



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



DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA

**APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO MONITORAMENTO DA
OPERAÇÃO DE DRESSAGEM**

**BAURU
2012**



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



DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA

**APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO MONITORAMENTO DA
OPERAÇÃO DE DRESSAGEM**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Titular Paulo Roberto de Aguiar

Bauru
2012

Moia, Daniela Fernanda Grizzo.
Aplicação de redes neurais artificiais no
monitoramento da operação de dressagem/ Daniela
Fernanda Grizzo Moia, 2012.

141 f.:il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

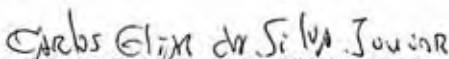
Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012.

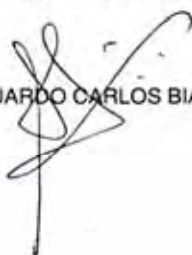
1. Retificação. 2. Dressagem. 3. Monitoramento. 4.
Emissão acústica. 5. Redes neurais artificiais. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de julho do ano de 2012, às 09:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, 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 - UNESP, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UFTPR, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA, intitulada "REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM". Após a exposição, a discente foi argüida 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. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DA ALUNA: DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA

DE: "REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM"

PARA:

Aplicação de Redes Neurais Artificiais no Monitorea-
mento da Operação de Dressagem.

Bauru, 06 de julho de 2012.


Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar
Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família pelo incentivo e apoio que sempre me deram, em especial ao meu marido, Carlos Eduardo de Santis Moia, pela paciência, companheirismo e amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis, iluminando meu caminho e me dando forças para seguir em frente. Sem Deus na minha vida, nada seria possível.

Ao meu marido, Carlos Eduardo de Santis Moia, pelo amor, carinho, companheirismo e compreensão.

A todos da minha família, que souberam entender e compreender a minha ausência quando em alguns momentos não pude estar presente, em decorrência dos meus estudos para realização desse trabalho. Em especial aos meus pais, José Luiz Grizzo e Aparecida de Fatima Godoy Grizzo, pelo amor e pelos ensinamentos que sempre me deram, me apoiando e incentivando em todas as etapas da minha vida. Aos meus irmãos Elen Cristiane Grizzo Izatto, Mario Henrique Grizzo e Braulio Roberto Grizzo.

Aos meus sobrinhos, Matheus Grizzo Izatto e João Pedro Moia Pullini, que Deus me presenteou, no decorrer da realização desse mestrado.

Ao Professor Titular, Paulo Roberto de Aguiar, pela incondicional orientação durante a realização e desenvolvimento desse trabalho, tendo paciência, capacidade, confiança, dedicação e sabedoria para me conduzir. Agradeço também pelos ensinamentos não somente técnicos, mas por me mostrar que é preciso sonhar e para que esses sonhos se tornem realidade é necessário e imprescindível a perseverança e dedicação.

Ao Professor Titular, Eduardo Carlos Bianchi pelo apoio, contribuições, sugestões e também pela dedicação, colocando-se sempre à disposição para esclarecimentos.

Ao Professor, Dr. Carlos Elias da Silva Junior, o qual aceitou o convite para participar da banca examinadora, desprovido de seus compromissos dando suas contribuições a esse trabalho.

Ao colega, Ícaro Henrique Thomazella, pela paciência e importantes contribuições, auxiliando de forma essencial para a realização desse trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Aquisição de dados, Flávio Ribeiro Rocha Chavaglia Filho, Frederico de Castro Neto, Hildo Guillard Junior, Marcelo Marchi, Maurício E. Nakai, Thiago M. Gerônimo, pela amizade, sugestões e apoio.

Ao colega Cesar Henrique Rossinoli Martins pela contribuição técnica, pela dedicação e amizade.

Aos meus amigos que direta ou indiretamente, longe ou perto, estiveram me acompanhando, tendo sempre palavras de ânimo e conforto.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e incentivo financeiro na realização desse trabalho.

RESUMO

O processo de retificação confere à peça o acabamento final, minimizando as irregularidades superficiais através de interações entre os grãos abrasivos de uma ferramenta (rebolo) e a peça retificada. O desgaste do rebolo devido ao atrito entre o rebolo e a peça retificada torna a ferramenta inadequada para nova utilização, sendo necessária a realização do processo de dressagem do rebolo para remoção e ou avivamento dos grãos gastos de sua superfície de corte, de forma a deixá-lo em condições para novo uso. O presente trabalho tem como objetivo classificar a condição do rebolo durante a operação de dressagem utilizando o sinal de emissão acústica (EA) e estatísticas derivadas desse sinal, por meio de redes neurais artificiais.

Nos experimentos realizados usou-se um rebolo de óxido de alumínio instalado em uma retificadora plana, um sistema de aquisição de sinais e um dressador de ponta única de diamante. O processamento digital de sinais foi obtido através do software MATLAB. Os ensaios foram realizados com diferentes graus de recobrimento e profundidade de dressagem. A partir dos dados obtidos de EA puro, calculou-se o valor médio quadrático (RMS), bem como mais duas estatísticas, as quais já foram empregadas com sucesso em trabalhos de detecção de queima, no processo de retificação. Essas estatísticas também se mostraram bons indicadores para o monitoramento da operação de dressagem. Uma rede neural perceptron multicamadas (MLP) foi utilizada com o algoritmo de aprendizado Levenberg-Marquardt, cujas entradas foram as duas estatísticas mencionadas e o valor RMS de EA. Os resultados mostram que o método empregado foi capaz de classificar as condições do rebolo no processo de dressagem, identificando o rebolo como “afiado” (com capacidade de corte) e rebolo “sem afiação” (com perda de capacidade de corte), viabilizando a redução do tempo e custo dessa operação e minimizando a remoção excessiva de material abrasivo do rebolo.

Palavras-Chave: Retificação, monitoramento, dressagem, emissão acústica, redes neurais.

ABSTRACT

The grinding process gives the piece a final finish by minimizing surface irregularities through interactions between the abrasive grains of a tool (wheel) and the part to be ground. The wear of the grinding wheel due to excessive friction between the grinding wheel and ground workpiece makes the tool unsuitable for further use; it is imperative the accomplishment of the process of dressing the grinding wheel to remove or resharpen the worn grains of its surface in order to make it suitable for use again. The present study aims to classify the condition of the grinding wheel during dressing operation using acoustic emission (AE) signal and statistics derived from this signal through artificial neural networks. In the experiments an aluminum oxide grinding wheel installed to a surface grinding machine was used along with a data acquisition system and a single point diamond dresser. The digital processing of these data was obtained using the MATLAB software. Tests were performed with different overlap ratio and depth of cut. The root mean square value of the AE signal as well as two other statistics were obtained from the raw acoustic emission signal, which have been successfully used in grinding burn detection. These statistics were also good indicators for monitoring the dressing operation. A multilayer perceptron neural network (MLP) was used with the learning algorithm Levenberg-Marquardt, whose inputs were the statistics previously mentioned and dressing conditions. The results show that the method used was able to classify the conditions of the grinding wheel in the process of dressing, identifying the wheel as sharp (cutting capacity) and dull (with loss of cutting capacity), enabling the reduction of time and cost of operation and minimizing the excessive removal of the wheel abrasive material.

Keywords: grinding, monitoring, dressing operation, acoustic emission, neural network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os seis elementos envolvidos na retificação plana, adaptado de (Marinescu <i>et al.</i> , 2007).....	7
Figura 2 - Influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Aguiar, <i>et al.</i> , 2002).....	10
Figura 3 - Componentes de força para retificação tangencial plana (Malkin, 1989)..	13
Figura 4 - Comprimento de contato (l_c) retificação Plana (MALKIN, 1989).....	15
Figura 5 - Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Stemmer, 2008).	22
Figura 6 - Três regiões de microfenômenos envolvidos no processo de formação de cavacos na retificação, (König e Klocke, <i>apud</i> Marinescu, 2007).	23
Figura 7 - Mecanismos de desgaste do rebolo: A – desgaste por atrito, B – fratura do grão abrasivo e C - fratura do ligante (Malkin & Guo, 2008).	25
Figura 8 - Representação esquemática do processo de dressagem, adaptado de Oliveira <i>et al.</i> (1992).	29
Figura 9 - Operação de dressagem e o grau de recobrimento, adaptado (Fiocchi <i>et al.</i> , 2011).	32
Figura 10 - Estatística MARSE sobre o sinal, adaptado de ndt-ed.org (2012).	45
Figura 11 - Modelo de neurônio biológico, adaptado de Negnevitsky (2005).....	46
Figura 12 - Modelo do neurônio artificial, Gonçalves (2009).	47
Figura 13 - Exemplo de RN Multicamadas. Dyminski (2000).	49
Figura 14 - Regra de parada antecipada baseada na validação cruzada, (Gonçalves, 2009).	50
Figura 15 - Operação de dressagem com o sensor de emissão acústica.	53
Figura 16 - Montagem esquemática do banco de ensaios.	55
Figura 17 - Método de medição da largura da ponta do dressador.....	55
Figura 18 - Esquema de medição da agressividade do rebolo.....	56
Figura 19 - Peça de aço queimada para a obtenção de um rebolo gasto e empastado	57
Figura 20 - Espectros do sinal de EA para três pontos escolhidos ao longo da passada.....	59

Figura 21 – Processo de obtenção da estatística RMS e vetores de médias para a estatística RMS.	61
Figura 22 - Estatística RMS, com 24 pontos, referente aos ensaios 01, 02 e 03.....	62
Figura 23 - Estatística RMS com interpolação, 2400 pontos, referente aos ensaios 01, 02 e 03	62
Figura 24 - Fluxograma adaptado do algoritmo de Cruz (2010).....	65
Figura 25 - Agressividade dos ensaios 01, 02 e 03.....	69
Figura 26 - Agressividade dos ensaios 04, 05 e 06.....	69
Figura 27 - Fotografia do rebolo empastado com poros entupidos, antes do início de cada ensaio.....	70
Figura 28 - EA_{RMS} referentes à 1ª passada do ensaio 01, remoção de 10 μm	71
Figura 29 - EA_{RMS} referentes à 12ª passada do ensaio 01, remoção de 120 μm	71
Figura 30 - EA_{RMS} referentes à 24ª passada do ensaio 01, remoção de 240 μm	72
Figura 31 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	73
Figura 32 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	73
Figura 33 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	73
Figura 34 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	74
Figura 35 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	74
Figura 36 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	75
Figura 37 - Valores médios da estatística RMS ao longo das passadas para os ensaios 01,02 e 03.....	76
Figura 38 - Valores médios da estatística MVD ao longo das passadas para os ensaios 01, 02 e 03.....	76
Figura 39 - Valores médios da estatística MARSE ao longo das passadas para os ensaios 01, 02 e 03.....	77
Figura 40 - Valores médios da estatística RMS ao longo das passadas para os ensaios 04, 05 e 06.....	78
Figura 41 - Valores médios da estatística MVD ao longo das passadas para os ensaios 04, 05 e 06.....	78
Figura 42 - Valores médios da estatística MARSE ao longo das passadas para os ensaios 04, 05 e 06.....	79
Figura 43 - Comportamento do sinal EA_{RMS} no rebolo (a) plenamente dressado (b) rebolo empastado, adaptado de (Chen & Rowe, 1996).....	80

Figura 44 - Matriz de confusão da repetição 1, arquitetura 1, do Grupo I de ensaios	83
Figura 45 - Matriz de confusão da repetição 3, arquitetura 1, do Grupo I de ensaios	83
Figura 46 - Matriz de confusão da repetição 1 e 3, arquitetura 1, do Grupo II de ensaios	86
Figura 47 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	99
Figura 48 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	99
Figura 49 - EA_{RMS} referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	99
Figura 50 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	100
Figura 51 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	100
Figura 52 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	100
Figura 53 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	101
Figura 54 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	101
Figura 55 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	101
Figura 56 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	102
Figura 57 EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	102
Figura 58 - EA_{RMS} referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	102
Figura 59 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	103
Figura 60 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	103
Figura 61 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	103
Figura 62 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	104
Figura 63 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	104
Figura 64 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	104
Figura 65 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	105
Figura 66 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	105
Figura 67 - EA_{RMS} referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	105
Figura 68 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	106
Figura 69 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	106
Figura 70 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	106
Figura 71 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm	107
Figura 72 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm	107
Figura 73 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm	107

Figura 74 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	108
Figura 75 - EA_{RMS} referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	108
Figura 76 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	108
Figura 77 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	109
Figura 78 - MVD referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	109
Figura 79 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	109
Figura 80 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	110
Figura 81 - MARSE referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	110
Figura 82 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	110
Figura 83 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	111
Figura 84 - EA_{RMS} referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	111
Figura 85 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	111
Figura 86 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	112
Figura 87 - MVD referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	112
Figura 88 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	112
Figura 89 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	113
Figura 90 - MARSE referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	113
Figura 91 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	113
Figura 92 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	114
Figura 93 - EA_{RMS} referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	114
Figura 94 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	114
Figura 95 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	115
Figura 96 - MVD referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	115
Figura 97 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	115
Figura 98 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 20 μm	116
Figura 99 - MARSE referente à 6ª passada, remoção de 120 μm	116
Figura 100 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 240 μm	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros usados no módulo de emissão acústica.	54
Tabela 2 - Os ensaios de dressagem realizados.	60
Tabela 3 – Arquiteturas das melhores RNs para o Grupo I.....	66
Tabela 4 - Arquiteturas das melhores RNs para o Grupo II.....	67
Tabela 5 - Valores de agressividade do rebole ao longo dos ensaios de dressagem (Início=antes do ensaio iniciar; Meio=no meio do ensaio; Fim=última passada do ensaio).....	68
Tabela 6 - Melhores arquiteturas neurais para os ensaios 01 e 02 (Grupo I).....	82
Tabela 7 - Melhores arquiteturas neurais para os ensaios 05 e 06 (Grupo II).....	85

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a: profundidade de corte	[mm]
a_d : profundidade de dressagem	[μm]
Al_2O_3 : Óxido de alumínio	
a_{sd} : área de dressagem	[mm ²]
b_d : largura de dressagem	[μm]
b_{dr} : largura real de atuação do dressador	[μm]
b_k : limiar de ativação (bias)	
b_s ou b: largura do rebolo/disco	[μm]
conf.: configuração da rede neural	
counts: contagem de cruzamento do sinal de EA	
DFT: Transformada Discreta de Fourier	
d_e : diâmetro equivalente do rebolo	[mm]
d_s : diâmetro externo do rebolo	[mm]
d_w : diâmetro da peça	[mm]
EA: emissão acústica	[V]
EA_{RMS} : sinal RMS de emissão acústica	[V*k]
F_n : força normal	[N]
F_T : força tangencial de corte	[N]
h_{eq} : espessura equivalente	[μm]
K: Agressividade da superfície de corte do rebolo	[mm ³ /N.s]
lc: comprimento de contato peça/rebolo	[mm]
k: constante de tempo RMS	
LM: algoritmo de <i>Levenberg-Marquadt</i>	
lr: taxa de aprendizagem	
MARSE: área medida abaixo do envelope retificado do sinal	
mse: <i>mean squared error</i> - média do somatório dos quadrados dos erros	
mu: momento	
MVD: desvio do valor médio (<i>mean-value deviance</i>)	
MSE: erro médio quadrático (mean square error)	
N: tamanho da população/amostra	
P: Potência de retificação	[W]

Qw: remoção específica do material	[mm ³]
r: raio do disco	
rp: raio de ponta do dressador	[μm]
RMS: valor médio quadrático (<i>root mean square</i>)	
rmse: raiz quadrada do erro médio quadrático	
RN: rede neural artificial	
S: desvio-padrão da amostra	
S _d : avanço do dressador por revolução do rebolo ou passo de dressagem	
U _d : grau de recobrimento de dressagem	
V _f : velocidade de avanço do rebolo	[mm/s]
V _k : saída do combinador linear	
V _s : velocidade periférica do rebolo; velocidade de corte	[m/s]
V _{sd} : velocidade de avanço de dressagem	[mm/s]
V _{fd} : velocidade de penetração de dressagem	[mm/s]
V _w : velocidade periférica da peça	[m/s]
w _n : pesos sinápticos	
W _t : ondulação teórica	
X _k : <i>K-ésimo- blocos de magnitudes</i>	
x _n : sinais de entrada do modelo de neurônio artificial	
y: saídas reais normalizadas	
~y: saídas normalizadas previstas pela rede	
y _k : saída do neurônio	
μ: média população/amostra	
σ: desvio-padrão da população	
φ: função de ativação	
μm: micrometro (1 μm = 10 ⁻³ milímetros)	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	4
1.2	JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DESTA PESQUISA.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO, COM ÊNFASE NA RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA	6
2.2	PARÂMETROS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	7
2.2.1	VELOCIDADE DE CORTE (V_s).....	8
2.2.2	VELOCIDADE DA PEÇA (V_w).....	8
2.2.3	A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA PEÇA	9
2.2.4	A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE.....	10
2.2.5	PROFUNDIDADE DE CORTE (a)	11
2.2.6	DIÂMETRO EQUIVALENTE DO REBOLO.....	11
2.2.7	ESPESSURA EQUIVALENTE DE CORTE	12
2.2.8	POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO	13
2.2.9	RUGOSIDADE.....	14
2.2.10	COMPRIMENTO DE CONTATO (l_c)	15
2.3	FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	16
2.3.1	PROPRIEDADES BÁSICAS DOS FLUIDOS DE CORTE	17
2.4	REBOLOS.....	17
2.5	MECANISMOS DE REMOÇÃO DE MATERIAL.....	22
2.5.1	TIPOS DE DESGASTE DO REBOLO	24
2.5.2	DETERMINAÇÃO DA TOPOGRAFIA DO REBOLO	25
2.6	A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM.....	26
2.6.1	DRESSADORES DE PONTA ÚNICA.....	30

2.6.2	TOPOGRAFIA DA DRESSAGEM	31
2.6.3	TAXA DE AVANÇO E GRAU DE RECOBRIMENTO (U_d)	31
2.6.4	PROFUNDIDADE DE DRESSAGEM (a_d).....	33
2.7	AGRESSIVIDADE DO REBOLO (K).....	34
2.8	MONITORAMENTO NOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	35
2.8.1	A IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO NOS PROCESSOS DE USINAGEM	37
2.8.2	EMISSÃO ACÚSTICA	39
2.8.3	SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA	40
2.9	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	45
2.9.1	PERCEPTRON DE MÚLTIPLAS CAMADAS	47
2.9.2	SISTEMAS INTELIGENTES USADOS NO MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE USINAGEM	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	BANCO DE ENSAIOS.....	53
3.2	ESTUDO DO ESPECTRO DO SINAL DE EA.....	58
3.3	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM.....	59
3.4	PROCESSAMENTO DIGITAL DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	60
3.5	PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DOS VETORES DE ENTRADA DAS REDES NEURAIS.....	61
3.6	DEFINIÇÃO DAS REGIÕES DE DRESSAGEM	63
3.7	ARQUITETURA DA REDE NEURAL PARA CLASSIFICAÇÃO	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	RESULTADOS DA AGRESSIVIDADE	68
4.2	RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DAS ESTATÍSTICAS RMS, MVD E MARSE AO LONGO DA PASSADA DE DRESSAGEM	71
4.3	RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS RMS, MVD E MARSE AO LONGO DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM	75

4.4	ARQUITETURAS NEURAIS SELECIONADAS E RESULTADOS	81
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A.....	99
	A.1 - SINAIS E_{ARMS} , MVD E MARSE DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS ...	99
	APÊNDICE B.....	117
	B.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS E ARQUITETURA DA RNA MLP – TESTES MANUAIS.....	117
	B.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS E ARQUITETURA DA RNA MLP – ALGORITMO OTIMIZADO	119

1 INTRODUÇÃO

Sendo uma das últimas etapas do processo de usinagem, a retificação necessita de uma grande precisão para um acabamento com um mínimo valor de defeitos possível, garantindo alta exatidão e qualidade. O comportamento de qualquer processo de retificação é muito dependente do desempenho da ferramenta. Esse desempenho pode mudar de maneira significativa durante o processo de retificação e isso dificulta a previsão a respeito do comportamento do processo durante seu andamento. (Gao et al., 2007). O rebolo, além de sofrer alterações durante o processo de retificação, pode perder suas condições ideais em seu próprio processo de fabricação.

Assim, os resultados da retificação estão diretamente relacionados com as condições topográficas da superfície de trabalho do rebolo. Estando essas condições alteradas, a operação de dressagem passa a ser fundamental no processo. Dressagem é o processo de condicionamento da superfície do rebolo visando sua remodelação quando o mesmo perdeu sua forma original pelo desgaste. (Xue et al., 2002). É a operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais, tendo como objetivo restaurar a eficiência de corte da ferramenta (Marinescu et al., 2007).

O processo de dressagem deve produzir uma topografia adequada da superfície de corte do rebolo. Essa topografia influencia na rugosidade e na camada superficial da peça por meio da quantidade e forma dos seus grãos abrasivos, do volume dos poros e do comportamento do desgaste da camada abrasiva (Malkin & Guo, 2008; Oliveira, 1989; Linke, 2008), na taxa de remoção de material, nas forças de retificação e na qualidade da peça (Wegener et al., 2011).

Para manter as características e funcionalidades do rebolo, é necessário que ocorra uma dressagem periódica. A dressagem produz uma superfície particular – dependendo do tipo e material do dressador – na superfície de corte do rebolo, onde cerca de 10% do rebolo é gasto no processo de usinagem e os demais 90% com a dressagem (Jackson et al., 2007).

O dressador de ponta única é o método mais utilizado na dressagem de rebolos (Salmon, 1992) e também a ferramenta de dressagem mais simples (Marinescu et al., 2007) de fácil aquisição e baixo custo.

A determinação do momento correto da dressagem é de fundamental importância, pois minimiza o tempo desta operação bem como evita a remoção excessiva de material do rebolo, e, portanto, reflete diretamente nos custos de produção. O número de passes de dressagem depende do grau de carregamento do rebolo, tamanho dos grãos e do grau de desgaste a ser removido. (Milton, 1996; Hassui, 2002). Em geral, os efeitos das condições de retificação e dressagem anteriores podem ser eliminados através de três (Milton, 1996) ou quatro passes sucessivos (Pattinson & Lyon, 1975). Erros de dressagem, no entanto, podem afetar diferentemente a qualidade da dressagem devido a flutuações da profundidade de dressagem real, desgaste do dressador e outros distúrbios. Essas condições indesejáveis podem ser detectadas por meio de um sistema online de monitoramento (Xue et al. , 2002).

A operação de condicionamento do rebolo é fortemente dependente da experiência e habilidade do operador (Kim & Ahn, 1999) e por isso um dos maiores obstáculos para se atingir a completa automatização do processo de usinagem dentro de sistemas integrados e flexíveis de manufatura é desenvolver o que pode ser chamado de usinagem não assistida pelo homem; isto é, um processo no qual o estabelecimento do momento de troca da ferramenta, a própria troca da ferramenta e a mudança das condições de corte não necessitem da intervenção do homem. Por isso, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle do processo, em tempo real, é de fundamental importância (Inasaki & Okamura, 1985; Racko, 1982).

A agressividade dos rebolos também é um fator importante, sendo responsável pela quantificação da capacidade de remoção de material, gerada pelo rebolo, estando diretamente ligada ao tamanho do grão, do tipo de ligante, da porosidade, entre outros (Webster, 2008).

Os sistemas de monitoramento utilizam-se principalmente de sensores de emissão acústica, pois esses se provaram superiores a outros tipos de sensores usados na retificação, devido a sua estabilidade à temperatura, alta sensibilidade e elevada dinâmica. A utilização da emissão acústica para o monitoramento de um processo, geralmente, tem um baixo custo e o sinal é de fácil captação apresentando também muita sensibilidade aos fenômenos que ocorrem no processo. Assim, diversos pesquisadores estão empregando esses sensores para o

monitoramento da operação de dressagem. Os principais usos são em detectar o contato dressador/rebolo, monitorar a profundidade de dressagem e diagnosticar falhas na dressagem (Konig & Meyen, 1990).

Para um monitoramento e controle da operação de usinagem é necessário conhecer o modelo matemático do processo, sendo este baseado na física das interações do sistema. Porém, devido à complexidade das interações presentes no processo dificilmente consegue-se obter modelos precisos. Assim, métodos de computação como rede neural artificial e algoritmos genéticos podem ser utilizados para modelar o processo, se baseando em dados coletados (Davim, 2008). Uma rede neural é um processador paralelo maciçamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso (Haykin, 2001).

As Redes Perceptron Multi-Camadas (MLP), treinadas com o algoritmo *backpropagation* consiste de um algoritmo elaborado para imitar o comportamento de um neurônio de McCulloch-Pitts com a finalidade de classificar padrões linearmente separáveis. A vantagem dessa abordagem está na capacidade de relacionar as saídas com as entradas, mesmo diante de dados imprecisos, faltantes ou incertos (Davim, 2008). De acordo com Wang et al. (2005), Kwak & Ha (2004), as redes neurais artificiais atraíram especial atenção dos pesquisadores da retificação por conterem funções de aprendizado, interpolação, reconhecimento e classificação de padrões, obtendo bons resultados nas suas aplicações.

Na manufatura, os sistemas inteligentes podem ser comparados a um operador qualificado, que emprega seu conhecimento para operar a máquina-ferramenta. Assim, esses sistemas necessitam de sensores com boa precisão e exatidão, baixo custo e implementação e ferramentas computacionais eficientes, desenvolvida através de algoritmos otimizados que possam reproduzir o processo de tomada de decisões do operador.

A operação de dressagem nas indústrias, atualmente, é realizada com base nas informações dos operadores, sendo realizada de forma empírica, não existindo, portanto, um método exato e geral que defina o momento correto no qual se deve parar a dressagem. A utilização de um sistema de monitoramento contribui com a otimização desse processo e, por isso, a importância da realização desse trabalho em monitorar a operação de dressagem de forma a classificar a condição do rebolo

durante essa operação, utilizando o sinal de emissão acústica e estatísticas derivadas desse sinal com técnicas de inteligência artificial.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo classificar a condição do rebolo durante a operação de dressagem utilizando o sinal de emissão acústica e estatísticas derivadas desse sinal, com a aplicação de redes neurais artificiais.

1.2 JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DESTA PESQUISA

Segundo Badger e Torrance (2000), os danos térmicos no processo de retificação podem ser extremamente reduzidos usando os parâmetros de operação e estratégias de dressagem corretos. A eficiência da operação de retificação é altamente dependente da superfície do rebolo (Oliveira *et al.*, 2000).

O processo de dressagem pode ser monitorado para produzir uma qualidade constante na superfície de corte do rebolo. A vida do rebolo pode ser definida pelo monitoramento de mudanças da amplitude e frequência características do sinal de emissão acústica (Inasaki, 1985).

As análises estatísticas utilizadas nesse trabalho foram empregadas, anteriormente, em trabalhos de detecção de queima no processo de retificação, desenvolvidos por Aguiar *et al.* (2002, 2005) e Dotto *et al.* (2006) como ferramentas de processamento digital de sinais e apresentaram-se como bons indicadores para o monitoramento do processo. Por esse motivo essas estatísticas foram empregadas no monitoramento da dressagem, e as mesmas também apresentaram bons resultados.

Considerando a importância do monitoramento da operação de dressagem e da necessidade crescente de automação do processo de retificação, o presente trabalho destina-se a realizar o monitoramento da operação de dressagem baseado no processamento digital dos sinais de emissão acústica (EA), para obtenção de dados de entrada para as redes neurais artificiais, com o intuito de classificar as condições de afiação do rebolo, minimizando o tempo de operação, evitando a

remoção excessiva de material (rebolo), atingindo assim, as características necessárias para a usinagem da peça.

Atualmente a operação de dressagem nas indústrias é realizada com base nas informações dos operadores, sendo realizada de forma empírica, não existindo, portanto, um método exato e geral que defina o momento correto no qual se deve parar a dressagem. A utilização de um sistema de monitoramento contribui com a otimização desse processo e, por isso, da importância desse trabalho, que fará uso do monitoramento para classificar a condição do rebolo durante a operação de dressagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura abordada, necessária para um melhor entendimento do assunto estudado. Neste capítulo serão abordados os seguintes temas: Fundamentos e parâmetros envolvidos no processo de retificação tangencial plana, a operação de dressagem e as variáveis envolvidas nesse processo, a importância do monitoramento nos processos de usinagem e redes neurais artificiais.

2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO, COM ÊNFASE NA RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA

Em um mundo industrial globalizado a redução dos custos de usinagem com garantia de qualidade das peças é constante e, praticamente, uma condição de sobrevivência de qualquer indústria (Irani *et al.*, 2005).

Segundo Aguiar *et al.* (2005, 2009), Dotto *et al.* (2006), (Oliveira, 2000), dentre os principais processos de manufatura podemos destacar a retificação. Trata-se de um processo de acabamento muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos de precisão. Entretanto, pode ser considerado como um processo de pouco domínio tecnológico se comparado aos processos convencionais de usinagem, além de ter a função de solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a sequência de fabricação. Isto ocorre porque este processo não é dependente apenas das máquinas e ferramentas, mas também da capacidade e habilidade da mão de obra que, na maioria das vezes, desconhece os inúmeros fatores envolvidos neste processo.

O processo de retificação é um processo de usinagem de precisão muito utilizado nas indústrias de fabricação e que, nas últimas décadas, obteve grande desenvolvimento tecnológico (Lima *et al.*, 2011), uma vez que é inaceitável perder uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase é elevado devido aos vários processos que antecedem a retificação (Soares, 2000).

A complexidade do processo de retificação é decorrente das dificuldades encontradas em relação ao elevado número de parâmetros nele envolvido (Vieira *apud* Catai *et al.*, 2010).

A operação de retificação utiliza como ferramenta um rebolo constituído por múltiplos grãos abrasivos, distribuídos aleatoriamente e unidos por um ligante (Silva Junior & Coelho, 1998).

A retificação é um dos processos abrasivos mais importantes na fabricação de precisão (Helletsberger, H. *apud* Odebrecht, O, 2003), a qual corresponde com cerca de 20 a 25% do total de despesas com operações de usinagem em países industrializados (Malkin & Guo, 2008). Ressalta-se que quase todos os produtos utilizados atualmente foram retificados em algum estágio de sua fabricação ou mesmo foram fabricados por este processo.

Segundo Diniz, Marcondes & Coppini (2010), o processo de retificação é empregado em operações de desbaste e semi-acabamento para posterior acabamento em processos como a lapidação e o polimento.

2.2 PARÂMETROS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

O processo de retificação é composto por seis elementos básicos: máquina-ferramenta, também conhecida como retificadora; ferramenta abrasiva, o rebolo; peça a ser retificada; fluido de corte; atmosfera, isto é, a interação dos gases ambiente com os elementos de retificação; e os resíduos provenientes da operação de retificação (Marinescu *et al.*, 2007).

A Figura 1 mostra todos os elementos básicos de uma retificação tangencial plana.

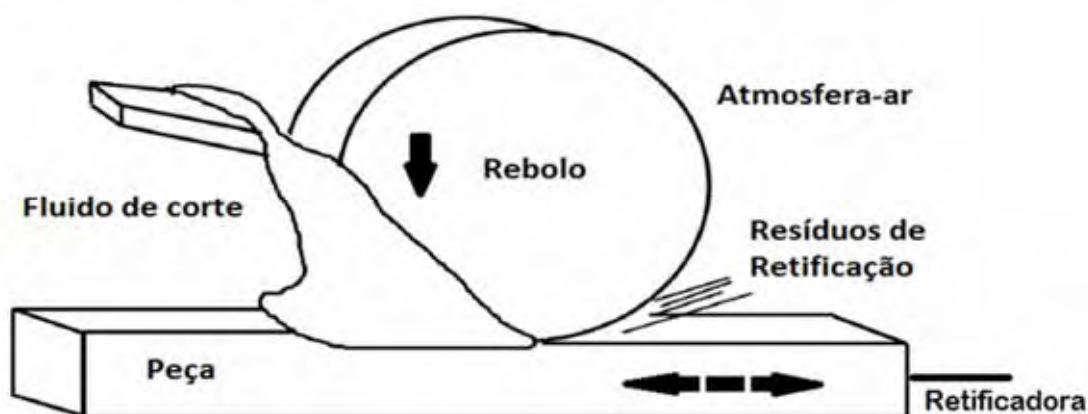


Figura 1 - Os seis elementos envolvidos na retificação plana, adaptado de (Marinescu *et al.*, 2007).

Os parâmetros de entrada típicos das máquinas retificadoras, que ocorrem na interação rebolo-peça são: taxa de avanço, velocidade do rebolo e da peça, profundidade de dressagem e tempo de centelhamento (*spark-out*) (King e Hahn, 1992).

A capacidade da superfície de corte (do rebolo), de remover material, chamada de agressividade do rebolo, também é uma variável importante no processo de retificação (Hellmeister, 2004).

2.2.1 VELOCIDADE DE CORTE (V_s)

A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo (V_s) é representada pelo deslocamento de um ponto (grão) na superfície de corte do rebolo certo espaço de tempo. Esta velocidade é extremamente importante no processo de retificação, pois determina a vida do rebolo, implicando na alteração da capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento superficial das peças (Webster, 1995). Este parâmetro é usualmente utilizado em metros por segundo (*m/s*) ou pés por minuto (*sfpm*), no sistema inglês (Marinescu *et al.*, 2007).

De acordo com Graf (2004), a velocidade de corte do rebolo V_s pode ser determinada em função do diâmetro externo do rebolo (d_s) e da rotação (n_s) do mesmo, conforme Equação 1:

$$V_s = \frac{\pi \times d_s \times n_s}{60 \times 1000} \quad (1)$$

2.2.2 VELOCIDADE DA PEÇA (V_w)

Na retificação plana, a velocidade da peça coincide com a velocidade da mesa, geralmente sendo expressa em metros por minuto (Destro *etal.*, 2011).

De acordo com Graf (2004), na retificação cilíndrica a velocidade da peça V_w pode ser determinada em função do diâmetro da peça (d_w) e da rotação (n_w) da mesma, conforme a Equação 2:

$$V_w = \frac{\pi \times d_w \times n_w}{60} \quad (2)$$

2.2.3 A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DA PEÇA

O aumento da velocidade da peça acarreta em uma elevação do volume de material removido, gerando cavacos de espessura maior e carga superior sobre cada grão abrasivo do rebolo, aumentando, conseqüentemente, os valores da força tangencial de corte (Graf, 2004).

A velocidade da peça V_w é coincidente com a velocidade da mesa da máquina retificadora. Esta velocidade está relacionada aos impactos que os grãos abrasivos provocam na peça.

Quando a velocidade da peça é baixa e a penetração é grande, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são pequenos e os cavacos são alongados. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são maiores. Assim, a força em um grão abrasivo é pequena e atua durante um tempo longo. Quando a velocidade da peça é alta e a penetração do rebolo é pequena, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são grandes e os cavacos são curtos. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são menores, gerando uma força por grão abrasivo grande e por pouco tempo (Bianchi *et al.* 1996).

Os grãos abrasivos tendem a permanecer mais tempo em contato com a peça, o que provoca um desgaste maior. As forças de corte (normal e tangencial) tendem a aumentar com o tempo de retificação e devido ao desgaste das arestas cortantes. Com isto, o desgaste do rebolo tende a ser menor, considerando-se que os grãos abrasivos permanecem mais tempo presos ao ligante, o que minimiza a perda de grão. Já quando os grãos tendem a se fraturar e a se desprender da superfície de corte do rebolo, as forças totais de corte tendem a uma estabilização pela troca constante de grãos abrasivos. O desgaste do rebolo tende a ser maior que no caso anterior. A Figura 2 apresenta a influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Bianchi *et al.*, 1996).

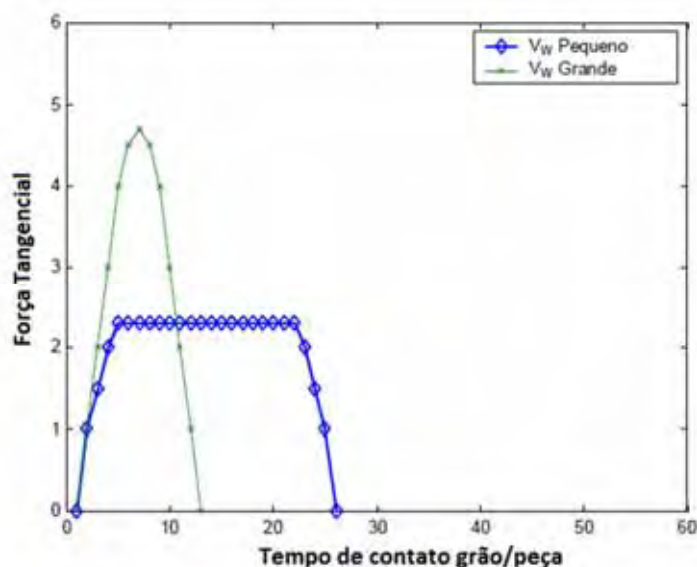


Figura 2 - Influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Aguiar, *et al.*, 2002).

2.2.4 A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE

De acordo com Klocke *et al.* (1997), pode se estabelecer que o aumento da velocidade de corte com todas as outras variáveis constantes, resulta em uma redução na espessura do cavaco e consequentemente na força de retificação. Isto pode ser utilizado para melhorar a qualidade da peça ou a taxa de remoção de material. O aumento na velocidade de corte, mantendo a taxa de remoção de material constante, resulta na redução das forças de retificação e do desgaste do rebolo, além de melhorar a precisão de forma e tamanho do componente retificado.

Segundo Hitchiner (2001a), o aumento da velocidade de corte acima de 100 m/s provoca a redução de temperatura da superfície da peça. Nestas velocidades, o tempo de contato do grão com a peça é tão pequeno que o processo térmico torna-se adiabático, já que o calor não tem tempo suficiente para se propagar em direção à peça antes de ser removido pelo cavaco. Com a redução da temperatura da peça, reduz – se a probabilidade do aparecimento de danos térmicos como a queima ou trincas.

De acordo com Bianchi *et al.* (1996) a velocidade de corte V_s exerce uma substancial influência sobre comportamento das forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima superficial da peça, vibrações da máquina, entre outros.

Quando a velocidade de corte V_s é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavaco devido ao aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, o número de grãos ativos é maior e a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo, pela menor sollicitação de cada grão. Em contrapartida, pelo aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, ocorre uma elevação da temperatura que pode ocasionar um dano térmico na peça.

2.2.5 PROFUNDIDADE DE CORTE (a)

A profundidade de corte é a penetração do rebolo na peça, a qual será a medida da espessura de material removido por revolução ou passagem da peça (Marinescu *et al.*, 2007).

A profundidade de corte é a grandeza que representa o quanto a ferramenta penetra em relação ao plano de trabalho (plano imaginário definido pelas direções de corte e de avanço), e é medida perpendicularmente à direção de avanço da peça ou rebolo. Este parâmetro é de grande interesse nas operações de fresamento e retificação plana (Diniz *et al.*, 2010).

Uma profundidade de corte elevada é responsável por ampliar a área de contato entre peça e ferramenta, aumentando, conseqüentemente, o número de grãos em contato com a superfície que está sendo usinada. Elevados valores de profundidade de corte implicam em acréscimo das forças de corte, as quais são responsáveis por causar deformações entre peça e ferramenta (König, 1980).

De acordo com Marinescu *et al.* (2004) a profundidade de corte também pode influenciar na integridade superficial dos componentes retificados.

2.2.6 DIÂMETRO EQUIVALENTE DO REBOLO

Segundo Oliveira (1989), e Marinescu *et al.* (2007) o diâmetro equivalente é o parâmetro criado por Hahn que representa o grau com que a superfície do rebolo e a peça se adaptam, ou se conformam. O cálculo do diâmetro equivalente de corte é mostrado na Equação 3:

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm d_s/d_w} \quad (3)$$

Os sinais (+) e (-) na equação, referem-se à retificação cilíndrica externa e interna respectivamente. Sendo $d_w = \infty$ para retificação plana (Marinescu *et al.*, 2007).

Ainda segundo o autor quanto maior o diâmetro equivalente, maior será o comprimento de contato ocasionando um aumento da força normal. À medida que o diâmetro da peça aumenta, a razão d_w/d_s deve ser reduzida gerando assim um valor menor de diâmetro equivalente.

2.2.7 ESPESSURA EQUIVALENTE DE CORTE

A espessura equivalente de corte (h_{eq}) representa a espessura da camada de material que é removida pelo rebolo, com a velocidade periférica deste, cujo volume específico equivale àquele retirado da peça naquele tempo de corte considerado. Este parâmetro permite quantificar uma condição de trabalho e pode ser definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material (Q_w) e a velocidade periférica do rebolo (V_s) (Malkin & Guo, 2008).

Dessa forma, um aumento na velocidade de corte, assumindo que todos os outros parâmetros de corte sejam mantidos constantes, conduz para a redução da espessura do cavaco não deformado. Com a diminuição da espessura do cavaco não deformado, algumas vantagens podem ser conseguidas, dentre elas, a redução das forças de retificação, menores taxas de desgaste do rebolo e menores valores de rugosidade (Jackson *et al.*, 2001).

A espessura equivalente de corte pode ser estabelecida ainda em função dos parâmetros de entrada: V_w (velocidade periférica da peça) e a (*profundidade de corte* - penetração do rebolo) (Malkin & Guo, 2008), como é mostrado na Equação 4.

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{V_s} = a \times \frac{V_w}{V_s} \quad (4)$$

A espessura equivalente de corte está diretamente relacionada ao comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas, tais como forças de corte, rugosidade, topografia da ferramenta, dentre outras (Malkin & Guo, 2008). O aumento do h_{eq} reflete no aumento das forças de corte e dos valores de rugosidade, e ainda na diminuição da vida do rebolo (Diniz *et al.* 2010).

2.2.8 POTÊNCIA DE RETIFICAÇÃO

A potência de corte ou de usinagem é obtida pelo produto da força tangencial e da velocidade de corte (Hellmeister, 2004).

As forças são desenvolvidas na interface rebolo-peça devido à ação do processo de retificação. Para operações de retificação plana, o vetor resultante da força total de retificação exercida pela peça sobre o rebolo pode ser decomposto em uma componente de força tangencial de corte (F_T) e uma componente de força normal (F_N), como é mostrado na Figura 3: (Malkin, 1989).

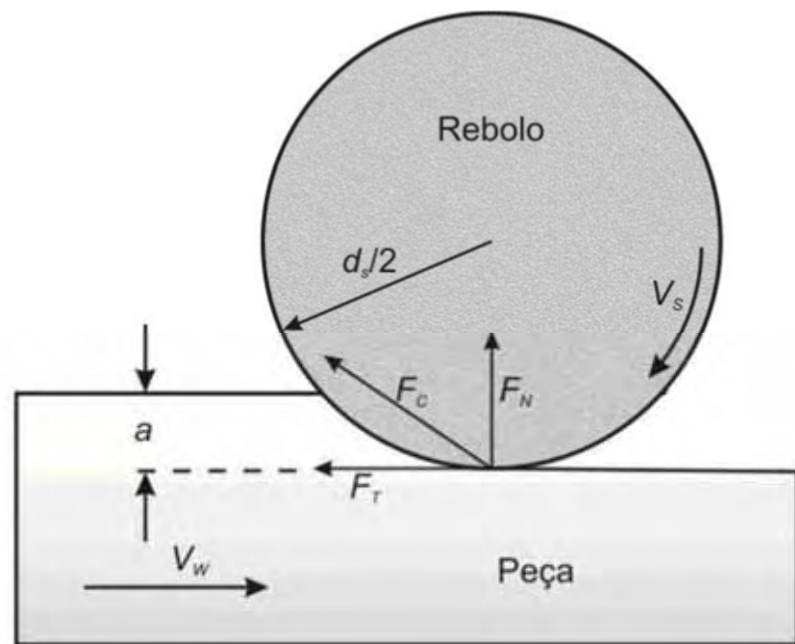


Figura 3 - Componentes de força para retificação tangencial plana (Malkin, 1989).

A potência de retificação (P) é apresentada pela Equação 5.

$$P = F_T (V_s \pm V_w) \quad (5)$$

O sinal positivo na equação é para retificação discordante (V_s e V_w tem direções opostas na região de corte) e o sinal negativo é utilizado para retificação concordante, com ambas as velocidades na mesma direção. Como V_w é, usualmente, muito menor que V_s , a potência de corte (P) pode ser escrita pela Equação 6.

$$P = F_T \times V_s \quad (6)$$

2.2.9 RUGOSIDADE

Na retificação a rugosidade obtida depende, de uma maneira complexa, da topografia inicial do rebolo gerada pela operação de dressagem; dos parâmetros de retificação, e interações tribológicas entre a peça e pontos de corte do abrasivo (Aguiar *et al.*, 2002).

A habilidade na operação de fabricação para produzir uma específica e desejada rugosidade depende de vários parâmetros. Os fatores que influenciam na rugosidade são uma mistura de parâmetros, ferramentas, propriedades dos materiais e condições de corte. Por exemplo, na retificação, o acabamento superficial depende consideravelmente da velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte, lubrificação de corte, vibrações, desgaste da ferramenta, e das propriedades mecânicas e outras propriedades do material que está sendo usinado. Pequenas mudanças em qualquer um desses fatores mencionados podem ter um significativo efeito no acabamento da superfície (Degarmo *et al.*, 2003).

Quando existe restrição de acabamento superficial, a taxa de remoção pode ser aumentada mantendo o mesmo acabamento, dressando o rebolo mais finamente. Dressagem mais fina pode causar maiores forças, as restrições de potência de retificação e danos térmicos não devem ser violadas. Superfícies mais lisas podem também ser obtidas usando rebolos de grãos mais finos, contudo este pode também conduzir a maiores forças ou maiores taxas de desgaste do rebolo (Malkin & Guo, 2008).

No que diz respeito ao comportamento da rugosidade em função do tempo de retificação, verifica-se que esta variável está diretamente relacionada com o crescimento da área plana do topo dos grãos abrasivos, que provoca sulcos mais

largos nas peças. Além disso, o aumento da área de contato do topo do grão causa uma elevação da temperatura local, fazendo com que o material da peça se torne mais mole, aderindo-se mais facilmente aos poros do rebolo. Desta forma, este material aglutinado à ferramenta abrasiva acaba gerando vários riscos na peça, aumentando assim os valores de rugosidade (Malkin & Guo, 2008).

2.2.10 COMPRIMENTO DE CONTATO (l_c)

O parâmetro que define a extensão de contato entre o rebolo e a peça durante a operação de retificação é denominado comprimento de contato (l_c). Este é um dos parâmetros mais utilizados e de grande importância na retificação, sendo que por meio dele o calor gerado é transmitido à peça (Marinescu *et al.*, 2007).

O comprimento de contato entre peça e o rebolo, é apresentado na Equação 7 (Malkin & Guo, 2008).

$$l_c = \sqrt{a \times d_e} \quad (7)$$

A Figura 4 apresenta o comprimento de contato:

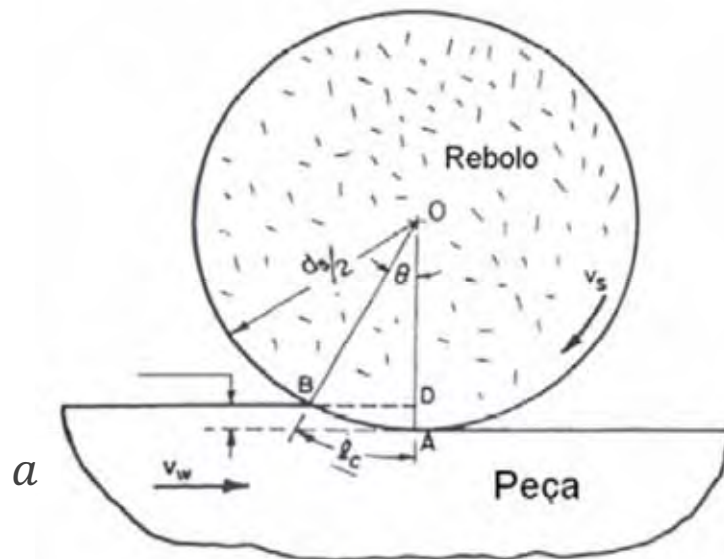


Figura 4 - Comprimento de contato (l_c) retificação Plana (MALKIN, 1989).

2.3 FLUIDOS DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

No processo de retificação o calor excessivo pode ser prejudicial, causando danos térmicos a peça, tais como: “queima”, transformações de fase, tensões residuais, trincas, entre outros. Falhas desta natureza implicam na funcionalidade desejada de projeto, por exemplo, reduzindo o limite de fadiga da peça. Além disso, o calor excessivo pode ser prejudicial ao rebolo, degradando os grãos ou mesmo o ligante, comprometendo o processo de retificação como um todo. Para evitar esses efeitos indesejáveis, utilizam-se a aplicação de fluidos de corte na região de corte (Liao *et al.*, 2000).

Segundo Dutta *et al.* (2008), os fluidos de corte são aplicados na forma de inundações, jato ou neblina, que são as práticas mais comuns para redução da temperatura da zona de corte. Assim, suas funções básicas são de resfriar a peça, retirar os cavacos formados e lubrificar a região de corte.

Todos os processos de retificação trabalham com fluido de corte. A seleção do fluido aplicado no processo é crucial para alcançar condições favoráveis de lubrificação e, o tipo, o óleo base, e a concentração do fluido são importantes para se garantir a eficiência da lubrificação. Os requerimentos básicos para selecionar um fluido são a boa lubrificação, a boa refrigeração e a alta resistência de gerar corrosão no material (Marinescu *et al.*, 2007).

Outros aspectos que devem ser levados em consideração na escolha do fluido são o econômico, a eficiência de operação, a estabilidade de operação (grande vida útil) e a proteção ambiental. É imperativo que os fluidos de corte garantam a saúde do homem, não causem danos ao meio ambiente e, por final, devem ser confiáveis durante a operação (Marinescu *et al.*, 2007).

Refrigerantes e lubrificantes são usados na zona de retificação de modo a reduzir o desgaste da máquina. Os fluidos de corte promovem ambos os benefícios, tanto à refrigeração quanto à lubrificação (Cambiella *et al.* 2007). Segundo Sokovic & Mijanovic (2001) a escolha correta de um fluido de corte pode aumentar a produtividade e reduzir os custos de fabricação, possibilitando o incremento de velocidades de corte e taxas de remoção (avanços) mais elevadas. Além disso, a aplicação correta de fluido é responsável por aumentar a vida da ferramenta, reduzir

a rugosidade, aumentar a precisão dimensional e, também, diminuir a quantidade de energia consumida durante o processo.

2.3.1 *PROPRIEDADES BÁSICAS DOS FLUIDOS DE CORTE*

De acordo com Webster & Ciu (1995), o estudo do emprego de fluidos em processos de usinagem por abrasão está se tornando cada vez mais importante devido às maiores taxas de remoção de material e rebolos cada vez mais resistentes ao desgaste. As funções de um fluido de corte no processo de retificação são: lubrificar, refrigerar, transportar cavacos, limpar o rebolo e, em alguns casos, minimizar a corrosão na máquina ferramenta.

Essas características trazem grande influência na temperatura do processo, na estrutura superficial e no desgaste da ferramenta (Tawakoli, 2007).

2.4 REBOLOS

O rebolo é a ferramenta de revolução utilizada nos processos de retificação. Caracteriza-se por possuir grãos abrasivos ligados por uma matriz ligante formando uma camada ou um corpo abrasivo. Esses grãos formam arestas de corte de geometria indefinida e são responsáveis pela remoção de material. Pode-se defini-lo como um sistema trifásico, formado por grãos abrasivos, aglomerante e poros. Assim, seu desempenho está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material ligante e ainda à porosidade do conjunto (Malkin & Guo, 2008).

Para formar o rebolo os grãos são reunidos através de aglomerante. Uma característica importante do aglomerante é ser poroso para que o cavaco possa se alojar até ser retirado pelo fluido refrigerante. Os aglomerantes utilizados são vidro, resina orgânica, borracha e metal.

Os três principais abrasivos convencionais são: Óxido de alumínio, alumina com zircônia e carboneto de silício (Malkin & Guo, 2008).

A principal propriedade que diferencia um grão superabrasivo (rebolos de CBN – (nitreto cúbico de boro) e diamante) de um abrasivo convencional é sua dureza. A dureza de um grão relativa à dureza do material a ser retificado é um fator

determinante na capacidade do rebolo de remover tal material (King & Hahn, 1992). Outras propriedades importantes são: resistência ao impacto, afinidade química e estabilidade térmica.

Em rebolos superabrasivos as ligas vitrificadas estão se consolidando rapidamente, principalmente nos rebolos de CBN. A grande vantagem da liga vitrificada sobre todas as outras consiste na facilidade de se obter estruturas porosas que permitem maior rapidez de corte, remoção de cavaco e melhor desempenho de refrigeração.

São necessárias cinco características para que se defina o tipo de rebolo, elas são: tipo de abrasivo, ligante, dureza dos grãos, granulometria e estrutura (Stemmer, 1992).

2.4.1.1 GRANULOMETRIA

Segundo Stemmer (2008), classificam-se os grãos pela norma americana ANSI Standard B74. 12-1977 *“Specification for Size of Abrasive Grain”*, a qual determina o tamanho do grão em *mesh*, isto é, determina a quantidade de furos por polegada linear da peneira na qual os grãos ficam retidos durante o processo de seleção.

A classificação do tamanho de grão é feita pelo método do peneiramento, sendo designado pelo número que corresponde à divisão linear da área de uma polegada quadrada. Dessa forma, quanto mais fino for o grão, maior é seu número na escala da granulometria (Malkin & Guo, 2008).

O tamanho do grão influencia bastante na taxa de remoção e no acabamento do material. A escolha do tamanho do grão a utilizar está associada ao que se pretende no processo. Os grãos classificados muito grossos e grossos são usados para operações de desbaste, de rebarbação, e para obras grosseiras em geral. Rebolos de grãos grossos são usados em geral para usinagem de materiais moles, dúcteis ou fibrosos, como os aços moles ou alumínio e também quando se deseja rápida remoção de material (Diniz *et al.*, 2010). Grãos mais grossos permitem maior remoção de material enquanto os mais finos produzem melhor acabamento (Malkin & Guo, 2008).

2.4.1.2 LIGANTE

O ligante ou aglutinante tem a função de manter o grão ancorado no rebolo até que este esteja cego ou perca a capacidade de corte em decorrência do processo de usinagem. Segundo Stemmer (1992), o ligante deve satisfazer três exigências: deve ser suficientemente resistente; deve formar pontes entre grãos com seções transversais suficientemente grandes para suportar os esforços de corte entre o grão abrasivo e o ligante, e deve existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão. Os ligantes dividem-se em dois tipos: vitrificados (composta de materiais cerâmicos, é rígida e quebradiça) e resinóides (elaborado com resinas sintéticas, é mais flexível e conseqüentemente de maior resistência que o anterior).

O ligante vitrificado é a liga mais comum para operação de retificação de precisão por apresentar maior eficiência, propiciar melhor acabamento superficial e maior vida. Não resiste a grandes impactos ou pressões, não é afetado pela água, óleos ou ácidos, trabalha normalmente com velocidade periférica de 33 m/s (Diniz *et al.*, 2010).

O ligante resinoide é composto por resinas orgânicas. É uma liga de elevada resistência e resiliência. Os rebolos com ligante resinóide, geralmente tem a ação de retificação mais macia e fácil com relação aos outros ligantes. Dependendo da construção, os rebolos podem operar até a velocidade de 100 m/s (Diniz *et al.* 1999). Estes rebolos removem material rapidamente e têm as seguintes características: (Bianchi *et al.*, 1999).

- podem ser utilizados em um grande número de aplicações
- estão disponíveis em um grande número de formas e tamanhos
- podem ser utilizados em retificação seca ou refrigerada
- possuem boas qualidades de corte

2.4.1.3 DUREZA

A dureza de um rebolo está relacionada à dificuldade de remoção dos grãos abrasivos de sua superfície, ou ainda, à dificuldade de proporcionar o rompimento entre o grão e o material aglomerante. Define-se como sendo a resistência do rebolo

ao arrancamento das partículas abrasivas, ou seja, à resistência à tração do ligante (Malkin & Guo, 2008).

Esta dureza é diretamente dependente das propriedades mecânicas do material aglomerante, pois se este possuir elevada resistência mecânica, e reduzirá a possibilidade de ruptura dos grãos abrasivos, devido a uma satisfatória acomodação dos impactos sofridos pelo rebolo. Além disso, uma elevada resistência ao desgaste do material aglomerante dificulta a remoção de grãos inteiros, pois desta forma a ancoragem dos grãos se mantém estável durante toda a vida do rebolo. Deste modo, observa-se que as características do material aglomerante são fundamentais para determinar a dureza dos rebolos (King & Hahn, 1992).

Rebolos denominados moles sofrem auto-afiação durante o processo de usinagem. Isto ocorre devido à perda dos grãos “cegos”, e consequente quebra de outros, gerando assim, novas arestas cortantes (King & Hahn, 1992).

O rebolo é considerado duro quando ele oferece uma grande resistência aos esforços de retificação que tendem a retirar os grãos do rebolo. Quando os grãos se desprendem com facilidade, o rebolo é considerado mole. Portanto, os rebolos duros retêm as partículas abrasivas mais firmemente do que os moles ou macios. Os rebolos são classificados de acordo com a dureza em muito mole, mole, médio, duro e muito duro. A classificação por diversos grãos depende das normas do fabricante. A Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15230:2008, segue a seguinte classificação: (ABNT, 2012)

E – F – G: Rebolos muito moles

H – I – J – K: Rebolos moles

L – M – N – O: Rebolos de dureza média

P – Q – R: Rebolos duros

S – T – U – V: Rebolos muito duros

2.4.1.4 ESTRUTURA

A estrutura indica a concentração volumétrica de grãos abrasivos no rebolo é o modo de se dispor os grãos. O espaçamento entre os grãos pode ser maior ou menor deixando a estrutura mais ou menos compacta. Quanto mais compacta, ou seja, mais fechado for o rebolo, mais duro ele será. Entende-se por rebolo com

estrutura fechada, um rebolo com bastante grãos abrasivos e aberto com poucos grãos abrasivos. Em geral uma estrutura mais aberta dá um acabamento grosseiro, mas os cavacos têm melhor saída e há menos aquecimento no processo, pois rebolos com estrutura aberta oferecem mais espaços para alojamentos do cavaco reduzindo a tendência ao entupimento de porosidades (Diniz et al., 2010).

A estrutura do cristal de um grão abrasivo afeta o modo do desgaste do grão. O grão abrasivo monocristalino tende a se desgastar mais consistentemente que uma partícula abrasiva que pode ter vários cristais fundidos juntos. Grãos abrasivos apresentam enormes variações em sua microestrutura (King & Hahn, 1992).

De acordo com King & Hahn (1992) uma porosidade ideal é aquela capaz de estar suficientemente aberta para permitir a remoção do cavaco e a introdução do fluido de corte na região de corte, mas também suficientemente fechada para garantir um número mínimo de grãos abrasivos atuando na remoção do material.

A codificação dos rebolos é padronizada, há uma codificação para os rebolos de óxido de alumínio e carboneto de silício e outra para os rebolos de diamante e nitreto cúbico de boro.

A Figura 5 mostra a identificação de um rebolo convencional.

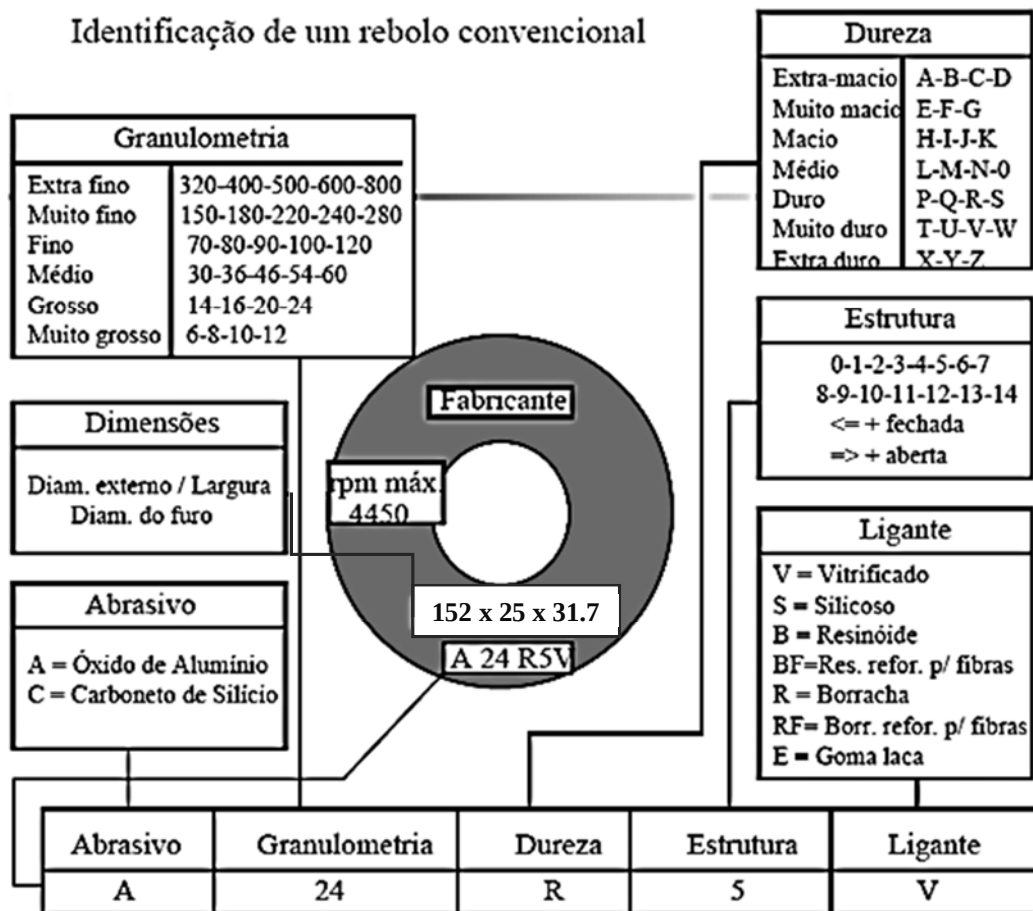


Figura 5 - Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Stemmer, 2008).

2.5 MECANISMOS DE REMOÇÃO DE MATERIAL

Malkin (1989) e Liao *et al.* (2000) citam que a remoção de material durante a operação de retificação se dá por meio da interação do rebolo com a peça, formando cavacos por cisalhamento. O método de remoção ocorre por cisalhamento após comparar os cavacos obtidos na retificação com cavacos de outros processos de usinagem, atingindo-se uma semelhança microscópica bastante grande.

Malkin (1989) e Marinescu *et al.* (2007), afirmaram que a energia específica envolvida no processo de retificação é muito maior do que nos outros processos de usinagem, principalmente quando se trabalha com baixos índices de h_{eq} . Isto ocorre pelo fato de que apenas uma parcela da energia é empregada no processo de

remoção de cavaco, sendo que a grande porcentagem restante é envolvida em outros mecanismos, como por exemplo, no atrito existente entre as regiões planas dos grãos e a peça e na deformação plástica da peça antes da formação do cavaco.

Partindo deste princípio, Malkin (1989) e Marinescu *et al.* (2007) dividiram o processo de remoção de cavaco em três regiões, mostradas na Figura 6.

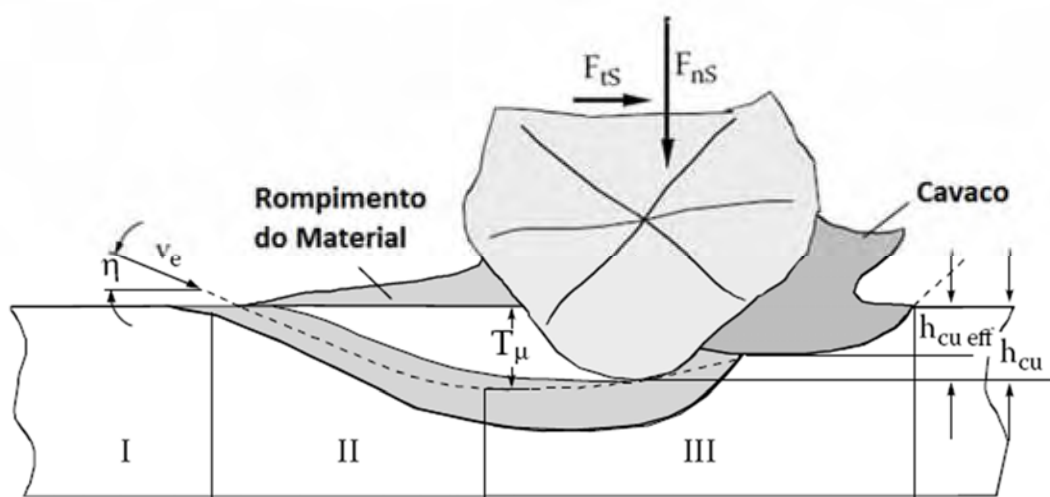


Figura 6 - Três regiões de microfenômenos envolvidos no processo de formação de cavacos na retificação, (König e Klocke, *apud* Marinescu, 2007).

Região 1: primeiro contato entre grão abrasivo e peça. Nesta etapa ocorre apenas a deformação elástica do material da peça, sendo que toda a energia fornecida ao processo é consumida pelo atrito, calor e deformações.

Região 2: etapa em que os grãos abrasivos continuam penetrando na peça, proporcionando deformações plásticas, escoamento lateral e recuperação das deformações elásticas ocorridas no estágio anterior. A maior penetração dos grãos implica em maiores forças de atrito entre peça e rebolo e desta forma, grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor.

Região 3: um valor de penetração crítico é atingido pelo grão abrasivo nesta fase, que por consequência gera uma pressão também crítica (P_c). Esta pressão é definida como sendo a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material. Neste instante inicia-se a formação de cavaco e grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material.

Depois de formado, o cavaco é removido da região de corte, sendo posteriormente expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga ou pela ação de

limpeza exercida pelo fluido de corte na superfície de trabalho do rebolo. Quando os cavacos não são eficientemente removidos dos poros do rebolo, tem-se perda da capacidade de corte da ferramenta, aumento do atrito e por consequência, incremento da temperatura na região de corte e também nos valores de rugosidade superficial da peça.

2.5.1 TIPOS DE DESGASTE DO REBOLO

Segundo Jackson & Mills (2004) e Tawakoli *et al.* (2007), existem quatro distintos mecanismos de desgaste dos rebolos: desgaste abrasivo (formação de áreas planas e alisadas que aumentam a área de contato do grão com a peça), fratura das pontes ligantes, fratura dos grãos devido ao impacto de carga mecânica ou pela variação térmica e fratura na interface entre o grão abrasivo e a ponte ligante. A causa pode variar de acordo com os parâmetros de retificação, tipo da peça, ou mesmo tipo do fluido refrigerante.

Ainda de acordo com Tawakoli *et al.* (2007), as causas do desgaste do abrasivo podem também ocorrer por ataque químico de componentes do fluido de corte, por danos térmicos do processo abrasivo ou por desgaste mecânico de fricção (atrito), resultando na quebra do ligante, ou na fratura do grão.

De acordo com Fathima *et al.* (2003), o desgaste do rebolo é um processo complexo, o qual envolve a existência de vários eventos que provocam desgaste entre vários grãos e a peça. O desgaste por atrito tem uma contribuição menor em relação à redução do volume do rebolo, mas a vida do rebolo é determinada baseada nesse desgaste por atrito. O desgaste por atrito reduz a nitidez e a altura de saliência do grão (afiação), indicando o final da vida do rebolo.

O desgaste total do rebolo aumenta com o tempo de corte. Ele pode ser dividido em uma diminuição de raio e em desgaste de quina do rebolo. Se o desgaste radial não é compensado durante a retificação por um sistema de medição adequado, pode-se ter um erro de medida ou eventualmente surgir vibrações na superfície da peça (Malkin, 1989).

O desgaste por atrito envolve a perda da afiação dos grãos abrasivos e crescimento das áreas planas no rebolo devido ao atrito com a peça. A fratura do grão abrasivo provoca a remoção de fragmentos, enquanto a fratura do ligante

ocorre por desalojamento do grão abrasivo inteiro devido aos esforços de corte. O outro tipo de desgaste é a erosão do ligante, que reduz a ancoragem dos grãos abrasivos e facilita a remoção destes (Malkin & Guo, 2008).

O rebolo ao longo de sua utilização sofre desgaste, perdendo sua agressividade, diminuindo a taxa de remoção de material e proporcionando acabamentos grosseiros (Oliveira, 1989). Outro efeito da perda da capacidade de corte são os danos térmicos. Praticamente toda energia do corte é transformada em calor. Danos térmicos podem ser produzidos pelas elevadas temperaturas, queima superficial e transformações microestruturais (Malkin & Guo, 2008).

O desgaste do rebolo é mostrado na Figura 7.

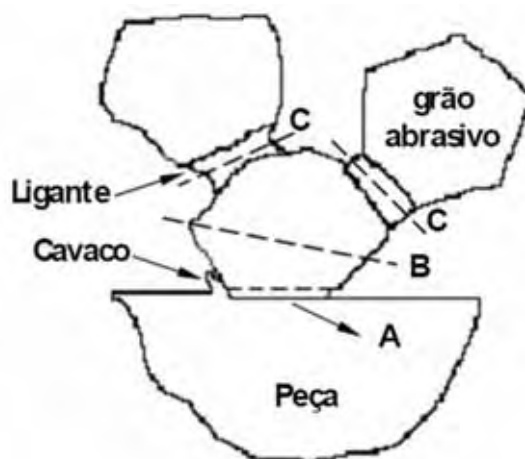


Figura 7 - Mecanismos de desgaste do rebolo: A – desgaste por atrito, B – fratura do grão abrasivo e C - fratura do ligante (Malkin & Guo, 2008).

2.5.2 DETERMINAÇÃO DA TOPOGRAFIA DO REBOLO

O atrito e os elevados esforços existentes na interface peça/ferramenta causam desgaste das ferramentas de corte. No caso de um rebolo, tem-se uma modificação considerável de sua topografia, prejudicando a capacidade de remoção de material. É então necessário recondicionar o rebolo para retomar a operação de forma eficiente, recompondo a sua geometria (Malkin & Guo, 2008).

Para tal, faz-se necessário uma operação de dressagem do rebolo. Conforme Marinescu *et al.* (2004), a operação de dressagem tem como objetivo restaurar a eficiência de corte da ferramenta. O desempenho de um processo de retificação é

definido significativamente pelo condicionamento das ferramentas abrasivas (Linke, 2008).

Segundo Derkx *et al.* (2008), várias pesquisas relacionadas à qualidade e economia de operações de retificação de alta precisão estão ligadas ao condicionamento de rebolos. Mudanças na topografia do reboło podem ajudar a explicar os efeitos dos parâmetros no desempenho da retificação (Cai & Rowe, 2004).

2.6 A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM

No processo de retificação, durante a usinagem da peça, o desgaste do reboło devido ao excessivo atrito entre o reboło e a peça retificada torna a ferramenta inadequada para nova utilização, sendo imprescindível a realização do processo de dressagem do reboło para remoção e/ou avivamento dos grãos gastos de sua superfície de forma a deixá-lo em condições para novo uso.

Segundo a literatura, quando se trata de retificação, é comum encontrar diferentes nomenclaturas relacionadas à operação de dressagem, dependendo do autor e da região, como, por exemplo, perfilamento ("*truing*"); avivamento ("*conditioning*"); e dressagem ("*dressing*"). No entanto, o senso geral converge para as definições a seguir.

Nos rebolos superabrasivos o perfilamento é a operação empregada com a finalidade de obter-se uma concentricidade entre a face de trabalho e o eixo de rotação do reboło e, caso seja necessário, gerar um perfil específico. Por esse motivo, a designação perfilamento. Simultaneamente, tem a capacidade de remover qualquer partícula estranha ancorada na face de corte do reboło e substituir a camada de abrasivo desgastada por uma nova (König, 1980; Oliveira 1989; Malkin, 1989; Marinescu *et al.*, 2007). Avivamento é uma operação mais específica, dirigida à remoção do ligante nas vizinhanças das partículas abrasivas, dando maior exposição aos grãos. (König, 1980; Oliveira 1989; Malkin, 1989; Marinescu *et al.*, 2007).

Nos rebolos convencionais a dressagem é tida como uma operação mais completa, que pode incluir o perfilamento e/ou avivamento, cujo objetivo é alcançar o

melhor desempenho na retificação (König, 1980; Oliveira 1989; Malkin, 1989; Marinescu *et al.*, 2007).

O desempenho da operação de dressagem depende principalmente da forma com que o rebolo é preparado. O processo de dressagem deve produzir uma topografia adequada para o rebolo além do perfil desejado. A topografia do rebolo influencia a rugosidade e a camada superficial da peça por meio da quantidade e forma das arestas de corte, do volume dos poros e do comportamento do desgaste da camada abrasiva. O processo de dressagem deve promover um processo de retificação tão consistente quanto possível, levando-se em conta o desgaste do rebolo (Linke, 2008).

A operação de dressagem consiste em deslocar o dressador transversalmente ao rebolo em movimento de rotação, dando lugar a uma nova camada de grãos abrasivos (Crichigno, 1994; Sanchez *et al.* 1999; Oliveira *et al.*, 2002). A penetração do dressador a uma determinada profundidade de dressagem implica em uma largura de atuação de dressagem, e este valor pode ser determinado medindo-se a ponta do dressador com um projetor de perfis, por exemplo (Oliveira *et al.*, 2002).

Segundo Oliveira (1989), Silva Junior & Coelho (1998), Marinelli *et al.* (1998), Bianchi *et al.* (1994) a operação de dressagem tem como principais finalidades realizar o perfilamento da face de trabalho para uma operação de forma; o arrancamento dos grãos abrasivos gastos para restabelecer a agressividade do rebolo e também remover as partículas da peça, presas na superfície do rebolo, pela restauração da camada de corte.

A capacidade de corte também pode ser prejudicada por partículas da peça presas na face do rebolo, essas partículas aderem de tal forma que o fluido de corte não consegue remover (Cruz, 2009).

A vida do rebolo, o tempo de ciclo de retificação e a qualidade final da peça são os itens mais afetados pela operação de dressagem (Marinelli *et al.*, 1998).

Através da dressagem pode-se alterar o grau de afiação e consequentemente a contribuição de cada região para o gasto total de energia na remoção de cavacos. Uma operação de dressagem corretamente realizada deve proporcionar uma menor densidade de grãos ativos com arestas mais pontiagudas. A menor densidade de

grãos ativos diminuem as perdas com atrito e riscamento levando a uma força de retificação menor (Coelho, 1991).

A definição do momento correto de dressagem do rebolo é fundamental no processo de retificação. Isso pode ser feito de maneira conservadora, ou seja, antes do fim da vida do rebolo. Desta forma, ocorrerá uma remoção excessiva do material abrasivo (rebolo) e principalmente, um aumento do tempo de processo, pelo maior número de dressagens realizadas (Hassui, 2002).

Klocke & König (1995) definiram a operação de condicionamento como a geração de um estado no rebolo que atenda os requisitos do processo de retificação. O termo condicionamento engloba vários processos de preparo do rebolo. Por isso, é necessária uma distinção básica para entender todas as etapas, e assim o processo é dividido em três principais etapas: Perfilamento (“*Truing*”), avivamento e limpeza. Os dois primeiros processos constituem o que é chamado dressagem.

Nos rebolos convencionais, as operações de perfilamento e afiação são frequentemente simultâneas, sendo então considerados ambos um processo de dressagem. Já para os rebolos superabrasivos, a correção da geometria e a preparação da superfície do mesmo, são realizadas através do perfilamento e do avivamento dos grãos (Farago, Pukaite, *apud* Bianchi *et al.* 2011).

De acordo com Sena (2007), Marinescu *et al.* (2007), a operação de dressagem pode ser definida como uma operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais no processo de retificação. A influência das condições de dressagem na retificação, em sua totalidade, é ainda pouco conhecida, pois a geometria do dressador é um fator de grande influência que frequentemente não é levado em conta. A maioria dos trabalhos encontrados na bibliografia utiliza como variáveis do processo, a profundidade de dressagem, largura de dressagem, largura do rebolo, e o passo de dressagem.

Wegener *et al.* (2011) relata a importância da operação de dressagem em realizar a preparação da ferramenta de corte (rebolo) no processo de retificação. A preparação do rebolo influencia na taxa de remoção de material, nas forças de retificação, na qualidade da peça. Os autores também explicam os tipos de dressagem, o macro e micro efeito, os principais parâmetros e variáveis envolvidas nessa operação.

Segundo Hassui *apud* Bianchi *et al.* (2011), são dois os efeitos resultantes da operação de dressagem: o macroefeito e o microefeito. O macroefeito é formado em função do formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo de dressagem em que é realizada a operação. Esse fenômeno determina a posição na qual as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas. Pode-se dizer que o macroefeito (ondulação teórica, W_t) é a rosca que o dressador produz na face do rebolo. O microefeito é formado pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, onde novas arestas de corte são geradas pelo dressador. A agressividade das arestas depende das condições de dressagem e da friabilidade (capacidade em formar novas arestas de corte quando fraturado) do grão abrasivo. O fenômeno do microefeito está, portanto, relacionado com o tipo de aresta que é formada nos grãos abrasivos durante a operação de dressagem, podendo variar a agressividade do rebolo.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa o esquema do processo de dressagem.

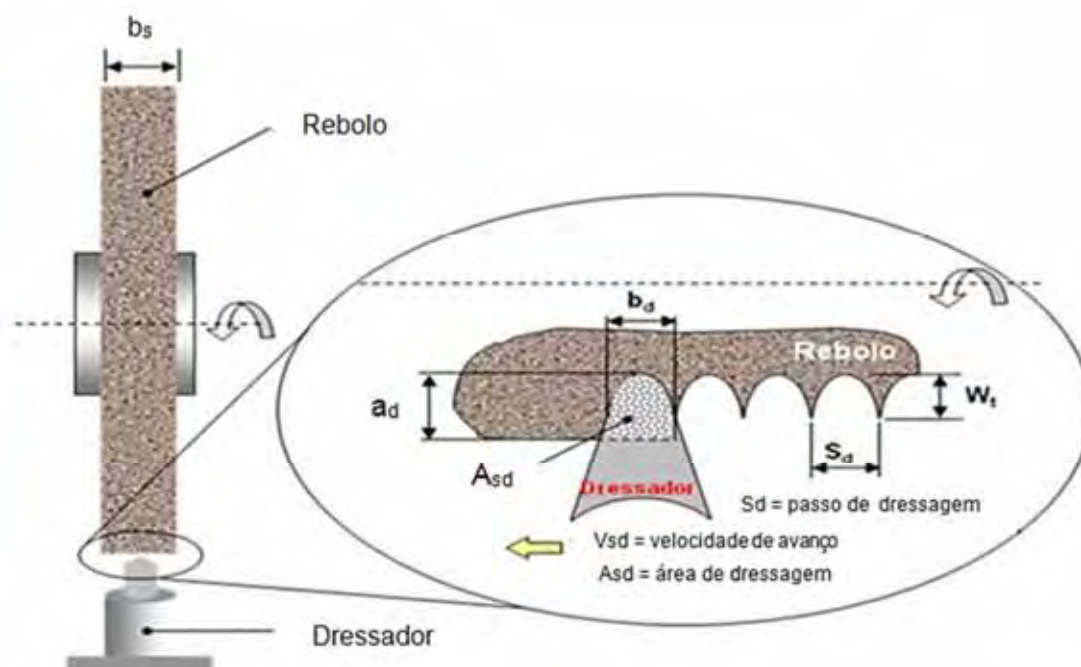


Figura 8 - Representação esquemática do processo de dressagem, adaptado de Oliveira *et al.* (1992).

O grande problema nas operações de condicionamento de rebolos está em encontrar um método para determinar a frequência necessária de interrupção da retificação para a dressagem para obter o máximo rendimento do reboło, pois, a operação de condicionamento é fortemente dependente da experiência e habilidade do operador (Kim & Ahn, 1999).

Por ser um elemento transformador da topografia da ferramenta, o procedimento de dressagem deve ser muito bem conhecido para que se tenha um maior controle sobre o desempenho do reboło (Oliveira *et al.*, 2002).

As principais variáveis envolvidas no processo de dressagem são: a profundidade de dressagem (a_d), largura de dressagem (b_d), largura do reboło (b_s), o passo de dressagem (S_d), que são caracterizadas pelo grau de recobrimento (U_d) (Aguiar *et al.*, 2009).

As operações adicionais de dressagem aumentam o custo da ferramenta, o qual pode ser altíssimo para rebolos superabrasivos. Então, uma caracterização da superfície do reboło durante o processo pode gerar informações importantes para aumentar a eficiência de um sistema de controle (Oliveira *et al.*, 2002).

2.6.1 DRESSADORES DE PONTA ÚNICA

A aplicação mais frequentemente utilizada, principalmente por apresentar menor custo, na dressagem de rebolos de corte reto ou perfilado é o dressador de ponta única. O dressador de ponta única é constituído de um diamante natural geralmente na forma octaedro soldado em uma haste. Segundo Minke (1999), o tamanho do diamante, ou seja, seu peso é especificado conforme as dimensões da ferramenta abrasiva (diâmetro e largura do reboło de corte).

Devido à pequena área de contato da ponta do diamante com o reboło, pouca força aplicada já faz reagir o sistema de dressagem. Por isso, o dressador de ponta única é empregado principalmente no processo de componentes que necessitam de retificação interna, sensíveis à vibração do eixo do reboło. Utilizado também na dressagem de perfis complexos, nos quais a dimensão do diamante tem que ser determinado em função da dimensão do reboło, conforme recomendações fornecidas por Minke (1999).

Stemmer *apud* Catai *et al.* (2010), este tipo de dressagem é bem convencional e muito utilizado. Quando é utilizada ponta única de diamante para a dressagem, exigem-se:

- ✓ diamantes suficientemente grandes, sendo que quanto mais pesada à tarefa maiores deverão ser os diamantes;
- ✓ giro frequente da ponta em torno do seu eixo longitudinal para evitar a geração de superfícies achatadas;
- ✓ posicionamento correto da ponta de diamante durante o processo de dressagem;
- ✓ evitar impactos do diamante contra o rebolo.

2.6.2 TOPOGRAFIA DA DRESSAGEM

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 determina uma largura de atuação de dressagem, e este valor pode ser determinado medindo-se a ponta do dressador com um projetor de perfis, por exemplo, (Oliveira *et al.*, 2002).

2.6.3 TAXA DE AVANÇO E GRAU DE RECOBRIMENTO (U_d)

A forma de afiação que usualmente é utilizada, ou seja, ajustando-se o avanço do dressador em função do seu tipo, é inadequada, pois não leva em conta a largura de atuação deste no instante da operação. Tal largura varia ainda devido ao desgaste da ponta do dressador durante várias operações de dressagem. König *apud* Aguiar *et al.* (2002) definiu o parâmetro denominado por grau de recobrimento (U_d) como sendo a relação entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o passo de dressagem (S_d), conforme a Equação 8:

$$U_d = b_d / S_d \quad (8)$$

A

Figura 9 - Operação de dressagem e o grau de recobrimento, adaptado (Fiocchi *et al.*, 2011).

A Figura 9 apresenta a operação de dressagem, a área de dressagem (A_{sd}), o raio de ponta do dressador (r_p), a largura real de atuação do dressador (b_{dr}), a ondulação teórica (W_t) e o grau de recobrimento.

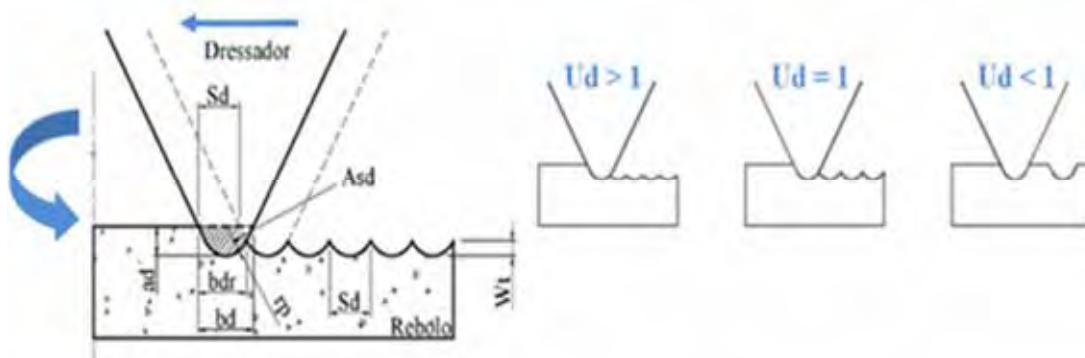


Figura 9 - Operação de dressagem e o grau de recobrimento, adaptado (Fiocchi et al., 2011).

De um modo geral, observa-se que a dressagem executada com valores de U_d próximos a 1 (S_d igual à b_d) produz máxima taxa de remoção, enquanto U_d entre 4 e 5 dá ao processo de retificação melhor acabamento superficial. Dessa forma, percebe-se que com um mesmo rebolo é possível executar as operações de desbaste e acabamento bastando, para isso, mudar o valor do U_d antes de iniciar cada tipo de operação (Oliveira, 1989).

A maior agressividade é obtida quando o rebolo é dressado com $U_d=1$ (Bianchi et al. 2011). Para valores altos de U_d o grau de transferência da ponta do dressador para a face do rebolo é baixo, quase não existindo macroefeito, produzindo pouca agressividade. Para os valores de U_d entre 0,8 e 3 uma situação inversa ocorre, a transferência do perfil do dressador para a face do rebolo é grande surgindo o macroefeito (Coelho, 1991).

As condições de dressagem influenciam diretamente na taxa de remoção de material, e interfere também na rugosidade da peça produzida. Em dressagens grossas, onde o grau de recobrimento é pequeno e o número de arestas atuantes é reduzido, é provocado um aumento na profundidade dos sulcos que, consequentemente, provoca valores mais elevados na rugosidade. Na dressagem fina, com valores maiores de grau de recobrimento, um número significativamente maior de arestas atuantes divide os esforços e cada grão abrasivo penetra menos na peça, reduzindo assim os valores de rugosidade (Oliveira, 1988).

König *apud* Coelho (1991) utilizou diversos tipos de dressadores estáticos e vários valores de U_d (valores entre 3 e 12), e observou que quando U_d diminui, a força de retificação também diminui e a rugosidade aumenta. Os resultados foram bastante consistentes também para todos os tipos de dressadores empregados. Particularmente este último resultado consagra a variável criada, U_d , como um parâmetro capaz de caracterizar a dressagem.

Já no trabalho realizado por Oliveira *et al.* (1992), foi usado também o parâmetro U_d para caracterizar a dressagem, mas utilizando-se os valores de U_d entre 1 e 5 com dressador de ponta única de diamante. Para valores de grau de recobrimento U_d próximos de 1, o volume de material removido é máximo, o que conduz uma vida maior para o rebolo. Conforme U_d diminui, a rugosidade aumenta, porém para U_d próximo de 1, embora a rugosidade seja a maior atingida pelo rebolo, seu valor permanece praticamente constante no decorrer da vida do rebolo (Oliveira *et al.*, 1992).

Com o aumento da profundidade de dressagem, aumenta o microefeito da mesma forma que a área de choque entre o grão e a ponta do dressador (Coelho, 1991).

2.6.4 PROFUNDIDADE DE DRESSAGEM (a_d)

O grau de recobrimento próximo de 1 produz um valor de agressividade (capacidade de remoção do material) máximo para uma dada profundidade de dressagem. Com maiores profundidades de dressagem a agressividade pode ser aumentada, aumentando-se ainda mais a capacidade de remoção de material da operação de retificação (Coelho, 1991).

No processo de retificação, a capacidade de remoção de material cresce com o aumento da profundidade de dressagem. Este aumento da profundidade, no entanto, não é indefinido. Há um valor de profundidade a partir do qual o aumento de agressividade não é mais significativo. Este valor é chamado profundidade limite de dressagem (Coelho, 1991). A escolha da profundidade, do passo de dressagem e do grau de recobrimento, deve também ser realizada para atingir a máxima vida útil do rebolo, mantendo uma rugosidade uniforme e dentro da especificação (Oliveira *et al.*, 1992).

Oliveira et al. (1992) estabeleceram o momento de dressagem da ferramenta abrasiva como o fim da vida da face de trabalho do rebolo, quando os grãos abrasivos estão excessivamente gastos e o rebolo incapaz de remover material adequadamente. Silva Junior & Coelho (1998) afirmaram que um rebolo gasto pode produzir calor elevado devido ao atrito e às vibrações, prejudicando a resistência e a integridade superficial da peça. A dressagem deve ser realizada no momento mais próximo do ponto ideal visto que:

- ✓ Se a dressagem for executada após o ponto de reafiação, podem-se produzir peças com queima superficial, trincas, rugosidade fora da especificada, etc.;
- ✓ Se a dressagem for executada antes do ponto de reafiação, tem-se uma perda de tempo e de rebolo, aumentando o custo do produto final.

O procedimento de dressagem provoca uma modificação na topografia dos rebolos, e, portanto, deve ser conhecido para que se tenha um maior controle sobre o desempenho da operação de retificação (Silva Junior & Coelho, 1998).

2.7 AGRESSIVIDADE DO REBOLO (K)

O desgaste das arestas e da superfície de corte do rebolo é causado por fatores mecânicos e físico-químicos. Este desgaste está diretamente relacionado à usinabilidade do material, propriedade ligada à vida útil do rebolo. A escolha adequada das condições de retificação e das especificações do rebolo podem otimizar a vida útil da ferramenta, proporcionando maior capacidade de remoção de material. A quantificação da capacidade de remoção de material, gerada pelo rebolo, é denominada agressividade superficial de corte (Bianchi *et al.* 2011).

Ainda segundo Bianchi *et al.* (2011) agressividade de um determinado rebolo está diretamente relacionada ao tipo de ligante que constitui a ferramenta, compreendendo os principais ligantes disponíveis no mercado, o resinóide convencional, vitrificado, convencional e resinoide de alto desempenho. Tais ligantes apresentam características próprias que influem nos resultados de agressividade.

Os resultados obtidos por König (1980) mostraram que quanto menor o grau de recobrimento (sendo o valor mínimo igual a um), maior a agressividade do rebolo, fato que prejudica a qualidade superficial da peça, mas favorece a remoção de

grandes quantidades de material. De acordo com Marinelli et al. (1998) a agressividade do rebolo é proporcional ao aumento da profundidade de dressagem (a_d) e ao grau de recobrimento (U_d).

A agressividade dos rebolos está diretamente ligada ao tamanho do grão, do tipo de ligante, da porosidade, entre outros. A porosidade apresentada pela ferramenta, a qual expressa à quantidade de núcleos vazios (poros) relaciona-se também à granulometria, que expressa à quantidade de grãos abrasivos encontrados em uma determinada área de superfície do rebolo, cabendo ressaltar, que maiores granulometrias ocasionam menores porosidades e consequentemente apresentam agressividade menor (Webster, 2008).

Coelho (1991) relaciona o deslocamento do disco (δ) em função do tempo (t), através da Equação 9:

$$\delta(t) = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{K.F_n}{b\sqrt{8r}} \cdot t \right)^{2/3} + \frac{2.\delta_0^{3/2}.b\sqrt{8r}}{K.F_n} \quad (9)$$

Onde:

K = Agressividade

F_n = Força normal de retificação

b = largura do disco

r = raio do disco

2.8 MONITORAMENTO NOS PROCESSOS DE USINAGEM

A necessidade do monitoramento em um processo de usinagem inclui o monitoramento da máquina e da dinâmica do processo da ferramenta de corte e da peça, a fim de se obter o melhor desempenho do sistema (Byrne *apud* Silva, 2011).

De acordo com Silva (2010); Silva et al., (2011), os sistemas de monitoramento podem ter o papel de substituir funções delegadas ao ser humano e seus sentidos, minimizando a necessidade de paradas e decisões tomadas de forma subjetiva. O monitoramento de um processo consiste em utilizar parâmetros que podem ser extraídos durante a operação de forma a fornecerem respostas

adequadas ao objetivo que se quer alcançar como, por exemplo, determinar a condição de desgaste de uma ferramenta de corte.

De acordo com Wang et al. (2001), emissão acústica (EA) é geralmente entendida como a liberação de ondas oscilatórias emitidas por um material reagindo a um esforço aplicado. As emissões acústicas geradas durante o processo de retificação e outros processos de usinagem tem sido relacionadas com o estado do processo e condição da superfície da ferramenta e da peça. A tecnologia de EA tem avançado significativamente e tem sido amplamente investigada como um método de teste não destrutivo para o monitoramento de processos de usinagem.

Xue (2004) confirmou através de uma série de experimentos que o sensor de emissão acústica é um mecanismo eficiente no monitoramento da dressagem tanto quanto para o processo de retificação, além de ajudar na obtenção de uma superfície topograficamente uniforme do rebolo. Embora tenha havido muito estudo sobre dressagem e sua influência nas variáveis de saída do processo de retificação, a maioria dos trabalhos analisa este ponto de forma qualitativa. Xue (2004) afirmou que são necessárias novas investigações para esclarecer o processo de geração do sinal EA na dressagem.

O processo de dressagem pode ser monitorado para produzir uma qualidade constante na superfície do rebolo. A vida do rebolo pode ser definida pelo monitoramento de mudanças da amplitude e da frequência característicos do sinal de emissão acústica (Inasaki, 1985).

Silva *et al.* (2011) desenvolveram em seu trabalho uma metodologia para o monitoramento do desgaste da ferramentas de corte durante o fresamento, utilizando rede neural artificial e os sinais de potência de corte e emissão acústica. Os parâmetros estatísticos que possuíam correlação com o desgaste da ferramenta foram utilizados para o treinamento e validação da rede neural artificial. Os resultados mostraram que o *skewness* do sinal de EA puro (banda de frequências 50-500 kHz), o nível RMS extraído dos espectros de potência de EA (banda de frequências 100-230 kHz), e a potência efetiva de corte média têm correlação com o desgaste. A utilização desses parâmetros como valores de entrada em uma RNA proporcionou excelentes respostas à rede, ao tentar prever se a ferramenta está ou não em condições de uso.

Liao (2009) extraiu e analisou as características do sinal de emissão acústica coletado durante a operação de retificação, e as condições do rebolo foram monitoradas. Os sinais foram extraídos pela Transformada Discreta Wavelet. Quatro algoritmos diferentes foram desenvolvidos para problemas de classificação. Valores empiricamente foram testados e apresentaram eficácia para problemas de classificação.

Pinto *et al.* (2011), realizaram em sua pesquisa o monitoramento através do sinal de emissão acústica, baseado na detecção de fontes de sinais acústicos que são emitidos durante a propagação de descontinuidades e deformações plásticas acentuadas. O trabalho desenvolveu classificadores não lineares, tendo como entrada os parâmetros dos sinais de EA capazes de discriminar o crescimento dos defeitos de fratura em duto rígido em três classes de sinais: Sem Propagação, Propagação Estável e Propagação Instável. A discriminação entre as classes foi feita por classificadores de padrões não-lineares usando redes neurais artificiais *feedforwards* treinadas pelo algoritmo *backpropagation*. Os resultados apresentaram acurácia de classificação de 86% para situação de três classes de sinais, provando que houve uma evolução significativa nos estudos com o intuito de separar o momento de propagação estável do instável. Realizou-se também estudo de relevância de parâmetros dos sinais de EA.

2.8.1 A IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO NOS PROCESSOS DE USINAGEM

Um dos grandes obstáculos para se obter automação de processos de usinagem em sistemas de manufatura flexível e integrada é o desenvolvimento do que pode ser chamado de usinagem não-assistida pelo homem. Isto significa ter um processo sem intervenção humana capaz de estabelecer o momento para a troca da ferramenta, fazer a própria troca da ferramenta e realizar mudanças nas condições de corte visando à sua otimização. Assim, o desenvolvimento de um sistema de monitoração e controle em tempo real é de fundamental importância. (Aguiar *et al.*, 2002, 2006, 2009).

Vieira Junior & Oliveira (2000) relataram que durante a operação de dressagem o sinal de EA captado é bastante sensível para detectar tanto a ruptura

do ligante como o instante em que ocorre contato entre o dressador e a superfície de trabalho do rebolo. Ainda, de acordo com os autores, o sinal de EA captado tende a crescer quando se aumenta a dureza do rebolo e a velocidade de corte. Em geral, menores graus de recobrimento tornam a superfície do rebolo mais grosseira, produzindo uma superfície da peça mais áspera, enquanto superfícies do rebolo mais finas (com maiores graus de recobrimento), aumentam a área de contato entre a peça e o rebolo, resultando em aumento da força de retificação e também do nível de sinal RMS da emissão acústica.

A técnica de EA pode ser usada para uma série de finalidades, além da eliminação da queima de peças, tais como: detecção da colisão do rebolo com a peça; excesso ou insuficiência de sobremetal; detecção de contato rebolo/peça; deformações estruturais térmicas; desgaste do rebolo; avaliação de dureza do rebolo; tempo de spark-out inadequado; a condição de dressagem para obter a profundidade de dressagem ótima; verificação da dressagem; detecção do mau funcionamento dos processos de usinagem, como cavaco enroscando, vibração auto excitada ou mesmo a condição do desgaste da ferramenta, etc. (Felipe Junior, 1996; Felipe Junior & Oliveira, 1998; Inasaki, 1999; Soares *et al.*, 2000; Vieira Junior & Oliveira, 2000).

A determinação do momento correto da dressagem é de fundamental importância, pois minimiza o tempo desta operação bem como evita a remoção excessiva de material do rebolo, e, portanto, reflete diretamente nos custos de produção. O número de passes de dressagem depende do grau de carregamento do rebolo, tamanho dos grãos e do grau de desgaste a ser removido. Em geral, os efeitos das condições de retificação e dressagem anteriores podem ser eliminados através de três ou quatro passes sucessivos. Erros de dressagem, no entanto, podem afetar diferentemente a qualidade da dressagem devido a flutuações da profundidade de dressagem real, desgaste do dressador e outros distúrbios. Essas condições indesejáveis podem ser detectadas por meio de um sistema online de monitoramento (Xue *et al. apud* Aguiar *et al.*, 2009).

Dornfeld & Cai (1984) fizeram uma investigação do processo de retificação através da análise da emissão acústica, para medir o desgaste relacionado ao “empastamento” do rebolo e o *sparkout* (perda de contato – tempo de centelhamento) entre o rebolo e a superfície da peça retificada. A emissão acústica

gerada durante o processo de retificação foi analisada com o intuito de determinar a sua sensibilidade para processar a eficiência e a condição do rebolo. A investigação realizada mostrou que a energia de emissão acústica aumenta com os efeitos combinados de desgaste do rebolo e do empastamento.

Segundo Donfeld & Cai (1984), Malkin & Anderson (1974), em geral, a energia específica de corte na retificação aumenta conforme a espessura equivalente de corte aumenta. Uma vez que a emissão acústica é uma função do volume (para velocidade constante e propriedades do material) e área do contato grão, os pesquisadores demonstraram que a energia da emissão acústica aumenta com o carregamento (empastamento) do rebolo e é proporcional à profundidade de corte.

Segundo Malkin (1989) os processos ativos durante a retificação nos quais o consumo de energia pode ser atribuído são: formação de cavaco, sulcamento (*plowing*) e deslizamento (*sliding*). Por causa da aleatoriedade da geometria do grão, supõem-se que todos esses processos estão ativos durante a retificação. Com o aumento do desgaste e empastamento do rebolo, o consumo de energia aumenta devido as componentes de sulcamento e deslizamento, e, assim, aumentam as forças de retificação com o desgaste. A energia de cisalhamento por deformação na zona de cisalhamento e a energia de atrito que acompanha o deslizamento ao longo da interface cavaco-grão são responsáveis pela energia de formação do cavaco.

Ainda, Segundo Dornfeld & Cai (1984), mostraram que os níveis de EA aumentam conforme as forças tangenciais do desgaste ocorrem. Na relação entre EA e as forças de retificação para o rebolo dressado e desgastado verificou-se que as forças de retificação apresentaram um crescimento rápido, durante os primeiros 10 minutos, e depois apresentaram um aumento gradual, tendendo à estabilização. Isso ocorre em função do tamanho e da distribuição das partículas no rebolo, medidas durante o processo de retificação.

2.8.2 EMISSÃO ACÚSTICA

A técnica de emissão acústica consiste em avaliar sinais acústicos coletados através de sensores piezelétricos instalados na superfície ao redor do equipamento em funcionamento. Estes sinais são ondas mecânicas de natureza transitória que se

propagam através do meio isolante e estrutura interna até atingir a superfície externa do equipamento ensaiado. Estas ondas podem ser geradas por fenômenos mecânicos, descargas parciais, arco elétricos, etc. Além de identificar defeitos elétricos, também podem ser identificados defeitos mecânicos (Zaghetto, 2009).

Emissão acústica é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos devido ao rearranjo da estrutura interna do material (Willians, 1968). Quando ocorre uma deformação no material (modificado por corte, atrito, trinca entre outras) ocorre um desarranjo da estrutura do material que tende a rearranjá-los. Esses rearranjos geram ondas vibracionais que deslocam a velocidade do som, daí o nome de emissão acústica. Estes sinais são captados por meio de um sensor que transformam os sinais mecânicos em sinais elétricos.

Segundo Li (2002), emissão acústica é uma onda de som ou, mais propriamente, uma onda de tensão que viaja por meio do material como resultado de alguma repentina liberação de energia.

Os sinais de emissão acústica classificam-se em dois tipos: o sinal contínuo e o sinal de pico ou transiente (Souto, 2007; Blum e Inasaki, 1990; Matsumoto e Diniz, 1997). O sinal transiente, segundo Souto (2007), é caracterizado por um pico de grande amplitude, mas de pequena duração, enquanto que o sinal contínuo tem amplitude relativamente menor, mas com uma longa duração. Na usinagem, o sinal contínuo se caracteriza pelas deformações plásticas de materiais dúcteis, enquanto que o sinal transiente é característico da propagação de trincas e impactos de cavaco.

2.8.3 SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA

Geralmente, algum fenômeno físico dentro ou na superfície de uma estrutura causa uma grande variação transitória do estado de tensão da estrutura naquele ponto. Como consequência, ondas de tensão se propagam pela estrutura, causando deslocamentos transitórios. Assim, um sensor acústico acoplado na estrutura pode monitorar essas ondas de tensão e produzir um sinal elétrico que, por fim, é usado para monitorar, e, possivelmente, controlar o processo que gera o sinal acústico. O monitoramento na usinagem de materiais é baseado fortemente no sensoriamento, e

permite diminuir a intervenção do operador e substituir algumas das funções do homem na produção de bens manufaturados (Felipe Jr. 1996).

Existem vários tipos de sensores para diversos tipos de aplicações. Normalmente os sensores utilizados para a captação do sinal de EA são do tipo piezelétricos, contudo, existem outros tipos de sensores. O sensor piezelétrico, segue um princípio de funcionamento simples, convertendo uma variável de processo medida em uma variação de tensão elétrica. Esse fenômeno ocorre em certos materiais quando sob estado de tensão mecânica (Silva, 2010). Este tipo de sensor foi utilizado nesse trabalho.

Segundo Silva (2010); Silva *et al.* (2011), sensores piezelétricos são utilizados para medir emissão acústica, força ou aceleração. São construídos por uma pastilha de cerâmica piezelétrica montada em uma cápsula metálica. A utilização da emissão acústica para o monitoramento de um processo geralmente tem um baixo custo, o sinal é de fácil captação e muito sensível aos fenômenos que ocorrem no processo.

As ondas de EA propagam-se no material com determinadas frequências, contudo, não há um consenso sobre qual seria a faixa, e, portanto, os valores variam de autor para autor. Apesar disso, independente de qual é o valor exato da faixa de frequência de propagação do sinal de EA, o importante é ressaltar que seus valores estão acima de ruídos presentes nos ambientes comuns e de manufatura. Essa característica é muito importante, afinal não é interessante que sinais externos interfiram naquele que se deseja medir, o que pode impedir a análise com qualidade e resultados satisfatórios (Dolinsek e Kopac, 1999; Inasaki, 1998 Li, 2003; Lee *et al.*, 2006; Pigari, 1995).

Os sensores de emissão acústica tem provado serem superiores a outros sensores no processo de retificação, tais como os sensores de força e de corrente. Além disso, o custo do sensor de emissão acústica é muito menor e mais fácil de posicioná-lo no processo (Xue *et al.*, 2002).

Xue *et al.* (2002) confirmaram, através de uma série de experimentos, que o sensor de emissão acústica é um mecanismo eficiente no monitoramento da dressagem tanto quanto para o processo de retificação, além de ajudar na obtenção de uma superfície topograficamente uniforme do rebolo.

Sensores de emissão acústica têm sido utilizados na detecção de contato entre o rebolo e dressador (Karpuschewski & Inasaki, 2000), no monitoramento da

profundidade de dressagem (Inasaki, 1985), monitoramento da ponta do dressador (Inasaki, 1985) e no diagnóstico de falhas na dressagem (Karpuschewski & Inasaki, 2000; Kwak & Ha, 2004; Lee *et al.*, 2006).

2.8.3.1 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT)

Segundo Lyons (1997), a transformada discreta de Fourier (DFT) é uma das ferramentas mais poderosas e comum encontrada na área de processamento digital de sinais. Ela proporciona a análise, manipulação e síntese de sinais de uma maneira que não seria possível com processamento de sinais contínuos. A DFT é um procedimento matemático usado para determinar o conteúdo harmônico ou de frequência de um sinal discreto no tempo.

A Equação 10 representa a transformada discreta de Fourier.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nm/N} \quad (10)$$

Onde:

$X(m)$ = m-ésima componente de saída da DFT

m = índice da componente de saída da DFT no domínio da frequência

$x(n)$ = a sequência das amostras do sinal de entrada ou sinal discreto

n = índice no domínio do tempo das amostras de entrada, $n=0,1,2,3,\dots,N-1$

$j=\sqrt{-1}$

N = número de amostras da sequência de entrada e o número de pontos em frequência na saída da DFT

Embora a DFT seja um dos procedimentos matemáticos mais diretos para determinar o conteúdo de frequência de uma sequência no domínio de tempo discreto, ela é ineficaz devido à lentidão do processo. Conforme o número de pontos em uma DFT aumenta para centenas ou milhares, a quantidade de números necessários para resolvê-la é extremamente excessiva. Publicaram-se vários artigos com melhorias, modificações e realizações chamados de algoritmos de transformada rápida de Fourier (FFT) (Yang & Chen, 2002).

A FFT é um algoritmo eficiente para se calcular a DFT e a sua inversa. As Transformadas rápidas de Fourier são de grande importância em uma vasta gama de aplicações. Por exemplo, se o desgaste da ferramenta influencia no conteúdo em frequência do sinal proveniente do sensor, a transformada rápida de Fourier fornece uma visão interna desse processo (Teti *et al.* 2010).

2.8.3.2 VALOR MÉDIO QUADRÁTICO (RMS)

O valor médio quadrático de uma quantidade ou sinal $x(t)$ é definido como sendo a raiz quadrada da potência média do sinal, conforme é expresso pela Equação 11: (Liu, 1991; Webster *et al.*, 1996).

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt} \quad (11)$$

Onde: T é o período do sinal ou tempo de integração

2.8.3.3 DESVIO-PADRÃO

O desvio padrão é uma medida de dispersão mais usada em problemas de engenharia, que pode ser considerada como uma medida de variabilidade dos dados de uma distribuição de frequências, ou seja, ele mede a dispersão dos valores individuais em torno da média. A Equação 12 expressa o cálculo do desvio padrão de um conjunto de dados observados ou de uma população.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (12)$$

Onde:

$\bar{x}$ é a média da população

n é o tamanho da população.

σ desvio-padrão da população

2.8.3.4 DESVIO DO VALOR MÉDIO (MVD)

Segundo Wang *et al.* (2001), processada no domínio da frequência, a estatística de desvio do valor médio (MVD) (*mean value deviation*) é dada pela Equação 13:

$$T_{mvd}(X) = \left| \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \log \left[\frac{\bar{X}}{X_k} \right] \right| \quad (13)$$

Onde o X_k é o k-ésima saída da FFT e $\bar{X}$ é o valor médio de $\{X_k\}$.

A estatística de MVD tem provado ser efetiva na detecção de transientes em algumas aplicações. O MVD parece ser útil para a detecção de queima no processo de retificação (Wang *et al.*, 2001).

2.8.3.5 ÁREA MEDIDA ABAIXO DO ENVELOPE RETIFICADO DO SINAL (MARSE)

A estatística MARSE (*Measured area under the rectified signal envelope*), algumas vezes chamada de contagem de energia, trata-se da medida da área sob a forma de onda de EA retificada, o que pode ser interpretado como a amplitude relativa do sinal. É um dos parâmetros de medição do sinal de emissão acústica mais amplamente utilizado. (Roberts, 2003). Através da estatística MARSE pode-se determinar a energia da emissão acústica, e tal estatística também é sensível à duração e amplitude do sinal. No entanto, MARSE não utiliza a contagem de cruzamento do sinal de EA (*counts*) ou um limiar definido pelo usuário (ndt-ed.org, 2012).

A Figura 10 ilustra a estatística MARSE.

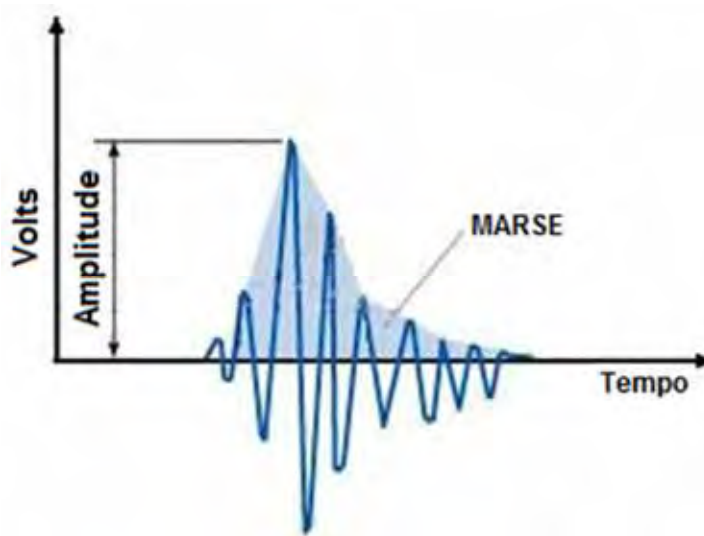


Figura 10 - Estatística MARSE sobre o sinal, adaptado de ndt-ed.org (2012).

2.9 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As pesquisas sobre redes neurais iniciaram-se em 1943, quando Warren McCulloch e Walter Pitts estabeleceram as bases da neurocomputação, concebendo procedimentos matemáticos análogos ao funcionamento dos neurônios biológicos. Esta contribuição foi puramente conceitual já que os autores não sugeriram aplicações práticas para o seu trabalho, mesmo porque os sistemas propostos por eles não tinham capacidade de aprender.

Em 1949 Donald Hebb deu um passo muito importante na história das redes neurais. Ele propôs um modo de proporcionar capacidade de aprendizado às redes neurais artificiais, baseado no comportamento do neurônio e de suas conexões (sinapses). A regra hebbiana, como ficou conhecida, foi utilizada por Frank Rosenblatt, um cientista da computação, em 1958, no desenvolvimento do modelo do perceptron (Haykin, 1999).

As redes neurais artificiais (RNs) são uma maneira de criar modelos matemáticos, com capacidade de processar informações, inspirados em uma estrutura física natural: o cérebro humano. Estes modelos não pretendem replicar a operação do cérebro humano, apenas utilizam como inspiração fatores conhecidos sobre o seu funcionamento, ou seja, apresentando a capacidade de aprender, de tomar decisões, de se adaptar mesmo em presença de sinais ruidosos (Hartmann,

2002). São nestas características que se observam umas das maiores qualidades das RNs: a capacidade de aprender através de exemplos e de generalizar sobre os padrões do conjunto de dados de treinamento, tornando possível a interpretação de outros padrões similares, mas não necessariamente idênticos aos utilizados durante o aprendizado.

Uma rede neural é um processador paralelo maciçamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso (Haykin, 2001).

A Figura 11 apresenta o neurônio biológico (Negnevitsky, 2005). Como o neurônio biológico, o perceptron recebe estímulos em suas conexões de entrada (sinapses) e, se as condições necessárias são satisfeitas, um sinal é emitido na saída (axônio).

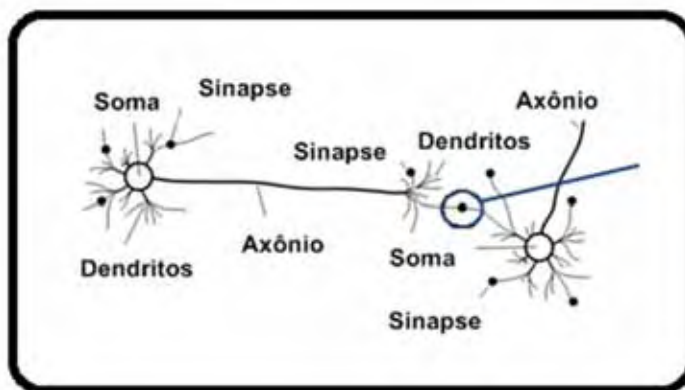


Figura 11 - Modelo de neurônio biológico, adaptado de Negnevitsky (2005).

No modelo matemático, 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 da soma é comparado a um limite de ativação do neurônio.

A Figura 12 mostra o modelo de neurônio artificial.

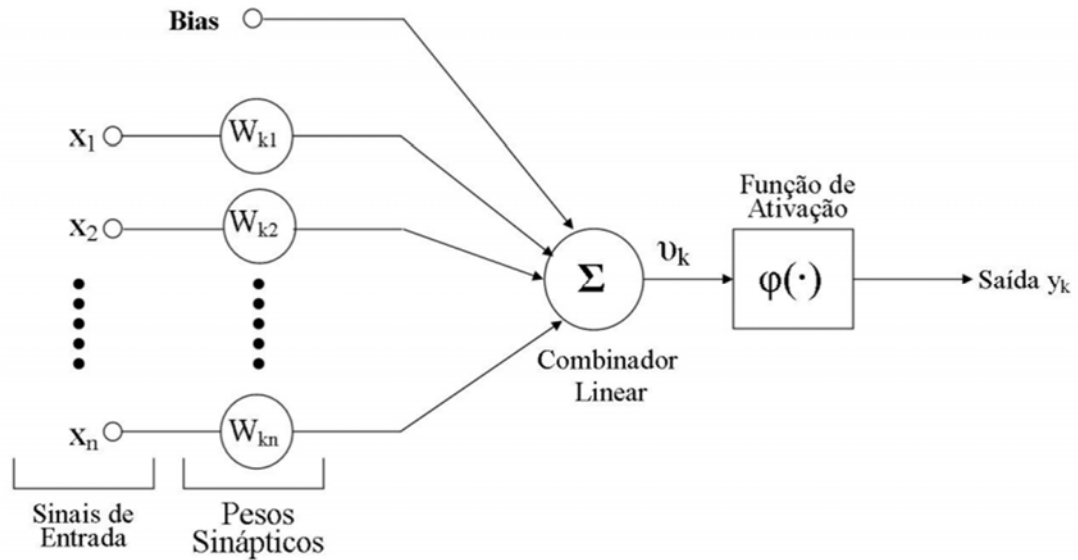


Figura 12 - Modelo do neurônio artificial, Gonçalves (2009).

Um neurônio artificial k pode ser descrito pelas Equações 14 e 15 (Haykin, 1999).

$$V_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (14)$$

$$y_k = \varphi(V_k + b_k) \quad (15)$$

Onde $x_1, x_2, \dots, x_n$ 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 (bias) (parâmetro externo do neurônio artificial) e tem o efeito de aumentar e diminuir a entrada líquida da função de ativação; $\varphi(\cdot)$ é a função de ativação (existe para buscar um ajuste ótimo ou modelo para um problema); e y_k é a saída do neurônio.

2.9.1 PERCEPTRON DE MÚLTIPLAS CAMADAS

Atualmente, a rede perceptron de múltiplas camadas, conhecida como MLP, é a arquitetura de rede neural artificial mais comum devido originalmente aos

pesquisadores Rumelhart e McClelland (1986), e é amplamente apresentada na maioria da literatura sobre redes neurais, como Haykin (2001).

Segundo Gonçalves (2009), redes MLP são redes alimentadas adiante (*feedforward*) que possuem uma ou mais camadas de neurônios entre as camadas de entrada e saída, chamada de camada oculta. Esta camada adiciona um poder maior em relação às redes Perceptron de camada única, que classifica apenas padrões linearmente separáveis, sendo os neurônios ocultos responsáveis por capturar a não-linearidade dos dados. Na rede MLP os neurônios são conectados aos neurônios da camada subsequente, não havendo ligação com os neurônios laterais (da mesma camada) e também não ocorre realimentação.

Ainda, segundo Gonçalves (2009), a aprendizagem de uma rede neural MLP é um processo iterativo, conhecido como aprendizagem por experiência, na qual padrões de treinamento (exemplos) são apresentados a rede, e com base nos erros obtidos ajustes são realizados nos pesos sinápticos com o intuito de diminuir o erro das 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, que consiste de dois passos, um para frente e outro para trás. O passo para frente é chamado de propagação, os valores provindos dos neurônios de entrada (nós fontes) são aplicados aos neurônios ocultos, e, posteriormente, suas saídas são aplicadas como entradas aos neurônios da camada final, obtendo a resposta da rede. Durante este passo, os pesos sinápticos da rede são todos fixos. No passo para trás ocorre o ajuste dos pesos sinápticos, por meio do cálculo do erro realizado na camada de saída, os pesos sinápticos entre as camadas antecessoras são ajustados de acordo com uma regra de correção de erro.

O projeto de redes neurais MLP envolve a especificação de importantes parâmetros, dentre os quais incluem o número de camadas escondidas e o número de unidades (neurônios) dessas camadas (Haykin, 2001). Outros parâmetros não menos importantes são a constante de momento e a taxa de aprendizagem. A taxa de aprendizagem define o tamanho do passo de atualização e a constante de momento é utilizada para que o método possa fugir do mínimo local na superfície de erro, objetivando o mínimo global.

A Figura 13 apresenta um exemplo de rede MLP.

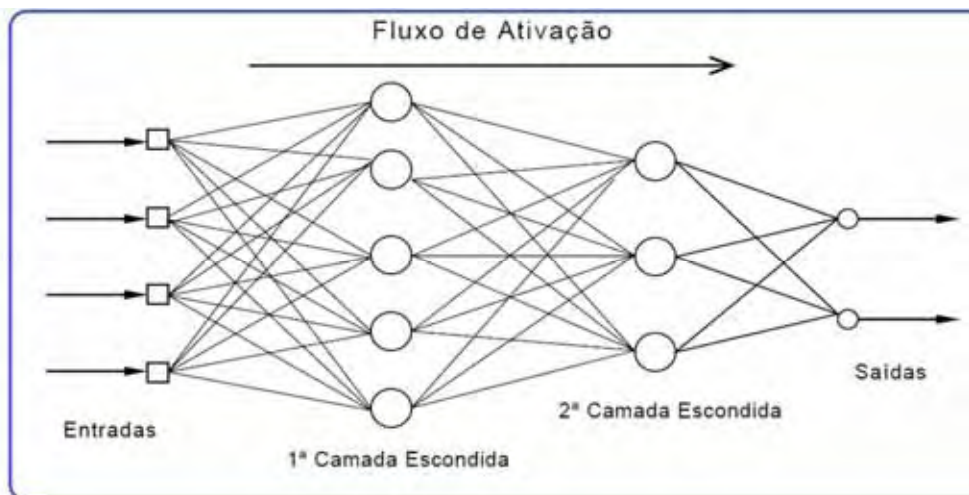


Figura 13 - Exemplo de RN Multicamadas. Dyminski (2000).

Um dos problemas que pode acontecer durante o treinamento da rede neural é o *overfitting*, ou super-treinamento. Esse fenômeno ocorre quando o erro do conjunto de dados de treinamento continua diminuindo e, em algum ponto desse processo, a rede começa a diminuir sua taxa de acertos. De acordo com Branga, Carvalho e Ludemir (2000) para reduzir a ocorrência de *overfitting* duas alternativas podem ser utilizadas: poda ou *prunning*, que elimina pesos ou neurônios irrelevantes; e validação cruzada, que encerra o treinamento quando o erro de validação começa a subir, indicando que a rede está aprendendo com ruído presente nos dados.

Haykin (2001) traz que, na validação cruzada, o conjunto de dados é dividido aleatoriamente em três subconjuntos: treinamento, validação e teste. O conjunto de treinamento deve ser utilizado para aprendizagem da rede, buscando otimizar os pesos sinápticos e bias. O conjunto de teste é utilizado para interromper o processo de treinamento quando for observado que o erro médio quadrático começa a aumentar de forma contínua.

Uma das dificuldades do uso de RNs consiste em identificar o melhor ponto de parada de treinamento, pois o erro de treinamento inicia com um valor alto, decresce rapidamente, e continua diminuindo lentamente, tendendo a atingir um mínimo local na superfície de erro (Haykin, 2001).

Assim, para identificar um ponto de parada de aprendizado, buscando obter a melhor generalização da rede, uma alternativa é utilizar a técnica da regra de parada antecipada, com base na validação cruzada. Esta consiste em uma técnica estatística, para validar o modelo obtido durante o treinamento da rede, utilizando um conjunto de dados diferentes dos usados, para estimar os parâmetros durante o treinamento (Haykin, 2001). O método consiste em acompanhar a evolução do aprendizado nas curvas correspondentes aos subconjuntos de dados de treinamento e de validação. Deste modo, o treinamento é interrompido quando a curva de validação decresce a um erro mínimo, e antes de começar a crescer, conforme o treinamento continua. A Figura 14 apresenta a regra de parada antecipada descrita.

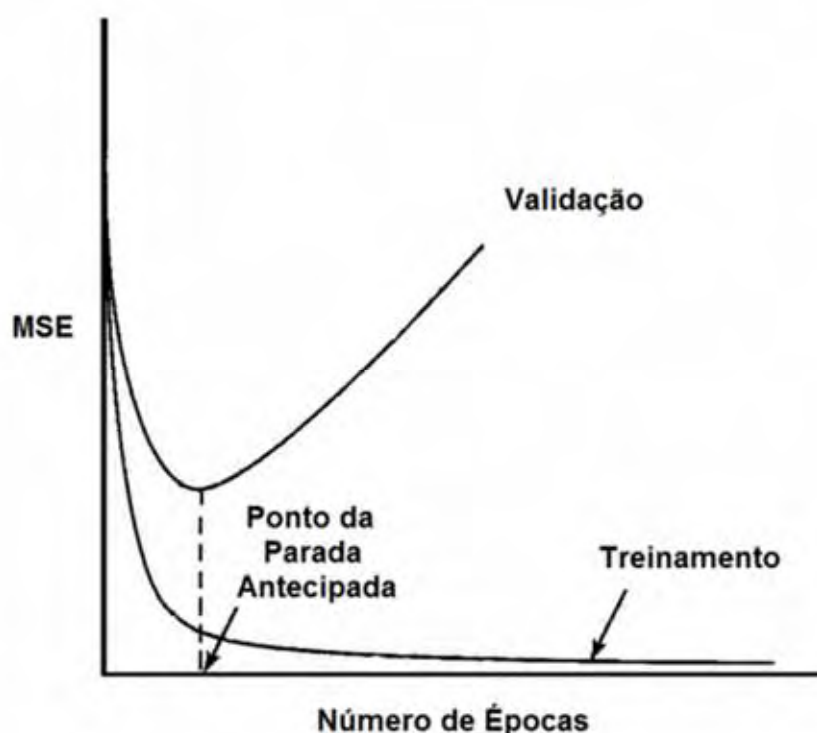


Figura 14 - Regra de parada antecipada baseada na validação cruzada, (Gonçalves, 2009).

2.9.2 SISTEMAS INTELIGENTES USADOS NO MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE USINAGEM

Os sistemas inteligentes aplicados na manufatura são comparados a um operador qualificado que emprega seus órgãos sensoriais e seu cérebro para operar uma máquina-ferramenta. Assim, é necessário o emprego de sensores com boa precisão e exatidão, com baixo custo de implantação, e ferramentas computacionais

eficientes, desenvolvidas através de algoritmos otimizados que possam reproduzir o processo de tomada de decisões do operador (Davim, 2008).

No monitoramento de operações de usinagem, o conhecimento do modelo matemático do processo é utilizado no controle, baseado na física de suas interações. Geralmente, esse modelo é aproximado através de equações diferenciais que podem ser aplicadas em softwares de simulação pelo método dos elementos finitos para viabilizar a análise do comportamento do processo, com grande esforço computacional. Porém, modelos matemáticos precisos dificilmente podem ser obtidos devido à complexidade da interação entre a ferramenta de trabalho e a peça. Métodos de computação leve - como RN e algoritmos genéticos, podem ser utilizados para modelar o processo baseados em dados coletados. A vantagem do uso desta classe de solução está na sua capacidade de relacionar as saídas às entradas, mesmo diante de dados imprecisos, faltantes ou incertos (Davim, 2008).

Aguiar *et al.* (2010) utilizaram os sinais de emissão e potência de corte bem como estatísticas derivadas desses sinais para estimar a queima superficial, rugosidade e microdureza de peças de aço retificadas. Como entradas das redes neurais, do tipo MLP, foram utilizados os sinais RMS de emissão acústica, potência de corte, o avanço e os parâmetros estatísticos DPKS e DPO. O melhor desempenho encontrado correspondeu a um erro médio de 5,54%, cujas entradas da rede foram o parâmetro RMS da emissão acústica, o avanço e a potência de corte.

Baseri (2010) utiliza uma rede neural *feedforward*, com algoritmo *backpropagation*, para estimação de rugosidade no processo de retificação, fixando os parâmetros de retificação e variando as condições de dressagem.

Silva *et al.* (2011) desenvolveu uma metodologia para monitoramento do desgaste de ferramentas de corte durante o fresamento, utilizando rede neural artificial e os sinais de potência de corte e emissão acústica. Os parâmetros estatísticos que possuíam correlação com o desgaste de flanco máximo foram utilizados no treinamento e validação de uma RNA. Os resultados mostram que o skewness do sinal de EA (banda de frequências 50-500 kHz), o nível RMS extraído dos espectros de potência de EA (banda de frequências 100-230 kHz) e a potência efetiva de corte média têm correlação com o desgaste. A utilização desses

parâmetros como valores de entrada em uma RNA proporcionou excelentes respostas à rede, ao tentar prever se a ferramenta está ou não, em condições de uso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada uma descrição dos equipamentos, materiais e a metodologia utilizada na realização desse trabalho. Foi necessária a confecção e a montagem de um banco de ensaios com o objetivo de permitir que a partir das condições de dressagem estabelecidas nos ensaios, a variável de saída (emissão acústica – sinal puro) pudesse ser medida em tempo real, para posterior processamento, análise e discussões dos resultados obtidos.

3.1 BANCO DE ENSAIOS

O banco de ensaios constituiu-se de um rebolo de óxido de alumínio do fabricante Norton com especificação 38A220KVS, dimensões de 355,6 x 12,7 x 127 mm, e rotação máxima de 1775 RPM, instalado em uma máquina retificadora tangencial plana modelo RAPH – 1055, da marca Sulmecânica. O fluido de corte empregado foi do tipo emulsão, com uma concentração controlada em torno de 4% em volume de óleo. Utilizou-se também um dressador de ponta única de diamante e um sensor de emissão acústica.

A Figura 15 apresenta uma ilustração da operação de dressagem e o monitoramento pelo sensor de emissão acústica posicionado no suporte do dressador.

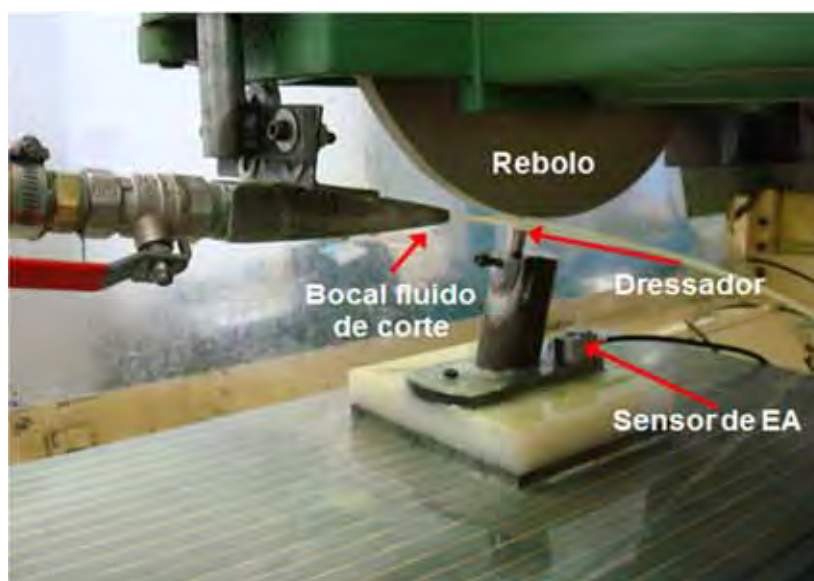


Figura 15 - Operação de dressagem com o sensor de emissão acústica.

Nos ensaios experimentais o sinal puro de emissão acústica foi coletado ao invés do valor médio quadrático desse sinal, pois estatísticas e parâmetros serão, posteriormente, obtidos a partir desse sinal.

Para a medição dos sinais de emissão acústica puro em tempo real, foi utilizado um sistema de emissão acústica, composto por um sensor e um módulo processador de sinais do fabricante Sensis, modelo DM42.

O módulo de emissão acústica foi configurado de acordo com os parâmetros mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros usados no módulo de emissão acústica.

Configuração do módulo de EA	
Canal de Entrada	2
Filtro Passa-Alta	50 kHz
Filtro Passa-Baixa	Nenhum
Ganho de Entrada	20
Ganho de Sinal	10

O sinal de emissão acústica foi coletado por uma placa de aquisição de dados, modelo PCI-6111E, da *National Instruments*, a uma taxa de aquisição de um milhão de amostras por segundo. A placa de aquisição foi instalada em um microcomputador com o *software* LabVIEW, no qual foi desenvolvido um programa para possibilitar a comunicação com a placa, aquisição dos dados, e o armazenamento dos dados em arquivos binários para posterior processamento digital.

Um filtro analógico foi empregado após o módulo de emissão acústica, possuindo as seguintes características: passa-baixa, tipo *Butterworth*, de segunda ordem, e frequência de corte de 300 kHz. O uso desse filtro se justifica pelo estudo em frequência realizado do sinal de EA puro, em que se observou que frequências acima de 200 kHz são praticamente inexistentes. Os espectros do sinal de EA são mostrados posteriormente neste trabalho. Assim, filtrando-se o sinal puro de EA com o referido filtro garante-se o teorema da amostragem (Kuo, 2007).

O software MATLAB foi empregado para o processamento dos dados após os ensaios e obtenção das estatísticas RMS, MARSE e MVD.

A montagem esquemática do banco de ensaios é apresentada na Figura 16.

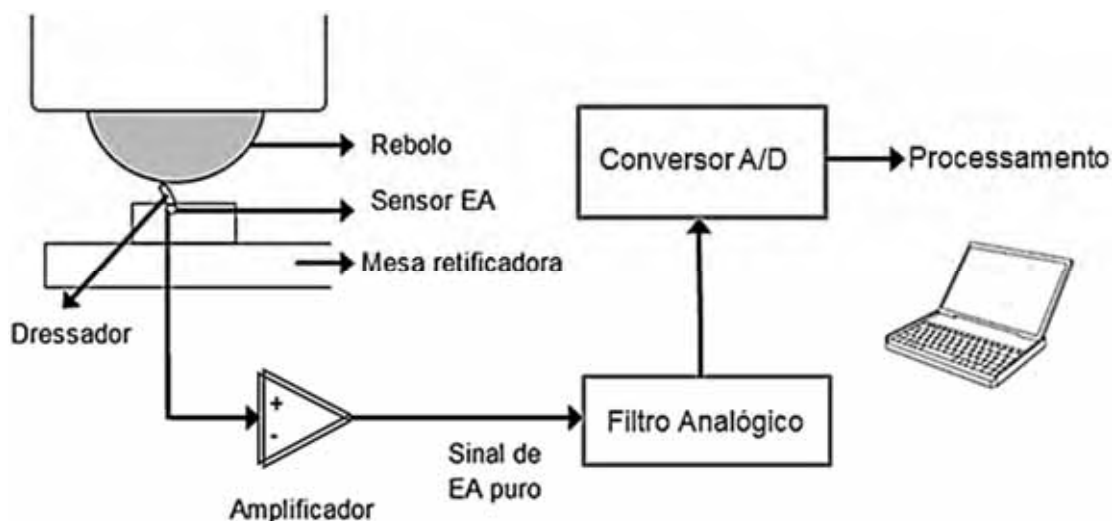


Figura 16 - Montagem esquemática do banco de ensaios.

Para a realização de cada ensaio de dressagem, mediu-se a largura de atuação de dressagem (b_d) com o auxílio de um projetor de perfil da marca Nikon, modelo 6C, cuja precisão de leitura é de $1\mu\text{m}$. Para as medições foi utilizada uma lente que permitia um aumento de 50 vezes.

As medições b_d foram realizadas de acordo com Figura 17.

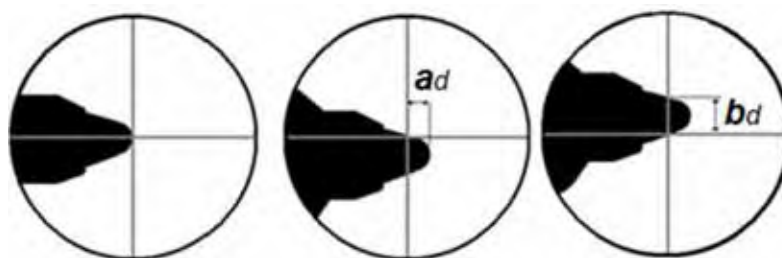


Figura 17 - Método de medição da largura da ponta do dressador

Cada medição foi realizada com o auxílio de duas linhas que se cruzam no painel do projetor de perfil. O procedimento consiste em aproximar a ponta do dressador ao centro de cruzamento das linhas e avançar o valor de a_d (previamente conhecido) com o auxílio de um manípulo de precisão micrométrica. Neste ponto, a largura de atuação (b_d) é feita deslocando-se a linha vertical de uma extremidade a outra da ponta do dressador por meio do outro manípulo com precisão micrométrica.

Antes de cada ensaio, o rebolo foi desgastado, sob condições severas de usinagem, retificando-se uma peça de aço ABNT 1020 sem a utilização do fluido de corte, até ocorrer a queima da peça. Os ensaios consistiram em seis operações de dressagem.

A agressividade da superfície de corte do rebolo foi medida ao longo de cada ensaio de dressagem em três momentos. A primeira medição foi realizada, no início do ensaio, com a remoção de 10 μm ou 20 μm de material do rebolo (conforme o valor de a_d de cada ensaio); a segunda medição foi com 120 μm de material do rebolo removido; e a terceira medição foi no final do ensaio, com 240 μm de material removido. Para isto, utilizou-se o método do disco retificado proposto por Coelho (1991), que consiste em submeter um disco, sob a ação de uma força constante, à retificação de mergulho. Isto é feito através do uso de um dispositivo semelhante a uma balança de pratos colocada sob o rebolo. Durante a retificação do disco, seu deslocamento é registrado no tempo através de um apalpador eletrônico acoplado à balança capaz de fornecer o valor do deslocamento em forma de tensão analógica. Isto proporciona o registro do comportamento do rebolo durante a retificação sob uma variação contínua de pressão, proporcionada pela forma cilíndrica do disco.

Para as medidas de agressividade utilizou-se o equipamento de apalpador eletrônico Tesatron TT60.

A Figura 18 apresenta o esquema de montagem utilizado na medição da agressividade do rebolo.

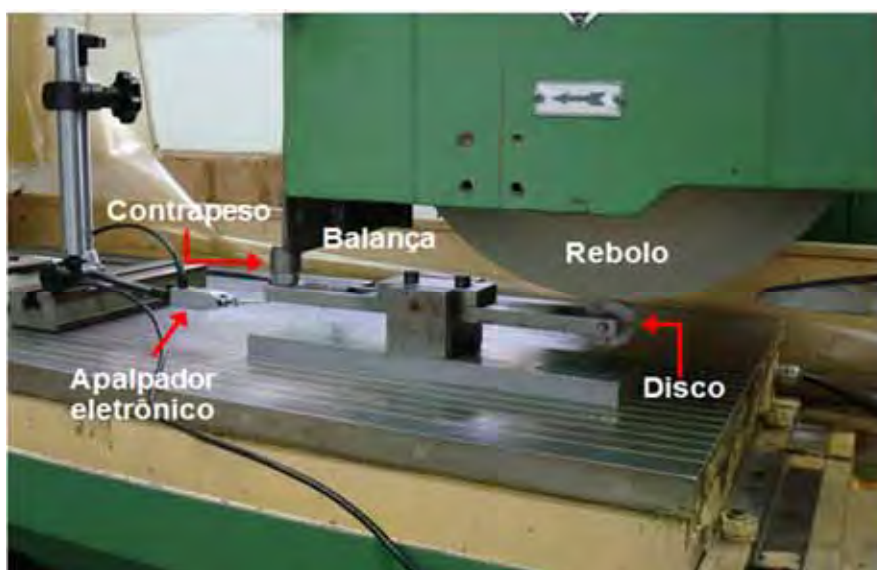


Figura 18 - Esquema de medição da agressividade do rebolo.

A sequência da realização dos ensaios de dressagem foi a seguinte:

1. Retificou-se uma peça (aço ABNT 1020) até ocorrer a queima da mesma, conforme Figura 19, assim, o rebolo encontrava-se “carregado” de cavaco (rebolo empastado) para a realização dos ensaios de dressagem.

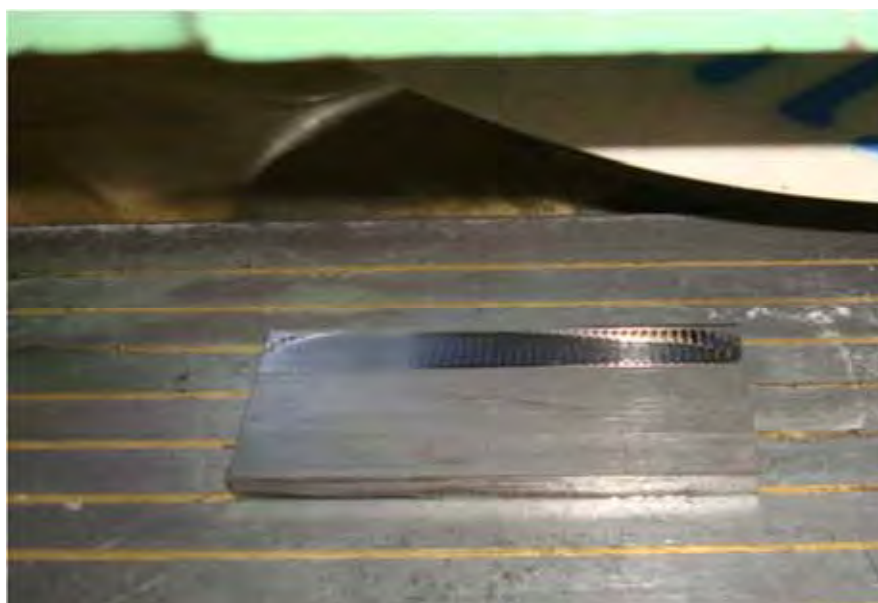


Figura 19 - Peça de aço queimada para a obtenção de um rebolo gasto e empastado

2. Escolheram-se os valores de U_d e a_d .
3. Mediu-se a ponta do dressador, para calcular o valor de S_d .
4. Calculou-se a velocidade do dressador.
5. Mediu-se a agressividade (início do ensaio), com remoção de 10 μm ou 20 μm , através do método do disco retificado.
6. Realizou-se a dressagem até a remoção de 120 μm .
7. Mediu-se a agressividade (metade do ensaio).
8. Realizou-se a dressagem dos 120 μm até a remoção de 240 μm (total de material removido na realização dos ensaios).
9. Mediu-se a agressividade (fim do ensaio).

É importante salientar que houve um controle rigoroso na realização dos ensaios, inclusive do a_d . Porém, devido o controle do ajuste da máquina ser manual,

pequenas variações podem ter ocorrido ao longo das passadas quando o rebolo já estava dressado.

A pressão e vazão do fluido de corte e a velocidade de corte do rebolo permaneceram constantes durante a realização dos ensaios de dressagem.

3.2 ESTUDO DO ESPECTRO DO SINAL DE EA

Com o objetivo de estudar melhor o comportamento do conteúdo harmônico do sinal puro de emissão acústica, fez-se um estudo do conteúdo em frequência do mesmo empregando-se a transformada discreta de Fourier, a qual foi implementada pelo algoritmo da FFT com uma função específica do software MATLAB. Assim, se obteve as curvas de amplitude em função da frequência do sinal de emissão acústica puro.

Para o cálculo da FFT foram escolhidos três janelas de 2048 amostras do sinal puro de EA ao longo da passada de dressagem, sendo um no início, meio e fim.

Na Figura 20 são apresentados os resultados dos espectros obtidos para as três janelas escolhidas ao longo da passada 24 do ensaio 01 (Ponto 1=início, Ponto 2 = meio, Ponto 3 = fim).

Espectro do sinal - Ponto 1 ($a_d = 10 \mu\text{m}$, $U_d = 2 \mu\text{m}$; Passada = 24)

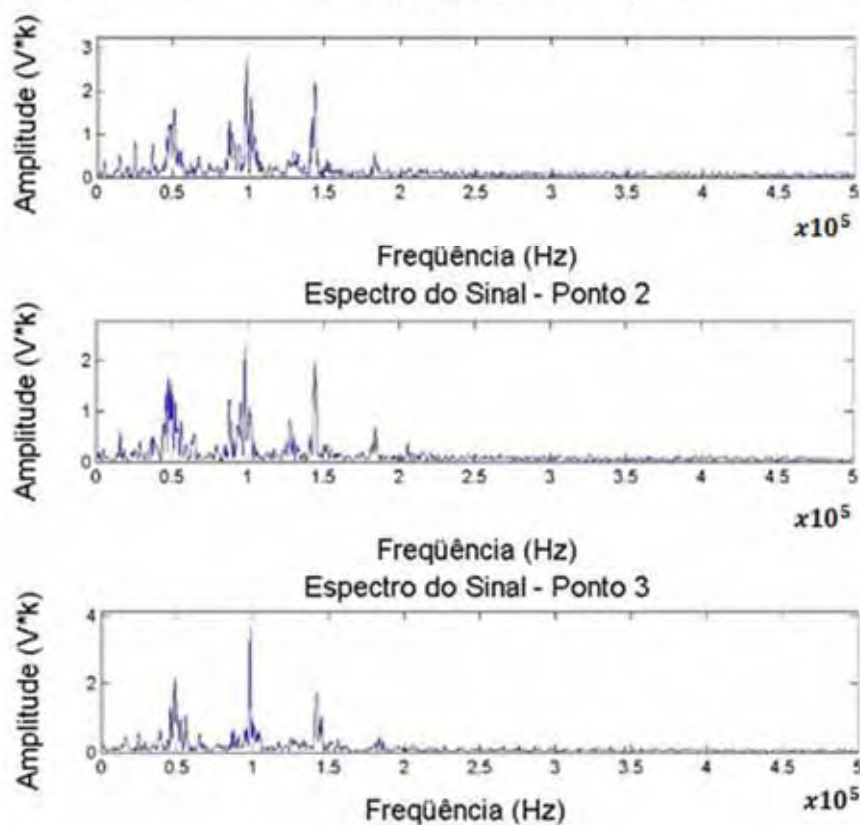


Figura 20 - Espectros do sinal de EA para três pontos escolhidos ao longo da passada

A partir das curvas de amplitude em função da frequência mostradas na Figura 23, verifica-se que a faixa significativa de frequências está entre 50 kHz e 200 kHz. Para os outros ensaios, os espectros se comportaram da mesma forma, e, portanto, pode-se ter a mesma análise. Assim, justifica-se o uso do filtro analógico após o sinal puro de emissão acústica, com frequência de corte de 300 kHz, como mencionado e mostrado anteriormente no banco de ensaios.

3.3 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM

Com o objetivo de se obter diferentes condições de dressagem para o estudo proposto nesse trabalho, planejaram-se os ensaios mostrados na Tabela 2, a qual também inclui parâmetros obtidos durante os ensaios.

Tabela 2 - Os ensaios de dressagem realizados.

Ensaio	U_d	a_d (μm)	b_d (μm)	V_d (m/s)	n (rpm)	Diâmetro do rebolo (mm)	Número de Passadas
01	2,0	10	152,3	2,2845	334	314,5	24
02	1,5	10	132,3	1,6460	386	314,3	24
03	1,0	10	165,0	4,9500	714	314,0	24
04	2,0	20	188,9	2,8335	412	315,0	12
05	1,5	20	195,6	3,9120	566	315,2	12
06	1,0	20	172,3	5,1690	745	315,5	12

Para uma melhor análise e comparação do comportamento das estatísticas obtidas (RMS, MVD e MARSE), os ensaios realizados foram agrupados em função do mesmo valor da profundidade de dressagem (a_d) e do mesmo número de passadas realizadas, ficando a divisão dos grupos dos ensaios da seguinte forma: **Grupo I** – Ensaios 01, 02 e 03; **Grupo II** – Ensaios 04, 05 e 06.

3.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

A partir dos dados armazenados em arquivos binários, e com o uso de rotinas desenvolvidas no MATLAB, realizou-se o processamento digital do sinal puro de emissão acústica para a determinação das estatísticas RMS, MVD e MARSE, descritas no item 2.8. A janela usada para o cálculo de cada estatística consistiu de 2048 amostras, ou seja, obtinha-se um valor de cada estatística a cada 2048 pontos do sinal puro de EA, e, conseqüentemente, se construíam os vetores dessas estatísticas.

Essas estatísticas foram escolhidas para serem estudadas e usadas como entradas da RN neste trabalho por já terem apresentado bons resultados em pesquisas anteriormente realizadas por Aguiar *et al.* (2002, 2005, 2009) e Dotto *et al.* (2006).

3.5 PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DOS VETORES DE ENTRADA DAS REDES NEURAIIS

Como descrito anteriormente, a partir do processamento digital dos sinais de emissão acústica, vetores foram gerados correspondentes às estatísticas RMS, MVD e MARSE. A partir desses vetores calculados para as estatísticas de cada passada e ensaio, geraram-se novos vetores correspondentes a média aritmética dos valores de cada estatística para cada passada.

Como o número de pontos desses vetores é considerado pequeno para o treinamento das redes neurais, o processo de interpolação foi empregado para se obter um conjunto maior de pontos para cada vetor. Essa interpolação foi realizada com função específica no MATLAB (função *interp*), e obteve-se como resultado vetores de 2.400 pontos para cada estatística do Grupo I de ensaios, e vetores de 1.200 pontos para cada estatística do Grupo II de ensaios.

A Figura 21 mostra o diagrama esquemático do processamento digital para a obtenção da estatística RMS, a formação dos vetores de média para cada passada, e o vetor depois do processo de interpolação. O mesmo procedimento foi desenvolvido para as outras estatísticas.

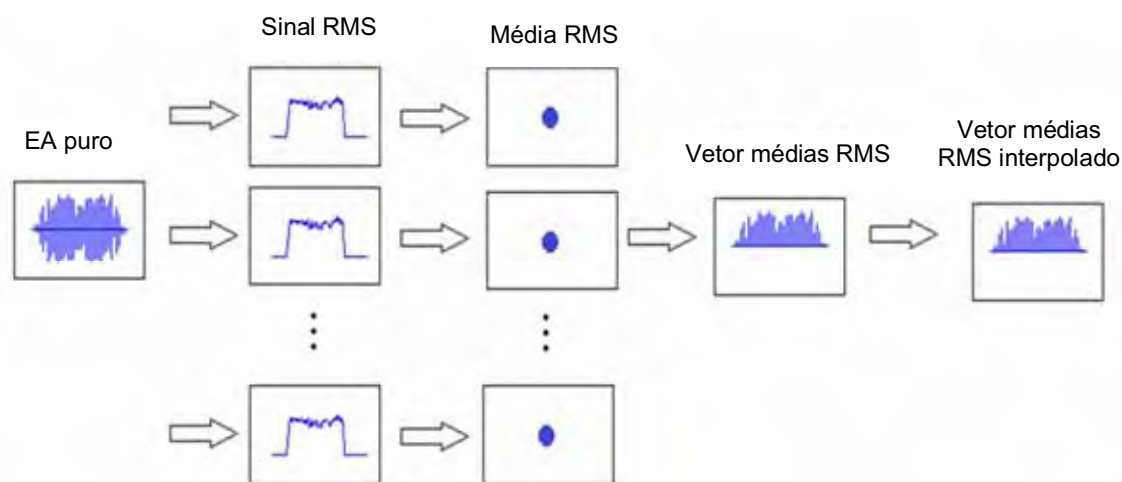


Figura 21 – Processo de obtenção da estatística RMS e vetores de médias para a estatística RMS.

As Figuras 22 e 23 ilustram as curvas obtidas para a estatística RMS antes e depois do processo de interpolação, respectivamente.

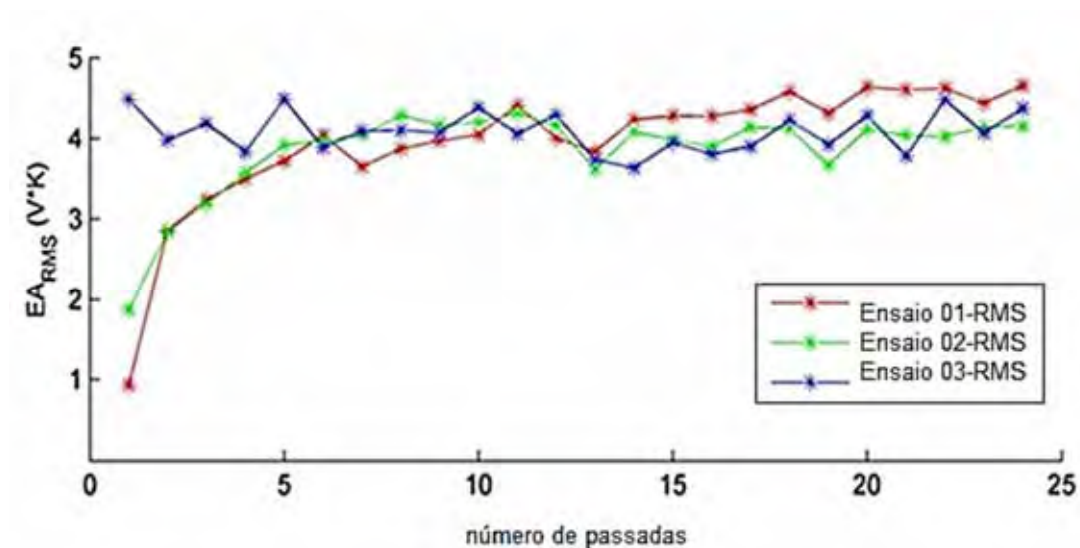


Figura 22 - Estatística RMS, com 24 pontos, referente aos ensaios 01, 02 e 03.

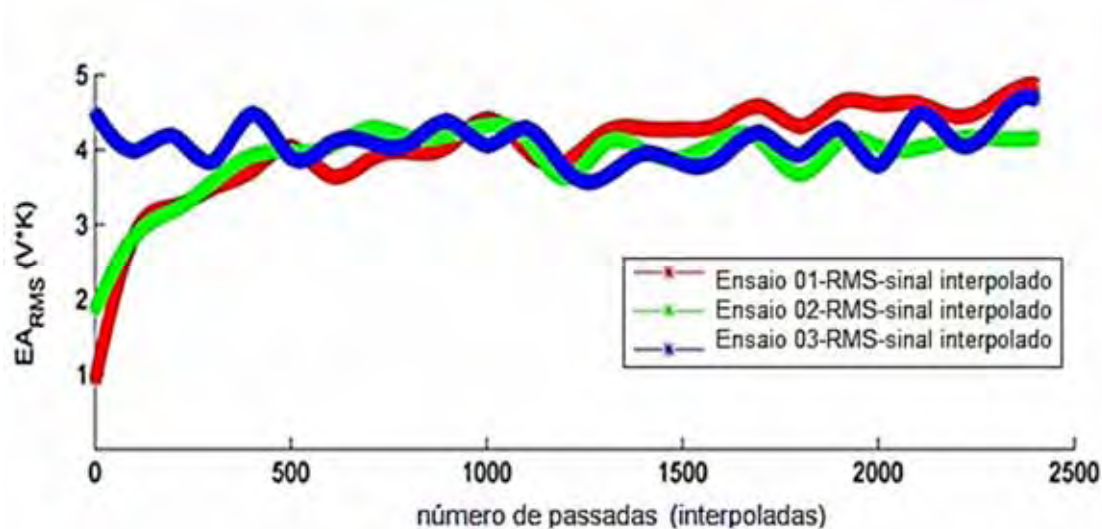


Figura 23 - Estatística RMS com interpolação, 2400 pontos, referente aos ensaios 01, 02 e 03

Comparando-se a Figura 22 com a Figura 23 observa-se que apenas o número de pontos do vetor (em cada ensaio) aumentou, mantendo-se o mesmo comportamento nas duas situações.

3.6 DEFINIÇÃO DAS REGIÕES DE DRESSAGEM

Neste trabalho duas condições de dressagem serão consideradas para a classificação da condição da superfície do rebolo, ou seja, o rebolo será considerado dressado (“afiado” – com capacidade de corte) ou não-dressado (“sem afiação” – sem capacidade de corte) ao longo de um determinado ensaio. Essas regiões são definidas com base no comportamento dos valores da estatística RMS, conforme Aguiar et al. (2009). A partir da análise dos resultados da estatística RMS, como aqueles apresentados na Figura 22, pode-se definir a região em que o rebolo se encontra dressado após a profundidade total de dressagem de 100 μm , sendo que antes desse valor o rebolo é considerado não-dressado. Outros detalhes sobre essa discussão serão apresentados posteriormente neste trabalho.

3.7 ARQUITETURA DA REDE NEURAL PARA CLASSIFICAÇÃO

A rede empregada neste trabalho foi do tipo MLP, treinada com algoritmo *Levenberg-Marquardt*. Inicialmente foram realizados alguns treinamentos com diversas arquiteturas para a RN MLP, variando-se manualmente o número de camadas escondidas, a quantidade de neurônios nas camadas escondidas, constante de momento, e taxa de aprendizagem. As entradas para essas redes também foram manualmente variadas, ou seja, mantiveram-se constantes os parâmetros U_d e a_d e combinaram-se as estatísticas RMS, MARSE e MVD. Os dados de todos os ensaios foram considerados para o treinamento dessas redes e o número de épocas utilizado nesses treinamentos foram valores inferiores a 2000. O conjunto de dados foi dividido em 60% para treinamento, 20% para validação, e 20% para o teste de todas as redes neurais.

Esse processo inicial de treinamento foi realizado com o intuito de se obter arquiteturas de redes viáveis para a classificação da dressagem.

Após a realização desse processo manual de ajustes e o treinamento dessas redes neurais, verificou-se que a maioria das arquiteturas das redes testadas não produzia resultados satisfatórios, ou seja, as redes não convergiam, e quando convergiam, as redes apresentavam uma porcentagem de erro muito alta (erros

entre 22% a 41%), tornando inviável o uso dessas arquiteturas para a classificação da dressagem.

Em função da não convergência dessas redes, eliminou-se os parâmetros U_d e a_d como entradas das redes neurais, aumentou-se o número de épocas para 2000, e se considerou dois grupos distintos para o treinamento das redes, como discutido anteriormente: Grupo I – Ensaios 01, 02 e 03; e Grupo II – Ensaios 04, 05 e 06. Esses grupos correspondem a valores constantes de a_d . As curvas dos sinais dos ensaios obtidos foram melhores analisadas, e verificou-se que os ensaios 03 e 04 apresentaram erros experimentais que estavam gerando erros elevados nas redes neurais, e por isso foram eliminados do treinamento dessas. Os resultados e análises serão realizados posteriormente no Capítulo 4. Dessa forma, treinaram-se separadamente as redes neurais ora com dados dos ensaios do Grupo I ora do Grupo II.

O resultado dessas novas redes produziram erros ainda mais satisfatórios, entre 2 a 29%, porém necessitando ainda de aprimoramentos nos ajustes das escolhas das arquiteturas das redes neurais.

Utilizou-se um algoritmo de otimização, proposto por Cruz (2010), com algumas modificações, a fim de testar um número muito maior de arquiteturas de forma automática.

A Figura 24 apresenta o fluxograma adaptado do algoritmo, proposto por Cruz (2010).

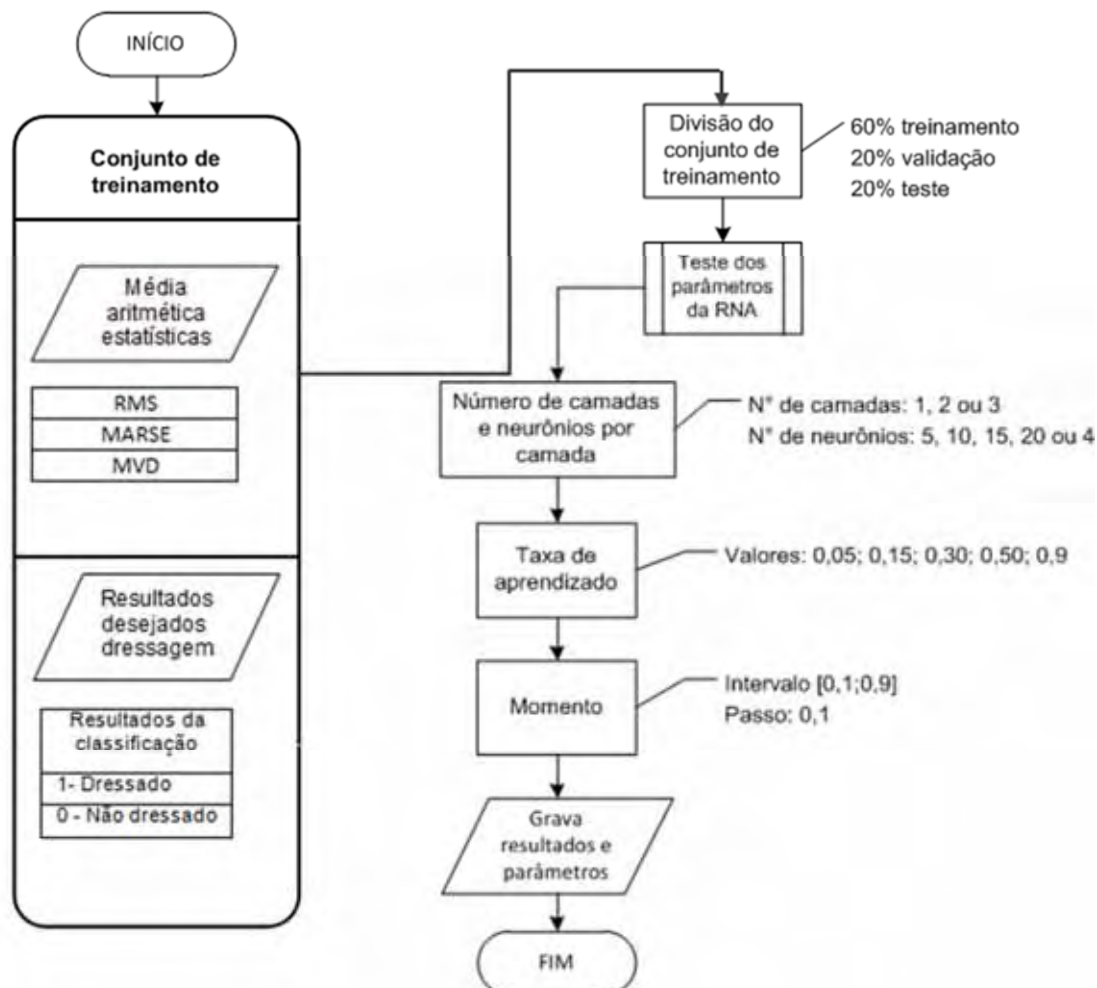


Figura 24 - Fluxograma adaptado do algoritmo de Cruz (2010).

O algoritmo proposto por Cruz (2010) e adaptado neste trabalho foi, inicialmente, utilizado da seguinte forma: variou-se apenas o número de neurônios (5, 10, 15, 20, e 40), e camadas escondidas (1, 2, e 3); fixou-se a taxa de aprendizagem em 0,3 e a constante de momento em 0,7. Essas combinações resultaram em 30 possíveis arquiteturas. Os valores de taxa de aprendizagem e constante de momento adotados nesse processo se basearam nos trabalhos de Cruz (2010) e Aguiar *et al.* (2010), os quais obtiveram bons resultados.

A divisão do conjunto de dados para utilização nas redes neurais nesse novo processo se manteve a mesma, ou seja, 60% para treinamento, 20% para validação, e 20% para teste. O método da validação cruzada também foi empregado nesse

trabalho, a qual encerra o treinamento quando o erro de validação começa a subir, indicando que a rede está aprendendo com ruído presente nos dados. (como apresentado no item 2.9.1). Cada arquitetura foi treinada 5 vezes, obtendo-se a média do erro quadrático médio e o seu respectivo desvio padrão.

Com base no menor erro médio e menor desvio padrão observado obteve-se as Tabela 3 e Tabela 4, as quais mostram as melhores arquiteturas (Arq.) e os números de neurônios em cada camada escondida (camada), de cada arquitetura obtida e treinada para o conjunto de dados do Grupo I e do Grupo II respectivamente.

Tabela 3 – Arquiteturas das melhores RNs para o Grupo I.

Arq.	1ª camada	2ª camada	3ª camada	Momento (μ)	Taxa de aprendizagem (η)
01	05	20	40	0,7	0,3
02	05	40	00	0,7	0,3
03	15	15	10	0,7	0,3
04	15	40	00	0,7	0,3
05	20	10	15	0,7	0,3
06	40	10	15	0,7	0,3
07	40	10	20	0,7	0,3
08	40	10	40	0,7	0,3
09	40	20	40	0,7	0,3
10	40	40	40	0,7	0,3

Tabela 4 - Arquiteturas das melhores RNs para o Grupo II.

Arq.	1ª camada	2ª camada	3ª camada	μ	lr	Arq.	1ª camada	2ª camada	3ª camada	μ	lr
01	10	05	00	0,7	0,3	18	10	20	05	0,7	0,3
02	10	15	00	0,7	0,3	19	10	20	00	0,7	0,3
03	10	20	00	0,7	0,3	20	10	40	40	0,7	0,3
04	10	40	00	0,7	0,3	21	15	10	10	0,7	0,3
05	15	15	00	0,7	0,3	22	15	15	15	0,7	0,3
06	20	05	00	0,7	0,3	23	15	40	40	0,7	0,3
07	20	10	00	0,7	0,3	24	20	05	10	0,7	0,3
08	20	15	00	0,7	0,3	25	20	10	05	0,7	0,3
09	40	05	00	0,7	0,3	26	20	15	15	0,7	0,3
10	40	40	00	0,7	0,3	27	20	20	10	0,7	0,3
11	05	10	10	0,7	0,3	28	40	05	10	0,7	0,3
12	05	15	10	0,7	0,3	29	40	15	15	0,7	0,3
13	05	20	10	0,7	0,3	30	40	20	15	0,7	0,3
14	05	40	15	0,7	0,3	31	40	20	40	0,7	0,3
15	10	05	05	0,7	0,3	32	40	40	15	0,7	0,3
16	10	10	10	0,7	0,3	33	40	40	40	0,7	0,3
17	10	10	15	0,7	0,3						

Por fim, com o uso do algoritmo de otimização de Cruz (2010), porém de forma adaptada, apenas as combinações de camadas ocultas e neurônios foram empregadas para o treinamento final dos modelos neurais, mostradas nas Tabela 3 e Tabela 4, variando-se a taxa de aprendizagem e a constante de momento, conforme mostra o Fluxograma da Figura 24. Cada arquitetura nesse novo processo foi também treinada 5 vezes, obtendo-se a média do erro quadrático médio e o seu respectivo desvio padrão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das medições dos valores de agressividade, o comportamento das estatísticas RMS, MARSE e MVD ao longo da passada dos ensaios de dressagem realizados, e as arquiteturas de redes neurais com os melhores resultados obtidos pelas RNs selecionadas.

4.1 RESULTADOS DA AGRESSIVIDADE

A partir das medições de agressividade do rebolo realizadas ao longo dos ensaios de dressagem, construiu-se a Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de agressividade do rebolo ao longo dos ensaios de dressagem (Início=antes do ensaio iniciar; Meio=no meio do ensaio; Fim=última passada do ensaio)

Ensaio	U_d	a_d	b_d	Valores de agressividade ($*10^{-3}mm^3/N.s$)		
				Início	Meio	Fim
01	2,0	10	152,3	0,021431	60,3995	67,8082
02	1,5	10	132,3	0,013914	95,6329	109,4374
03	1,0	10	165,0	0,023705	133,8809	157,3273
04	2,0	20	188,9	0,012110	82,5642	95,2653
05	1,5	20	195,6	0,175282	105,5596	110,9907
06	1,0	20	172,3	0,186283	120,7698	135,6788

Com os valores apresentados na Tabela 5, os gráficos da agressividade ao longo de cada ensaio foram construídos para os ensaios do Grupo I e do Grupo II, conforme mostram as Figura 25 e Figura 26.

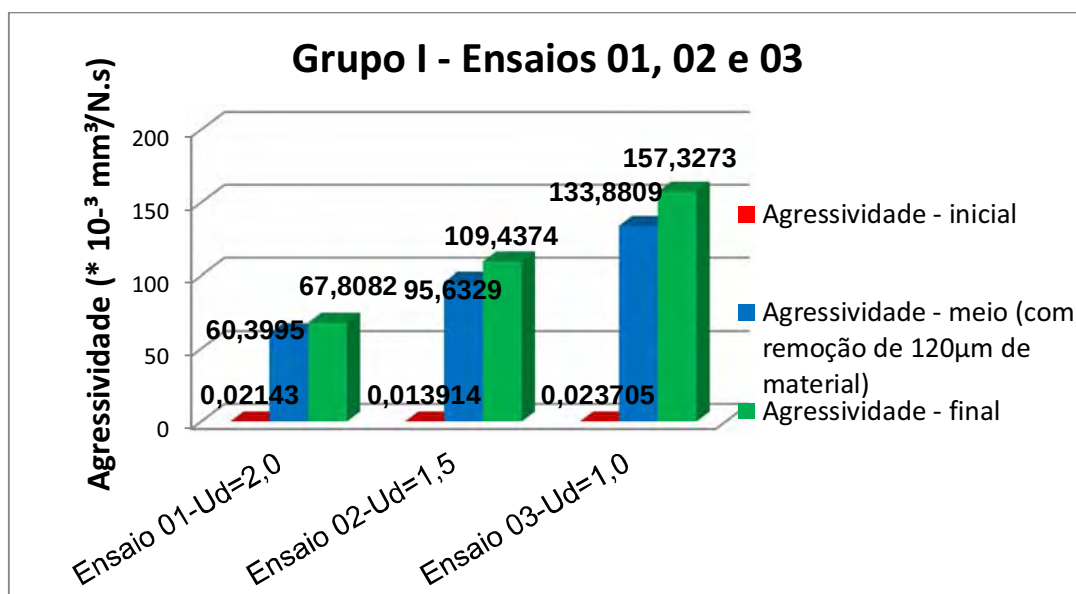


Figura 25 - Agressividade dos ensaios 01, 02 e 03.

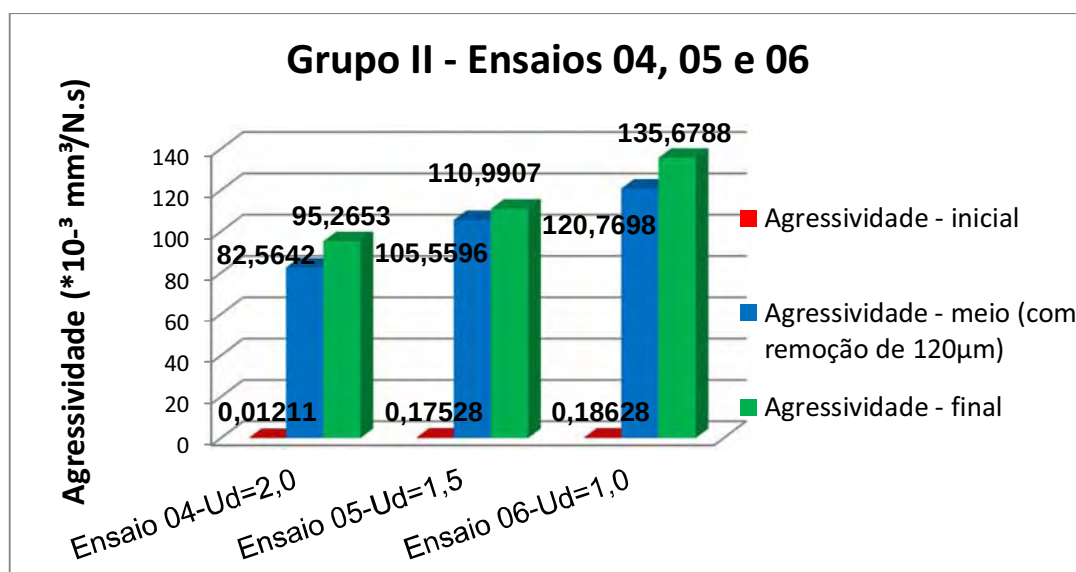


Figura 26 - Agressividade dos ensaios 04, 05 e 06.

Os diferentes valores da agressividade observados na Tabela 5 ocorreram em função das condições de dressagem características para cada ensaio.

De acordo com König (1980), Marinelli (1998), Oliveira *et al.* (1992), Bianchi *et al.* (2011), Oliveira (1989) e Coelho (1991), quanto menor o valor de U_d maior é a agressividade do rebolo. Ainda, segundo Coelho (1991), o comportamento da agressividade pode ser explicado com base na teoria do microfenômeno de remoção, pois para valores altos de U_d o grau de transferência da ponta do

dressador para a face do rebolo é baixo, quase não existindo macroefeito e, portanto, produz baixa agressividade. Nesta situação, existe uma alta densidade de arestas ativas. Por outro lado, para valores baixos de U_d uma situação inversa ocorre, ou seja, a transferência do perfil do dressador para a face do rebolo é grande, surgindo então o macroefeito.

Esses fenômenos podem ser claramente observados nos valores de agressividade medidos no fim de cada ensaio de dressagem como apresentado nas Figura 25 e Figura 26. Nota-se que para valores de U_d mais baixos os valores de agressividade são mais altos, e para valores de U_d mais altos os valores de agressividade são mais baixos.

Para todos os ensaios verifica-se que os níveis de agressividade iniciais são relativamente baixos, pois corresponde a situação do rebolo antes do ensaio de dressagem iniciar, e, portanto, o rebolo se encontrava empastado (com cavaco impregnado), com baixa agressividade. A condição do rebolo empastado pode ser observada na Figura 27. Conforme o rebolo vai sendo limpo e, conseqüentemente dressado ao longo de um dado ensaio, o valor de agressividade se torna maior. Esse comportamento será melhor apresentado no próximo item desse trabalho.



Figura 27 - Fotografia do rebolo empastado com poros entupidos, antes do início de cada ensaio.

4.2 RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DAS ESTATÍSTICAS RMS, MVD E MARSE AO LONGO DA PASSADA DE DRESSAGEM

Como apresentado no Capítulo 3, o processo de obtenção das estatísticas foi, inicialmente, realizado para os dados do sinal puro de emissão acústica de cada passada ao longo de um determinado ensaio.

As Figura 28, Figura 29 e Figura 30 mostram o comportamento da estatística RMS ao longo da 1ª, 12ª e 24ª passadas, respectivamente, para o ensaio 01.

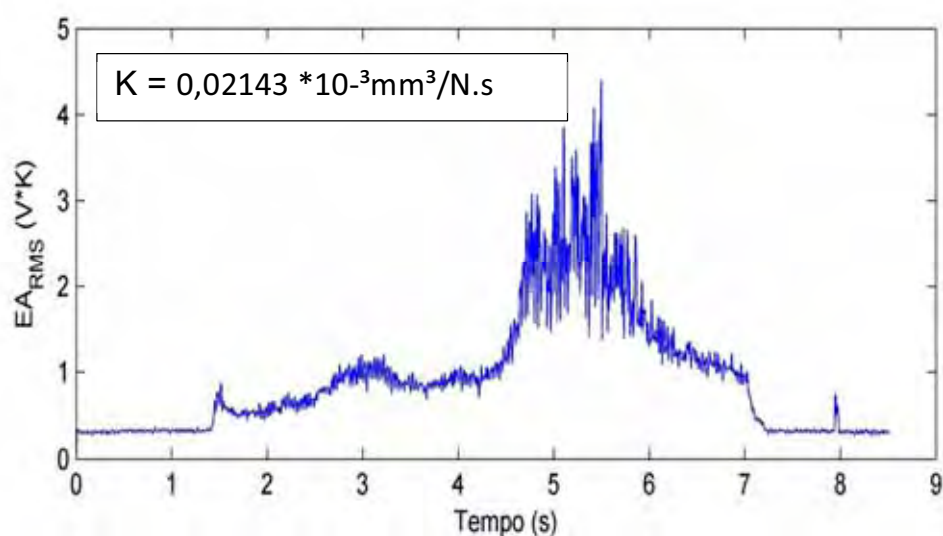


Figura 28 - EA_{RMS} referentes à 1ª passada do ensaio 01, remoção de 10 μm .

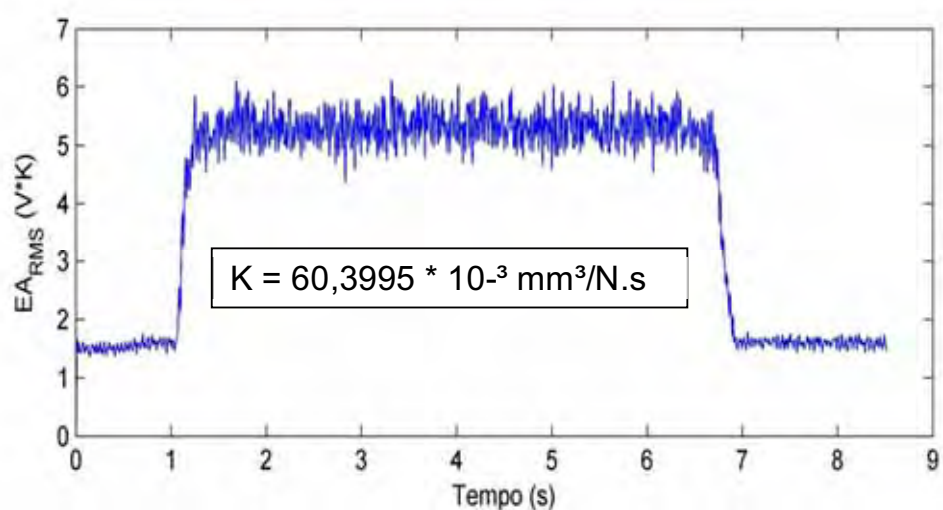


Figura 29 - EA_{RMS} referentes à 12ª passada do ensaio 01, remoção de 120 μm .

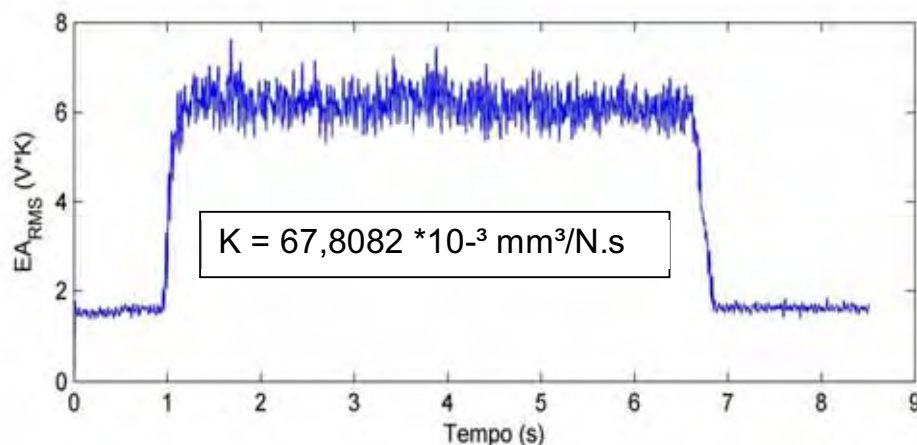


Figura 30 - EA_{RMS} referentes à 24ª passada do ensaio 01, remoção de 240 μm .

Verifica-se na Figura 28, da 1ª passada, que a estatística RMS ao longo da passada mostra claramente as irregularidades do rebolo, ou seja, caracteriza um rebolo empastado, sem capacidade de corte. No entanto, para as 12ª e 24ª passadas, o comportamento da estatística durante essas passadas é bem uniforme, conforme mostram as Figura 29 e Figura 30, respectivamente, caracterizando um rebolo com uma superfície mais regular e/ou dressado. Assim, a estatística RMS se mostra sensível às condições da superfície do rebolo, pois essas passadas são referentes às condições de dressagem mostradas anteriormente na Tabela 5, a qual contempla diferentes valores de agressividade para essas passadas.

As Figura 31, Figura 32 e Figura 33 apresentam os resultados da estatística MVD para o ensaio 01 nas 1ª, 12ª e 24ª passadas, respectivamente.

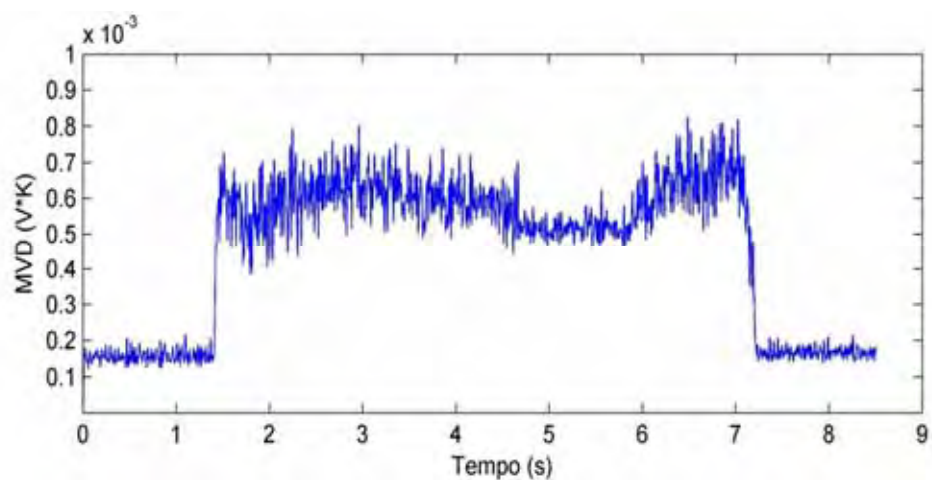


Figura 31 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 μm .

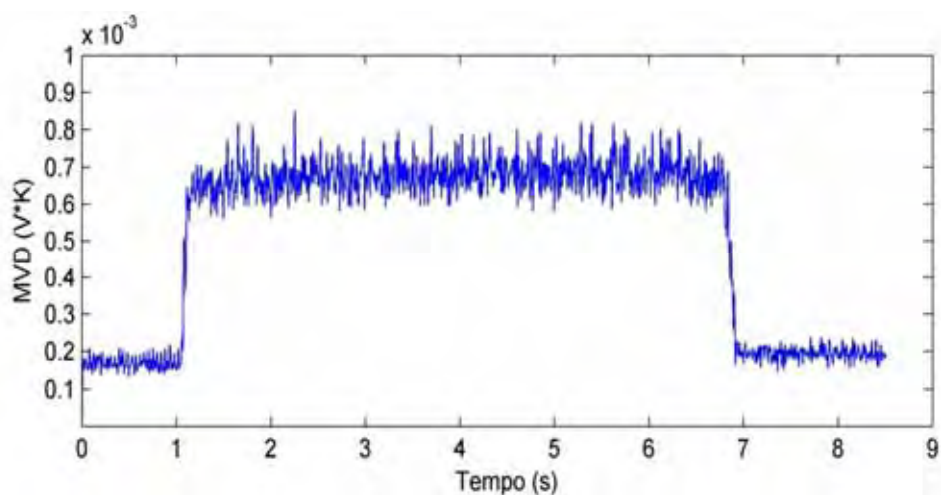


Figura 32 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 μm .

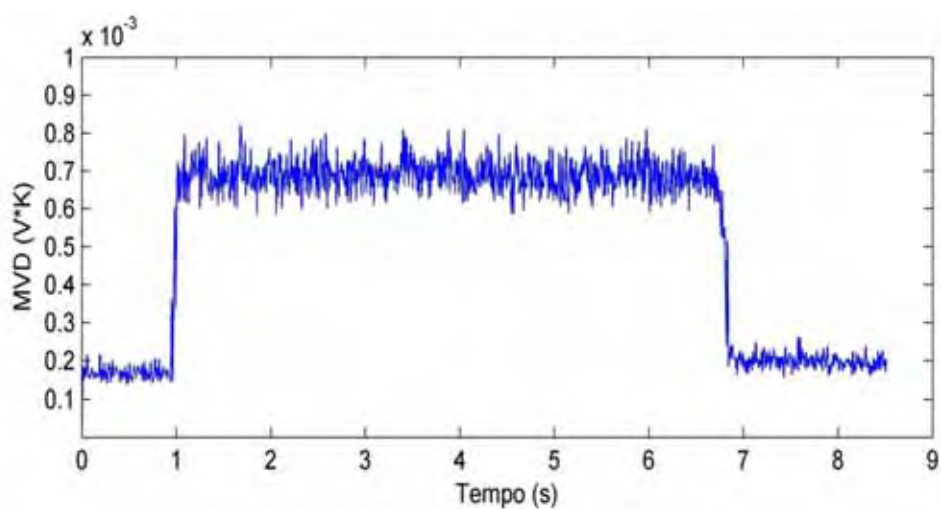


Figura 33 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

Observa-se para os resultados da estatística MVD um comportamento semelhante daquele da estatística RMS.

A Figura 31 mostra a condição do rebolo empastado na primeira passada do ensaio, em que o comportamento dos valores da estatística MVD traduz as irregularidades da superfície do rebolo nessa passada. No entanto, quando esse comportamento é comparado com aquele obtido pela estatística RMS, a sensibilidade aparentemente é reduzida para a estatística MVD. Uma análise mais detalhada seria necessária quanto à sensibilidade, e não será melhor explorada por não ser o foco deste trabalho.

As Figura 34, Figura 35 e Figura 36 apresentam os resultados da estatística MARSE para o ensaio 01 nas 1ª, 12ª e 24ª passadas, respectivamente.

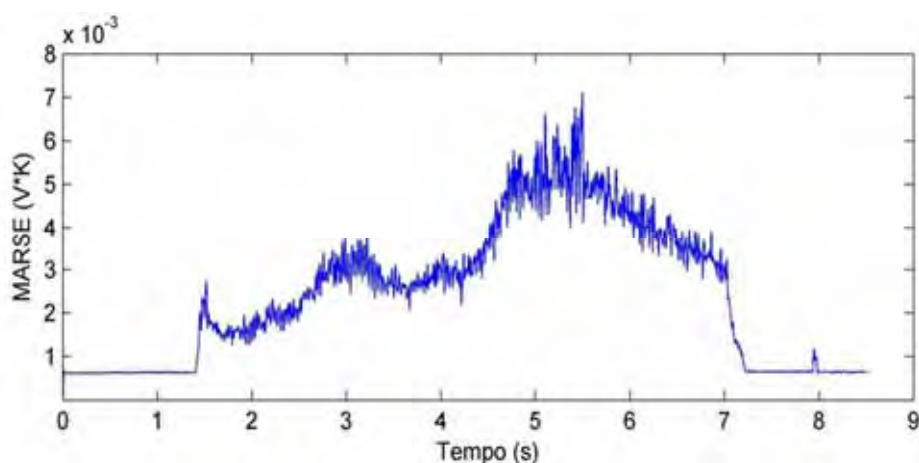


Figura 34 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 µm.

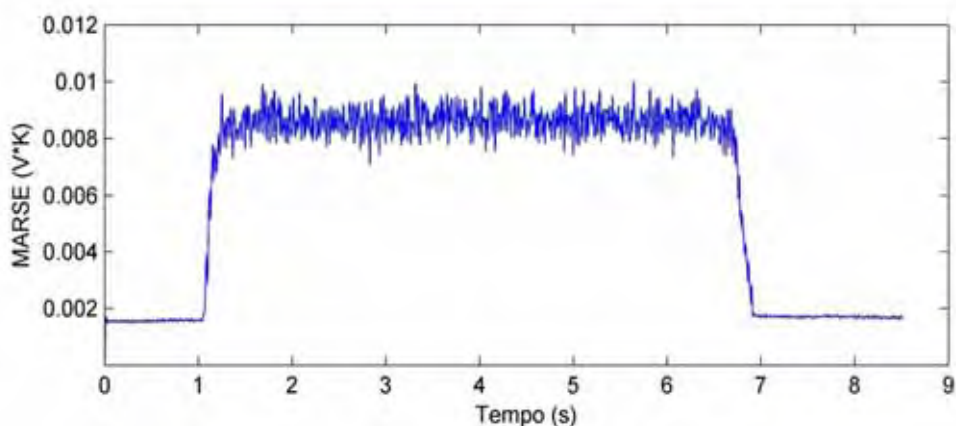


Figura 35 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 µm.

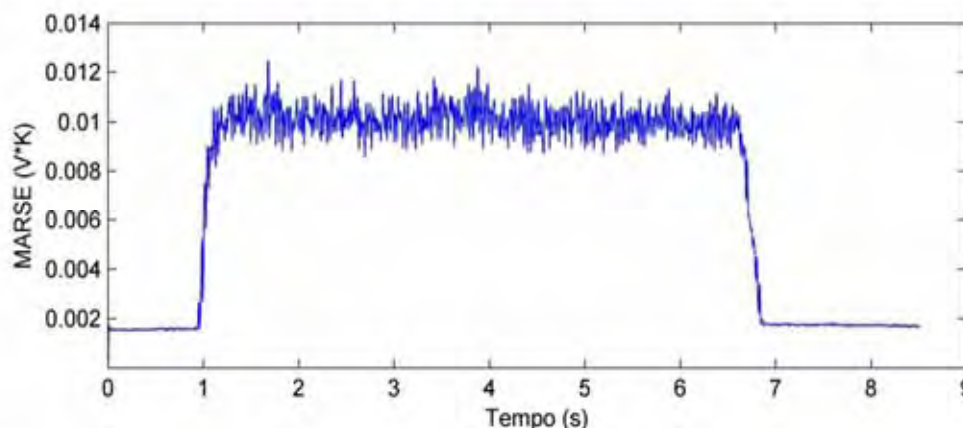


Figura 36 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

Observa-se também para essa estatística uma sensibilidade muito boa em caracterizar a condição da superfície do rebolo, como mostra o resultado obtido na 1ª passada apresentada na Figura 34, em que o rebolo se encontra irregular e empastado. Por outro lado, nas 12ª e 24ª passadas representam uma superfície do rebolo mais regular, os sinais se comportam mais uniformemente ao longo das referidas passadas.

O comportamento das estatísticas RMS, MARSE e MVD para os outros ensaios se apresentou de forma semelhante, e as mesmas discussões e análises podem ser consideradas. Esses resultados são mostrados no Apêndice A.

4.3 RESULTADOS DAS ESTATÍSTICAS RMS, MVD E MARSE AO LONGO DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM

A partir das estatísticas RMS, MARSE e MVD anteriormente discutidas para cada passada, obteve-se a média dos vetores de cada passada para comporem os vetores de médias e seus respectivos desvios-padrão para cada ensaio de dressagem realizado.

As Figura 37, Figura 38 e Figura 39 mostram os resultados dos valores médios das estatísticas RMS, MVD e MARSE para o Grupo I de ensaios. Os gráficos mostrados nessas figuras mostram também as regiões que definem a condição de afiação do rebolo, conforme critério discutido no Capítulo 3.

Para cada ensaio foi realizada uma regressão polinomial usando-se funções específicas do software MATLAB (*polyfit* e *polyval*), que podem ser observadas

pelas linhas contínuas nas curvas das figuras. Essa aproximação foi realizada para melhor visualização da tendência de comportamento das curvas.

Na Figura 37, observa-se um desvio inicial dos valores da estatística para o ensaio 03, sendo essa região destacada por um retângulo abrangendo esses valores.

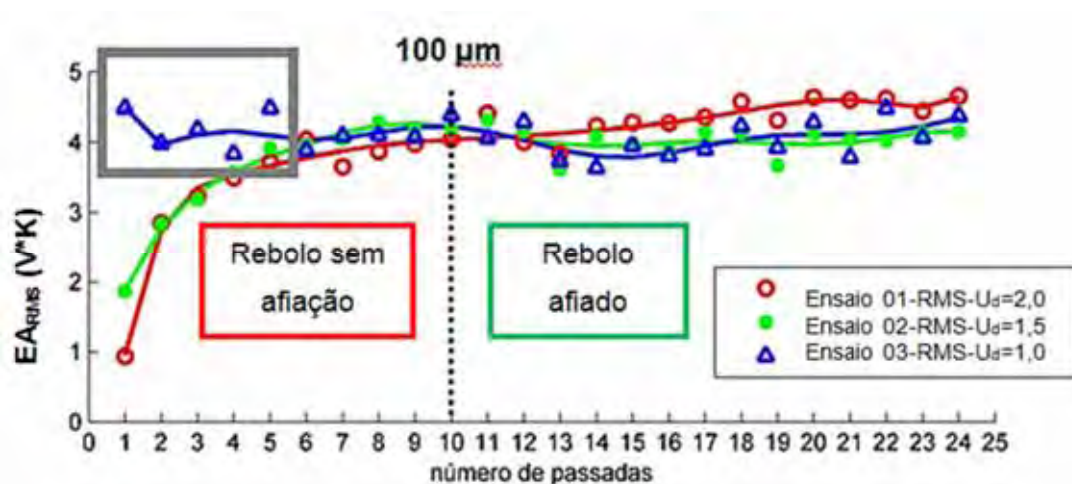


Figura 37 - Valores médios da estatística RMS ao longo das passadas para os ensaios 01,02 e 03.

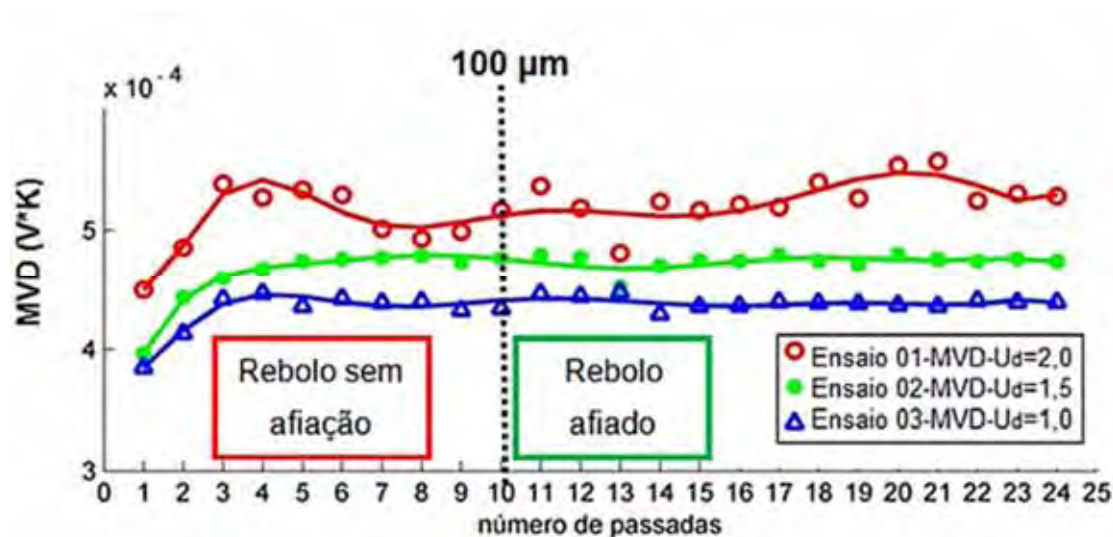


Figura 38 - Valores médios da estatística MVD ao longo das passadas para os ensaios 01, 02 e 03.

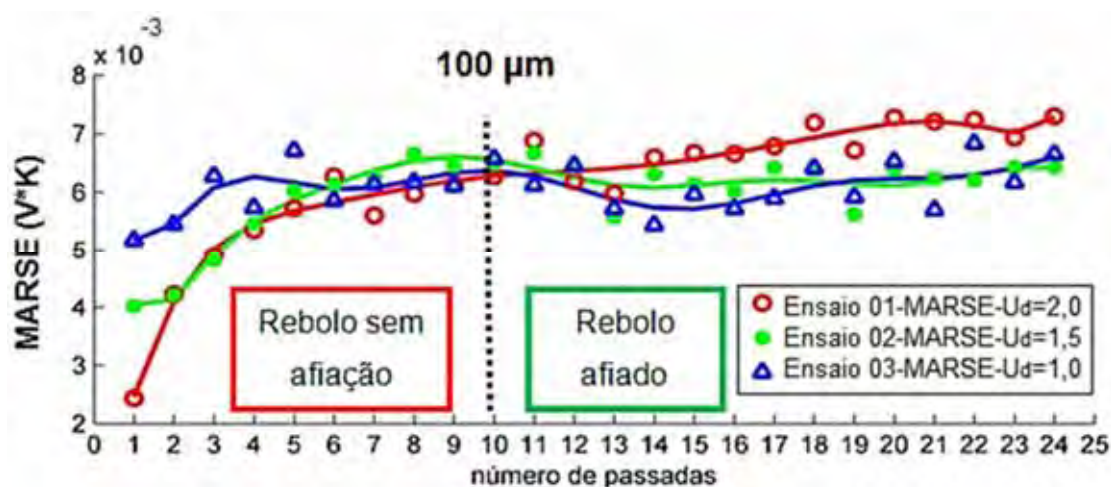


Figura 39 - Valores médios da estatística MARSE ao longo das passadas para os ensaios 01, 02 e 03.

De forma semelhante, as Figura 40, Figura 41 e Figura 42 mostram os resultados dos valores médios das estatísticas RMS, MVD e MARSE para o Grupo II de ensaios. Os gráficos mostrados nessas figuras apresentam as regiões que definem a condição de afiação do rebolo, conforme critério discutido no Capítulo 3.

Nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42 observa-se que os valores das estatísticas para o ensaio 04 ficaram em um patamar bem maior do esperado em comparação com os ensaios 05 e 06. Isto ocorreu, provavelmente, por causa de desajustes de ganhos do módulo de emissão acústica e/ou filtro analógico. Assim, para efeito de análise e entradas das redes neurais deste trabalho, o ensaio 04 não será considerado.

De forma semelhante aos ensaios do Grupo I, aproximações polinomiais foram realizadas para os ensaios do Grupo II, e mostradas como linhas contínuas nos gráficos.

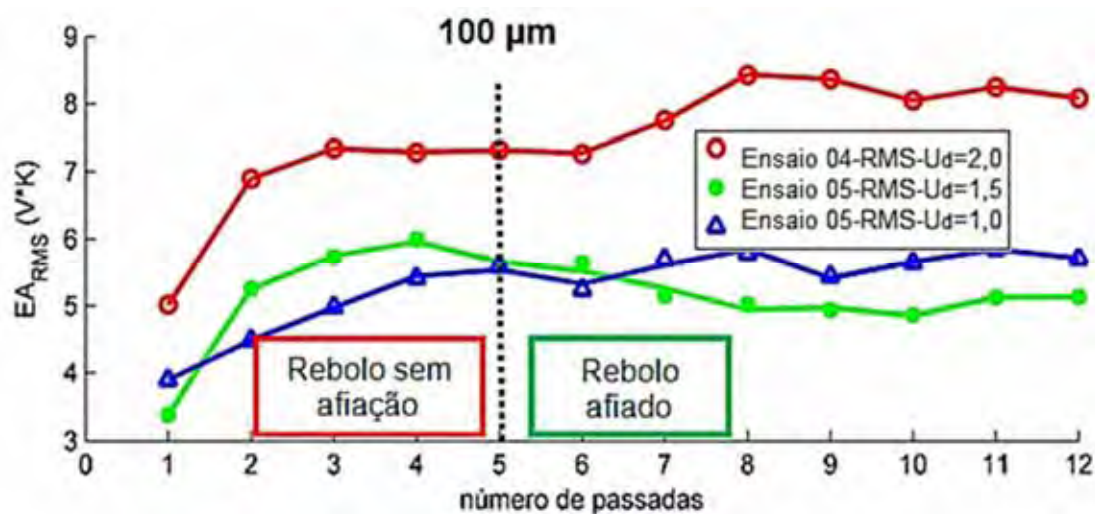


Figura 40 - Valores médios da estatística RMS ao longo das passadas para os ensaios 04, 05 e 06.

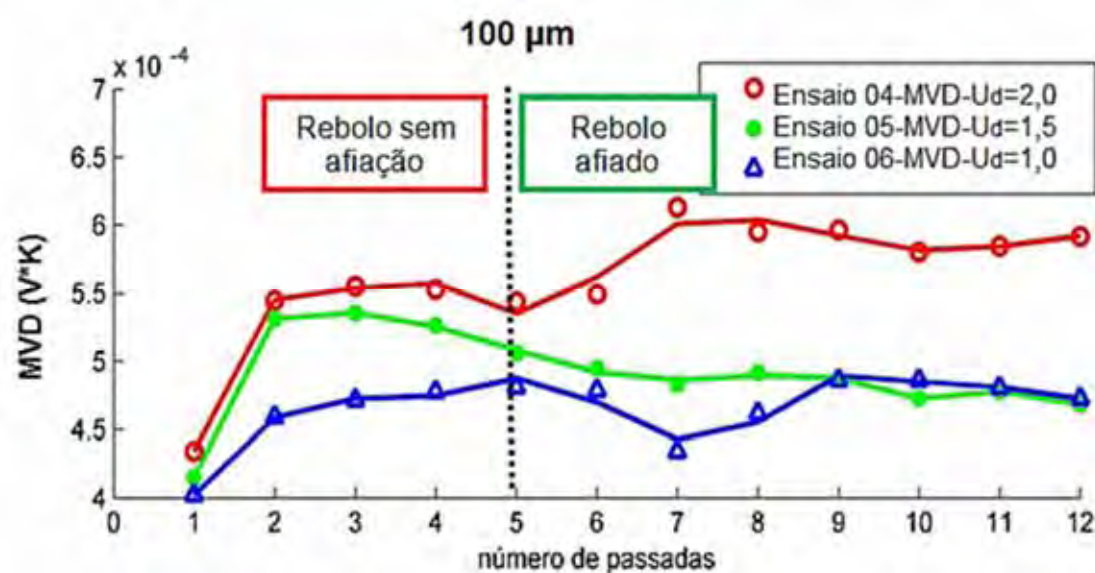


Figura 41 - Valores médios da estatística MVD ao longo das passadas para os ensaios 04, 05 e 06.

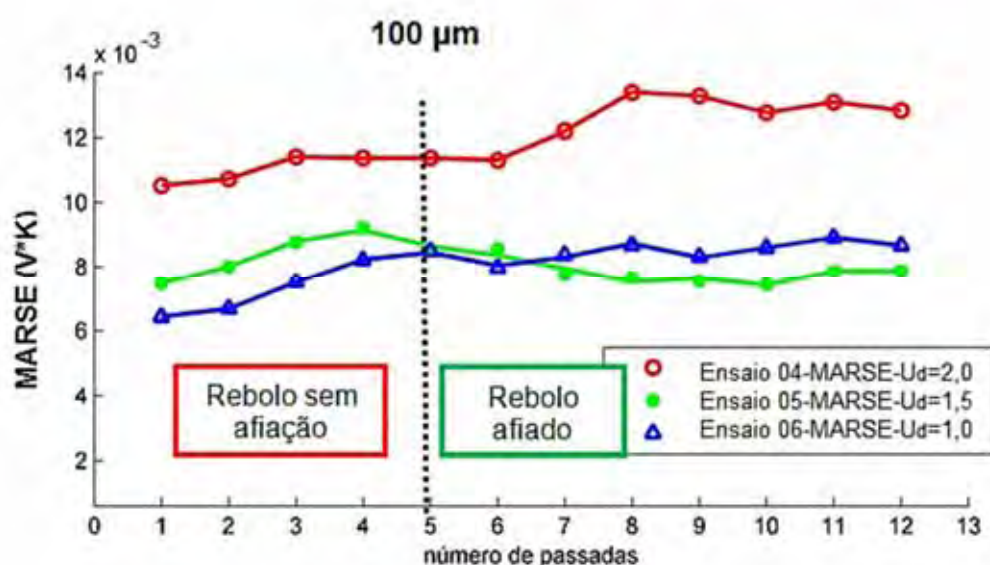


Figura 42 - Valores médios da estatística MARSE ao longo das passadas para os ensaios 04, 05 e 06.

A análise a seguir é apresentada para os resultados da estatística RMS.

Segundo a investigação realizada por Dornfed & Cai (1984), sobre o comportamento do sinal RMS de emissão acústica no processo de retificação, verificou-se que desse sinal aumenta com os efeitos combinados de desgaste do rebolo e do empastamento, e é proporcional a profundidade de corte.

No entanto, na operação de dressagem verifica-se o inverso, ou seja, quando o rebolo encontra-se “afiado”, sem o acúmulo de cavacos armazenados em suas porosidades, o nível de emissão acústica é maior quando comparado com a condição de rebolo empastado. Isso ocorre devido à uniformidade da superfície do rebolo quando dressado plenamente, e, conseqüentemente, o atrito gerado entre os grãos abrasivos e o dressador (diamante) produzem um nível de emissão acústica maior. Já quando o rebolo encontra-se impregnado de cavaco (rebolo empastado), o nível do sinal de EA é menor em função da irregularidade da superfície do rebolo, gerando menor atrito e menos impactos entre o dressador e o rebolo nesta condição. A presença dos cavacos impregnados nos grãos e poros do rebolo exerce, possivelmente, um papel de amortecedor dos níveis do sinal de EA. Conforme o rebolo vai sendo dressado, os cavacos vão sendo eliminados, ocorrendo o macro e o microefeito da operação de dressagem, e, conseqüentemente, as amplitudes do sinal de emissão acústica aumentam e tendem

a se estabilizar quando o rebolo já está dressado (“afiado”). A Figura 43 apresentada esquematicamente o rebolo sem empastamento e rebolo empastado (com cavacos impregnados), evidenciando o comportamento do sinal de EA_{RMS} .

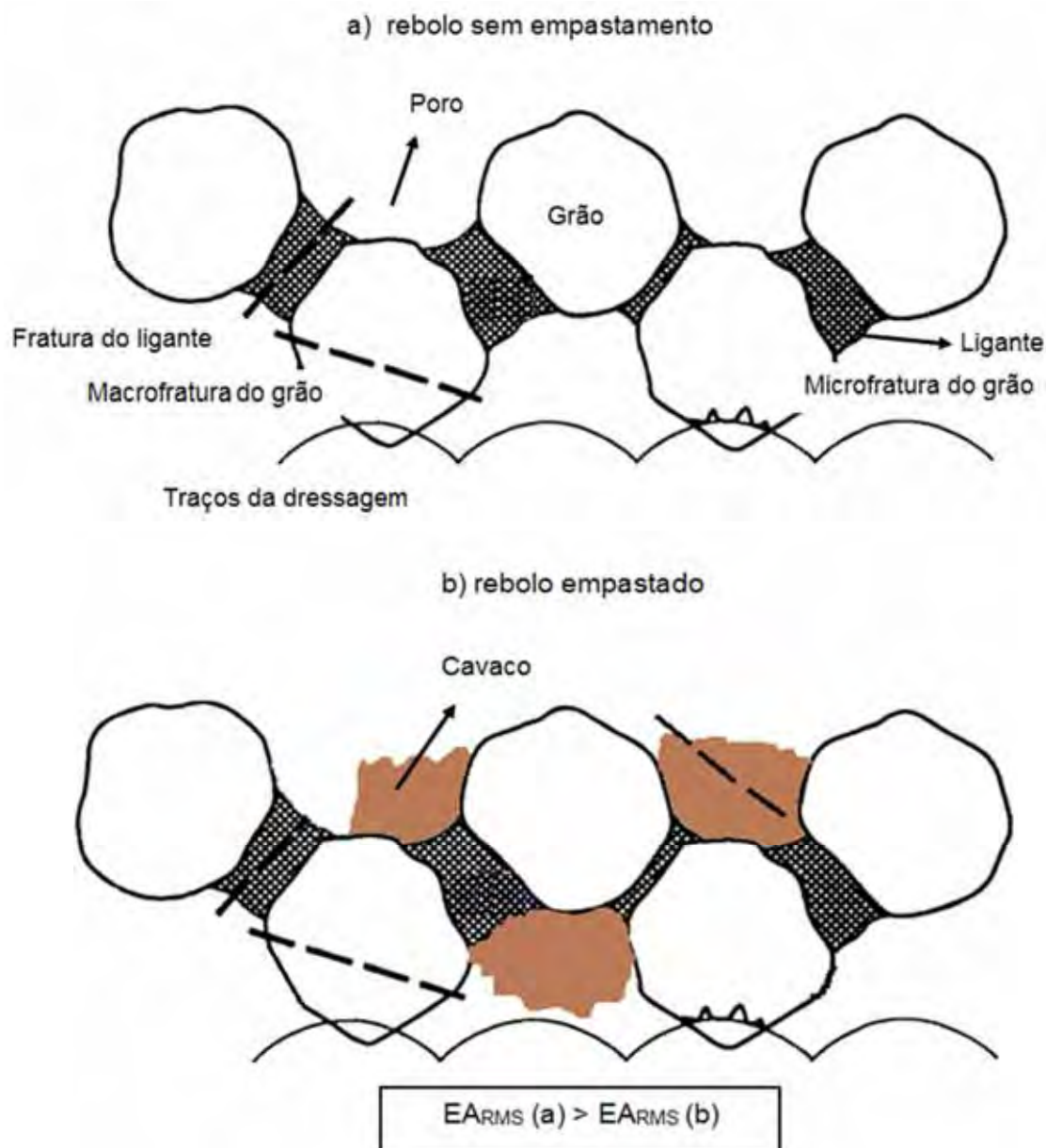


Figura 43 - Comportamento do sinal EA_{RMS} no rebolo (a) plenamente dressado (b) rebolo empastado, adaptado de (Chen & Rowe, 1996).

Assim, pode ser observado claramente para a estatística RMS de todos os ensaios que o seu comportamento possui valores baixos para o rebolo empastado, tendo um crescimento gradual conforme o rebolo sofre a limpeza, atingindo uma certa estabilização quando a dressagem se completa. Esse ponto de tendência à

estabilização é observado para todos os ensaios, e adotado nesse trabalho quando a profundidade total de dressagem atinge 100 μm . Pode-se dizer que, a partir deste ponto o rebolo está com a sua superfície limpa, recondicionada, e, portanto, apresentando uma dressagem plena.

Os estudos realizados por Aguiar *et al.*, (2009), os quais analisaram o monitoramento do processo de dressagem, vem confirmar o limiar de dressagem (100 μm) encontrado, bem como o comportamento dos sinais obtidos nesse trabalho, para as condições de dressagem aqui empregadas. De acordo com os resultados alcançados por esses autores, a partir de 100 μm de material removido, o rebolo encontra-se com a agressividade necessária para ser novamente utilizado.

Para as estatísticas MVD e MARSE observa-se o mesmo comportamento da estatística RMS, ou seja, um crescimento gradual do início do ensaio até um ponto onde ocorre uma tendência à estabilização (aproximadamente 100 μm de remoção).

Em resumo, as estatísticas RMS, MVD e MARSE se apresentaram como bons indicadores para o monitoramento da operação de dressagem, pois as curvas apresentaram um crescimento até certo ponto com uma tendência de estabilização. Esse comportamento possibilitou definir um limite (profundidade total de dressagem de 100 μm) que define as regiões de rebolo “afiado” e “sem-afiação”. A característica de crescimento dos valores das estatísticas até certo valor pode ser atribuída pela remoção dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga), fratura dos grãos que não se desgastaram por completo e irregularidade do rebolo no início do ensaio. Por outro lado, quando os valores da estatística não sofrem variações significativas, isto é, após algumas passadas, os grãos se apresentam com maior ancoragem na liga e o rebolo encontra-se mais regular.

4.4 ARQUITETURAS NEURAI SELECIONADAS E RESULTADOS

A partir do algoritmo de otimização de Cruz (2010), fixando-se as entradas das redes neurais (RMS, MARSE e MVD), e utilizando os parâmetros definidos nas Tabela 3 e Tabela 4 apresentadas no Capítulo 3, um processo automático de treinamento de várias arquiteturas neurais foi desenvolvido. Como resultado, obteve-se um total de 1935 arquiteturas de redes neurais treinadas. O treinamento, validação e teste de cada arquitetura neural foi realizado cinco vezes para garantir a

estabilidade e confiabilidade dos resultados obtidos, utilizando-se do método de validação cruzada.

Do total de 1935 arquiteturas de redes neurais, selecionou-se as 3 melhores arquiteturas para cada grupo de ensaios.

A Tabela 6 mostra as melhores arquiteturas (Arq.) obtidas para o Grupo I de ensaios.

Tabela 6 - Melhores arquiteturas neurais para os ensaios 01 e 02 (Grupo I).

Arq.	Entradas			Nº camadas escondidas	Nº de neurônios	Momento	Taxa de aprendizagem	Nº. médio Épocas	Erro médio (%)
1	RMS	MVD	MARSE	3	40; 40; 40	0,4	0,9	226	0,50
2	RMS	MVD	MARSE	3	40; 10; 20	0,9	0,5	128	0,54
3	RMS	MVD	MARSE	3	40; 10; 15	0,7	0,3	178	0,65

Na Tabela 6 é possível verificar que a primeira arquitetura foi a que apresentou o melhor resultado, indicando a menor porcentagem do erro médio quadrático obtido no treinamento. As outras duas arquiteturas (2 e 3) também apresentaram bons resultados, indicando baixos valores de erros.

A segunda e a terceira arquitetura comparadas com a primeira, embora apresentem uma porcentagem de erro médio maior, nota-se que a diferença entre esses erros é muito pequena. No entanto, observa-se que a quantidade de neurônios nas camadas escondidas é menor do que a arquitetura 1, o que possibilita maior agilidade e rapidez no processamento quando utilizadas.

As Figura 44 e Figura 45 apresentam as matrizes de confusão da repetição 1 e 3, respectivamente, referente a arquitetura 1 para o Grupo I de ensaio. Os resultados das outras repetições foram muito semelhantes, e, portanto, não serão mostrados e analisados. Nessas figuras, a classe 1 corresponde a condição do reboło dressado, e a classe 2 a condição do reboło não-dressado (sem capacidade de corte). As células da matriz na coloração verde correspondem aos verdadeiros positivos (posição 1,1) e verdadeiros negativos (posição 2,2); na coloração em vermelho correspondem aos falsos positivos (posição 1,2), e falsos negativos (posição 2,1).

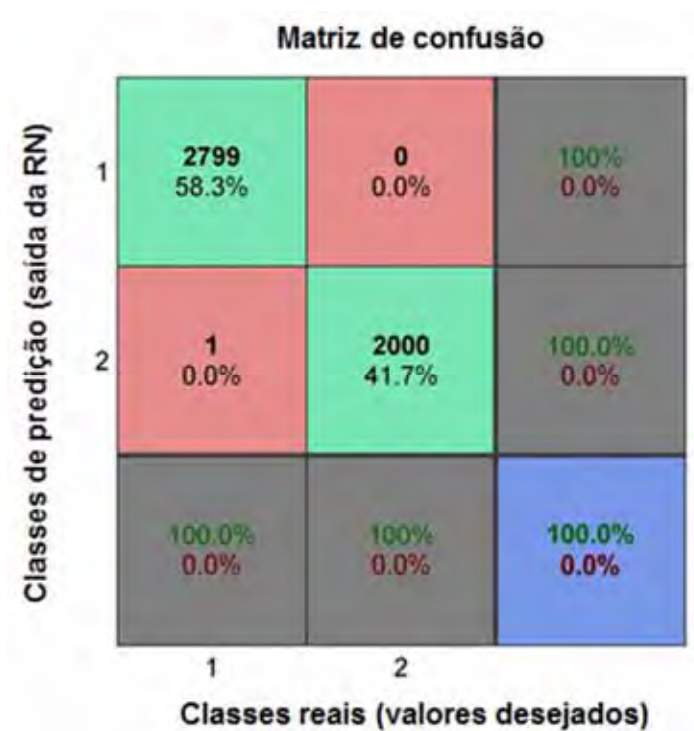


Figura 44 - Matriz de confusão da repetição 1, arquitetura 1, do Grupo I de ensaios

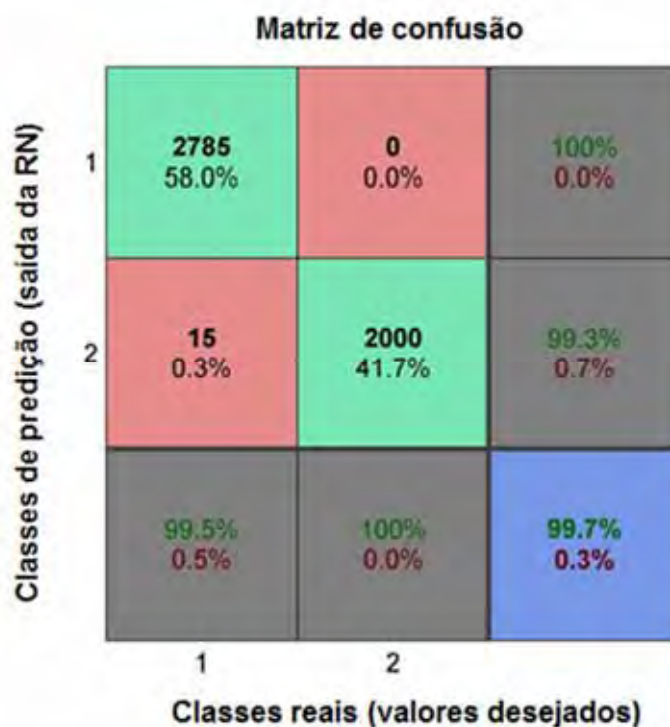


Figura 45 - Matriz de confusão da repetição 3, arquitetura 1, do Grupo I de ensaios

Observa-se nas Figura 44 e Figura 45 que os erros de classificação são muito pequenos para as duas repetições apresentadas. As matrizes de confusão trazem também informações sobre as porcentagens de falsos positivos e falsos negativos, as quais são nulas ou desprezíveis para essas repetições. A informação da última linha dessas matrizes (em cinza) refere-se à sensibilidade e a especificidade, respectivamente, da rede neural no processo de classificação da ferramenta.

Cabe mencionar que a sensibilidade e a especificidade são parâmetros estatísticos que auxiliam na análise de um sistema de classificação de padrões. De acordo com Wikipedia (2012), a sensibilidade é uma medida da proporção de verdadeiros positivos devidamente identificados (para o presente trabalho significa a porcentagem de acertos que a rede neural apresentou classificando o rebolo como dressado). A especificidade representa a medida da proporção de verdadeiros negativos devidamente identificados (porcentagem de acertos que a rede neural apresentou classificando o rebolo como não-dressado).

Vale ressaltar que a rede apresentou alta sensibilidade na capacidade de identificar as informações pertencentes à classe dos valores verdadeiros positivos, o que permite identificar corretamente as condições do rebolo como estando dressado. A rede também demonstrou alta especificidade sendo capaz de identificar as informações pertencentes à classe dos valores verdadeiros negativos, ou seja, identificando corretamente as condições do rebolo como não dressado. Verificou-se também, que a rede teve um bom desempenho na classificação da identificação das classes pertencentes aos falsos positivos e à classe pertencente aos falsos negativos. A rede apresentou uma porcentagem de erro muito baixa, o que é de extrema importância, pois demonstra que dificilmente o rebolo será classificado de forma incorreta, prevendo identificar todos os rebolos dressados no grupo de rebolos dressados, (sensibilidade de 100%) e não prevendo qualquer rebolo não dressado no grupo como sendo dressado (especificidade de quase 100%).

Observa-se na matriz de confusão das Figura 44 e Figura 45 a ausência de falsos positivos, ou seja, nenhuma classificação identificada como rebolo dressado estando o mesmo não-dressado. Isto implicaria, caso ocorresse, na utilização de um rebolo não-dressado para retificar uma dada peça, e, conseqüentemente, um resultado de acabamento da peça fora das especificações, ou mesmo a perda da peça.

A mesma análise pode ser feita para os falsos negativos produzidos por essa arquitetura, como mostram as Figura 44 e Figura 45. Nota-se que a porcentagem de falsos negativos é extremamente baixa, o que é muito favorável como já mencionado anteriormente. No caso de se ter uma rede neural que produzisse um número considerável de falsos negativos, significaria classificar um rebolo não-dressado estando o mesmo dressado. A implicação disso acarretaria na continuação do processo de dressagem, e, conseqüentemente, em uma remoção de material do rebolo desnecessária, aumentando o tempo e custos de produção.

Assim, o alto índice de acertos produzidos pela arquitetura 1 para classificação da condição da superfície do rebolo permite sua utilização em um sistema de monitoramento online nas empresas dependentes desse processo.

A Tabela 7 mostra as melhores arquiteturas obtidas para o Grupo II de ensaios, sendo realizada de forma semelhante a do Grupo I.

Tabela 7 - Melhores arquiteturas neurais para os ensaios 05 e 06 (Grupo II)

Arq.	Entradas			Nº camadas escondidas	Nº de neurônios	Momento	Taxa de aprendizagem	Nº médio Épocas	Erro médio (%)
1	RMS	MVD	MARSE	2	20; 10; 0	0,3	0,9	94	0,21
2	RMS	MVD	MARSE	3	15; 15; 15	0,9	0,5	51	0,25
3	RMS	MVD	MARSE	3	40; 20; 15	0,8	0,5	59	0,25

Na Tabela 7 é possível verificar que para o Grupo II de ensaios a primeira arquitetura também foi a que melhor resultado apresentou, indicando a menor porcentagem do erro médio quadrático obtido no treinamento. As outras duas arquiteturas (2 e 3) também apresentaram um índice alto de classificação, traduzido pelos baixos erros médios obtidos.

Quando se compara a arquitetura 1 (menor erro obtido) com as outras duas, observa-se que os erros são aproximadamente os mesmos, porém o número de camadas escondidas é menor para a arquitetura 1, o que representa uma rede com processamento mais rápido e de mais fácil implementação.

A matriz de confusão para as repetições 1 e 3 é apresentada na Figura 46, referente a arquitetura 1 para o Grupo II de ensaio. As outras repetições não são mostradas por apresentarem resultados semelhantes.

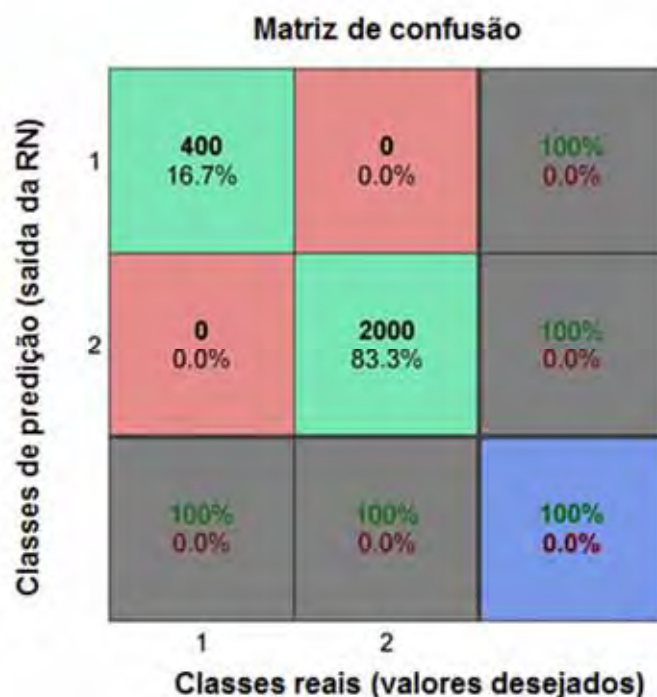


Figura 46 - Matriz de confusão da repetição 1 e 3, arquitetura 1, do Grupo II de ensaios

Como mostrado na Figura 46, as repetições 1 e 3 produziram a mesma matriz de confusão, ou seja, a mesma porcentagem de acertos. Observa-se que para o treinamento desse grupo de ensaios essas repetições produziram um sistema de classificação com 100% de acertos. Este resultado mostra a eficiência de 100% da arquitetura escolhida para essas repetições. No entanto, vale ressaltar que a rede neural nem sempre acertou 100% na classificação, como mostrado na Tabela 7, onde o erro médio observado para as cinco repetições foi de 0,21%. Ainda assim, esse erro é considerado muito pequeno, senão desprezível, e, portanto, a arquitetura neural escolhida pode ser considerada como plenamente satisfatória no problema de classificação da condição da superfície do rebolo.

As porcentagens de falsos positivos e falsos negativos produzidos por esta arquitetura são zero ou valores desprezíveis, como mostradas na tabela de confusão para as repetições 1 e 3. Assim, essa arquitetura é viável na implementação de um sistema inteligente de monitoramento da operação de dressagem nas empresas que utilizam o processo de retificação.

5 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, foi possível verificar que as curvas dos sinais de emissão acústica juntamente com as outras duas estatísticas, forneceram informações importantes no processo de monitoramento da dressagem, o que viabilizou analisar o comportamento dos sinais obtidos nos ensaios.

As estatísticas RMS, assim como as estatísticas MVD e MARSE iniciam-se com valores baixos, com uma tendência de crescimento e estabilização no decorrer de cada ensaio, conforme a dressagem do rebolo ocorre.

Pela análise das curvas obtidas para as estatísticas RMS, MVD e MARSE, pode-se extrair um limiar de 100 μm de remoção de material do rebolo, o qual define as regiões onde o mesmo se encontra ou não dressado. Essa informação é de grande importância no processo de retificação, pois impede que a peça continue sendo retificada sem que a ferramenta de corte esteja atendendo as condições necessárias para a sua utilização.

Com base nas estatísticas estudadas, foi possível testar muitas arquiteturas de redes neurais do tipo MLP, visando à classificação das condições da superfície do rebolo. Utilizando-se um algoritmo de otimização para automatizar o processo de treinamento, validação e testes das redes neurais, um número de 1935 arquiteturas foram treinadas, sendo que cada arquitetura foi treinada 5 vezes para garantir a sua estabilidade e confiabilidade.

Os resultados obtidos pelas melhores arquiteturas de redes neurais produziram um índice de sensibilidade e especificidade muito elevado, atingindo valores próximos de 100% de acertos na classificação.

É importante salientar que os resultados obtidos nesse trabalho são válidos apenas para as condições de dressagem, tipo do rebolo e dressador de ponta única empregados.

SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

- ✓ Emprego de filtros digitais com base no estudo do conteúdo harmônico do sinal puro de EA, obtendo-se faixas de frequências mais sensíveis e características da operação de dressagem. Consequentemente, novos vetores da estatística RMS, MARSE e MVD são obtidos para essas faixas de frequências, com posterior utilização de redes neurais para a classificação das condições de dressagem.
- ✓ Decomposição do sinal puro de emissão acústica com a técnica de Wavelets, considerando frequências mais relacionadas com as condições de dressagem, e a utilização dos vetores característicos para o treinamento de novas arquiteturas neurais.
- ✓ Estudo da influência de outras estatísticas aplicadas ao sinal puro de emissão acústica quando da operação de dressagem, tais como Relação de Potência (ROP), constante de alarme falso (CFAR), contagem de eventos por um determinado limiar (*Counts*), Curtose, obliquidade ou assimetria (*Skewness*), dentre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15230:2008), <http://www.abntcatalogo.com.br>. Acesso em 20 maio de 2012.

AGUIAR, P. R. PAULA, W. C. F. BIANCHI, E. C. ULSON, J. A. C.; CRUZ, C.E.D. Analysis of forecasting capabilities of ground surfaces valuation using artificial neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 32, n. 2, p. 146–153, 2010.

AGUIAR, P. R., SOUZA, A. G. O., BIANCHI, E. C., LEITE, R. R. & DOTTO, F. R. L. Monitoring the dressing operation in the grinding process. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, Vol. 5, No. 1, pp. 3-22, 2009.

AGUIAR, P. R., SERNI, P. J. A., DOTTO, F. R. L. & BIANCHI, E. C., In-process grinding monitoring through acoustic emission, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, Vol. 28, No. 1, pp. 118– 124, 2006.

AGUIAR, P.R., FRANÇA, T.V. & BIANCHI, E.C., Roughness and roundness prediction in grinding. **Proceedings of the 5th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering** (CIRP ICME), 25-28 July, Italy, 2006,183 -188.

AGUIAR, P. R., DOTTO, F. R. L. & BIANCHI, E. C. Study of threshold to burning in surface grinding process”, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, Vol. 27, no. 2, pp. 150-156, 2005.

AGUIAR P. R., BIANCHI, E. C. & OLIVEIRIA, J. F. G. A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power signals”, **CIRP Journal of Manufacturing Systems**, Paris, Vol. 31, No. 3, pp. 253–257, 2002.

ALVES, M. C. S. ; Bianchi, E. C. ; AGUIAR, P. R. . Influência das técnicas de mínima quantidade de lubrificante, refrigeração otimizada e refrigeração convencional na qualidade de peças produzidas com aços endurecidos no processo de retificação. Ingeniare. **Revista Chilena de Ingeniería**, v. 18, p. 228-234, 2010.

BADGER, J. A., TORRANCE, A. Understanding the causes of grinding burn helps alleviate the problem”, Cutting Tool Engineering CUTTING TOOL ENGINEERING Magazine, U.S., December 2000/volume 52/ number 12.

BASERI, H., Workpiece Surface Roughness Prediction in Grinding Process for Different Disc Dressing Conditions, International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010) Department of Mechanical Engineering Babol University of Technology Babol, Iran,p. 209-212, 2010.

BATALHA, G. F.; MURANAKA, Carlos Shiniti ; CISNEROS, César Abraham Flores . Contribuição ao desenvolvimento da monitoração de processos de fresamento via emissão acústica. In: **III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2004, Belém - PA. Proc.. Belem - PA : ABCM-UFPA, 2004. v. 1. p. 1-10.

BISHOP, C. M.; **Neural Networks for Pattern Recognition** – Oxford University Press, 1995.

BIANCHI, E. C., MONICI, R. D., NETO, L.D. , AGUIAR, P. R., GUERMANDI, L. G. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. *Cerâmica* vol.57 n.344, São Paulo, ISSN 0366-6913 Oct./Dec. 2011.

BIANCHI, E.C.; FERNANDES, O.C.; MOGAMI, O.; SILVA JÚNIOR, C.E.; AGUIAR, P.R. Avaliação do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Dúcteis. Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV. Recife/PE, 17 a 20 de junho, p. 387-392, 1996.

BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. G. Comportamento das forças de corte em rebolos de CBN com ligante resinóide e sua influência no desempenho do processo de retificação. *Revista Engenharia e Ciências Aplicadas*. São Paulo, V.2, p. 79 - 90, 1994/1995. ISSN - 0104-6314.

BLUM, T., INASAKI, I. A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **Journal of Engineering for Industry**. Vol 112. Pp. 203 -211. 1990.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. Redes neurais artificiais: teoria e aplicações. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000, 262p.

CAMBIELLA, A., BENITO J. M., PAZOS C., COCAA J., HERNANDEZ A., FERNANDEZ J. E. Formulation of emulsificable cutting fluids and extreme pressure behavior”, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 184, p.139-145, 2007.

CAI, R.; ROWE, W. B. “Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding”. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**: Design, Research and Application, vol. 44, p. 1391-1402, 2004.

CATAL, R. E.; BIANCHI, E. C. ; AGUIAR, P. R.; ALVES, M. C. S. Influence of cutting fluid on the roundness, residual stress and microstructure when grinding VC131 steel. *Diamond Tooling Journal*, vol. 2-10, p. 34-38, 2010.

CHEN, X.; ROWE, W.B. - Analysis and simulation of the grinding process. Part i: generation of the grinding wheel surface **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 36, p. 871-882, 1996.

COELHO, R.T. **Estudo experimental da profundidade de dressagem de rebolos na retificação de precisão usando método do disco retificado** – Universidade de São Paulo – USP – Escola de Engenharia de São Carlos – 1991.

CRICHIGNO, J.M.F., 1994, “Simulação numérica do processo de lapidação plana como ferramenta para otimização do processo”, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 142p.

CRUZ, C.E.D. Estimação do diâmetro e rugosidade em um processo de furação utilizando multi sensores e redes neurais artificiais. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2010.

DAVIM, J. P. **Machining: fundamentals and recent advances**. 2nd ed. London: Springer Verlag, 2008.

DEGARMO, E.P., BLACK, J.T., KOHSER, R.A. **Materials and Processes in Manufacturing**. 9ª Edição, Wiley, Hoboken, 2003

DERKX, J. M.; HOOGSTRATE, A. M.; SAURWALT, J. J.; KARPUSCHEWSKI, B. "Form crush dressing of diamond grinding wheels". **CIRP Annals**. Vol. 57, No.1, pp. 349-352, 2008.

DESTRO, R. S.; BIANCHI, E. C.; OIKAWA, M. H.; SOUZA, R. M.; DAMASCENO, R. F.; AGUIAR, P. R.; ALVES, M. C. S. Análise de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul-RS. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Caxias do Sul-RS, 2011. v. CD-ROM. p. 1-11

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 7ª Edição, 2010.

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

DORNFELD, D. & CAI H. G. "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission". **Journal of Engineering for Industry**, Vol. 106. Pp -28-33, 1984.

DOTTO, F.R. L., AGUIAR,P.R., BIANCHI, E.C., SERNI, P.J.A. & THOMAZELLA,R. Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring. **Journal of Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, XXVIII, nº2. 2006, 153-160.

DUTTA, T.; GHOSAL, S.; BARNERJEE, S. Development of a simple technique for improving the efficacy of fluid flow through the grinding zone. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 197, 2008, p. 306-313.

DYMINSKI, A. S. **Análise de problemas geotécnicos através de redes neurais**. Tese de Doutorado, PUC – Rio de Janeiro, 2000.

FATHIMA, K.; KUMAR, A. S.; RAHMAN, M.; LIM, H. S. **A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding**. *Wear*. 254, pp.1247-1255, 2003.

FELIPE JUNIOR, J.; OLIVEIRA, J. F. G. A retificação inteligente é mais confiável e menos dependente do operador. **Máquinas & Metais**, n. 386, p. 80-98, 1998.

FELIPE JUNIOR, J. **Contribuição para implementação de funções de retificação inteligente (R.I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica.** Tese de doutorado, EESC-USP, São Carlos, 138p. 1996.

FIOCCHI, A. A.; SANCHEZ, L. E. A.; OLIVEIRA, J. F. G.; MARINESCU, I. D. . Investigation on surface finishing of components ground with lapping kinematics: Lapgrinding Process. *Advanced Materials Research*, v. 223, p. 879-887, 2011.

FOODY, G.M. ARORA, M. K. An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. **Internacional Journal of Remote Sensing**, v.18, n.4, p. 799 – 810, 1997.

GAO, R.X., 2007, “Monitoring Systems for Grinding Processes, Springer Series in Advanced Manufacturing”, pp. 83- 107

GERÔNIMO, T. M. ; CRUZ, C. E. D.; CASTRO Neto, F. ; AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, E. C.; CAMPOS, F. S. **Contribuição à supervisão do processo de furação com foco na estimação do diâmetro do furo por redes neurais artificiais.** In: X Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (CIBEM 10), 2011, Porto. v. 1. p. 3221-3226.

GONÇALVES, A. R. Redes neurais. Apostila de curso da Unicamp. 2009. Disponível em <www.dca.fee.unicamp.br/~andrerico>

GRAF, W. „Cylindrical Grinding. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.

HAGAN MT, DEMUTH HB, Beale M., **Neural network design**, Boston PWS Publishing Company, 1996.

HAHN, R. S & LINDSAY, R.P. The influence of process variables on material removal, surface integrity, surface finish and vibration in grinding. In : **International Machine Tool Design and Research conference**, 10 . September 1969. P95 – 117.

HARTMANN, F. R., **Redes Neurais, Conceitos Básicos e Análise.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos, UNISINOS - RS, 2002.

HASSUI, A.; DINIZ A. E. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 43, p. 855–862, 2003.

HASSUI, A. **Estudo de vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho.** 2002. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

HAYKIN, Simon. **Neural networks: a comprehensive foundation.** New York: Macmillan College Publishing, 1994.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation.** 2nd ed. Delhi: Pearson Prentice Hall, 1999.

HAYKIN, S. Redes Neurais: princípios e prática. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

HELLMEISTER, C. F. L. P., **Monitoramento da dressagem na retificação através do sinal puro de emissão acústica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.

HITCHINER, M. P. O emprego da alta velocidade com rebolos de CBN. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, no 428, p. 116-133, setembro, 2001 (a).

INASAKI, I., KARPUSCHEWSKI, WEHMEIRER, M. **Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic emission Sensors** - Department of System Design Engineering, Keio University, Yokohama-shi, Japan Received on December 20, 2000.

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

INASAKI, I.; OKAMURA, K. Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 34, ed. 1, p. 277-280, 1985.

IRANI, R.A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, ed. 15, p. 1696-1705, 2005.

JACKSON, M.J., KHANGAR, A., CHENC, X., ROBINSON, G.M., VENKATESH , V.C., DAHOTRE N.B., 2007, "Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 185, pp. 17–23.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. "Microscale wear of vitrified abrasive materials". *Journal of Materials Science*. Vol. 39, pp. 2131-2143, 2004.

JACKSON, M. J.; DAVIS, C. J.; HITCHINER, M. P.; MILLS, B. High-speed grinding with CBN grinding wheels – applications and future technology. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol.110, pp. 78-88, 2001

JOHNSON, C. D. **Process Control Instrumentation Technology**, Prentice Hall, 5 ed. New Jersey, 1997, 638 p.

KONIG, W.; MEYEN, H. P. AE in grinding and dressing: accuracy and process reliability. International Grinding Conference, v. 4, p. 220, 1990.

KIM, S.; AHN, J. H. "Decision of dressing interval and depth by the direct measurement of the grinding wheel surface". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 84, pp. 190-194, 1999.

KING, R. I., HAHN, R. S., **Handbook of Modern Grinding Technology**. 3ª Ed., New York, Chapman And Hall, 1992.

KLOCHE, F.; BRINKSMEIER, E.; EVANS, C.; HOWES, T.; INASAKI, I; MINKE, E.; TONSHOFF, H. K. WEBSTER, J. A.; STUFF, D. High- Speed Grinding – Fundamentals and State of the Art in Europe, Japan, and, the USA. *Annals of CIRP*, v. 46/2, p.715 – 724, 1997

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. Appropriate conditioning strategies increase the capabilities of vitrified-bond CBN grinding wheels. *CIRP Annals*. Vol. 44, No.1, pp. 305-310, 1995.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. „Fertigungsverfahren band2: Shchleifen, Honen, Läppen“. Band 2.VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1980.

KUO, B. C. **Digital Control Systems**. 2^a Ed. (Indian Edition), New Delhi, Oxford University Press, 2007, 751p.

KWAK, J.S. & HA, M.K. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals, **Journal of Materials Processing Technology**, 147, 2004, 65-71.

LEE, D.E.; HWANG, I.;VAENTE, C. M. O; OLIVEIRA, J.F.G; DORNFELD, D. A. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. **Internacional of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 46, 2 ed, p. 175-188, 2006

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

LI. X. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning. **Internacional Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol 42.pp 157-165, 2002

LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. A thermal model of the wet grinding process. **Journal of Materials Processing Technology**, nº 101, 2000, p. 137-145.

LIAO, T. W. **Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding whell condition monitoring**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol 23, Issue 1, February 2010, Pages 74-84, ISSN 0952-1976.

LIMA, A.; GÂMBARO, L. S.; VIEIRA JUNIOR, M.; BAPTISTA, E.A. The Use of Cylindrical Grinding to Produce a Martensitic Structure on the Surface of 4340 Steel **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. Copyright © 2011 by ABCM January-March 2011, Vol. XXXIII, Nº. 1**

LINKE, B. – Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels- **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Volume 57, Issue 2, 2008, Pages 345–348

LIU, J. B. **Monitoring the precision machining process: Sensors, signal processing and information analysis**. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, USA, 1991.

MALKIN, S. & ANDERSON, R.B. “Termal Aspects of Grinding. Part 1: Energy Partition” ASME. **Journal of Engineering for Industrial**, vol. 96, p. 1177, 1974.

MALKIN, S. **Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives**. 1.ed. Chichester: Ellis Norwood Ltd., 1989, 274 p. ISBN 0-85312-756-5.

MALKIN, S., GUO. C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. New York: 2ª ed. Industrial Press, 2008. 372p.

MARINELLI, N., COELHO, R. T. & OLIVEIRA, J. F. G. Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina. **Revista Máquinas e Metais**, Vol. 1, n. 388, pp. 56-73, 1998.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B. & INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 1ª. Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, London, New York, 2007.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. 1ª.ed. Norwich, William Andrew Inc, 2004.

MATSUMOTO, H.; DINIZ, A.E. Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor. In: **14º COBEM**. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP. Brasil, 1997

MILTON C. SHAW, "Principles of abrasive processing," Clarendon Press, Oxford, 1996.

MINKE, E. Handbuch zur Abricht technick. Riegger Diamantwerkzeuge GMBH, 1999.

NDT RESOURCE CENTER, Introduction to Acoustic Emission Testing. Disponível <http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm>. Acesso em: 10 de março de 2012.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems**. 2nd ed. Harlow: Addison-Wesley, 2005.

ODEBRECHT, O. **Dressamento de rebolos de óxido de alumínio microcristalino com dressadores fixos**. Tese de mestrado, UFSC, Florianópolis, 2003.

OLIVEIRA, J.F.G., 1989. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Publicação 048/89 da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos-SP.

OLIVEIRA, J. F. G., BIANCHI, E. C. Grinding process dominance by means of the dressing operation. In: Twenty - Ninth International Matador Conference, 1992, p. 547-550

OLIVEIRA, J.F.G, COELHO, R.T., TUNDISI, J.E.M., GOMES, J. J. F., BELLINI, P. A new system to get information about the grinding wheel performance", abrasives. Magazine – april/may, p. 24-30, 2000.

OLIVEIRA, J. F. G., SILVA, E. J., BIFFI M. **New Architecture Control System for an intelligent High Speed Grinder**. Abrasives Magazine – October/November, p. 1-8, 2002.

PATTINSON, E.J. & J. LYON, "The collection of data for the assessment of grinding wheel dressing treatment," Proceedings of the 15th International Machine Tool Design and Research Conference, Vol. 15, 1975, pp. 317-323

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

PINTO, C. F. C. ; SILVA, R. R. ; CALÔBA, L. P. . Uso de Redes Neurais Artificiais na Detecção de Propagação de Defeitos em Dutos Rígidos. Revista Abende, v. 45, p. 39-46, 2011.

PRICKEN, W. **Dressing of vitrified bond wheels with CVD dress and monodress**. IDR, 1999, no 3, p. 226-231.

QUIAN, N. **On the momentum term in gradiente descente learning algorithms**. *Neural Networks* Vo. 12, pp.145-151, 1999

ROBERTS, T.M.; TALEBZADEH, M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, Issue 6, p. 695-712, 2003

RACKO, D. Distortion of acoustic emission signals by a change of gain in the sensing device. *NDT International*, v. 15, ed. 1, p. 3-8, 1982.

ROWE, W. B.; MORGAN, M. N. The effect of deformation on the contact area in grinding". In: **Annals of the CIRP**, vol. 42/1, 1993.

SALMON, S.C. **Modern Grinding Process Technology**. MacGraw-Hill, 1992.

SANCHEZ, L. E. A.; LOSNAK, C.; PEREZ, F. R. C. Comportamento da Taxa de Remoção e Acabamento Superficial na Lapidação Plana sob Diferentes Parâmetros do Processo. **XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 10 p, 1999.

SANCHEZ, L. E. A. **Sistema de programação CN para retificação de peças cilíndricas escalonadas**. Dissertação de mestrado, EESC-USP, São Carlos, 122 p., 1992.

SENA, L., **Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC Flexa 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica**. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SILVA JUNIOR, C. E.; COELHO, R. T. Dressagem de rebolos para aplicações de precisão. **Revista Máquinas e Metais** , n. 393, p. 100-111,1998.

SILVA, R. H. L., SILVA, B. M. , DUARTE, V. A. M., COSTA, G. M., BORGES, A. S. Aplicação de rede neural artificial para monitoramento do desgaste de ferramentas utilizando sinal de emissão acústica e potência de Corte. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de fabricação de 11 a 15 de abril de 2011**, Caxias do Sul, RS, 2011.

SILVA, R. H. L. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais.** Dissertação apresentada a Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção de título de mestre em engenharia mecânica, Minas Gerais, 2010.

SOARES, D.D.; MEIRELES, G.S.C.; OLIVEIRA, J.F.G.; BIFFI, M. Monitoramento e otimização no chão de fábrica via diagnostico remoto. **Revista Máquinas e Metais**, n. 416, p. 72-87, 2000.

SOKOVIC M., MIJANOVIC K. "Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes", **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 109, p.181-189, 2001.

SOUTO, U.B. Monitoramento do Desgaste de ferramenta no Processo de Fresamento Via Emissão Acústica. COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - 2007 – Brasília.

STEMMER, C. E. Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscas, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos. Editora da UFSC, Florianópolis, SC, 1992

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II. Florianópolis: Editora da UFSC..314p., il.,7ªEd, 2008.

TAWAKOLI, T.; WESTKÄMPER, E.; RABIEY, M.; RASIFARD. A. Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application**. Vol. 47, pp.734-739, 2007.

TETI, R., JEMIELNIAK K., DONNELL G. O., DORNFELD, D. *Advanced monitoring of machining operations*. University of Naples Federico II, Italy, **CIRP Annals - Manufacturing Technology** vol.59, pg 717-73, 2010.

VIEIRA, M. J. & OLIVEIRA, J. F. G. 2000. " Método para avaliar a dureza de rebolos em trabalho." **Revista Máquinas e Metais**, Ano 2000, pp. 208-221.

XIAO, G. & MALKIN, S. "On- line optimization for internal grinding process". **Annals of the CIRP**, v. 45/1, 1996. p. 287-292.

XUE, L., NAGHDY, F. & COOK, C., Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding, **IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok**, pp. 1296-1299, 2002.

WANG, J.Z. ,WANG, L.S, G.F. LI & G.H. ZHOU, Prediction of surface roughness cylindrical traverse grinding based on ALS algoritm, Proceedings of the Fourth Internacional Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 18-21 August 2005, 549-554.

WANG, Z., WILLETT, P., AGUIAR, P. R., WEBSTER, J., "Neural Network Detection Grinding Burn from Acoustic Emission". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, volume 41, 2001, pp. 283- 309.

WEBSTER J.A., *Cutting Tool Technol.* **60**, 2 (2008) 586.

WEBSTER, J.; DONG., W. P.; LINDSAY, R. "Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process", In: *CIRP, Annals of the CIRP*, v.45/1/1195, 1996, p. 335-340

WEBSTER, J.A. & CIU, C. Flow rate and jate velocity determination for design of a grinding cooling system. **Conferência Internacional de Usinagem**, set/1995.

WEGENER, K.; HOOFFMEISTER, H.W.; HOOFFMEISTER, B.; KARPUSCHEWSKI, F.; KUSTER, W., HAHMANN, C., RABIEY, M. **Conditioning and monitoring of grinding wheels, CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Volume 60, Issue 2, 2011, Pages 757-777, ISSN 0007-8506, 10.1016/j.cirp.2011.05.003. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611002058>)

WIKIPEDIA. Sensitivity and specificity – Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Sensitivity_and_specificity Acesso em 10 junho de 2012.

YANG, J. F., CHEN, F. K. Recursive discrete Fourier transform with inified IIR filter structures, *Signal Processing* 82 (2002) 31 – 41.

ZAGHETTO, S. L; SILVA, F. F.N, GONÇALVES FILHO, O. G. A consolidação e implantação da técnica de emissão acústica como técnica preditiva no diagnóstico de transformadores e reatores na Eletronorte. **XIII ERIAC DÉCIMO TERCER ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ**. Puerto Iguazú Argentina XIII/PI-A2-10, *24 al 28 de mayo 2009*.

APÊNDICE A

A.1 - SINAIS E_{RMS} , MVD E MARSE DE TODOS OS ENSAIOS REALIZADOS

A passada inicial (sem remoção de material), com a remoção de 120 μm (meio) e com a remoção de 240 μm de material (final) e a média de todas as passadas para cada estatística calculada, de cada ensaio, são mostradas das Figuras 47 à 100.

Ensaio 01 – RMS

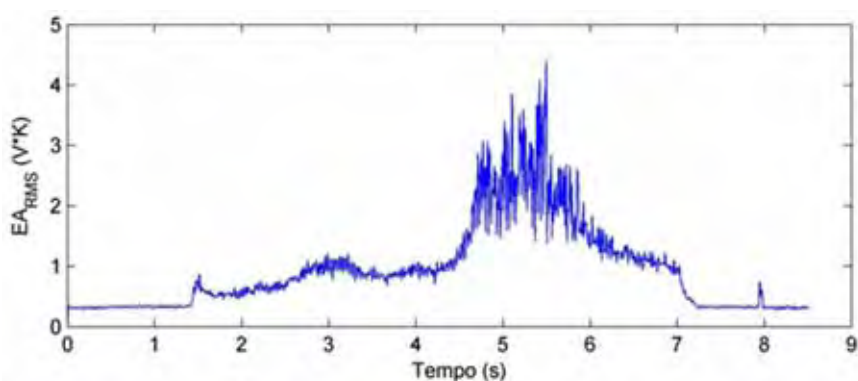


Figura 47 - E_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 10 μm .

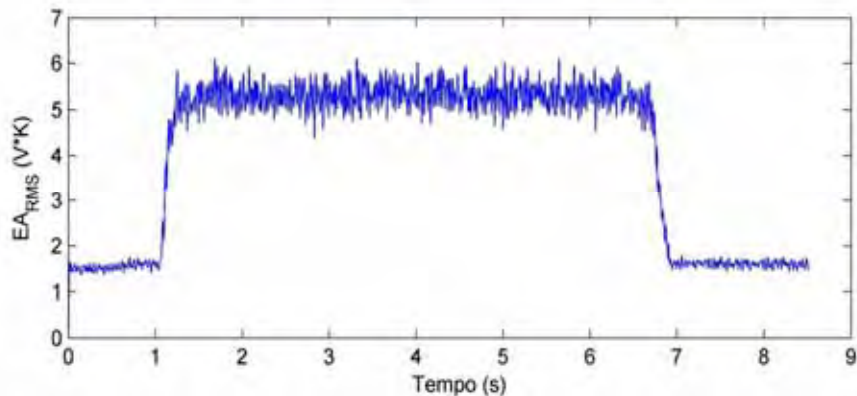


Figura 48 - E_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 120 μm .

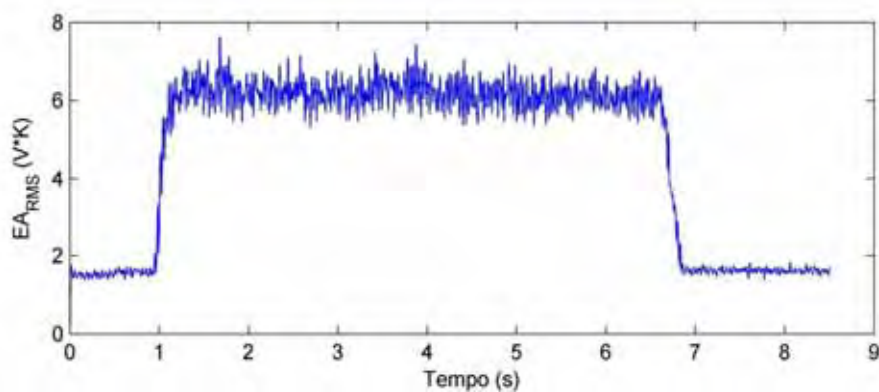


Figura 49 - E_{RMS} referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

Ensaio 01 – MVD

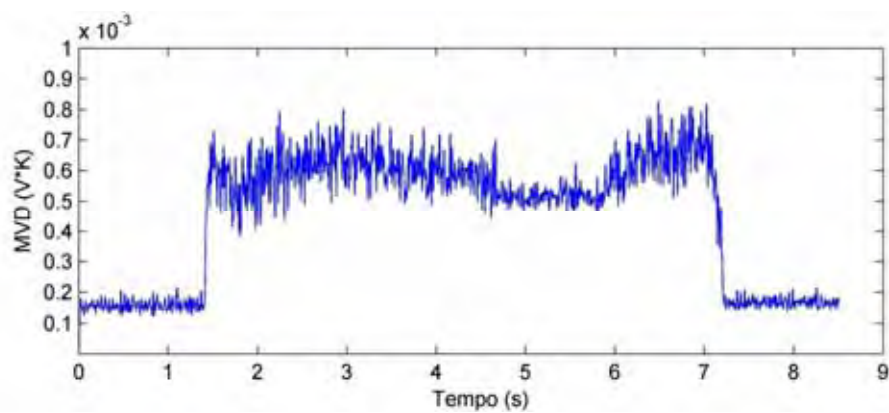


Figura 50 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 µm.

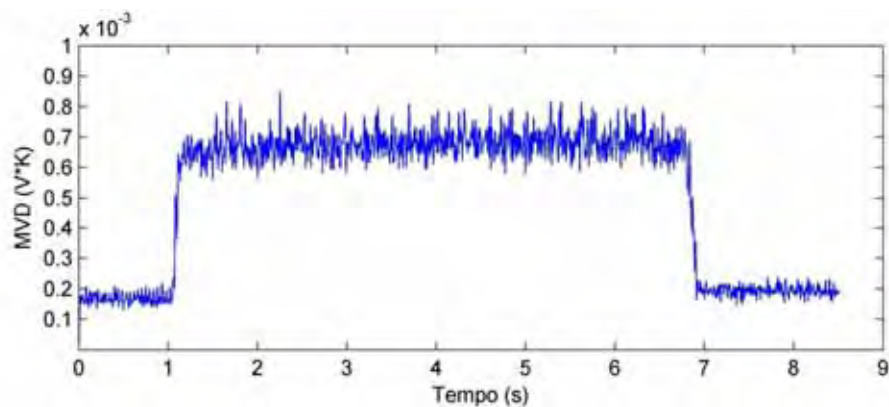


Figura 51 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 µm.

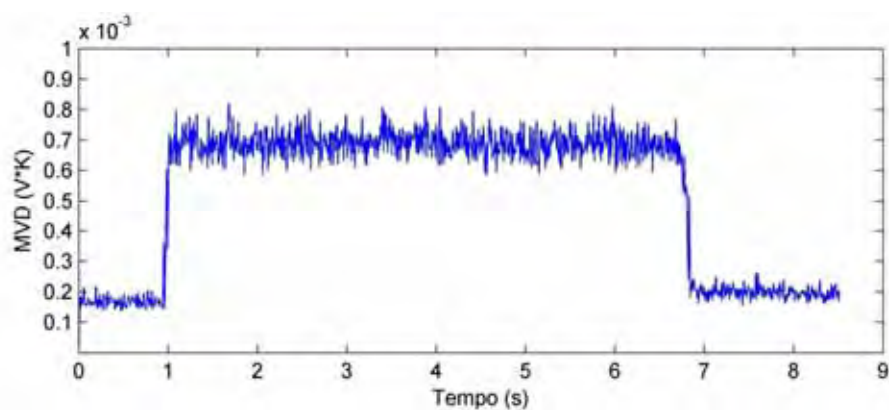
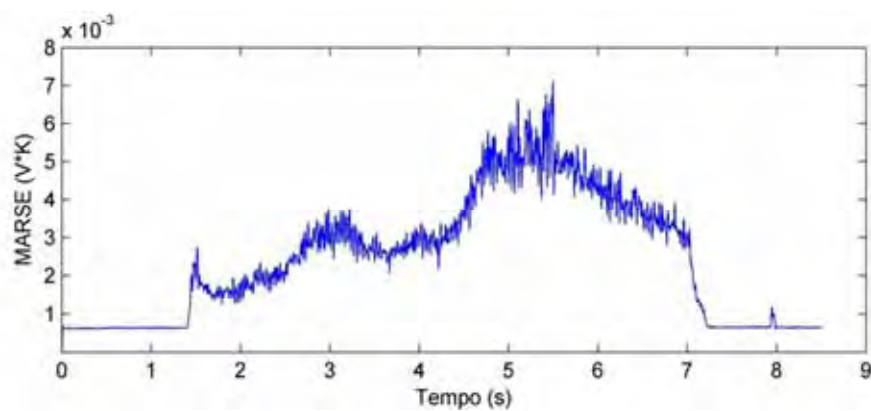
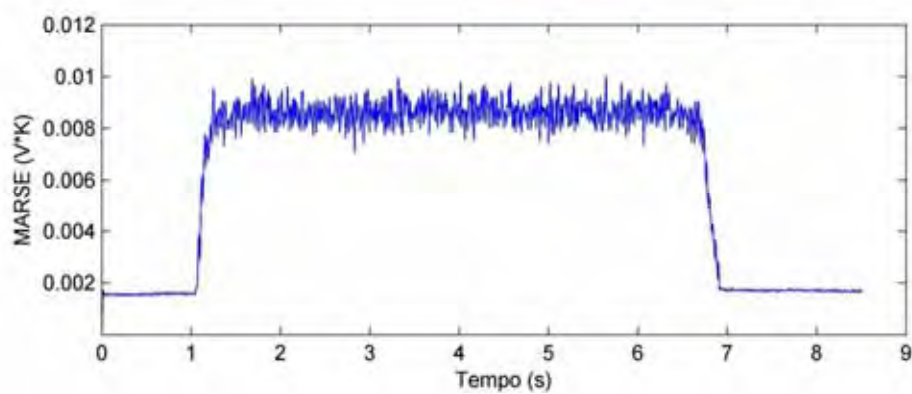
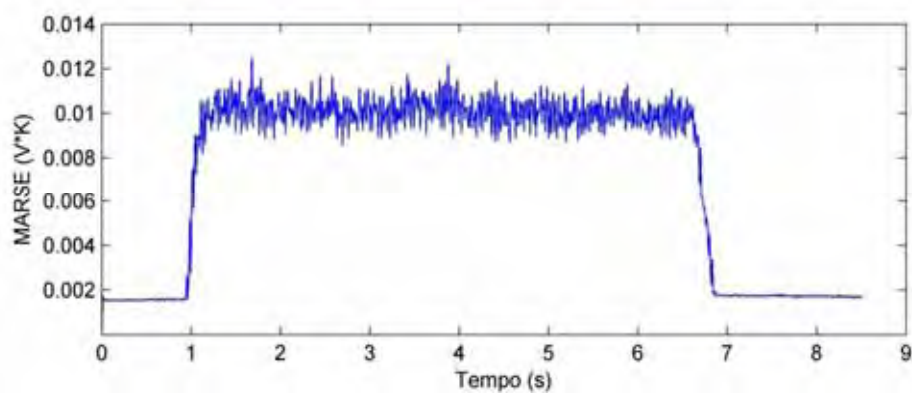
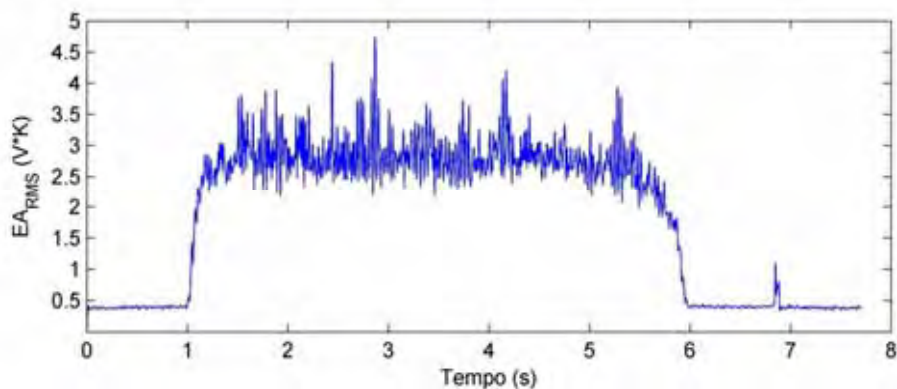
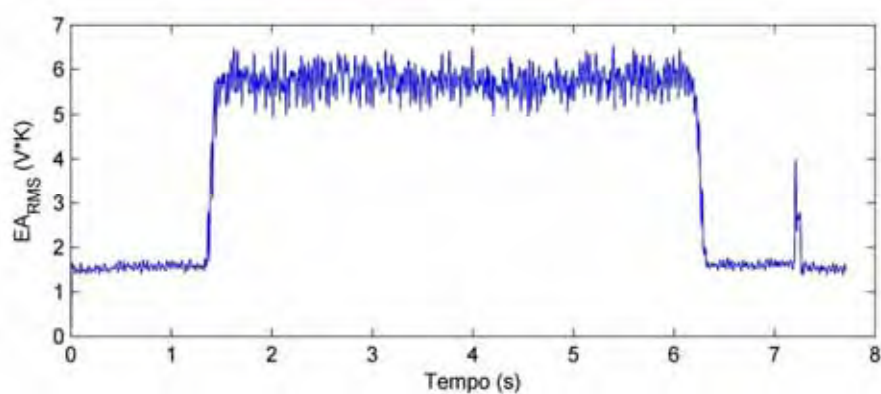
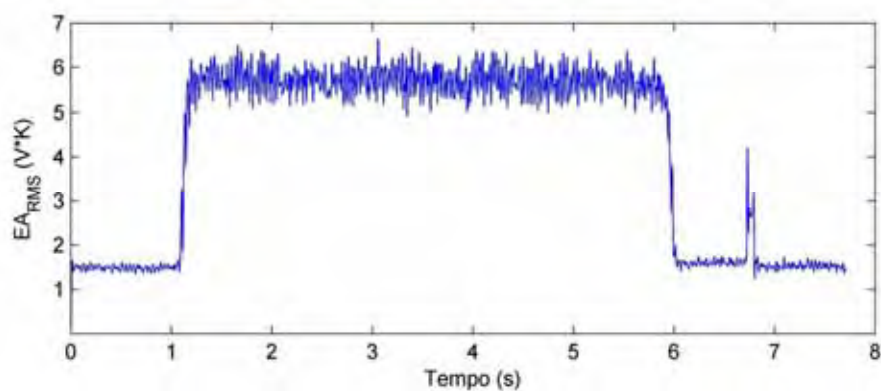


Figura 52 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 µm.

Ensaio 01 - MARSE

Figura 53 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm .Figura 54 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm .Figura 55 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

Ensaio 02 - RMS

Figura 56 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 10 μm .Figura 57 EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 120 μm .Figura 58 - EA_{RMS} referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

ENSAIO 02 - MVD

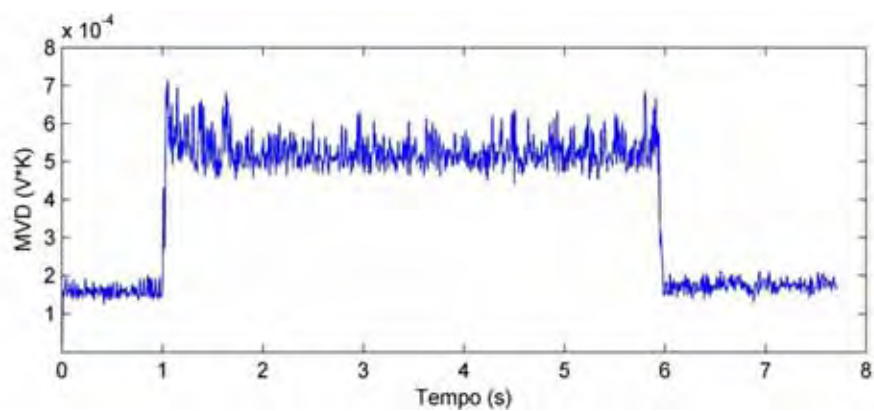


Figura 59 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 µm.

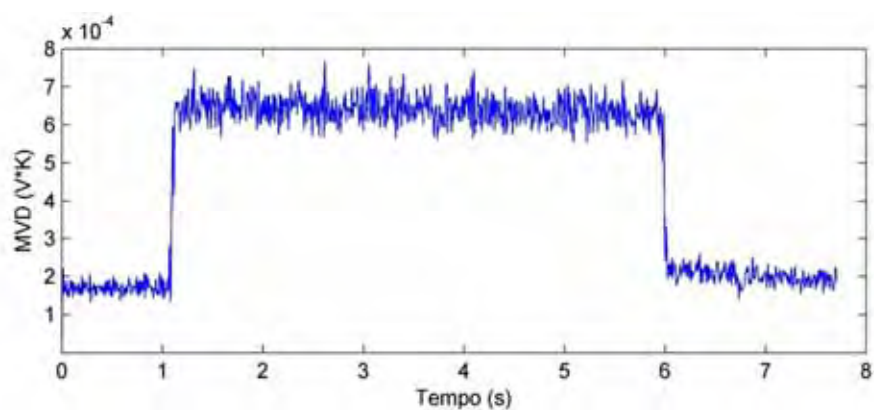


Figura 60 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 µm.

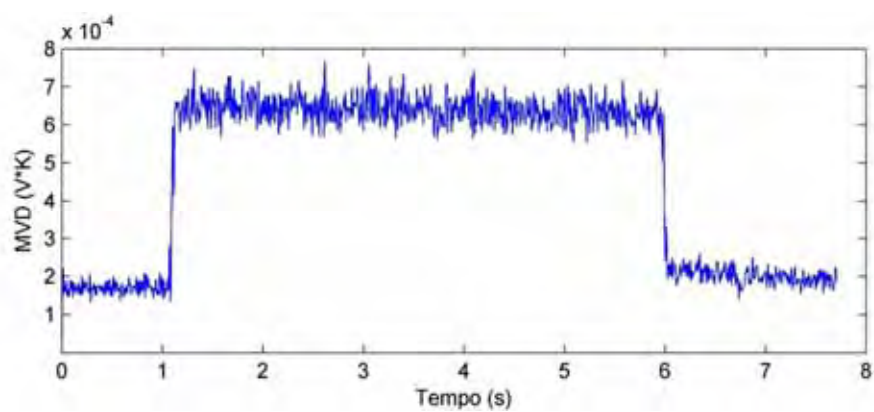
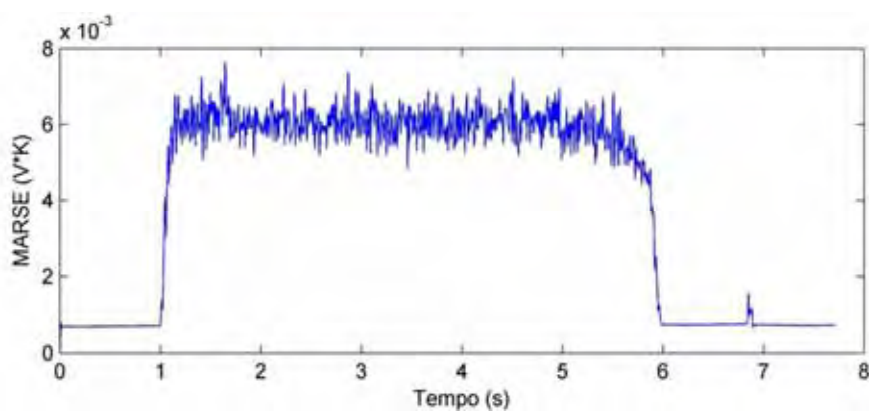
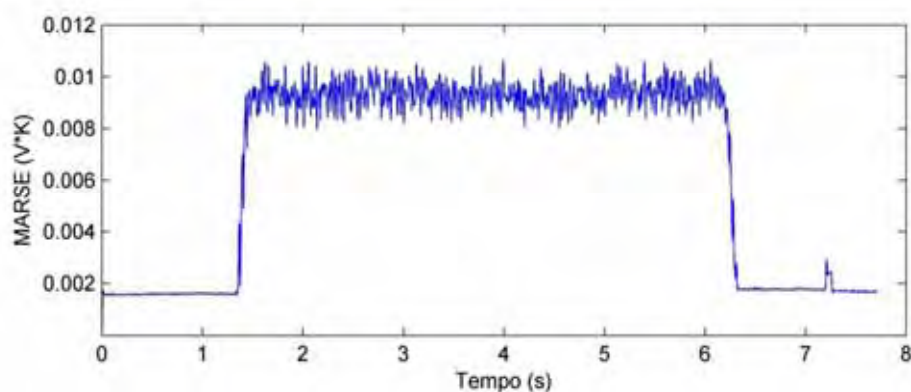
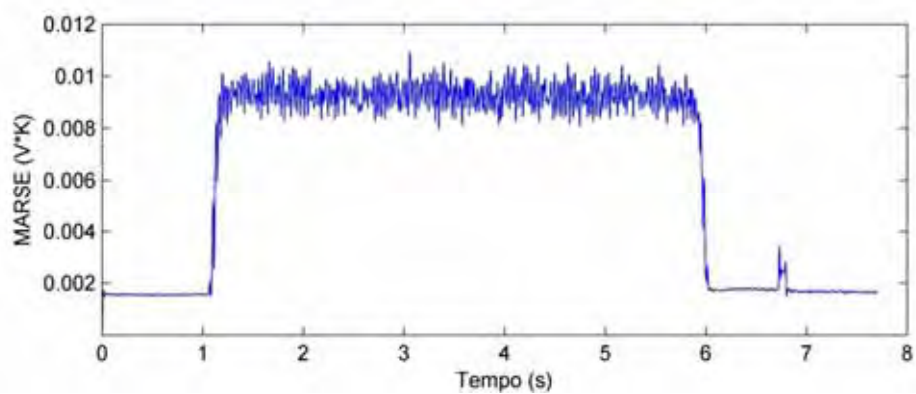
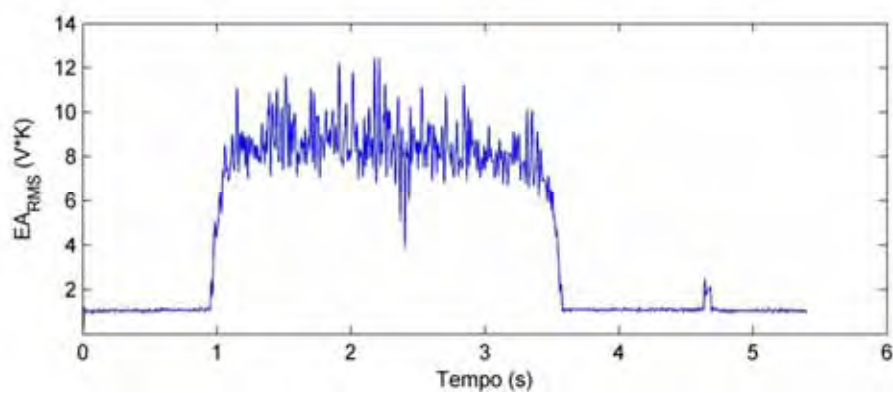
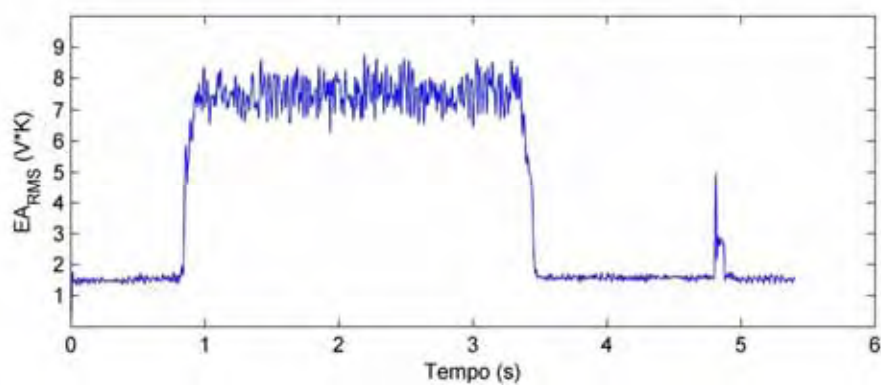
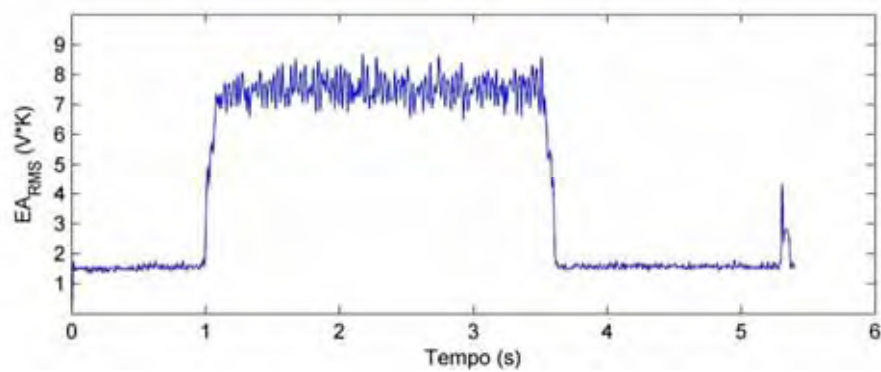


Figura 61 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 02 - MARSE

Figura 62 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm .Figura 63 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm .Figura 64 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

Ensaio 3 - RMS

Figura 65 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 10 µm.Figura 66 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 120 µm.Figura 67 - EA_{RMS} referente à 24ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 3 – MVD

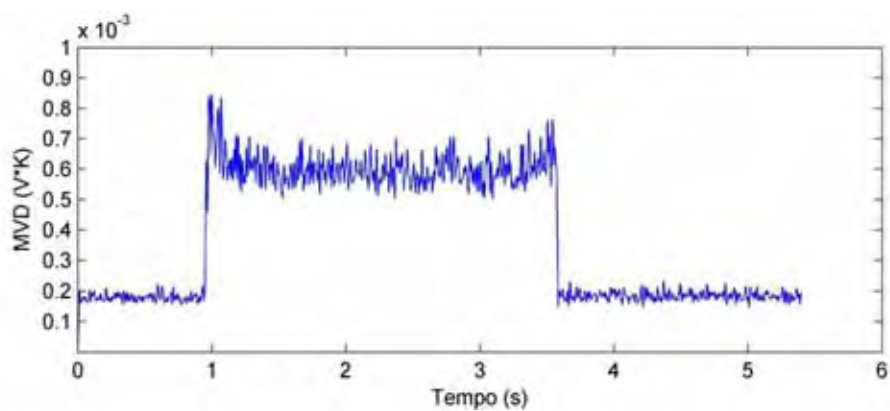


Figura 68 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 10 µm.

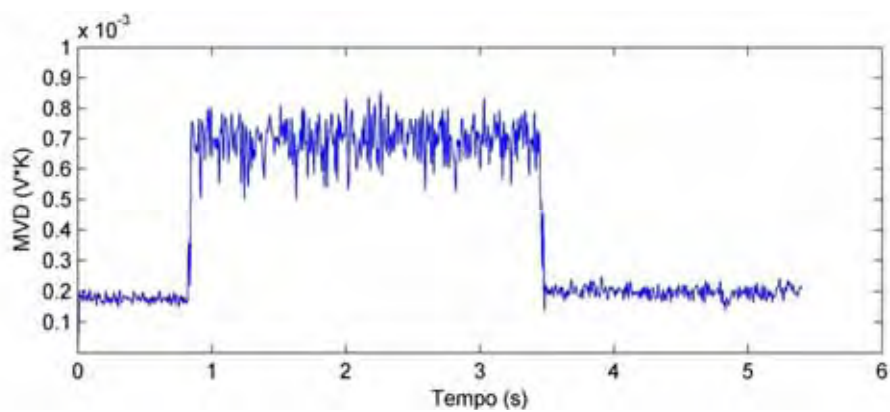


Figura 69 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 120 µm.

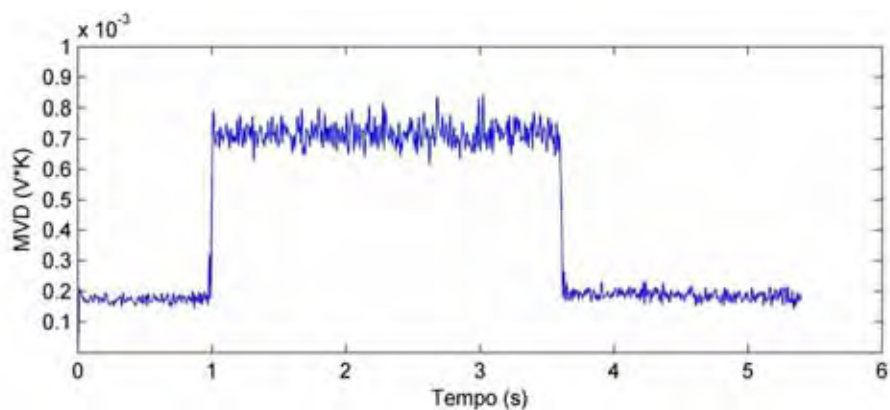
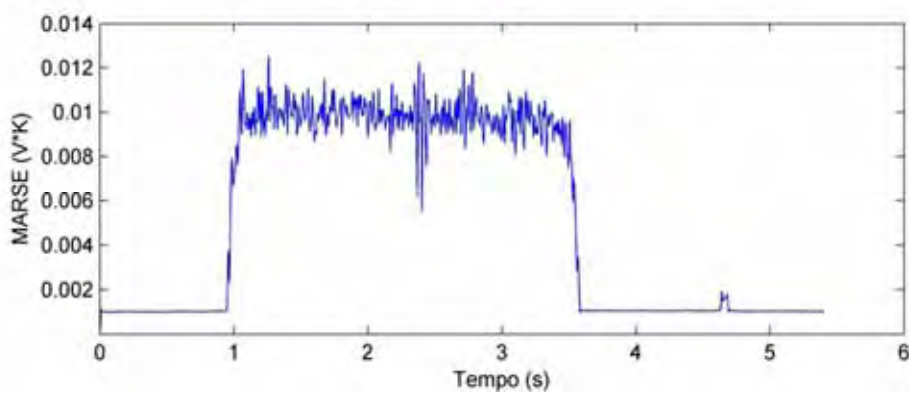
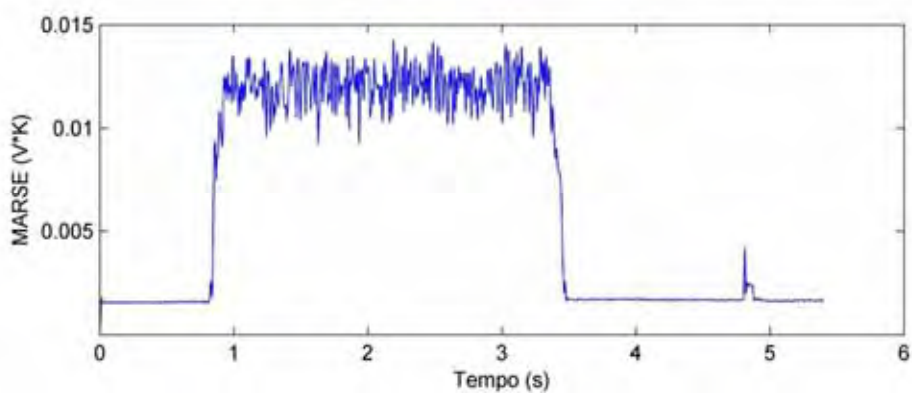
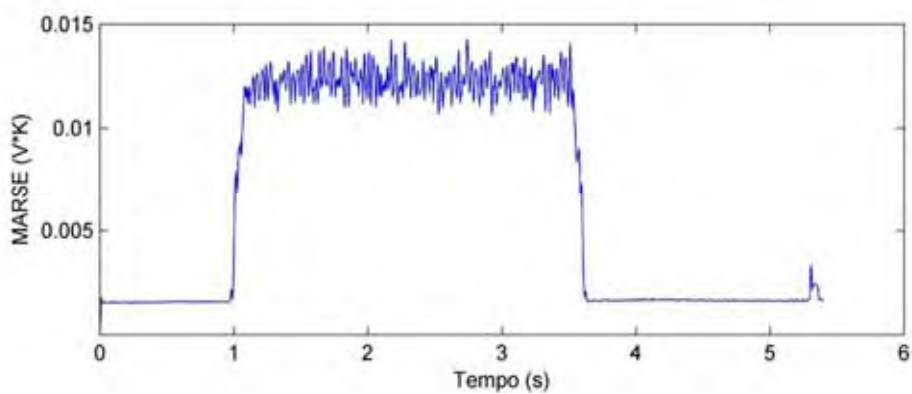
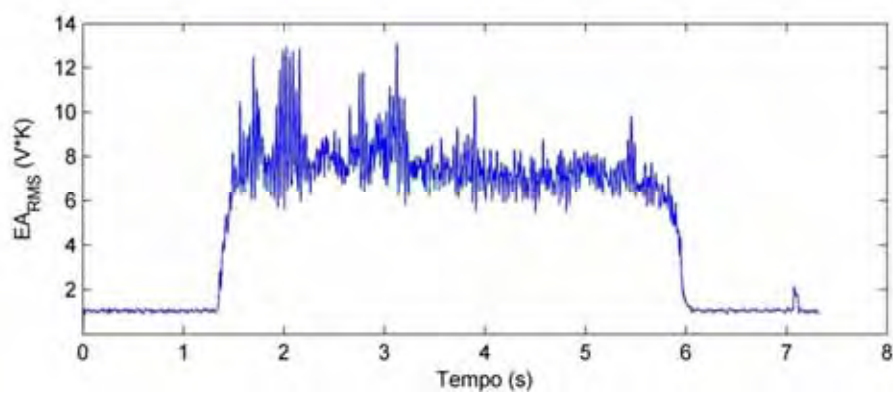
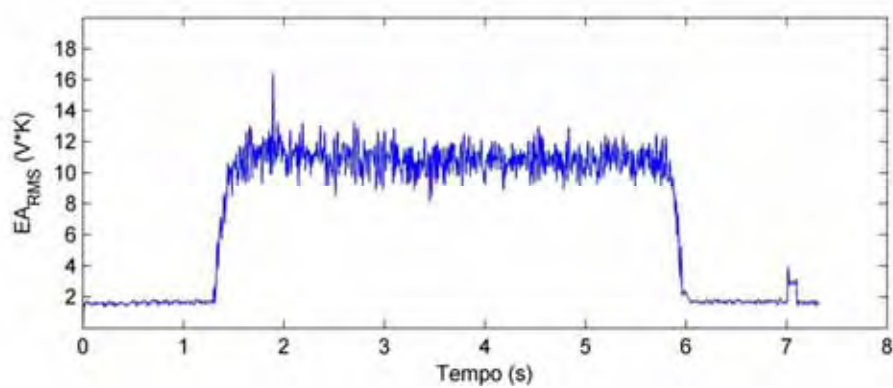
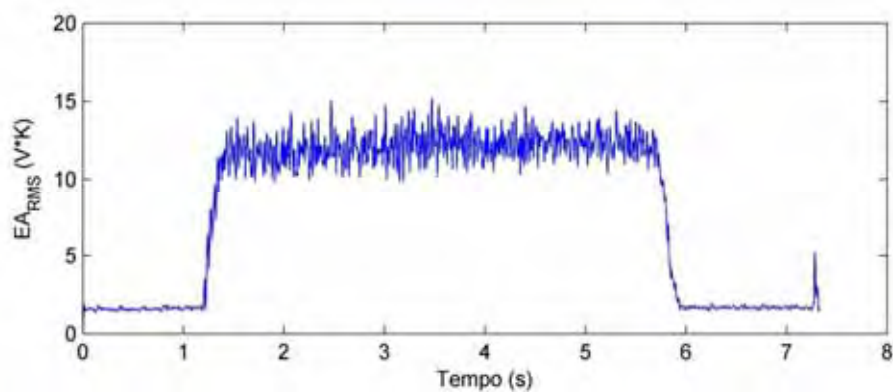


Figura 70 - MVD referente à 24ª passada, remoção de 240 µm

ENSAIO 3 - MARSE

Figura 71 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 10 μm .Figura 72 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 120 μm .Figura 73 - MARSE referente à 24ª passada, remoção de 240 μm .

Ensaio 04 - RMS

Figura 74 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.Figura 75 - EA_{RMS} referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.Figura 76 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 04 - MVD

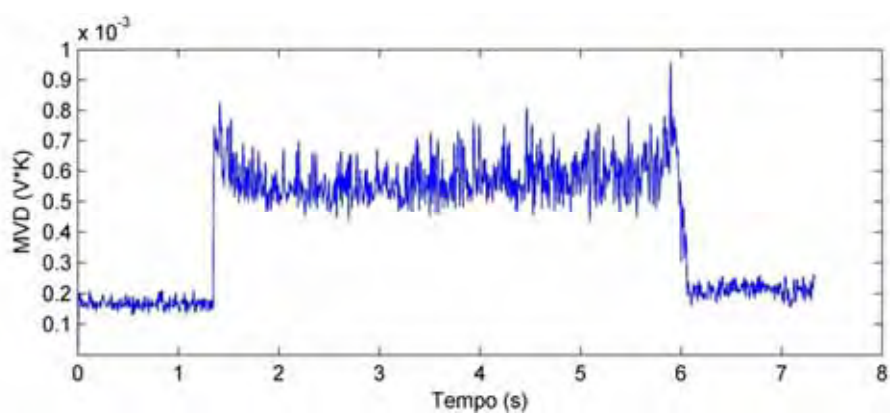


Figura 77 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.

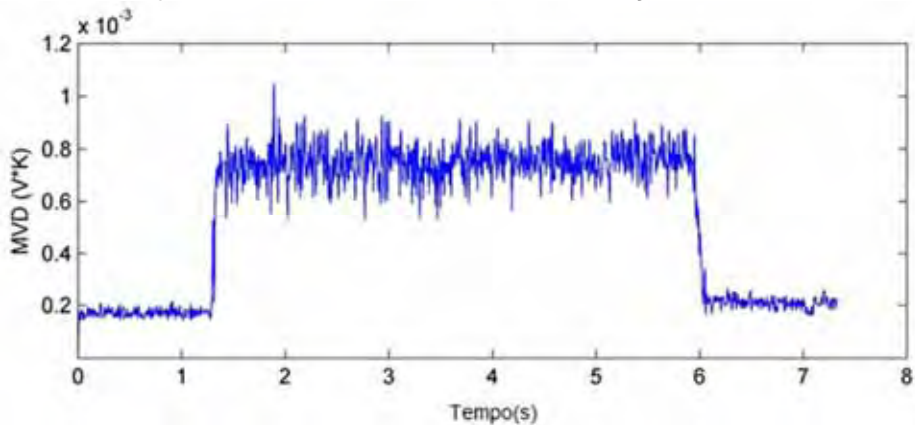


Figura 78 - MVD referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.

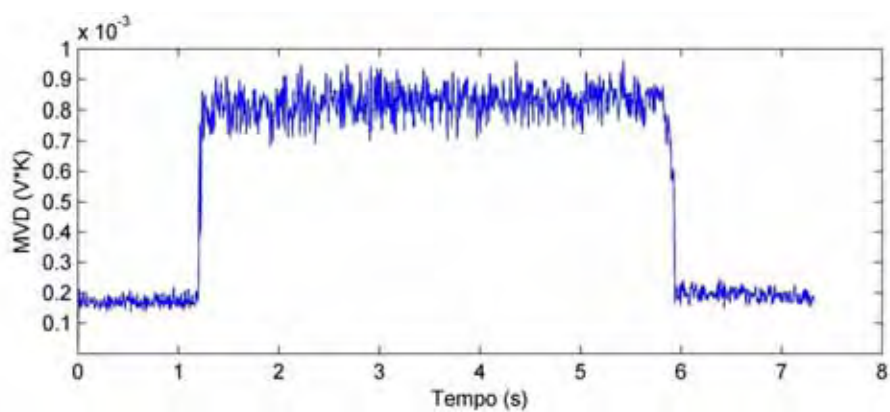
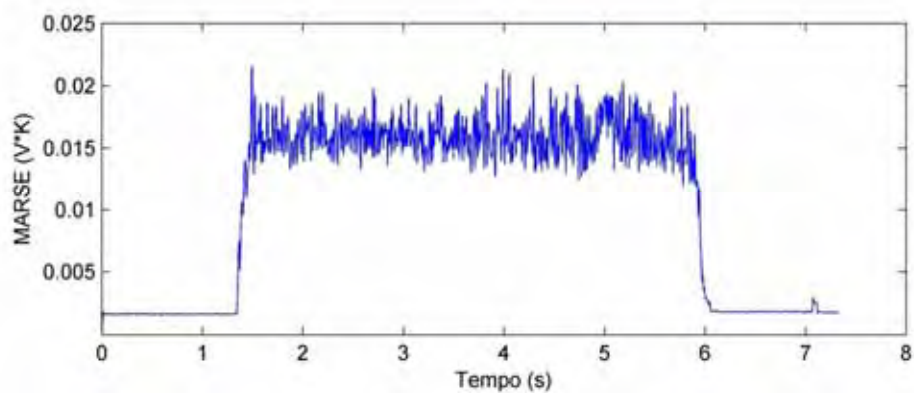
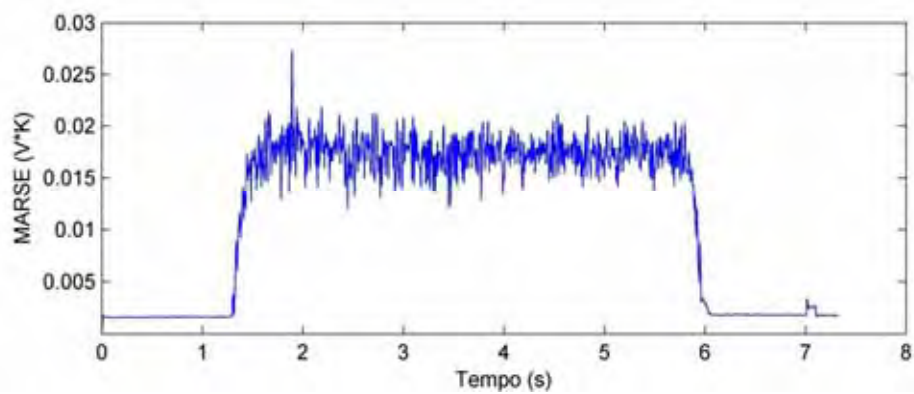
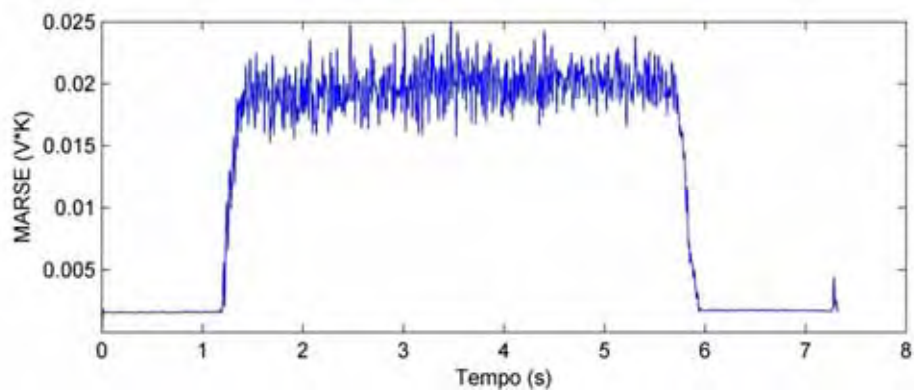
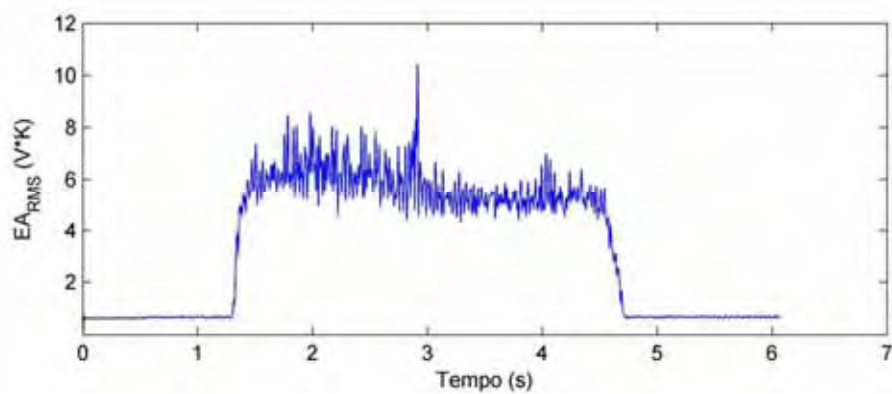
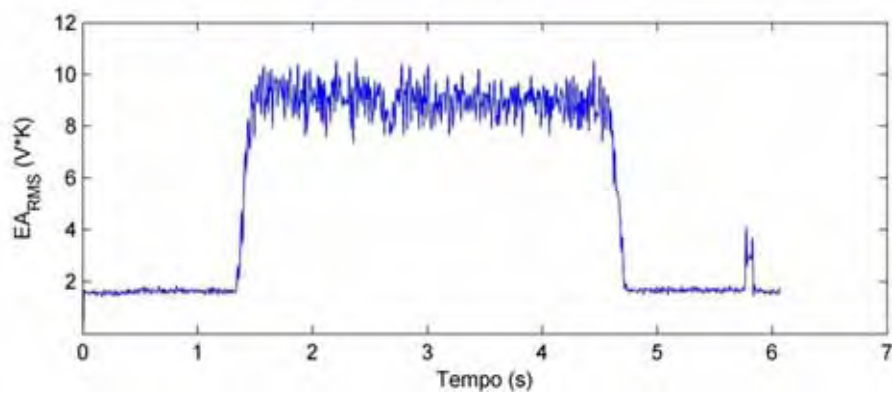
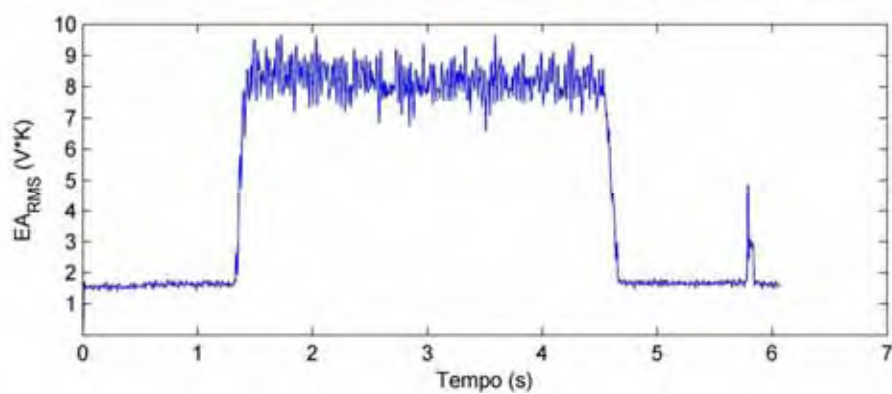


Figura 79 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 04 – MARSE

Figura 80 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 20 μm .Figura 81 - MARSE referente à 6ª passada, remoção de 120 μm .Figura 82 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 240 μm .

Ensaio 05 – RMS

Figura 83 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.Figura 84 - EA_{RMS} referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.Figura 85 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 05 – MVD

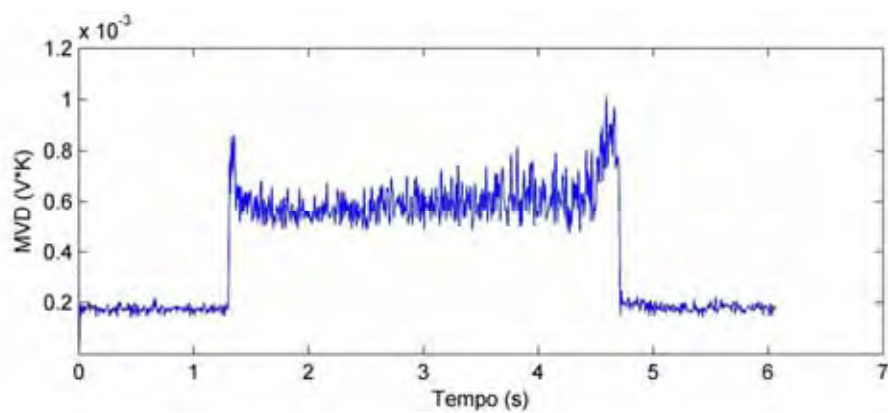


Figura 86 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.

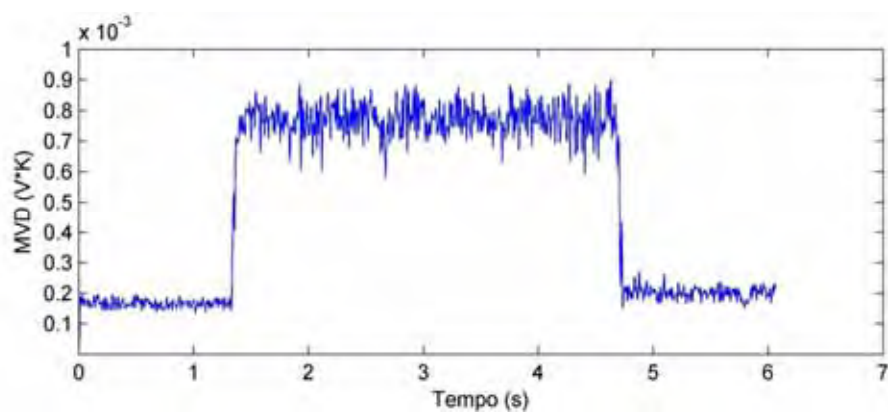


Figura 87 - MVD referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.

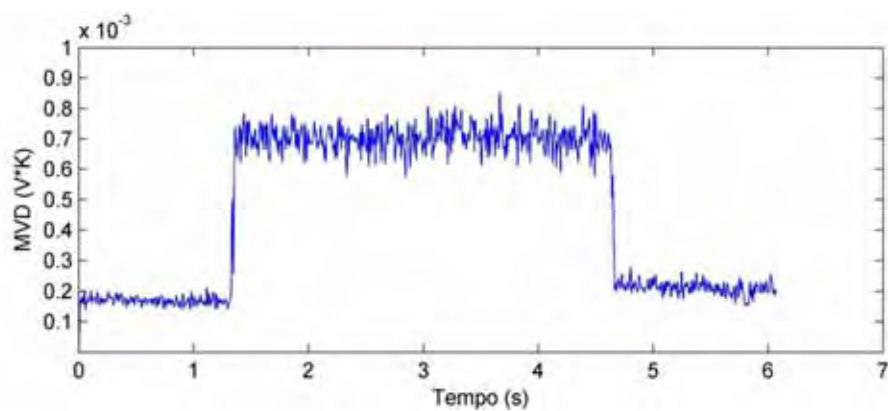
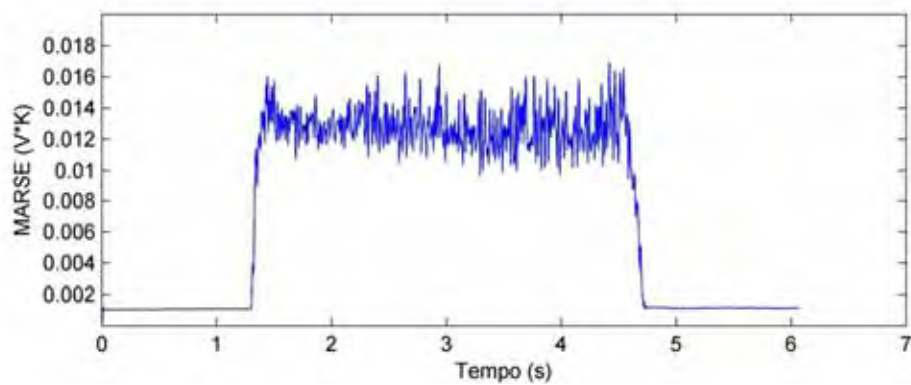
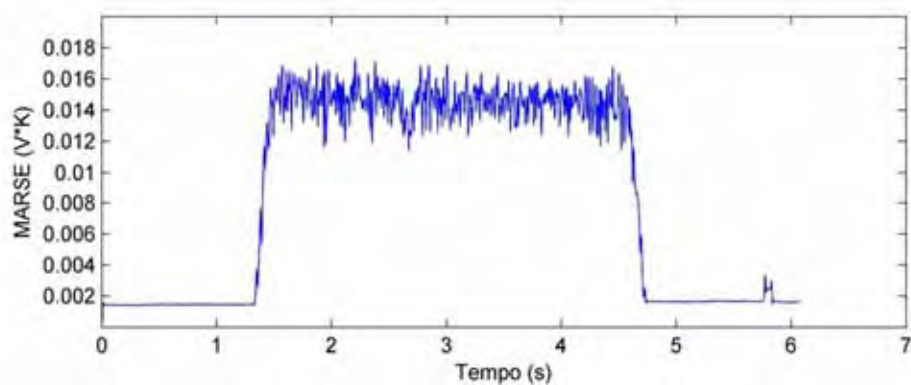
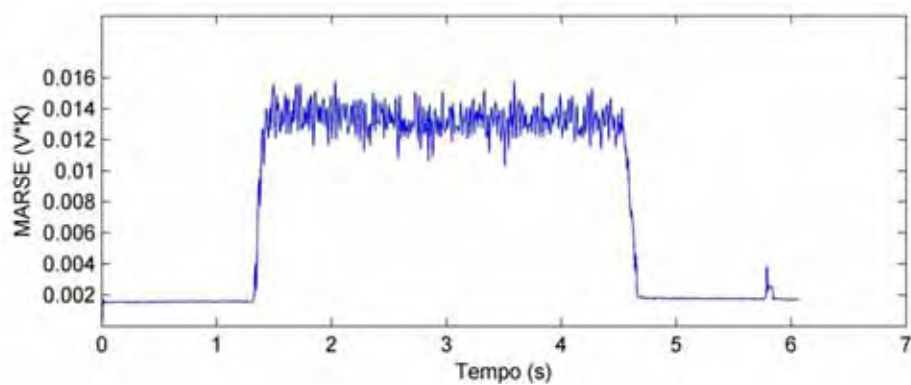
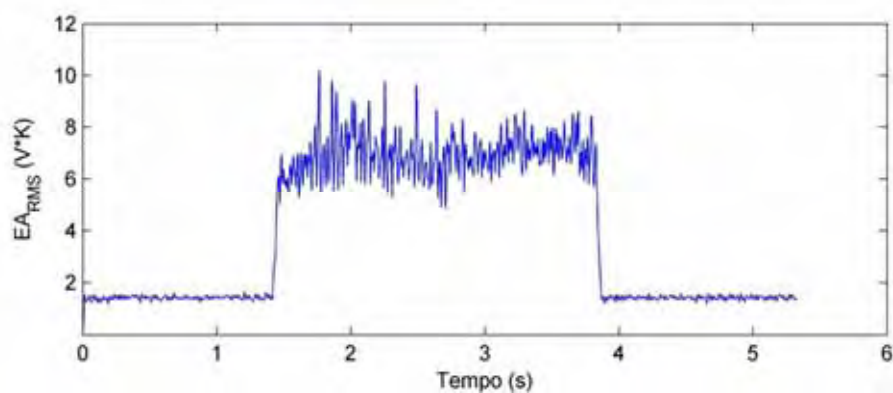
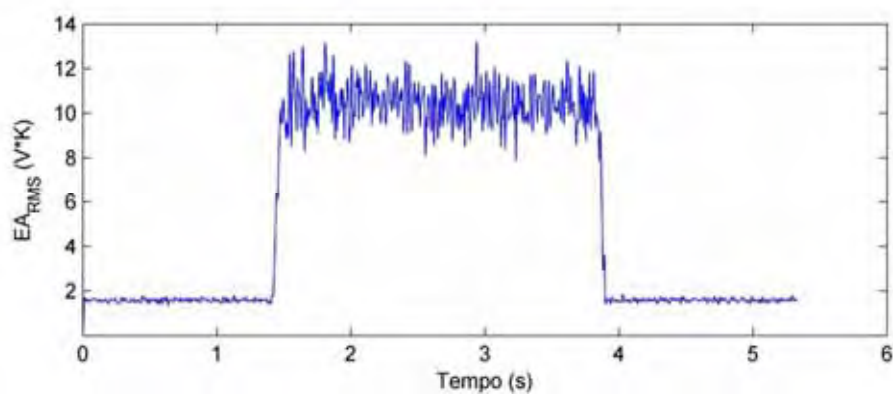
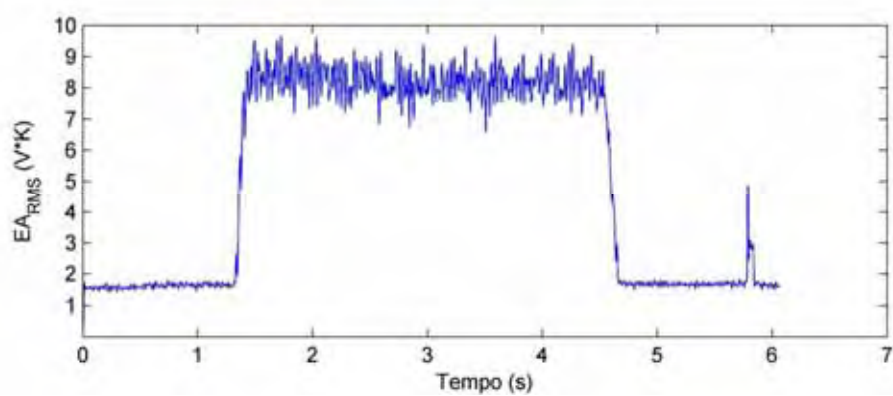


Figura 88 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 05 – MARSE

Figura 89 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 20 μm .Figura 90 - MARSE referente à 6ª passada, remoção de 120 μm .Figura 91 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 240 μm .

Ensaio 06 - RMS

Figura 92 - EA_{RMS} referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.Figura 93 - EA_{RMS} referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.Figura 94 - EA_{RMS} referente à 12ª passada, remoção de 240 µm

ENSAIO 06 – MVD

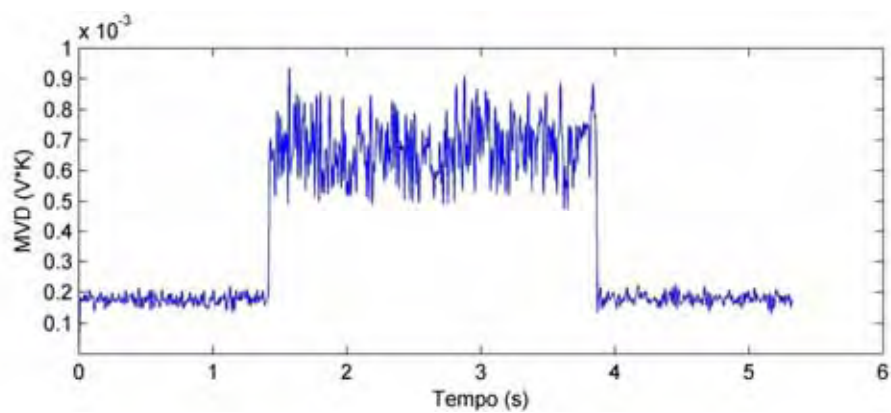


Figura 95 - MVD referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.

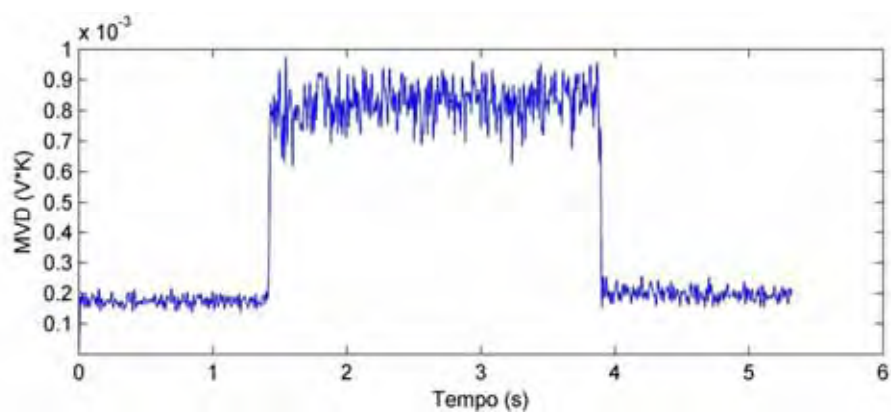


Figura 96 - MVD referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.

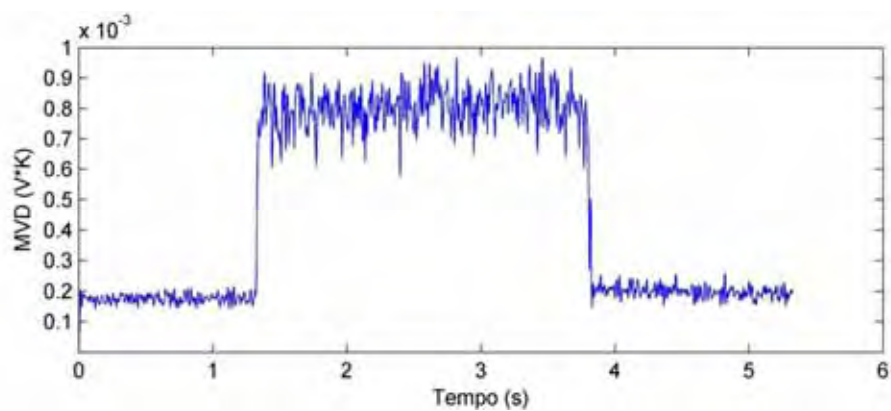


Figura 97 - MVD referente à 12ª passada, remoção de 240 µm.

ENSAIO 06 - MARSE

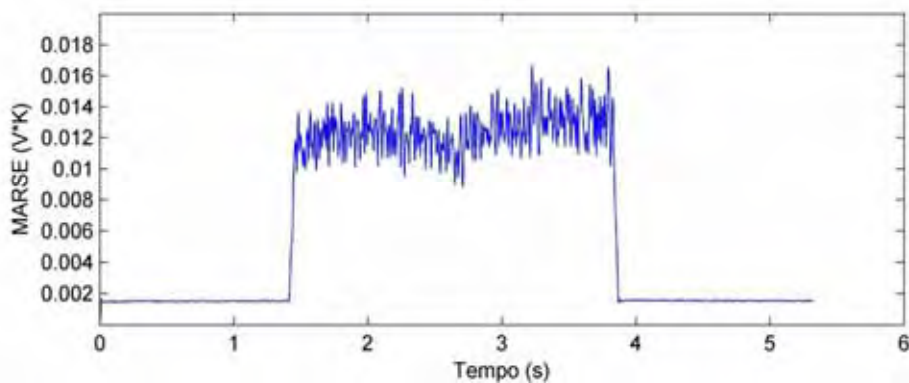


Figura 98 - MARSE referente à 1ª passada, remoção de 20 µm.

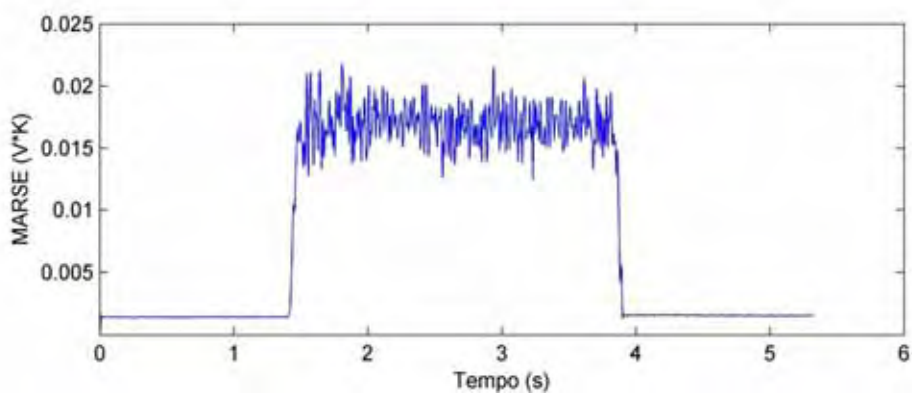


Figura 99 - MARSE referente à 6ª passada, remoção de 120 µm.

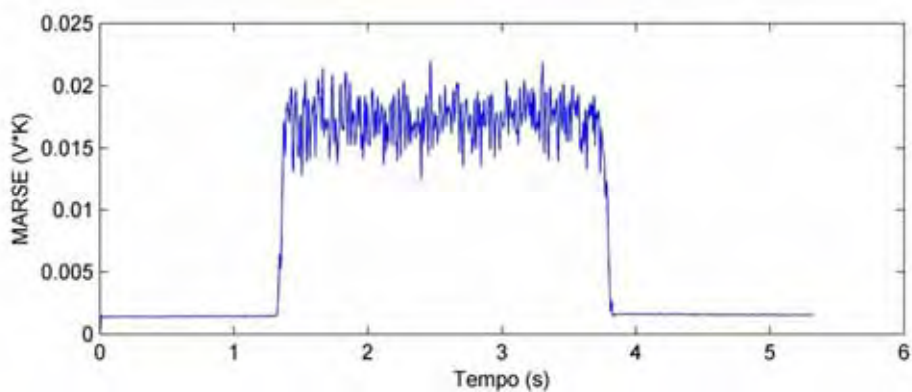


Figura 100 - MARSE referente à 12ª passada, remoção de 240 µm.

APÊNDICE B

B.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS E ARQUITETURA DA RNA MLP – TESTES MANUAIS

```
% *****
% REDE NEURAL PARA classificação das condições do rebolo – Dressado ou não
% dressado – DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA
% *****

close all
clc

%Carregando os dados de treinamento

E_mediaRms = [];
E_mediaMarse = [];
E_mediaMvd = [];

estatisticaRms = ['rms'];
estatisticaMarse = ['marse'];
estatisticaMvd = ['mvd'];

target = []; %valores de saída 0 até 100 micron removido - nao dressado
            %valores de saída 1 depois 100 micron removido - dressado
            % os valores de saída serao 0 e 1

ensaio = [5 6]; %variavel criada para poder escolher os ensaios que serão
              compilados

    for ii=1:numel(ensaio)

% carregando os vetores de media RMS quando utilizada no treinamento

        eval(['load medias_Int_',
num2str(ensaio(ii),'%02i'),'_',estatisticaRms]);
        E_mediaRms = [E_mediaRms;
reshape(mediasInt',size(mediasInt,1)*size(mediasInt,2),1)];

% carregando os vetores de media MARSE quando utilizada no treinamento

eval(['load medias_Int_',
num2str(ensaio(ii),'%02i'),'_',estatisticaMarse]);    E_mediaMarse =
[E_mediaMarse; reshape(mediasInt',size(mediasInt,1)*size(mediasInt,2),1)];

% carregando os vetores de media MVD quando utilizada no treinamento

eval(['load medias_Int_', num2str(ii,'%02i'),'_',estatisticaMvd]);
eval(['load medias_Int_', num2str(ensaio(ii),'%02i'),'_',estatisticaMvd])
E_mediaMvd = [E_mediaMvd;
reshape(mediasInt',size(mediasInt,1)*size(mediasInt,2),1)];
```

```

        aux = [];
        aux(1:numel(mediasInt)/2.4) =0;
        aux(1+(numel(mediasInt)/2.4):numel(mediasInt))=1; % criado para
carregar o vetor target!

        target = [target aux];

end

entrada = cell2mat({[ E_mediaRms'];[E_mediaMvd'];[E_mediaMarse']}));

% aqui variou-se de forma manual as entradas, hora RMS, MVD e MARSE e também
algumas combinações.

saida = [target];

[trainP, valP, testP, trainIND, valIND, testIND] =
dividerand(entrada,0.6,0.2,0.2); % Divisão dos dados para Treinamento
(60%)validação(20%) e teste (20%)

[trainT, valT, testT] = divideind(saida, trainIND, valIND, testIND);

        net = newff(trainP, trainT, [ 20 15])
% aqui foram testadas várias configurações de camada e número de neurônios,
no caso aqui estão com 2 camadas sendo uma de 20 e outra de 15 neurônios.

        % variações dos parâmetros de treinamento
        nettrainParam.mc = 0.5;
        nettrainParam.lr = 0.6;
        nettrainParam.show=5;
        nettrainParam.goal = 1e-7;
        nettrainParam.epochs = 2000;
        netdivideFcn = '';
        nettrainParam.showWindow = 1;
        nettrainParam.showCommandLine = 0;

        net = train(net, valP, valT);
        Y = sim(net, testP);
        plot(testT, 'o');
        hold
        plot(Y , 'xr');

errofim = 0
tol = 0.5 % tolerancia do erro
fim = testT-Y %quantidade de número de teste-simulação
        fim =abs(fim) % valor absoluto (se tiver numero
        negativo faz ficar positivo)
for i=1:length(Y)% de 1 até a quantidade de valores de Y
    if (fim(i) > tol)
        errofim = errofim+1
    end
end
        erroper = errofim/length(Y)
%errofim é a quantidade de pontos do vetor que será testado.
%Erroper=a quantidade de erro porcentual obtido.

```

B.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS E ARQUITETURA DA RNA MLP – ALGORITMO OTIMIZADO

```
% *****
% REDE NEURAL PARA classificação das condições do rebolo – Dressado ou não
% dressado – DANIELA FERNANDA GRIZZO MOIA
% *****

tic

clear all
close all

load TabelaNeuroniosMelConfE1E2;

%Carregando os dados de treinamento
load ('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\Ensaios\medias_Int_01_rms.mat')
mediasRms1 = mediasInt;
load ('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\Ensaios\medias_Int_01_mvd.mat')
mediasMvd1 = mediasInt;
load ('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\Ensaios\medias_Int_01_marse.mat')
mediasMarse1 = mediasInt;
load ('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\Ensaios\medias_Int_02_rms.mat')
mediasRms2 = mediasInt;
load ('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\Ensaios\medias_Int_02_mvd.mat')
mediasMvd2 = mediasInt;
load ('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\Ensaios\medias_Int_02_marse.mat')
mediasMarse2 = mediasInt;

saidadarede(1:1000) = 0;
saidadarede(1001:length(mediasInt)) = 1;

mediasRms = cell2mat([mediasRms1 mediasRms2]);
mediasMvd = cell2mat([mediasMvd1 mediasMvd2]);
mediasMarse = cell2mat([mediasMarse1 mediasMarse2]);

saida = cell2mat([saidadarede saidadarede]);

Indice = 0;
possibilidades = '111';

if exist('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaErroRIE1E2_MeLr.mat','file') &
exist('C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaProcessamentoRIE1E2_MeLr.mat','
file')
    load C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaErroRIE1E2_MeLr;
    load C:\CopiaTodosEnsaios\Ensaios\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaProcessamentoRIE1E2_MeLr;
    inicio = k;
    tempoanterior = tempo;
    tempo = 0;
else
    inicio = 7; % k=7 para fixar o numero de entradas - numero de possibilidades da rede...
    Indice = 0;
    tempoanterior = 0;
    tempo = 0;
    ErroDres = {};
end

for k=inicio:bin2dec(possibilidades)
    if k == 4
        k = k+1;
    end
end
```

```

tempo = toc+tempoanterior;
save C:\CopiaTodosEnsaio\Ensaio\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaProcessamentoRIE1E2_MeLr k
Indice tempo %\salva informação para continuação do processamento
save C:\CopiaTodosEnsaio\Ensaio\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaErroRIE1E2_MeLr ErroDres
binario = double(dec2bin(k));
while length(binario)<3
    binario = cell2mat([48] [binario])
end
entrada = 0;

if binario(3) == '1'
    entrada = mediasRms;
end

if binario(2)=='1'
    if entrada == 0
        entrada = mediasMvd;
    else
        entrada = cell2mat ([entrada];[mediasMvd]) ;
    end
end

if binario(1) == '1'
    if entrada == 0
        entrada = mediasMarse;
    else
        entrada = cell2mat ([entrada];[mediasMarse]) ;
    end
end

[trainP,valP,testP,trainIND,vaIND,testIND] = dividerand(entrada,0.6,0.2,0.2);
[trainT,valT,testT] = divideind(saida,trainIND,vaIND,testIND);

for j=1:9
    for k=1:5

        for neuronios=1:length(TabelaNeuronios(:,1))
            Momento=j/10;

            %Variação da taxa de aprendizagem (Learning Rate)

            learn_rate=0;
            if k==1
                learn_rate=0.05;
            end

            if k==2
                learn_rate=0.15;
            end

            if k==3
                learn_rate=0.30;
            end

            if k==4
                learn_rate=0.50;
            end

            if k==5
                learn_rate=0.90;
            end

            for m=1:5
                if (TabelaNeuronios(neuronios,2)==0) & (TabelaNeuronios(neuronios,3)==0)
                    NumNeuronios = TabelaNeuronios(neuronios,1);
                    net = newff(trainP,trainT,[NumNeuronios]);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

end

if (TabelaNeuronios(neuronios,3)==0) & (TabelaNeuronios(neuronios,2)~=0)
    NumNeuronios = TabelaNeuronios(neuronios,1:2);
    net = newff(trainP,trainT,[NumNeuronios]);
end

if TabelaNeuronios(neuronios,3)>0
    NumNeuronios = TabelaNeuronios(neuronios,1:3);
    net = newff(trainP,trainT,[NumNeuronios]);
end

nettrainParam.mc = Momento;
nettrainParam.lr = learn_rate;
nettrainParam.show = 5;
nettrainParam.goal = 1e-7;
nettrainParam.epochs = 2000;
nettrainParam.showWindow = 0;
nettrainParam.showCommandLine = 0;

[net, trNet] = train(net, valP, valT); %
Y(m, :) = sim(net, testP);
testeT(m, :) = testT;

% Rede confusion -matlab para classificação -

[c, ~, per] = confusion(testT, sim(net, testP));
trErro = struct('Erro', c, 'Avaliacao', per);
disp(sprintf('Erro: %.3f', c));

trPerf = struct('Treinamento', trNetbest_perf, 'Validacao', trNetbest_vperf, 'Teste', trNetbest_tperf);
Tr{m} = struct('Parada', trNetstop, 'TotalEpocas', trNetnum_epochs, 'MelhorEpoca', trNetbest_epoch,
'Performance', trPerf, ...
'ErroTrain', trErro);

end
clc
Indice= Indice+1;
ErroDres{Indice,1}=binario(1); %N de Neurônios - Primeira Camada
ErroDres{Indice,2}=binario(2); %N de Neurônios - Segunda Camada
ErroDres{Indice,3}=binario(3); %N de Neurônios - Terceira Camada

ErroDres{Indice,6}=TabelaNeuronios(neuronios,1); %N de Neurônios - Primeira Camada
ErroDres{Indice,7}=TabelaNeuronios(neuronios,2); %N de Neurônios - Segunda Camada
ErroDres{Indice,8}=TabelaNeuronios(neuronios,3); %N de Neurônios - Terceira Camada
ErroDres{Indice,9}= Momento; %Momento
ErroDres{Indice,10}= learn_rate; %Taxa de Aprendizagem

ErroDres{Indice,11}= mean([Tr{1}.ErroTrain.Erro Tr{2}.ErroTrain.Erro Tr{3}.ErroTrain.Erro
Tr{4}.ErroTrain.Erro Tr{5}.ErroTrain.Erro]);

ErroDres{Indice,12}= Tr(1);
ErroDres{Indice,13}= Tr(2);
ErroDres{Indice,14}= Tr(3);
ErroDres{Indice,15}= Tr(4);
ErroDres{Indice,16}= Tr(5);

erro = 0;
qtdeamostras = 0;
for serie=1:5
    qtderro = abs(testeT(serie,:)-Y(serie,:));

```

```

    for r=1:length(qtderro)
        if qtderro(r) > .5
            erro = erro + 1;
        end
        qtdeamostras = qtdeamostras+1;
    end
end
ErroDres{Indice,17} = erro/qtdeamostras;

disp(['Indice processado #',num2str(Indice)]);
tempodecorrido = (toc+tempoanterior)/3600;
disp(['tempo decorrido: ',num2str(tempodecorrido),' horas']);
qtde = 45*length(TabelaNeuronios(:,1))*7;
mediadeprocessamento = (toc+tempoanterior)/Indice;
disp(['tempo médio de processamento: ',num2str(mediadeprocessamento),' segundos']);
tempoestimado = (mediadeprocessamento*(qtde-Indice))/3600;
disp(['tempo estimado: ',num2str(tempoestimado),' horas']);

end
end
end
end

tempo = toc+tempoanterior;
save C:\CopiaTodosEnsaio\Ensaio\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaProcessamentoRIE1E2_MeLr j
Indice tempo %\salva informação para continuação do processamento

save C:\CopiaTodosEnsaio\Ensaio\Vetores_estatist_interpolados\ContinuaErroRIE1E2_MeLr ErroDres

save C:\CopiaTodosEnsaio\Ensaio\Vetores_estatist_interpolados\workspaceE1E2_MeLr

```