



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Campus de Bauru



WALLACE CHRISTIAN FEITOSA DE PAULA

**ANÁLISE DE SUPERFÍCIES DE PEÇAS RETIFICADAS COM O USO
DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Campus de Bauru



WALLACE CHRISTIAN FEITOSA DE PAULA

**ANÁLISE DE SUPERFÍCIES DE PEÇAS RETIFICADAS COM O USO
DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

**Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da
UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do Título
de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

**BAURU
2007**

**DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP – BAURU**

Paula, Wallace Christian Feitosa de.

Análise de superfícies de peças retificadas
com o uso de redes neurais artificiais / Wallace
Christian Feitosa de Paula, 2007.
151 f.

Orientador : Paulo Roberto de Aguiar.

Dissertação (mestrado) – Universidade
Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru,
2007.

1. Retificação. 2. Detecção de queima. 3.
Rugosidade. 4. Microdureza. 5. Redes neurais
artificiais. I – Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Ciências. II - Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Campus de Bauru



ANÁLISE DE SUPERFÍCIES DE PEÇAS RETIFICADAS COM O USO DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

WALLACE CHRISTIAN FEITOSA DE PAULA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais em 26 de janeiro de 2007 como requisito à obtenção do título de Mestre.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Prof. Dr. Amauri Hassui
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEDICATÓRIA

À minha esposa Fabiana e minhas filhas
Luize e Nicole, pelo amor, apoio, incentivo
e paciência...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me proporcionar saúde, sabedoria e persistência na busca de meus objetivos.

Agradeço a meus pais e familiares, pelo suporte que sempre me proporcionaram em minha caminhada.

Ao professor Dr. Paulo Roberto de Aguiar, não somente por ser o orientador deste projeto, mas por ser um amigo e um exemplo de ser humano.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais e do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia da UNESP de Bauru, pela inestimável contribuição que proporcionaram à minha formação profissional.

Ao professor Dr. César Antunes de Freitas, pela coordenação dos testes de microdureza conduzidos no Laboratório de Materiais Dentários da Faculdade de Odontologia da USP – Campus de Bauru.

Agradeço aos bolsistas de Iniciação Científica Ricardo Robles Leite, Carlos Eduardo Dorigatti Cruz, Lúcio Roberto da Silva Santana, bem como aos graduandos André Jordan Botaro de Lima, Ricardo Costa Prazeres, Marcelo M. Spadotto e ao mestrando Patrik Nascimento Lançoni, pelas inúmeras contribuições agregadas a este trabalho.

A todos deixo os meus votos de sucesso pessoal e profissional.

PAULA, W. C. F. de. **Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais**. 2007. 151f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais). Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru, 2007.

RESUMO

O cenário mundial tem apresentado um ambiente de alta competição industrial, pressionando cada vez mais as indústrias a tornarem seus processos produtivos mais eficientes. Além da eficiência, a precisão é de extrema importância num ambiente onde as empresas tentam manter padrões e procedimentos que se adaptem às normas internacionais. Um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de componentes mecânicos de precisão é a retificação, e um dos critérios preponderantes na qualidade final de um produto é a integridade superficial, influenciada principalmente por fatores térmicos e mecânicos. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar as relações intrínsecas entre a qualidade superficial de peças retificadas e o comportamento dos sinais correspondentes de emissão acústica e potência de corte para a retificação tangencial plana utilizando-se redes neurais artificiais. A caracterização da qualidade superficial das peças foi analisada por meio de parâmetros de queima superficial, rugosidade e microdureza. Verificou-se que o uso de redes neurais artificiais na caracterização da qualidade de superfícies de peças retificadas obteve bons resultados, apresentando-se como uma proposta interessante para implementação de sistemas inteligentes em ambientes industriais.

Palavras-chave: Retificação, Detecção de Queima, Rugosidade, Microdureza, Redes Neurais Artificiais.

PAULA, W. C. F. de. **Surface analysis of grinding workpieces using artificial neural networks**. 2007. 151p. Dissertation (Master of Science degree in Science and Technology of Materials). Sao Paulo State University – UNESP, Bauru, 2007.

ABSTRACT

The world scenario has presented a high industrial competition, pressuring each time more the industries to change its more efficient productive processes. Besides efficiency, the precision is of extremely importance in a world where the companies try to maintain patterns and procedures that fit international demands. One of the most used final processes in the manufacturing of mechanical precision components is grinding, and one of the main criteria in the final quality of a product is its surface integrity, mainly influenced by thermal and mechanical factors. Thus, the objective of this work is to investigate the existing relationships between the surface quality of grinding workpieces and the behavior of correspondent signal of acoustic emission and cutting power to the surface grinding machines using artificial neural network. The characterization of the surface quality of the workpieces was analyzed through surface burning parameters, surface roughness and microhardness. It was verified that the use of artificial neural networks in the characterization of quality of surfaces grinding workpieces had positive results, being presented as an interesting proposal to implementation of intelligent systems in the industrial environments.

Keywords: Grinding, Burning Detection, Surface Roughness, Microhardness, Artificial Neural Networks.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo do Trabalho	2
1.3 Estrutura deste Documento	2
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A Importância dos Processos de Usinagem	4
2.2 Conceitos do Processo de Retificação	4
2.2.1 Características Básicas de um Sistema de Retificação	5
2.3 Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação do Tipo Tangencial Plana	7
2.3.1 Comportamento da Profundidade de Corte (a)	8
2.3.2 Comportamento da Velocidade de Corte (V_s)	8
2.3.3 Comportamento da Velocidade da Peça (V_w)	9
2.3.4 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})	10
2.3.5 Relação G	11
2.4 Restrições do Processo de Retificação	11
2.4.1 Capacidade de Potência da Máquina	12
2.4.2 Vibrações da Máquina-Ferramenta	13
2.4.3 Danos Térmicos	14
2.4.4 Desgaste do Rebolo	15
2.5 Ferramenta de Corte	16
2.5.1 Tipos de Abrasivos	17
2.5.2 Ligantes	19
2.5.3 Dureza	19
2.5.4 Granulometria	20
2.5.5 Estrutura	20
2.6 Operação de Dressagem	21
2.6.1 Ferramentas de Dressagem	22
2.6.2 Influência da Dressagem no Processo de Retificação	23
2.6.3 Grau de Recobrimento (U_d)	24
2.7 Fluidos de Corte	24
2.8 Integridade Superficial da Peça de Trabalho	25
2.8.1 Queima de Oxidação	27
2.8.2 Amolecimento Térmico	28
2.8.3 Queima de Reendurecimento	28
2.8.4 Tensão Residual de Tração	28
2.9 Rugosidade	30
2.9.1 Valores de Rugosidade Média em Manufatura	31
2.9.2 Rugosidade em Processos de Usinagem	31
2.9.3 Tolerâncias	32
2.10 Dureza	33
2.10.1 Fatores que Influenciam na Exatidão de Ensaios de Dureza	35
2.10.2 Microdureza Vickers	36
2.11 Monitoramento do Processo de Retificação	38

2.12	Monitoração de Danos Térmicos no Processo de Retificação	38
2.12.1	Sinal de Emissão Acústica (EA)	39
2.12.2	Utilização do Sinal de EA nos Processos de Retificação.....	39
2.13	Aquisição de Dados e Processamento de Sinais.....	40
2.13.1	Amplificação	42
2.13.2	Filtragem	42
2.14	Parâmetros Estatísticos para Detecção de Queima.....	43
2.14.1	Valor RMS do Sinal de Emissão Acústica.....	43
2.14.2	DPO.....	43
2.14.3	DPKS.....	44
2.15	Redes Neurais Artificiais.....	45
2.15.1	Princípios das Redes Neurais Artificiais.....	45
2.15.2	Neurônios Artificiais.....	46
2.15.3	Tipos de Função de Ativação.....	48
2.15.4	Topologias de Redes	50
2.15.5	Arquitetura de Redes.....	52
2.15.6	Aprendizagem	52
2.15.7	Regras de Aprendizagem	54
2.15.8	Perceptron	57
2.15.9	Rede Neural Backpropagation	59
2.15.10	Taxa de Aprendizagem	61
2.15.11	Termo Momentum	62
2.15.12	Etapas de Projeto de uma Rede Neural	62
2.15.13	Dimensionamento de uma Rede Neural.....	63
2.15.14	Redes Neurais Aplicadas à Manufatura	65
2.15.15	Limitações das Redes Neurais	67
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....		68
3.1	Desenvolvimento Inicial.....	68
3.2	Escolha do Tipo de Operação de Retificação.....	68
3.3	Seleção e Confeção dos Corpos de Prova.....	69
3.4	Escolha do Rebolo	70
3.5	Fluido de Corte	71
3.6	Ajustes da Máquina Retificadora	72
3.6.1	Balanceamento do Rebolo.....	72
3.6.2	Fixação do Corpo de Prova.....	73
3.6.3	Ajuste da Velocidade Tangencial da Mesa	74
3.6.4	Ajuste da Velocidade do Rebolo.....	75
3.6.5	Controle de Dressagem	76
3.7	Sensor de Emissão Acústica.....	78
3.8	Sensor de Potência Elétrica	80
3.9	Sistema de Aquisição de Sinais.....	80
3.10	Processamento de Sinais.....	81
3.11	Software de Detecção de Queima.....	82
3.12	Medição de Rugosidade	82
3.13	Medição de Microdureza	84
3.14	Dimensionamento das Redes Neurais Artificiais	85
3.14.1	Estruturas das Redes Neurais Artificiais.....	86
3.14.2	Conjunto de Dados de Entrada das Redes Neurais	87
3.14.3	Conjunto de Dados de Saída das Redes Neurais.....	88

3.14.4 Determinação dos Parâmetros das Redes Neurais	88
CAPÍTULO 4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	90
4.1 Introdução	90
4.2 Banco de Ensaios	90
4.3 Medidas Pós-Retificação	92
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5.1 Introdução	93
5.1.1 Sinais de Emissão Acústica e Potência	93
5.1.2 Resultados de Quantificação de Queima	101
5.1.3 Resultados de Rugosidade	105
5.1.4 Resultados de Microdureza	114
5.1.5 Comportamento do Conjunto de Variáveis de Entrada e Saída das RNAs	123
5.1.6 Resultados das Redes Neurais Artificiais	125
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	131
6.1 Considerações Finais e Conclusões	131
CAPÍTULO 7 SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
ANEXO I PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	142
Sistemas de Medição de Rugosidade	142
Rugosidade Média	142
Rugosidade Máxima	143
Rugosidade Parcial	144
ANEXO II RUGOSIDADE MÉDIA EM PROCESSOS DE MANUFATURA	145
ANEXO III PRINCIPAIS ENSAIOS DE DUREZA	146
ANEXO IV VALORES OBTIDOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	147
ANEXO V SOFTWARE DE DETECÇÃO DE QUEIMA	148
ANEXO VI CÓDIGO FONTE MATLAB – REDES NEURAS	150
ANEXO VII TRABALHOS PUBLICADOS	151

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de Boothroyd & Knight, 1989).....	5
Figura 2 – Esquema da superfície de retificação superficial (King & Hahn, 1986).....	6
Figura 3 – Variáveis de entrada e saída para máquinas e processos de retificação (Adaptado de King & Hahn, 1986).	7
Figura 4 – Influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Aguiar, 1997)	9
Figura 5 – Espessura de corte equivalente para uma operação tangencial plana do tipo pendular (Aguiar, 1997)	10
Figura 6 – Modelo idealizado de Retificação Plana quanto à rigidez (Aguiar, 2003)	14
Figura 7 – Porcentagem dos fatores que influenciam para a queima no processo de retificação (Adaptado de Kwak & Ha, 2004).....	15
Figura 8 – Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Stemmer, 1992).....	20
Figura 9 – Esquema do processo de dressagem (Adaptado de Bianchi, 1990).....	23
Figura 10 – Interações entre rebolo e peça (Badger & Torrance, 2000)	29
Figura 11 – Medição da rugosidade média.....	31
Figura 12 – Relação entre a rugosidade e o número de peças usinadas (Adaptado de Kwak e Ha, 2004)	32
Figura 13 – Ensaio de dureza Brinell (Leta et al., 2004).....	34
Figura 14 – Ensaio de dureza Vickers (Leta et al., 2004)	34
Figura 15 - Relação entre as áreas e o Processamento Digital de Sinais (Smith, 1999)	41
Figura 16 – Estrutura básica de um neurônio biológico (Adaptado de Haykin, 2001)	46
Figura 17 – Estrutura básica de um neurônio artificial (Adaptado de Haykin, 2001).....	47
Figura 18 – Formato básico de uma rede neural artificial (Carvalho, 2006).....	51
Figura 19 – Diferenças entre um problema linearmente separável e outro não-linearmente separável (Oliveira, 2006)	58
Figura 20 – Fluxo de correção dos pesos em uma rede backpropagation (Mello, 2004).....	60
Figura 21 – Corpo de prova previamente tipografado.....	69
Figura 22 – Refratômetro utilizado na medição da concentração do fluido de corte.....	72
Figura 23 – Suporte utilizado no balanceamento do rebolo	72
Figura 24 – Massas de metal utilizadas para o balanceamento do rebolo.....	73
Figura 25 - Fixação e alinhamento do corpo de prova na máquina retificadora	74
Figura 26 – Tacômetro utilizado na medição da velocidade tangencial da mesa retificadora	75
Figura 27 - Projetor de perfis usado na medição da largura da ponta do dressador.....	77
Figura 28 – Posicionamento do sensor de emissão acústica sobre a bancada de ensaios	79
Figura 29 – Sistema de monitoração de EA do fabricante Sensis	79
Figura 30 – Interface do programa LabVIEW utilizado nos ensaios	81
Figura 31 – Medição de rugosidade das peças ensaiadas.....	83
Figura 32 - Divisão da peça para medição de rugosidade média	83
Figura 33 – Equipamento de medição de microdureza	84
Figura 34 – Divisões da peça para medição de microdureza	85
Figura 35 - Estruturas das redes neurais utilizadas no projeto	87
Figura 36 – Síntese dos ensaios elaborados para definição das redes neurais	89
Figura 37 – Banco de ensaios experimentais.....	91

Figura 38 – Processo de usinagem utilizado no banco de ensaios	91
Figura 39 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 5,0µm (Peça A)	94
Figura 40 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 7,5µm (Peça B)	94
Figura 41 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 10µm (Peça C)	95
Figura 42 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 12,5µm (Peça D)	95
Figura 43 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 15µm (Peça E)	96
Figura 44 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 17,5µm (Peça F)	96
Figura 45 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 20µm (Peça G)	97
Figura 46 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 22,5µm (Peça H)	97
Figura 47 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 25µm (Peça I)	98
Figura 48 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 27,5µm (Peça J)	98
Figura 49 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 30µm (Peça K)	99
Figura 50 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 35µm (Peça L)	99
Figura 51 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 40µm (Peça M)	100
Figura 52 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 45µm (Peça N)	100
Figura 53 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 50µm (Peça O)	101
Figura 54 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 5µm (Peça A)	106
Figura 55 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 7,5µm (Peça B)	106
Figura 56 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 10µm (Peça C)	107
Figura 57 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 12,5µm (Peça D)	107
Figura 58 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 15µm (Peça E)	108
Figura 59 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 17,5µm (Peça F)	108
Figura 60 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 20µm (Peça G)	109
Figura 61 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 22,5µm (Peça H)	109
Figura 62 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 25µm (Peça I)	110
Figura 63 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 27,5µm (Peça J)	110
Figura 64 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 30µm (Peça K)	111
Figura 65 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 35µm (Peça L)	111
Figura 66 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 40µm (Peça M)	112
Figura 67 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 45µm (Peça N)	112
Figura 68 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 50µm (Peça O)	113
Figura 69 – Rugosidade média obtida para as profundidades de corte ajustadas	113
Figura 70 – Medidas de microdureza para a profundidade de 5µm (Peça A)	115

Figura 71 – Medidas de microdureza para a profundidade de 7,5µm (Peça B)	115
Figura 72 – Medidas de microdureza para a profundidade de 10µm (Peça C)	116
Figura 73 – Medidas de microdureza para a profundidade de 12,5µm (Peça D)	116
Figura 74 – Medidas de microdureza para a profundidade de 15µm (Peça E)	117
Figura 75 – Medidas de microdureza para a profundidade de 17,5µm (Peça F)	117
Figura 76 – Medidas de microdureza para a profundidade de 20µm (Peça G)	118
Figura 77 – Medidas de microdureza para a profundidade de 22,5µm (Peça H)	118
Figura 78 – Medidas de microdureza para a profundidade de 25µm (Peça I)	119
Figura 79 – Medidas de microdureza para a profundidade de 27,5µm (Peça J)	119
Figura 80 – Medidas de microdureza para a profundidade de 30µm (Peça K)	120
Figura 81 – Medidas de microdureza para a profundidade de 35µm (Peça L)	120
Figura 82 – Medidas de microdureza para a profundidade de 40µm (Peça M)	121
Figura 83 – Medidas de microdureza para a profundidade de 45µm (Peça N)	121
Figura 84 – Medidas de microdureza para a profundidade de 50µm (Peça O)	122
Figura 85 - Microdureza média obtida para as profundidades de corte ajustadas	122
Figura 86 – Comportamento dos parâmetros de entrada das RNAs	124
Figura 87 - Comportamento dos parâmetros de saída das RNAs	125
Figura 88 – Comparativo de desempenho das estruturas desenvolvidas para as redes neurais	127
Figura 89 – Desempenho da rede 3-20-3 obtido pela estrutura 1	128
Figura 90 – Curva de desempenho da rede de arquitetura 3-20-3 no estágio de treinamento	129
Figura 91 – Linha média de um perfil de rugosidade (Adaptado de Agostinho et al., 1981)	142
Figura 92 – Parâmetro de rugosidade R_a (Agostinho et al., 1981)	143
Figura 93 – Parâmetro de rugosidade R_y (Agostinho et al., 1981)	143
Figura 94 – Parâmetro de rugosidade R_z (Agostinho et al., 1981)	144
Figura 95 – Valores de R_a para diferentes processos de fabricação (Adaptado da Norma DIN 4766)	145
Figura 96 – Janela de inicialização do software Grinding Analyses (Dotto, 2004)	148
Figura 97 – Janela principal do software Grinding Analyses (Dotto, 2004)	148
Figura 98 – Tela do software de Quantificação de Queima	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin, 1989)	19
Tabela 2 – Tipos de funções de ativação	49
Tabela 3 – Profundidade de corte das peças utilizadas e sua codificação	70
Tabela 4 – Rebolo utilizado nos ensaios experimentais	71
Tabela 5 – Parâmetros utilizados na aquisição do sinal de EA	80
Tabela 6 – Parâmetros de usinagem	92
Tabela 7 – Profundidades adotadas para os ensaios realizados	93
Tabela 8 – Fotografias das peças usinadas na retificadora plana	102
Tabela 9 – Quantificação percentual de queima das peças	103
Tabela 10 – Classificação de queima das peças retificadas	105
Tabela 11 – Resultados das redes neurais para a Estrutura 1	126
Tabela 12 – Resultados das redes neurais para a Estrutura 2	126
Tabela 13 – Resultados das redes neurais para a Estrutura 3	126
Tabela 14 – Ensaios de dureza (Callister, 2002)	146
Tabela 15 – Dados provenientes dos ensaios experimentais	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	<i>Profundidade de Corte [μm]</i>
A_0	<i>Área Projetada de Indentação</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
a_d	<i>Penetração de Dressagem [μm]</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
B	<i>Largura de Retificação [mm]</i>
b_d	<i>Largura de Atuação do Dressador [mm]</i>
b_s	<i>Largura do Rebolo [mm]</i>
CBN	<i>Nitreto Cúbico de Boro</i>
DAC	<i>Data Acquisition</i>
d_e	<i>Diâmetro Equivalente [mm]</i>
d_s	<i>Diâmetro do Rebolo [mm]</i>
d_w	<i>Diâmetro da Peça [mm]</i>
EA	<i>Emissão Acústica</i>
FFT	<i>Transformada Rápida de Fourier</i>
F_n	<i>Força Normal de Corte</i>
F_t	<i>Força Tangente de Corte [N]</i>
G	<i>Relação entre Volume Retificado e Desgaste do Rebolo</i>
h'	<i>Profundidade de Corte Crítica [μm]</i>
h_{eq}	<i>Espessura Equivalente de Corte [μm]</i>
$h_{m\acute{a}x}$	<i>Espessura Teórica Máxima do Cavaco [mm]</i>
K1	<i>Rigidez da Máquina (Cabeçote)</i>
K2	<i>Rigidez da Mesa e Suporte da Peça</i>
K_{eq}	<i>Rigidez Equivalente do Sistema</i>
L	<i>Espaçamento Médio entre Grãos Abrasivos [μm]</i>
lc	<i>Comprimento de Contato [mm]</i>
LMS	<i>Least Mean Square</i>
lr	<i>Learning Rate</i>
LSE	<i>Least Square Error</i>
mc	<i>Momentum Coefficient</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>
μ_x	<i>Média das Amostras</i>
n	<i>Rotação do Rebolo</i>
P	<i>Potência de Corte na Retificação</i>
POT	<i>Potência de Corte</i>
Q'_w	<i>Taxa de Remoção por Unidade de Largura [mm^3/s]</i>

Q_w	<i>Taxa de Remoção [mm^2/s]</i>
R_a	<i>Average Roughness [μm]</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNA	<i>Redes Neurais Artificiais</i>
R_y	<i>Rugosidade Máxima [μm]</i>
R_z	<i>Rugosidade Parcial [μm]</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
S_d	<i>Passo de Dressagem [mm]</i>
σ_x	<i>Desvio Padrão das Amostras</i>
u	<i>Energia Específica de Retificação [J/mm^3]</i>
U_d	<i>Grau de Recobrimento de Dressagem do Rebolo</i>
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
V_d	<i>Velocidade de dressagem</i>
V_f	<i>Velocidade de Mergulho [m/s]</i>
V_s	<i>Velocidade de Corte do Rebolo [m/s]</i>
V_{sd}	<i>Velocidade de Dressagem [m/s]</i>
V_w	<i>Velocidade Periférica da Peça [m/s]</i>
Z	<i>Taxa Volumétrica de Remoção de Cavaco</i>
Z_w	<i>Volume de metal retificado [mm^3]</i>
Z_s	<i>Volume de rebolo gasto [mm^3]</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O processo de retificação pode ser definido como a remoção de material por desgaste abrasivo. Trata-se da última etapa dentro do processo de fabricação e, por esta razão, tem um grande valor agregado ao produto final. Nesse contexto, pesquisadores têm como objetivo controlar o processo de retificação por meio de abordagens que qualificam e quantificam com fidelidade o processo. Por se tratar de um processo de alta precisão, e responsável pelo acabamento final em processos de manufatura, o desenvolvimento dessa área se torna imprescindível para a indústria metal-mecânica.

Vários sistemas de monitoramento de força de corte ou potência e emissão acústica (EA) têm sido avaliados por pesquisadores para controlar a qualidade da retificação. Entretanto, tais técnicas de monitoramento ainda falham em determinadas situações, onde as variações do fenômeno não são completamente captadas pelos sinais empregados (Aguiar, 1997). Sinais de emissão acústica e potência de corte têm sido utilizados com sucesso na determinação de parâmetros indicativos da queima.

Comparado a outros testes não-destrutivos de materiais, o monitoramento de processos por sinais de emissão acústica são mais complexos. Entretanto, tal monitoração é mais desafiante do que outros mecanismos devido à orientação e distribuição irregular dos grãos do rebolo (Liu et al., 2006).

Assim, sinais de EA e potência de corte tratados e combinados podem possibilitar a implementação de um sistema de controle em tempo real da queima, otimizando o processo de retificação (Wang et al., 2001; Aguiar, 2003; Aguiar et al., 2006a; Dotto et al., 2006).

Dentre as possibilidades de melhoramento da retificação, pode-se citar a aplicação deste processo associado aos conceitos e práticas de inteligência computacional, a qual se refere à capacidade de uma máquina executar tarefas normalmente associadas ao intelecto humano, tais como: o raciocínio, o aprendizado e o auto-melhoramento (Rowe et al., 1996).

Uma das técnicas mais conhecidas de inteligência computacional é a das redes neurais artificiais (RNA), que são modelos computacionais análogos ao cérebro humano e possuem como principal característica a capacidade de aprendizado. Trata-se de uma boa ma-

neira de classificar e prever regras, principalmente quando os resultados do modelo são mais importantes que a compreensão de seu funcionamento.

Para situações onde as variáveis a serem estudadas possuam relações complexas ou não linearidades, o uso de redes neurais se apresenta como uma ferramenta eficiente se comparada a outros métodos clássicos de predição.

Sua aplicação tem obtido rápido crescimento em aplicações voltadas a ambientes industriais. Estudos recentes indicam que as redes neurais artificiais são utilizadas em aproximadamente 39% nos setores de produção ou manufatura (Govindhasamy et al., 2005), representando desta forma uma poderosa ferramenta de análise a ser aplicada em problemas de retificação.

Segundo Aguiar et al. (2005), o uso de redes neurais na detecção da queima no processo de retificação é uma boa alternativa devido à sua capacidade de auto-ajuste para novas calibrações, generalizando assim os resultados que podem ser obtidos.

1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é investigar as relações intrínsecas entre a qualidade superficial de peças retificadas por meio de processos de retificação tangencial plana e o comportamento dos sinais correspondentes de emissão acústica e força de corte utilizando redes neurais artificiais. A caracterização da qualidade superficial das peças foi investigada por meio da análise de ocorrência de queima da peça, rugosidade e microdureza.

1.3 Estrutura deste Documento

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, discorrendo sobre a importância da automação no processo de retificação e a necessidade de controlar os danos térmicos ocorridos nesse processo; além de sintetizar os objetivos principais a serem desenvolvidos na elaboração do trabalho. O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica sobre o sistema de retificação, com ênfase no monitoramento dos parâmetros indicativos de qualidade de superfícies retificadas pelo processo de retificação tangencial plana, e as aplicações da inteligência computacional nos processos de fabricação. Uma atenção especial é dada para a aquisição de dados e processamento de sinais, visto que foram

ferramentas imprescindíveis para se alcançar os objetivos da presente pesquisa. O Capítulo 3 reporta os materiais e métodos utilizados, a escolha do tipo de operação de retificação, materiais e rebolos empregados, medição dos sinais de emissão acústica e potência de corte, montagem do banco de ensaios, balanceamento e dressagem do rebole, determinação da velocidade de deslocamento da mesa da máquina e velocidade de corte, processamento de sinais provenientes do banco de ensaios elaborado, as etapas de medição de rugosidade e de microdureza e os procedimentos realizados para o dimensionamento das redes neurais artificiais destinadas à predição dos parâmetros estabelecidos como indicadores de qualidade superficial das peças. O Capítulo 4 descreve os ensaios realizados na máquina retificadora bem como as medições pós-retificação de rugosidade e microdureza. O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais observadas neste trabalho e no Capítulo 7 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

As Bibliografias consultadas e referenciadas, bem como alguns Anexos finalizam o trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Importância dos Processos de Usinagem

Os processos de usinagem representam uma parcela significativa das operações de manufatura. (Shin et al., 1992). Estima-se que 15% do valor de todos os componentes mecânicos manufaturados em todo o mundo são derivados de operações de usinagem (Govindhasamy, 2005). Dentre os principais métodos 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 (Bianchi et al., 1996).

O processo de retificação visa melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade das peças (Vieira et al., 1999). Trata-se de um processo de alta precisão e importância, já que é inaceitável a perda de uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase já é muito elevado devido aos outros processos que antecederam o mesmo (Soares, 2002).

A necessidade de efetivas reduções de custos, aliada ao aumento de qualidade das peças produzidas, requer a implementação de sistemas mais inteligentes em ambientes industriais. Portanto, o controle dos danos causados no processo de retificação é de interesse direto a todos os setores dependentes desse processo, levando assim a uma taxa mais baixa de perdas de peças e conseqüentemente a um custo mais baixo de produção.

A pesquisa bibliográfica descrita a seguir objetiva a formação de uma base teórica para aplicação nos procedimentos experimentais deste estudo.

2.2 Conceitos do Processo de Retificação

A retificação é um processo de usinagem que consiste na remoção de material da peça mediante abrasivo. O abrasivo é constituído de grãos cortantes que removem cavacos muito pequenos de material, motivo pelo qual o acabamento superficial da peça é geralmente melhor que o obtido por outros processos de usinagem, tais como torneamento e fresamento.

Ao contrário dos processos de fabricação com ferramenta de geometria definida, como o fresamento e o torneamento, na retificação a remoção de cavaco é realizada por uma infinidade de arestas de corte geometricamente não definidas. Cada grão abrasivo da superfície do rebolo funciona como uma ferramenta de corte. A Figura 1 apresenta a formação do cavaco por um grão abrasivo, sendo este o responsável pelo corte da peça que está sendo retificada.

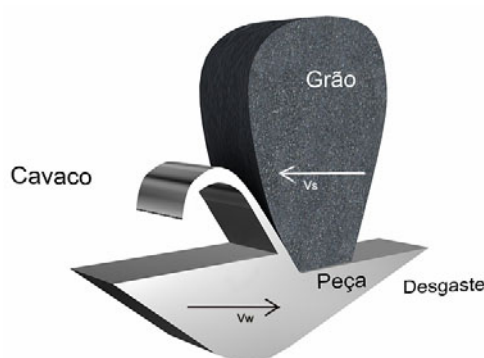


Figura 1 - Formação do cavaco por um grão abrasivo (Adaptado de Boothroyd & Knight, 1989)

Procedendo a uma análise estatística dos processos de remoção de cavaco, obter-se-ão leis equivalentes que podem ser deduzidas da cinemática do processo.

Quando uma superfície abrasiva em movimento entra em contato com a peça, sendo a força alta o bastante, o material é removido da peça e o rebolo se desgasta. Estes dois fatores sempre irão ocorrer, contudo, o nível da força determina o quão rápido serão as taxas de remoção de material, qual será a rugosidade resultante, e se a peça será metalurgicamente danificada ou não.

2.2.1 Características Básicas de um Sistema de Retificação

A largura do contato rebolo-peça é usualmente denominada por B . Geralmente utilizam-se taxas volumétricas de remoção ao invés de taxas radiais. Isto permite relacionar sistemas de tamanhos diferentes entre si. Taxas volumétricas de remoção têm sido classificadas de Z (e, mais recentemente, Q) em publicações internacionais (Aguilar, 2003).

Neste processo estão envolvidas duas forças: F_n , ou força normal à superfície de contato rebolo-peça e F_t , ou força tangencial à superfície de contato. Multiplicando F_t pela

velocidade do rebolo tem-se a potência usada na retificação. Convencionou-se internacionalmente usar quantidades “primárias” para ilustrar fatores “por unidade de largura”. Dessa forma taxas volumétricas de remoção por unidade de largura seriam escritas como: F'_n , F'_t , Z'_w , Z'_s (ou Q'_w e Q'_s). Estas convenções são um tanto confusas no início, porém uma vez compreendidas, pode-se ler artigos do mundo inteiro sem a necessidade de checagem contínua dos símbolos (King & Hahn, 1986).

A Figura 2 mostra uma configuração da retificação tangencial plana que ilustra outra maneira de cálculo de taxas de remoção volumétricas. A profundidade de corte é denominada por “ a ” e a largura de contato é determinada como B . A taxa de remoção é dada pela Equação (1).

$$Z = a.V_w.B \quad (1)$$

Onde: a : profundidade de corte;

V_w : velocidade periférica da peça;

B : largura de retificação.

e a taxa de remoção por unidade de largura é dada pela Equação (2).

$$Z' = a.V_w \quad (2)$$

Onde: a : profundidade de corte;

V_w : velocidade periférica da peça.

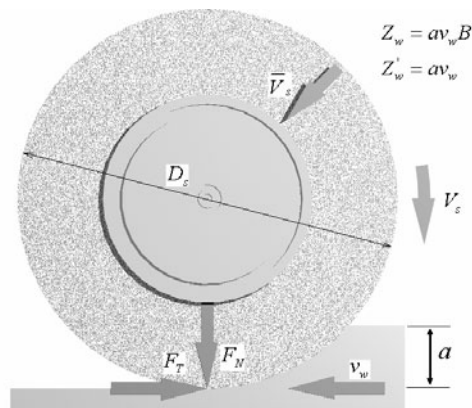


Figura 2 – Esquema da superfície de retificação superficial (King & Hahn, 1986)

2.3 Principais Variáveis e Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação do Tipo Tangencial Plana

Segundo King & Hahn (1986), em operações de planejamento da retificação é necessário definir as entradas e saídas do processo e desenvolver relações entre elas. Para que isto seja feito é importante distinguir as variáveis de entrada da retificadora e entradas do processo de retificação que ocorrem na interação rebolo-peça. Os parâmetros de entrada típicos das máquinas retificadoras são: velocidade de avanço, velocidade do rebolo, velocidade da peça e tempo de centelhamento. As variáveis do sistema são apresentadas no diagrama da Figura 3.



Figura 3 – Variáveis de entrada e saída para máquinas e processos de retificação (Adaptado de King & Hahn, 1986).

Nas máquinas de retificação convencionais a taxa de avanço é um parâmetro controlado. Como o rebolo interage com a peça, forças são induzidas na interface rebolo-peça; sendo que, quanto maior a força, maior a remoção de material. A força induzida também controla o acabamento superficial, a deflexão da máquina e o princípio do dano térmico. Portanto, a força induzida é uma das mais importantes variáveis que normalmente não são controladas nas máquinas de retificação convencionais.

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.

2.3.1 Comportamento da Profundidade de Corte (a)

Segundo Bianchi et al. (1996), a deflexão entre o rebolo e a peça aumenta quando a área de contato e, conseqüentemente, o número de grãos em contato com a peça aumentam. Sendo assim, a temperatura durante o processo também aumenta. Portanto, um aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de metal. Os cavacos resultantes são mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão. Desta forma, o atrito e o riscamento entre os cavacos removidos e a peça elevam a temperatura na região de corte tendo como consequência a elevação de rugosidade, nível de emissão acústica e forças de corte normal e tangencial. Hassui (2002) apresentou em seu trabalho um modelo teórico para avaliar o empastamento do rebolo relacionando o mesmo com variáveis de processo. Este modelo baseia-se na adesão que ocorre na interface do grão abrasivo com o cavaco. O autor conclui que o empastamento aumenta com o aumento da profundidade de corte, mas não é influenciado pela velocidade da peça.

2.3.2 Comportamento da Velocidade de Corte (V_s)

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

Quando a velocidade de corte 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 solicitação 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 (Bianchi et al., 1996).

2.3.3 Comportamento da Velocidade da Peça (V_w)

De acordo com Bianchi et al. (1996), 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. Este comportamento pode ser observado com o auxílio do gráfico apresentado na Figura 4. 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 grãos.

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, fato este também observado no gráfico apresentado pela Figura 4. Os grãos tendem a se fraturar e a se desprender da superfície de corte do rebolo. Neste caso, 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.

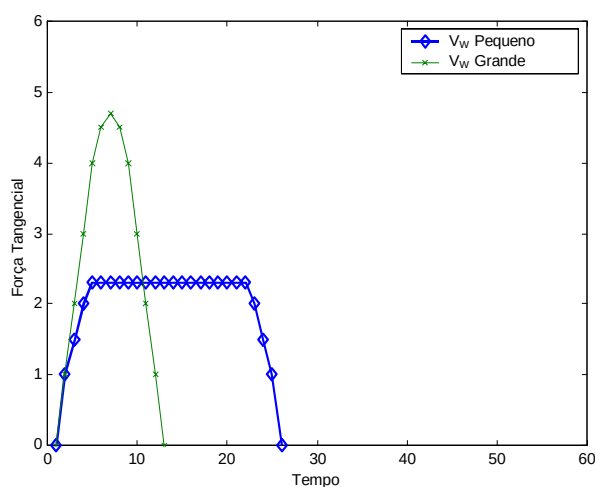


Figura 4 – Influência da velocidade da peça no tempo de contato e na força tangencial de corte (Aguilar, 1997)

2.3.4 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

De acordo com Bianchi (1990), a espessura equivalente de corte h_{eq} [μm] representa a espessura da camada de metal que é arrancada pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro teórico que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis V_s e V_w , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação. A espessura equivalente é expressa pela Equação (3).

$$h_{eq} = \frac{aV_w}{V_s} \quad (3)$$

Onde: a : profundidade de corte;

V_w : velocidade periférica da peça;

V_s : velocidade de corte do rebolo.

O parâmetro h_{eq} está diretamente relacionado com o comportamento do processo de retificação em função de variáveis envolvidas como forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta, entre outros. A Figura 5 apresenta o parâmetro h_{eq} .

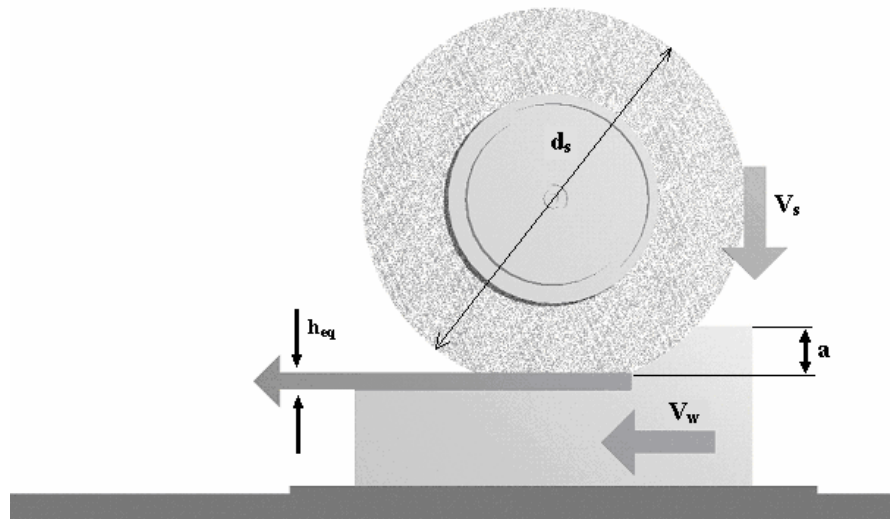


Figura 5 – Espessura de corte equivalente para uma operação tangencial plana do tipo pendular (Aguiar, 1997)

2.3.5 Relação G

Segundo Bianchi (1990), o parâmetro G foi definido como sendo a relação entre o volume de metal retificado e o desgaste volumétrico do rebolo. Este parâmetro é representado pela Equação (4).

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \quad (4)$$

Onde: Z_w : volume de metal retificado;

Z_s : volume de rebolo gasto.

Esta relação caracteriza o desgaste de um rebolo sob determinadas condições de trabalho. Se o desgaste do rebolo for grande, a relação G é pequena. Isto significa que está havendo auto-afiação e, portanto, o rebolo permanece agressivo pela renovação dos grãos abrasivos. Se o desgaste do rebolo for pequeno a relação G é alta e, desta forma, não há liberação dos grãos gastos e o rebolo perde a agressividade pelo desgaste do topo dos grãos.

2.4 Restrições do Processo de Retificação

Um dos danos mais comuns provenientes do processo de retificação é a queima da peça. Este fenômeno tem sido investigado por vários pesquisadores, porém, não existem ainda métodos de medida que permitam o monitoramento em tempo real da queima de peças. O usuário industrial é forçado a confiar em testes destrutivos de peças que são obtidas aleatoriamente. Isto resulta em perda de tempo e alto custo de produção, conflitando com os procedimentos atuais de crescente demanda por mínimo custo (Konig, 1993).

Por meio de medições de microdureza na superfície de aços temperados verificou-se que a queima induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de reaustenitização do material. Para aços temperados retificados sem queima, existe geralmente um amolecimento do material próximo à superfície, por terem sido atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima ocorre a retêmpera do material, a qual é consequência da reaustenitização do mesmo, seguida da formação de martensita não revenida. Esta pode ser constatada com o auxílio de uma análise metalográfica, resultando no aumento da microdureza superficial. Evidências metalúrgicas e medições de microdureza indicam que o

limite para início da queima visível coincide com o valor limite da temperatura para início da austenitização do material.

Segundo Malkin (1989), a queima da peça, observada para aços de rolamentos, traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga e conseqüente diminuição do número de ciclos destes aços após a retificação. Este comportamento é atribuído à formação de martensita não-revenida, gerada no processo de queima, em função do aquecimento à temperatura de austenização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões (revenimento).

A melhoria de processos de usinagem usualmente requer a identificação de parâmetros operacionais que irão satisfazer um objetivo ou critério específico. Métodos analíticos de máquina-ferramenta-economia são freqüentemente usados para aperfeiçoar processos de corte de larga escala, como torneamento e fresamento, de acordo com um critério de máxima taxa de produção ou mínimo custo, podendo também ser aplicada uma aproximação similar à retificação. Para o uso destes métodos é necessária uma relação entre a vida da ferramenta e os parâmetros operacionais, similar à equação de vida da ferramenta de Taylor para torneamento ou fresamento. Para retificação de precisão, a vida da ferramenta pode ser interpretada como o tempo útil de retificação entre os redressamentos do rebolo. No entanto, geralmente é mais conveniente expressar a vida da ferramenta em termos da quantidade de material removida entre o redressamento do rebolo ou número de peças por dressagem (Malkin, 1989).

As taxas de produção que podem ser alcançadas pela retificação são limitadas por vários obstáculos. Algumas restrições comumente encontradas incluem: capacidade de potência da máquina, vibrações da máquina-ferramenta, danos térmicos na peça, desgaste excessivo do rebolo, rugosidade e tolerâncias dimensionais e geométricas. Enquanto não é possível prever com exatidão a combinação de parâmetros operacionais prévias à retificação, a transgressão de restrições pode ser identificada tanto durante a retificação ou após a mesma na inspeção da peça. É especialmente importante a prevenção quanto a restrições de produção e a possibilidades de relaxá-las (Malkin, 1989). As restrições citadas anteriormente serão analisadas na seqüência.

2.4.1 Capacidade de Potência da Máquina

Segundo Malkin (1989), a potência líquida disponível na retificadora é um pouco menor que sua potência total avaliada devido à ineficiência no sistema de transmissão. Para a operação da máquina no seu limite de potência do eixo é necessário reduzir a energia especí-

fica do processo para relaxar as restrições e prosseguir para uma taxa de remoção mais rápida. Isto pode ser feito, por exemplo, dressando o rebolo mais grosseiramente, aumentando o avanço no caso de dressador de diamante, mas isto resultará em uma superfície mais rugosa, e esta aproximação para reduzir a energia específica só é possível se a superfície é mais lisa do que o necessário. Outra maneira de diminuir a energia específica para relaxar as restrições de potência inclui o uso de um rebolo mais macio ou um fluido de corte que lubrifique melhor. Uma desvantagem do uso de um rebolo mais macio é a possibilidade de aumento do desgaste.

Para a determinação da potência de acionamento do motor principal é necessário obter o registro da potência de entrada. Ela é composta por:

- Potência do motor em vazio (existente devido ao atrito e perdas);
- Potência de corte como decorrência das forças de retificação.

A potência de corte é obtida pelo produto da força tangencial e da velocidade de corte. Tanto a força tangencial como a força normal diminui com o aumento da velocidade de corte. A evolução da potência de usinagem depende do fato de o aumento da velocidade de corte poder compensar a diminuição da mesma. De uma forma geral, a potência de usinagem aumenta com o aumento da velocidade de corte, conduzindo a temperaturas mais elevadas.

2.4.2 Vibrações da Máquina-Ferramenta

A vibração pode causar baixa qualidade superficial e limitar a capacidade de produção. As vibrações são classificadas em dois tipos: vibrações forçadas e vibração auto-excitada (regenerativa).

Vibrações forçadas podem ser eliminadas ou minimizadas, eliminando ou isolando a origem da vibração. Vibrações auto-excitadas não podem ser eliminadas na maioria dos casos, exceto em operações de baixas taxas de remoção.

Contudo pode ser possível impedir o crescimento da vibração para prolongar o tempo de retificação livre de vibração. Isto usualmente requer a redução das forças ou potências de retificação, que pode ser alcançado por uma dressagem áspera, alta friabilidade (facilidade para fraturar o grão em pedaços, sob uma determinada força ou impacto) do rebolo, ou melhor lubrificação (Malkin, 1989).

A Figura 6 mostra o modelo idealizado de retificação plana quanto à rigidez, onde $K1$ representa a rigidez da máquina (cabecote) e $K2$ a rigidez da mesa e suporte da peça a ser usinada.

Devem ser levadas em consideração ainda a rigidez do rebolo e a rigidez da peça. A rigidez equivalente para uma associação em série de molas segue a Equação (5).

$$\frac{1}{K_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i} \quad (5)$$

Onde: K_{eq} : rigidez equivalente do sistema.

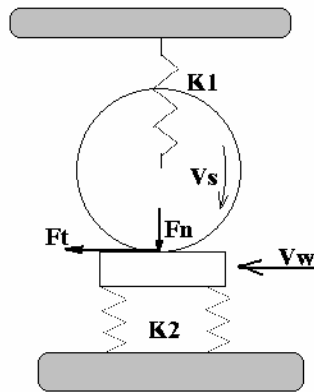


Figura 6 – Modelo idealizado de Retificação Plana quanto à rigidez (Aguiar, 2003)

2.4.3 Danos Térmicos

As altas temperaturas geradas na zona de retificação podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, como por exemplo, queima (no caso de aços), têmpera excessiva da camada superficial com possível reendurecimento e aumento da fragilidade, indesejáveis tensões residuais de tração, redução da resistência à fadiga e trincas. Para atenuar a restrição de danos térmicos é geralmente necessário reduzir a potência de retificação. Isto pode ser obtido utilizando um rebolo mais macio ou uma dressagem mais grosseira, ambas tem suas desvantagens. O fluido de corte também tem um importante efeito como lubrificante. Lubrificação direta com fluidos de retificação torna-se importante principalmente na retificação *creep-feed*. Algumas análises de transferência de calor indicam que o uso de uma velocidade de trabalho maior, mantendo a mesma taxa de remoção, deveria abaixar a temperatura e reduzir o dano térmico, mas isto nem sempre ocorre na prática (Malkin, 1989).

Vários fatores corroboram a incidência de danos térmicos em peças retificadas. Segundo Kwak & Song (2001), a operação de retificação tem sido usada como etapa final de um produto por causa da sua capacidade de cortes mínimos e por causa do êxito com exigências de rugosidade. Se um dano ocorre, um valor aceitável de rugosidade não poderá ser mantido. Danos na retificação são afetados por influência de diversos fatores que são principalmente classificados dentro das condições de usinagem, do tipo de rebolo, das condições de dressagem e do fluido de corte. A Figura 7 descreve a porcentagem de influência dos fatores sobre a queima em um processo de retificação, segundo estudos efetuados por Kwak & Ha (2004).

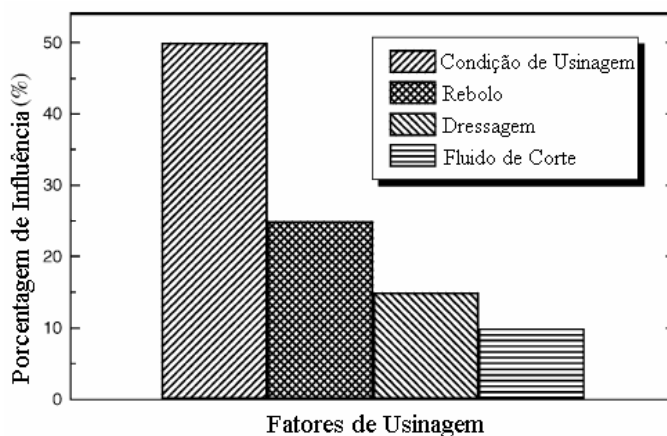


Figura 7 – Porcentagem dos fatores que influenciam para a queima no processo de retificação (Adaptado de Kwak & Ha, 2004)

2.4.4 Desgaste do Rebolo

O desgaste do rebolo pode ser classificado em três tipos: abrasão do grão, fratura do grão e fratura do ligante. Todos os tipos de desgaste ocorrem simultaneamente em maior ou menor grau. O desgaste total pode ser expresso em termos da relação G , que é a taxa volumétrica de material removido em contraposição ao desgaste do rebolo. Para operações típicas de retificação de precisão com rebolos convencionais (óxido de alumínio ou carbeto de silício) o custo do rebolo é geralmente insignificante, e mais rebolo pode ser consumido pela dressagem do que pelo processo de retificação em si. Em tais casos o menor desgaste do rebolo, com a maior relação G , pode não ser a melhor situação, pois pode exigir maiores forças e energias e isso conduz a temperaturas excessivas (Malkin, 1989).

Segundo Malkin (1989), restrições de desgaste do rebolo são freqüentemente associadas à rugosidade e tolerâncias necessárias. Com taxas de remoção maiores a relação G tende a decrescer, levando a uma mais rápida deterioração na forma e no acabamento da superfície. Se maiores forças e altas temperaturas podem ser toleradas, estas restrições de produção podem ser relaxadas usando um rebolo de desgaste lento, que usualmente significa uma menor friabilidade. Um fluido de corte melhor deve aumentar a relação G , diminuindo as forças e a temperatura.

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.

Têm-se assim dois tipos de desgaste:

- Cegamento do grão isolado por desgaste abrasivo mecânico, adesão, corrosão, difusão, bem como micro e microfissuras, em decorrência de tensões térmicas;
- Quebra de grãos integrais ou grupos de grãos por uma solicitação mecânica demasiada do ligante ou em decorrência da deterioração mecânica ou química do ligante.

A interligação desses dois tipos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo. Fala-se em um efeito de auto-afiação quando as arestas cegas, em virtude de uma maior ação da força, quebram e permitem a ação de novos gumes.

2.5 Ferramenta de Corte

O rebolo original foi feito de argila e pó abrasivo, torneado e aquecido por Frank B. Norton no final de 1800. O rebolo, ou disco de retífica, é uma pedra artificial moldada denominada vulgarmente esmeril. É uma ferramenta de corte múltipla, formada por aglomeração compacta de cristais duríssimos que cortam o metal, raspando-os com suas pontas agudas. São constituídos de abrasivos e aglomerantes.

Abrasivos são as ferramentas de corte ou produtores de cavaco do rebolo. O elemento abrasivo pode ser um cristal natural ou artificial em forma de pontas-agudas. Os principais abrasivos são: óxido de alumínio, carbetto de silício, nitreto de boro cúbico e diamante.

As características dos abrasivos que determinam sua eficiência na remoção de material são: dureza do cristal, estrutura do cristal, forma do grão, a friabilidade ou durabilidade do grão, e se foi tratado ou revestido. Segundo King & Hahn (1986), 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.

São necessárias cinco características para que se defina o tipo de rebolo: tipo de abrasivo; ligante; dureza dos grãos; granulometria e estrutura.

2.5.1 Tipos de Abrasivos

Os abrasivos são as ferramentas de corte da retificação. Podem ser subdivididos em 3 grupos: abrasivos naturais, abrasivos convencionais e superabrasivos (Krar, 1995).

2.5.1.1 *Abrasivos Naturais*

Os abrasivos naturais não são normalmente usados nos rebolos, pois não possuem durabilidade para resistir às altas pressões da retificação. Estes abrasivos ainda são usados em algumas aplicações onde baixas pressões e abrasivos baratos e afiados têm utilidade.

2.5.1.2 *Abrasivos Convencionais*

Abrasivos convencionais são primariamente colocados em um forno e fundidos, contudo alguns abrasivos não-fundidos estão disponíveis. Os três abrasivos principais são: óxido de alumínio, alumina com zircônio e carбето de silício.

O óxido de alumínio é usado em rebolos para retificar materiais ferrosos. É o abrasivo convencional mais mole, mas é relativamente resistente ao impacto. A alumina com zircônio é usada para desbaste de metais, particularmente metais ferrosos. Tem a maior resistência ao impacto dos abrasivos convencionais. Existem dois tipos básicos de alumina com zircônio: uma liga de 15% de zircônio e uma outra com maior percentagem de zircônio (comercialmente chamado de Norzon). O primeiro tem maior durabilidade e maior resistência ao impacto. O segundo é mais friável, com capacidade de microfratura e geração de novas superfícies agressivas. Alumina com zircônio não são geralmente usadas nas operações de acabamento devido a sua ineficiência sob forças pequenas.

O rebolo de carbeto de silício é geralmente usado para retificar materiais não-ferrosos. É o mais duro dos abrasivos convencionais, mas tem menor resistência ao impacto que o óxido de alumínio. Existem dois tipos básicos de carbeto de silício: preto e verde. Carbeto de silício preto é menos puro, levemente mais durável, e geralmente mais barato que o tipo verde. Carbeto de silício verde tem pureza maior, é o abrasivo convencional mais agressivo e relativamente caro.

O carbeto de silício não é normalmente utilizado na retificação de aços, pois não é tão eficiente quanto o óxido de alumínio (não remove muito material antes do desgaste de suas arestas). Teoricamente isto ocorre devido à composição química do abrasivo e o conteúdo de carbono dos aços e/ou a necessidade de resistência ao impacto na retificação dos mesmos.

2.5.1.3 Superabrasivos

Os superabrasivos são: diamante e CBN (*Cubic Boron Nitride*). O diamante está disponível tanto como abrasivo natural quanto abrasivo artificial. O alto custo e disponibilidade limitada do diamante natural têm estimulado a sua troca pelo diamante artificial ou sintético. O diamante é usado para retificar carbetos, cerâmicas, vidros e outros materiais refratários. Há muitas formas e purezas de diamantes disponíveis. O CBN é um abrasivo artificial, sendo o segundo material mais duro conhecido. São usados para retificar materiais ferrosos, particularmente aços duros e ligas. Não é encontrado na natureza e é de duas a três vezes mais duro que o abrasivo de óxido de alumínio.

O termo “superabrasivo” é usado para diferenciar os abrasivos de diamante e CBN (nitreto de boro cúbico) dos “convencionais” carbeto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3). A principal propriedade de um abrasivo, que diferencia o superabrasivo de um abrasivo convencional, é sua dureza. Outras propriedades importantes são: resistência ao impacto, afinidade química e estabilidade térmica.

Acredita-se que o CBN seja economicamente viável em uma faixa estimada de 25% do mercado de retificação de precisão, mas seu atual uso está bem acima disso e crescendo rapidamente (Hellmeister, 2004). Comparado ao diamante, o CBN tem resistência ao impacto, resistência ao calor e é quimicamente menos ativo (Khenafes, 2006). Embora não sejam utilizados neste trabalho, os rebolos superabrasivos são de grande importância em qualquer estudo referente à retificação. A Tabela 1 mostra algumas características importantes de rebolos para diferentes tipos de abrasivos.

Tabela 1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin, 1989)

	MATERIAL			
	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	Carbeto de Silício (SiC)	Nitreto de Boro Cúbico (CBN)	Diamante (C)
Estrutura Cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/mm ³)	3.98	3.22	3.48	3.52
Ponto de Fusão	~ 2040 °C	~ 2830 °C	~3700 °C à 13 kbar (ponto triplo)	~ 3700 °C à 130 kbar (ponto triplo)
Dureza Knoop (kg/mm ²)	2100	2400	4700	8000

2.5.2 Ligantes

O ligante ou aglutinante tem a função de manter o grão preso, até que este esteja cego o suficiente 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 são classificados em vitrificados, resinóides, galvânicos, entre outro.

2.5.3 Dureza

A dureza de um rebolo é a resistência oposta ao arrancamento dos grãos, ou seja, uma capacidade de reter os grãos. Essa capacidade depende do tipo de ligante, do tamanho do grão e dos vazios e da espessura das pontes de ligantes. Um rebolo macio solta facilmente os grãos e se desgasta mais rapidamente, logo, um rebolo duro retém fortemente os grãos abrasivos.

A dureza ideal a ser utilizada é aquela que os grãos gastos e arredondados são arrancados por si só, de modo que o rebolo se reafia automaticamente, com mínima necessidade de utilizar a operação de re-afiação do rebolo (Krar, 1995).

2.5.4 Granulometria

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. Grãos mais grossos são utilizados em rebolos para operações de corte e limpeza, enquanto os mais finos são utilizados para polimento e lapidação (Krar, 1995).

2.5.5 Estrutura

A estrutura do rebolo tem relação direta com a densidade e com o espaçamento médio entre os grãos abrasivos. A estrutura fechada é indicada pelos números 0, 1, 2, 3; a estrutura média pelos números 4, 5, 6; e de 7 a 12 a estrutura é aberta.

Uma estrutura fechada determina um aumento no número de arestas cortantes na periferia do rebolo. Rebolos com estrutura aberta oferecem mais espaços para alojamentos do cavaco reduzindo a tendência ao entupimento de porosidades.

A Figura 8 mostra a identificação padronizada de um rebolo convencional, o qual leva em conta as características do rebolo citadas anteriormente.



Figura 8 – Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Stemmer, 1992)

Na seleção do tipo de estrutura utilizada para cada operação, devem ser analisados três fatores: material a ser usinado, o acabamento desejado e o tipo de trabalho.

2.6 Operação de Dressagem

A dressagem é considerada por diversos autores como diretamente responsável pela topografia dos rebolos, um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante as operações de retificação. A vida do reboło, 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).

A operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais na retificação é denominada dressagem.

Após a fabricação e uso, ferramentas para retificação não se encontram em condições normais para nova utilização. Podem apresentar gumes cegos, não estar numa forma desejada e os poros podem estar impregnados de cavaco, de modo que a absorção de novos cavacos com sucessiva remoção de material fica dificultada. Isto resulta em um atrito excessivo e, conseqüentemente, uma geração de calor muito grande para a peça.

Na operação de dressagem são utilizados diversos tipos de ferramentas denominadas dressadores, ou retificadores, que incluem: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, rodas retificadoras, pontas simples de diamante, dressadores de diamantes múltiplos e em matriz, roletes estacionários e giratórios de diamante e roletes de esmagamento. Cada tipo apresenta vantagens específicas.

As principais finalidades da operação de dressagem são: obtenção de concentricidade da face de trabalho do reboło com o eixo de rotação; perfilamento da face de trabalho do reboło para uma operação de forma; arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho do reboło.

Segundo Hassui (2002), a definição do momento correto de dressagem do reboło é fundamental no processo de retificação. Isso pode ser feito de maneira conservadora, ou seja, antes do fim da vida do reboło. Desta forma, ocorrerá um desperdício de abrasivo e principalmente, um aumento do tempo de processo, pelo maior número de dressagens realizadas. Vale lembrar que o tempo de corte na retificação normalmente é bastante curto em função dos baixos volumes de material removido. Por outro lado, uma utilização do reboło além da sua

vida poderá acarretar uma rejeição da peça retificada. Caso isso ocorra, o custo aumentará significativamente, já que as peças quando chegam neste estágio possuem alto valor agregado.

2.6.1 Ferramentas de Dressagem

Segundo Konig (1993), as ferramentas de dressagem se distinguem de acordo com o princípio cinemático de ação: ferramentas estáticas e ferramentas rotativas. Para as ferramentas estáticas, ao contrário das rotativas, não existe um movimento de rotação da ferramenta, apenas translação.

As ferramentas de dressagem fixas trabalham da mesma forma que uma ferramenta de torneamento onde o rebolo seria a peça a ser torneada. Esta ferramenta é geralmente fixa à mesa de trabalho ou sobre um dispositivo especial de dressagem e é deslocada com uma velocidade de avanço constante (V_{sd}). Entre dois passos de dressagem a ferramenta é avançada de um valor de profundidade (a_d). As ferramentas com contato pontual ou na forma de uma linha também são adequadas para o perfilamento. O perfil é produzido pelo movimento da ferramenta de dressagem que é guiada por um sistema copiador. Podem-se encontrar atualmente ferramentas de dressagem comandadas numericamente.

A ferramenta rotativa trabalha da mesma forma que a ferramenta estática, sendo avançada longitudinalmente ao longo do rebolo. As demais ferramentas não necessitam de um movimento de avanço, uma vez que têm uma largura de trabalho (b_d) que é maior ou igual à largura do rebolo (b_s). A velocidade de penetração pode ser realizada por meio de um movimento intermitente nas ferramentas em bloco ou na forma de um movimento contínuo de dressagem por rolo. Em ambos os casos a ferramenta executa movimento de penetração radial em relação ao rebolo. O perfil da ferramenta de dressagem é reproduzido de forma recíproca na superfície do rebolo.

Para que durante a dressagem seja possível a remoção de material do rebolo, as ferramentas de dressagem devem ser mais duras que o material do rebolo. Em decorrência disso, para a dressagem de rebolos convencionais são empregadas ferramentas de diamante. Além da dressagem do rebolo por corte, também é usual empregar-se uma sobrecarga de retificação sobre o rebolo, produzindo um efeito de remoção de material de sua superfície. Este procedimento permite que, retificação de materiais extremamente duros e sob condições extremas de usinagem, sejam produzidas grandes forças de cortes nos contornos dos grãos abra-

sivos. Estas forças fazem com que os grãos abrasivos cegos lasquem ou sejam expulsos do ligante.

2.6.2 Influência da Dressagem no Processo de Retificação

Ainda é pouco conhecida em sua totalidade a influência das condições de dressagem na retificação, pois a geometria do dressador é um fator de grande influência que frequentemente não é levado em conta. Grande número de trabalhos encontrados na bibliografia utiliza como variáveis do processo a profundidade de dressagem (a_d) e o passo de dressagem (S_d).

Segundo Bianchi (1990), 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. Este fenômeno determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas. Pode-se dizer que o macroefeito é a “rosca” que o dressador produz na face do rebolo. A Figura 9 representa o esquema do processo de dressagem.

Reduzir o número de ciclos de dressagem maximiza a produção, mas também resulta em um rebolo gasto, que não corta livremente. Quando o rebolo está gasto, ele produz um acabamento mais liso e aumenta a probabilidade de danos térmicos, formação de lóbulos e de trepidação (Schwarz, 1999).

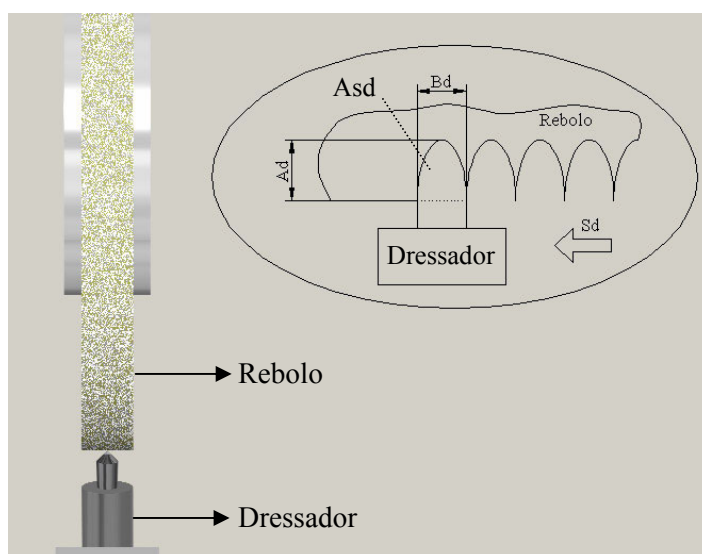


Figura 9 – Esquema do processo de dressagem (Adaptado de Bianchi, 1990)

2.6.3 Grau de Recobrimento (U_d)

Segundo König (1993), 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 (1993) definiu o parâmetro denominado por grau de recobrimento (U_d) de acordo com a Equação (6).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (6)$$

Onde: b_d : largura de atuação do dressador;

S_d : passo de dressagem.

As condições de dressagem influenciam diretamente na taxa de remoção de material que por sua vez interfere 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, conseqüentemente, provocam 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.

2.7 Fluidos de Corte

Todo processo de retificação trabalha com fluidos de corte. Os principais objetivos dos tais fluidos são: resfriar a peça que está sendo retificada; lubrificar a interface peça/partícula abrasiva; melhorar o acabamento superficial; reduzir o desgaste das ferramentas; remover os cavacos da área de corte; proteger contra a corrosão (máquina, ferramenta, peça e os cavacos) e lubrificar guias e barramentos.

A eficiência da refrigeração depende em larga escala do comprimento do arco de corte. Operações de retífica com grandes arcos de corte têm uma grande área de contato disponível para convecção do calor diretamente para o fluido de corte. Assim, o fluido de corte absorve uma grande fração do calor, tornando a refrigeração mais eficiente.

Operações com arcos de corte pequenos, como retificação cilíndrica, tem pequena superfície de contato disponível para convecção. Assim, o fluido de corte absorve somente uma pequena fração do calor. Nesses casos, o principal benefício do fluido de corte é a lubrificação.

A escolha adequada de fluidos de corte com relação aos diversos fabricantes e tipos de fluidos existentes no mercado exige extrema atenção. O fluido de corte influi diretamente sobre alguns fatores como: a qualidade superficial das peças; produtividade; custo operacional e meio ambiente.

Recentemente tem sido polêmico o debate a respeito da quantidade de fluido de corte que deve ser aplicada. Alguns temas envolvidos são: a velocidade do fluido de corte, velocidade da ferramenta, ângulo do bocal, melhor projeto do bocal, etc. (Monici, 2002).

2.8 Integridade Superficial da Peça de Trabalho

Danos superficiais causados nas peças durante a operação de retificação podem ser causados por efeito térmico, mecânico ou químico. Os tipos de danos térmicos em aços resultantes da temperatura excessiva são: transformação metalúrgica (sobretêmpera e reendurecimento), microtrincas, alterações de dureza, tensão residual e deformação, enquanto que impactos mecânicos podem resultar em esforços indesejáveis, deformação plástica e tensão residual de compressão (Kim, 1997).

Um dos tipos mais comuns de danos térmicos no processo de retificação é a queima da peça. Quando a queima superficial da peça se inicia, existe uma tendência do crescimento da adesão de partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como consequência o aumento das forças de retificação. Este aumento de forças provoca a deterioração da qualidade superficial da peça, podendo levar ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que seu desgaste volumétrico aumente. Segundo Malkin (1989), a queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado.

Por meio da realização de medições de microdureza na subsuperfície de aços temperados verificou-se que a queima superficial induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de reaustenitização do material. Para aços temperados retificados sem queima superficial, existe geralmente um amolecimento do material próximo à superfície, por terem sido atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima superficial ocorre a retêmpera do material, a qual é consequência da reaustenitização do mesmo, se-

guida da formação de martensita não revenida. Esta pode ser constatada via análise metalográfica, resultando no aumento da microdureza superficial. Evidências metalúrgicas e medições de microdureza indicam que o limite para início da queima visível coincide com o valor limite da temperatura para início da austenitização do material (Malkin, 1989). A queima superficial da peça impacta em efeitos adversos o limite de fadiga do material, provocando a diminuição de seu tempo de vida. Este comportamento está diretamente ligado à formação de martensita não-revenida, gerada no processo de queima superficial, em função do aquecimento à temperatura de austenitização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões.

Existe outra frente de pesquisas que defende o fenômeno de “*film-boiling*” como causa do aumento da temperatura na zona de usinagem.

Segundo Aguiar (1997), o fenômeno denominado *film-boiling* ocorre durante a retificação, em uma determinada temperatura, quando se utiliza um fluido de corte. Se a temperatura da peça estiver acima da temperatura de *film-boiling*, a temperatura da peça aumenta dramaticamente e pode resultar na queima.

O início do *film-boiling* poderia ser detectado no processo pelas medidas nas variações da força, potência ou emissão acústica. Assim, o controle adaptativo do dano térmico no processo de retificação seria possível de ser realizado com a utilização do critério do *film-boiling*, e poderia ser usado para interromper o processo mesmo antes de o dano térmico ocorrer.

Shafto (1975) postulou que o aumento rápido na temperatura é característica de um fenômeno conhecido como *burn-out*, o qual ocorre em tubos de ebulição. Para uma temperatura crítica, referente à temperatura de *burn-out*, existe um colapso no mecanismo de transferência de calor, o qual resulta num rápido crescimento da temperatura. Quando a temperatura atinge valores por volta de 100°C a água entra em ebulição causando bolhas na superfície do aquecedor. Um aumento além da temperatura de ebulição faz com que todas as bolhas se juntem, formando uma camada de vapor sobre a superfície, o chamado *film-boiling*. A transferência de calor através deste filme é muito mais difícil, causando assim um aumento repentino da temperatura.

Yasui & Tsukada (1983) mediram a temperatura na superfície da peça utilizando como fluido refrigerante óleo, água e também a seco. Eles verificaram que a uma temperatura acima do ponto de ebulição de cada fluido, a superfície da peça atingia rapidamente a temperatura correspondente àquela verificada para a retificação a seco. Em outras palavras, os fluidos deixavam de ser efetivos. Num estudo posterior, Salmon (1988) observou experimental-

mente a formação de um filme de vapor na superfície da peça, imediatamente abaixo da zona de contato.

No trabalho de Lyau (2000) foi desenvolvido um modelo térmico para o processo de retificação que considerava o efeito térmico da interface grão-peça e o plano de cisalhamento entre a peça e o cavaco. Obtendo-se todos os parâmetros necessários para o referido modelo a partir de resultados experimentais, foi possível a predição da temperatura na zona de corte. Nesse trabalho o referido pesquisador mostrou que a vazão de fluido de corte sob condições gerais de usinagem é suficiente para cobrir a camada limite térmico do fluido de corte na zona de corte. Alguns resultados experimentais obtidos para condições gerais de usinagem foram comparados com as temperaturas calculadas pelo modelo. Os resultados obtidos apenas não foram satisfatórios para a retificação *creep-feed* com fluido de corte a base de água. As diferenças entre os resultados teóricos e experimentais são atribuídas a propriedades térmicas constantes e desconsideração da condução térmica transversal no modelo.

Pesquisa semelhante foi realizada por Saravanapriyan et al. (2001) com um sistema multisensores, incluindo monitoramento de potência, vibração, emissão acústica e temperatura. No método estudado uma rede neural foi treinada de forma a predizer a temperatura da zona de usinagem para um dado número de ciclos.

Segundo Malkin (1989) e Badger & Torrance (2000) são encontrados os seguintes danos térmicos: queima de oxidação; amolecimento térmico; queima de reendurecimento e tensão residual de tração.

2.8.1 Queima de Oxidação

Causada por uma fina camada superficial de metal e fluido de corte oxidado, causa descoloração na peça. Esta descoloração é normalmente superficial e ocorre normalmente sem as peças sofrerem algum dano metalúrgico. A queima de oxidação pode ser vista sobre uma superfície retificada e/ou próximo à região de retificação onde as temperaturas são altas devido à condução. A queima de oxidação é um mau indicador da ocorrência do dano térmico pela sua imprevisibilidade.

2.8.2 Amolecimento Térmico

Os aços são freqüentemente retificados no estado temperado. O amolecimento térmico ocorre quando a temperatura de retificação ultrapassa a temperatura de revenimento do aço. O sobre-revenimento causa amolecimento da superfície da peça.

De acordo com Malkin (1989), o revenimento da superfície de aços endurecidos ocorre freqüentemente durante a retificação em condições típicas de produção, mas seus efeitos podem ser minimizados. A profundidade da camada revenida pode ser reduzida principalmente pelo uso de maiores velocidades da peça, o que resulta numa menor penetração do calor e em menores tempos de aquecimento.

Ainda segundo Malkin (1989) algumas ou mesmo todas as camadas revenidas produzidas durante a retificação em desbaste, com altas taxas de remoção do cavaco, podem ser removidas por uma operação posterior de retificação em acabamento, com centelhamento no fim do ciclo de retificação.

2.8.3 Queima de Reendurecimento

Conforme mencionado anteriormente, para Malkin (1989), a queima da peça, observada para aços de rolamentos, traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga e conseqüente diminuição do número de ciclos destes aços após a retificação. Este comportamento é atribuído à formação de martensita não-revenida, gerada no processo de queima, em função do aquecimento à temperatura de austenitização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões (revenimento).

Para acentuar mais o problema, a queima de reendurecimento é também acompanhada por uma tensão residual secundária, por que o novo material formado tem uma densidade maior que o material original (Badger & Torrance, 2000).

2.8.4 Tensão Residual de Tração

A tensão residual de tração é causada pela expansão térmica da peça além de sua tensão limite elástica, o que coloca o material, próximo à superfície, sobre uma constante tensão. Esta tensão degrada a resistência à fadiga do material, e em casos extremos causa imediata fratura. A profundidade e severidade da fissura dependem da temperatura de retificação e do material.

O desenvolvimento da tensão residual de tração é complicado e influenciado por muitas variáveis. Durante a retificação muito calor é gerado e este penetra na peça. Como as temperaturas sobem, a superfície quente da peça retificada busca se expandir para cima e para o redor. Se a temperatura é alta o suficiente, a tensão compressiva irá exceder a tensão limite elástica do material e o mesmo irá permanecer deformado (Badger & Torrance, 2000).

Quando o material resfria após a retificação, ele tende a encolher para um tamanho menor que o original (devido à deformação compressiva permanente). Mas a continuidade do material restringe esse encolhimento (ele está sendo puxado pelo material circundante), o que resulta em uma superfície de material sob tração. A tensão residual trativa pode diminuir a resistência à fadiga da peça durante sua vida prevista e, se for severa o suficiente pode causar fratura imediata. Se a fratura ou fissuração não estão presentes, tensões residuais podem ser aliviadas por um tratamento térmico pós-retificação. Tensões residuais não podem ser vistas olho nu, mas a detecção é possível com difração de raios X, método de Barkhausen ou banho de ácido (Badger & Torrance, 2000).

Durante a retificação, três interações primárias ocorrem entre o rebolo e a peça: deslizamento (*sliding*) e atrito (*rubbing*), deformação plástica sem remoção de material (*plowing*) e o corte do material propriamente dito (*chip formation*). A Figura 10 ilustra essas interações.

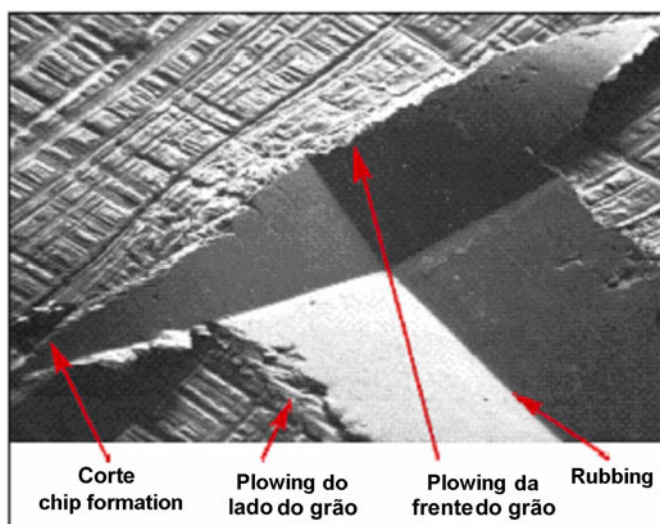


Figura 10 – Interações entre rebolo e peça (Badger & Torrance, 2000)

Todas as interações geram calor e ocorrem em grau variável durante a operação. Um rebolo afiado corta mais material enquanto um rebolo cego tende a deformar e deslizar

mais. O cegamento do rebolo é consequência do atrito desgastando a ponta dos grãos. Retificação sob essas condições, devido ao excessivo deslizamento e deformação, gera mais calor e aumenta a probabilidade de dano térmico.

2.9 Rugosidade

Rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (Rosa, 2006). A rugosidade, também chamada de erro microgeométrico, desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na: qualidade de deslizamento; resistência ao desgaste; possibilidade de ajuste do acoplamento forçado; resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes; qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras; resistência à corrosão e à fadiga; vedação e aparência.

Segundo Fusse (2005), a rugosidade superficial caracteriza-se pelas microirregularidades geométricas da superfície do material usinado. A rugosidade consiste basicamente de marcas regulares oriundas do perfil da ferramenta combinada a outras irregularidades, podendo ser variáveis conforme o material e o tipo de ferramenta utilizada. As microirregularidades são em geral sobrepostas a outras irregularidades geométricas, com ordem de grandeza crescente.

A rugosidade é gerada pela interação da topografia da superfície do rebolo com a peça sob movimentos cinemáticos impostos pela máquina. O acabamento obtido depende, de uma maneira complexa, da rugosidade do rebolo (dressagem), parâmetros de retificação e interações tribológicas entre a peça e pontos de corte do abrasivo (Xiao & Malkin, 1996).

A análise morfológica de superfícies retificadas apresenta complexidade adicional em função de inúmeros fenômenos envolvidos no processo, tais como deslizamento, atrito, deformações plásticas sem remoção de material e o corte do material propriamente dito.

Desta forma, a determinação da rugosidade de um material consiste, basicamente, em percorrer a rugosidade com um apalpador de formato normalizado, acompanhado de uma guia (patim) em relação ao qual ele se move verticalmente, conforme apresentado na Figura 11.

Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, a guia acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrado em um mostrador e/ou em um gráfico.

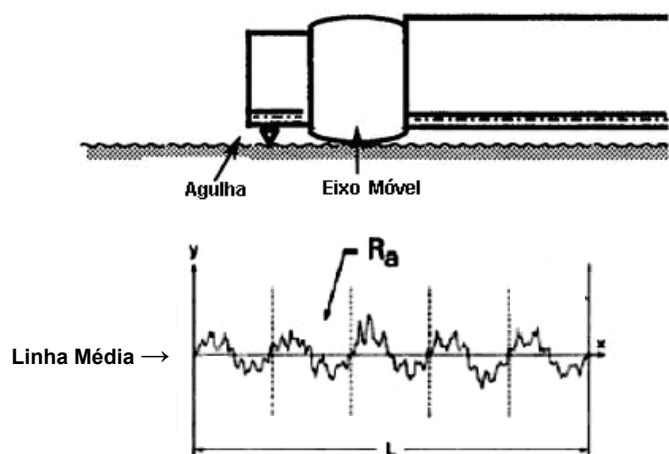


Figura 11 – Medição da rugosidade média

2.9.1 Valores de Rugosidade Média em Manufatura

Para obter diferentes valores de rugosidade média a Norma DIN 4766 estabelece uma série de operações de processamento para metais. Para o processo de retificação tangencial plana os valores atingíveis médios situam-se entre $0,4\mu\text{m}$ e $1,6\mu\text{m}$. Entretanto, valores entre $0,1\mu\text{m}$ e $6,3\mu\text{m}$ são possíveis de serem encontrados.

2.9.2 Rugosidade em Processos de Usinagem

Conforme mencionado anteriormente, segundo Malkin (1989) quando existe restrição de acabamento superficial, a taxa de remoção pode ser aumentada mantendo-a a mesma, ou mesmo melhorando o acabamento dressando o rebolo mais finamente. Dressagem mais fina pode causar maiores forças, relaxando a restrição da rugosidade. Isto só é praticável se as restrições de potência de retificação e danos térmicos não são 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.

O controle da rugosidade em um processo de usinagem é realizado pelo gerenciamento e otimização dos processos e condições de usinagem. O tipo de rebolo (CBN ou óxido de alumínio) pode também influenciar nos valores de rugosidade, pois rebolos de CBN apre-

sentam um maior poder de corte ao longo do processo, resistindo mais ao desgaste abrasivo, se comparado ao rebolo convencional.

Para rebolos convencionais de óxido de alumínio tal comportamento se difere, pois os rebolos de óxido de alumínio não apresentam a característica de auto-afiação (no caso de elevada dureza utilizada na retificação de precisão), gerando, portanto grãos cegos com maior frequência e conseqüentemente elevando os valores da força tangencial de corte e temperatura, o que facilita o entupimento das porosidades do rebolo gerando maiores valores de rugosidade (Fusse, 2005).

Por meio da condução de ensaios experimentais, Kwak & Ha (2004) demonstraram que a escolha correta das condições de usinagem é muito importante para evitar o aumento da rugosidade e a ocorrência de danos térmicos. A Figura 12 é um bom exemplo para mostrar o quanto um dano deteriora a rugosidade de uma superfície retificada. De acordo com o número de peças usinadas os valores da rugosidade sofrem pequenos aumentos sob condições normais de usinagem, mas aumenta rapidamente quando um dano ocorre. Segundo Kwak e Ha (2004), um produto é manufaturado satisfatoriamente se os danos, como queima e vibrações, são diagnosticados o mais cedo possível.

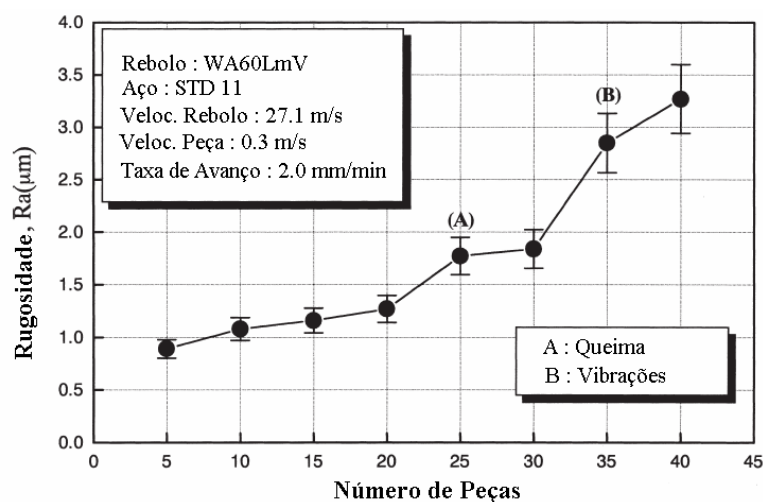


Figura 12 – Relação entre a rugosidade e o número de peças usinadas (Adaptado de Kwak e Ha, 2004)

2.9.3 Tolerâncias

Tolerâncias dimensionais são de interesse principalmente para comprimentos medidos de uma superfície acabada para outra. Enquanto a rugosidade de uma superfície acabada

é a medida de uma incerteza na especificação exata de sua localização, há freqüentemente uma relação direta entre a tolerância e a rugosidade combinadas nos pontos de medidas. Entretanto, é geralmente necessário exigir acabamentos mais finos para manter melhores tolerâncias. O requerimento da rugosidade é freqüentemente uma consequência do requerimento de tolerâncias, e ambos os fatores podem ser similarmente afetados pelas condições de retificação. Outros fatores que afetam tolerâncias dimensionais incluem deflexões da máquina, expansão e distorção térmica da máquina e da peça, desgaste do rebolo e vibrações. Muitos dos fatores que afetam as tolerâncias dimensionais também afetam tolerâncias de forma. Contudo os erros de forma mais significativos são usualmente associados com desgaste excessivo do rebolo, especialmente quando se retifica formas em seções transversais com canais ou quinas. Melhores formas de fixação geralmente necessitam desgastes mais lento de rebolos, o que geralmente significam maiores forças (Malkin, 1989).

2.10 Dureza

A dureza é uma importante propriedade mecânica dos materiais, sendo uma medida de resistência à deformação plástica localizada. Consiste basicamente na aplicação de uma carga no indentador sobre a superfície do sólido e o valor de dureza é obtido dividindo-se o valor da carga pela área residual projetada de indentação (Suterio, 2005). A medida de resistência do material em relação à penetração do indentador é obtida pela razão entre a força aplicada P e a área de contato projetada na direção do deslocamento A_0 , conforme Equação (7).

$$H = \frac{P}{A_0} \quad (7)$$

Onde: P : carga aplicada na indentação;

A_0 : área projetada da indentação.

O ensaio de dureza é empregado amplamente em pesquisa e avaliação de materiais para controle de qualidade por ser um método menos oneroso e mais rápido para quantificação de propriedades mecânicas de materiais (Leta et al., 2004).

Vários testes qualitativos de ensaio foram desenvolvidos, tais como dureza Rockwell, dureza Brinell, microdureza Knoop e Vickers. Estes ensaios são baseados em pequenos

penetradores que são forçados contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Assim, é feita a medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é relacionada a um número índice de dureza; quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza. As durezas medidas são relativas, e deve-se tomar cuidado ao se comparar valores determinados segundo técnicas diferentes.

O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado, de diâmetro D , sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga F , durante um tempo t , produzindo uma calota esférica de diâmetro d , conforme apresentado pela Figura 13.

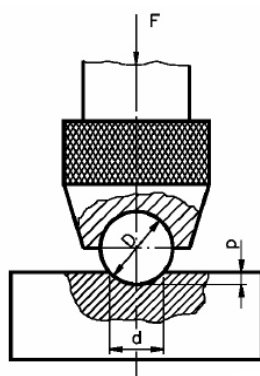


Figura 13 – Ensaio de dureza Brinell (Leta et al., 2004)

Já a dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , conforme apresentado na Figura 14.

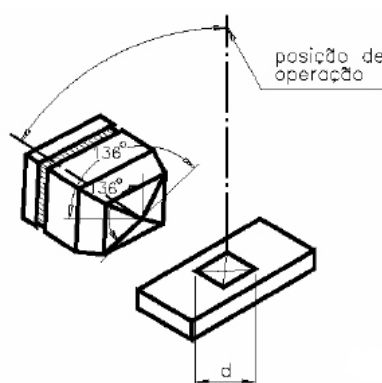


Figura 14 – Ensaio de dureza Vickers (Leta et al., 2004)

2.10.1 Fatores que Influenciam na Exatidão de Ensaio de Dureza

Para se proceder a testes de ensaio de microdureza deve-se utilizar o instrumento de medição de acordo com as instruções do fabricante, levando em consideração alguns fatores que podem influenciar diretamente na exatidão da medida.

2.10.1.1 Força Utilizada nos Ensaio

Os valores de microdureza dependem da força aplicada de modo muito mais marcante que para a macrodureza (forças maiores do que 10 N). Devido a uma série de fatores, é muito importante indicar o local dos corpos-de-prova onde as medidas foram efetuadas. Só serão obtidos valores comparáveis de dureza se as medidas forem feitas com a mesma força e o mesmo intervalo de tempo de aplicação da força.

2.10.1.2 Velocidade do Penetrador

Caso a velocidade do penetrador, ao fazer a impressão na superfície do corpo-de-prova, seja muito grande, o valor da dureza obtido será muito baixo. A velocidade do penetrador deve ser tal que a sua redução não cause um valor mais elevado de dureza. A velocidade correta para a maioria dos instrumentos está entre 15 mm/s e 70 mm/s. A fim de determinar se a velocidade adotada foi correta, devem ser feitos vários ensaios com velocidades decrescentes gradualmente. A velocidade abaixo da qual não existe mais variação no resultado é a velocidade a ser usada para a força escolhida. Estes ensaios devem ser executados com os mesmos materiais e forças que serão usados nas determinações de durezas do corpo-de-prova em análise.

2.10.1.3 Duração da Aplicação da Força

A força deve ser aplicada normalmente de 10s a 15s. Se a força for aplicada durante um intervalo de tempo diferente do indicado, este tempo deve ser indicado no resultado. Se a força for aplicada por tempo inferior a 10s, o tamanho da impressão será dependente do tempo de aplicação da força e os valores encontrados de dureza serão mais elevados.

2.10.1.4 Vibração

A vibração representa uma fonte de erros muito séria, independentemente da força aplicada, mas os efeitos são mais evidentes no caso de forças pequenas. Em geral, obtêm-se

valores de dureza menores se a determinação for feita com vibração do equipamento. Esta fonte de erro pode ser detectada por medidas comparativas em um bloco-padrão, de dureza próxima à dureza do corpo-de-prova em análise. Os efeitos da vibração podem ser diminuídos montando-se o corpo-de-prova em um suporte rígido e o equipamento em uma bancada também rígida.

2.10.1.5 Preparo da Superfície do Corpo de Prova

O corpo-de-prova pode ser polido por meio mecânico, eletroquímico ou químico. O polimento mecânico deve ser executado de modo a minimizar o aquecimento ou retrabalho localizados, que poderiam alterar a dureza.

2.10.1.6 Orientação em Relação ao Penetrador

A superfície polida do corpo-de-prova deve ser perpendicular ao eixo do penetrador (direção da força) e mantida assim durante todo o tempo de ação da força. Se isso não ocorrer, a medida de dureza não será válida. Se o material for isotrópico existe uma não perpendicularidade quando uma metade de uma diagonal for nitidamente maior que a outra metade da mesma diagonal (microdureza Vickers ou Knoop).

2.10.2 Microdureza Vickers

O ensaio de dureza Rockwell representou um avanço em relação ao ensaio Brinell, já que possibilitou avaliar a dureza de vários metais que antes não podiam ser ensaiados quanto à dureza. Entretanto, o ensaio Rockwell também mostra limitações como, por exemplo, suas escalas não têm continuidade. Por isso, materiais que apresentam dureza no limite de uma escala e no início de outra não podem ser comparados entre si quanto à dureza. Outra limitação importante é que o resultado de dureza no ensaio Rockwell não tem relação com o valor de resistência à tração, como acontece no ensaio Brinell.

Vários pesquisadores tentaram encontrar uma solução para superar essas dificuldades. Coube a Smith e Sandland, em 1925, o mérito de desenvolver um método de ensaio que ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers. Este método leva em conta a relação ideal entre o diâmetro da esfera do penetrador Brinell e o diâmetro da calota esférica obtida, e vai além porque utiliza outro tipo de penetrador, que possibilita medir qualquer valor de dure-

za, incluindo desde os materiais mais duros até os mais moles. O ensaio desenvolvido por Smith e Sandland ficou conhecido como ensaio de dureza Vickers porque a empresa que fabricava as máquinas mais difundidas para operar com este método chamava-se Vickers-Armstrong.

O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado. Essa relação pode ser expressa em linguagem matemática conforme a Equação (8).

$$HV = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Onde: F : carga aplicada na indentação;

A : área projetada da indentação.

Pelo método Vickers, ao contrário do que ocorre no Brinell, as cargas podem ser de qualquer valor, pois as impressões são sempre proporcionais à carga para um mesmo material. Deste modo, o valor de dureza será o mesmo, independentemente da carga utilizada.

Para aplicações específicas, voltadas principalmente para superfícies tratadas (carbonetação, têmpera) ou para a determinação de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, utiliza-se o ensaio de microdureza Vickers. A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, só que utiliza cargas menores que 1kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como 10gf.

2.10.2.1 Vantagens e Limitações do Ensaio Vickers

O ensaio Vickers fornece uma escala contínua de dureza, medindo todas as gamas de valores de dureza numa única escala. As impressões são extremamente pequenas e, na maioria dos casos, não inutilizam as peças, mesmo as acabadas. O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável. Este ensaio aplica-se a materiais de qualquer espessura, e pode também ser usado para medir durezas superficiais.

Por outro lado, devem-se tomar cuidados especiais para evitar erros de medida ou de aplicação de carga que alteram muito os valores reais de dureza. Quando se usam cargas menores do que 300gf pode haver recuperação elástica, dificultando assim a medida das dia-

gonais. A máquina de dureza Vickers requer aferição constante, pois qualquer erro na velocidade de aplicação da carga traz grandes diferenças nos valores de dureza.

2.11 Monitoramento do Processo de Retificação

Um dos maiores obstáculos para se atingir a completa automatização do processo de usinagem dentro de sistemas integrados e flexíveis de manufatura é o desenvolvimento do que pode ser chamado 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 visando a otimização do processo não necessitam da intervenção do homem. Para isto, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle do processo, em tempo real, é de fundamental importância (Diniz et al., 1991; Souza, 1999).

Segundo Inasaki (1999), existem três importantes objetivos no monitoramento do processo de retificação: detectar problemas que ocorram durante o processo, fornecer informações para otimizar o processo, e contribuir com o estabelecimento de um banco de dados necessário para determinar a configuração dos parâmetros de controle.

De acordo com Johnson (1997), no controle de processos o objetivo básico é regular o valor de alguma variável envolvida, mantendo-a dentro de um limite desejado, o qual é chamado de valor de referência. O controle de processos se divide em controle humano e automático.

2.12 Monitoração de Danos Térmicos no Processo de Retificação

A dificuldade fundamental em controlar os danos causados no processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo. Webster et al. (1994) têm mostrado que a medida do sinal de emissão acústica é significativamente mais sensível às variações das condições de retificação do que medidas de força e potência e fornece uma técnica mais promissora para o monitoramento do processo em tempo real.

2.12.1 Sinal de Emissão Acústica (EA)

A emissão acústica (EA) pode ser definida como ondas de tensão elástica gerada como resultado da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material que podem ser detectados por um sensor piezoeletrico que transforma estes deslocamentos em sinais elétricos (Diniz et al., 1991).

Sua faixa de frequência gira em torno de 50kHz a 1000kHz, que está acima da faixa de muitos ruídos vindo de fontes exteriores ao próprio processo de retificação. Sendo assim, é um método sensível e adequado para monitorar o processo de retificação (Dornfeld, 1992; Kluff, 1994).

As origens da emissão acústica no processo são decorrentes principalmente da fratura do grão e do ligante, fissura do grão e fricção entre o grão abrasivo e a peça, todos diretamente ligados ao processo de formação de cavaco e desgaste do rebolo. Com o sinal de emissão acústica é possível determinar o fim do centelhamento, que é muito importante para diminuir o ciclo de retificação (Oliveira, 1998).

2.12.2 Utilização do Sinal de EA nos Processos de Retificação

Nos últimos anos vários artigos técnicos, vindos de diferentes países, têm mostrado pesquisas que tentam relacionar sinais de emissão acústica a aspectos relativamente complicados do processo de retificação, incluindo a detecção de quebra (Chang & Dornfeld 1993), queima e trincas (Konig & Klumpen 1993), e a transição do modo dúctil/frágil (Bifano & YI, 1992). Estudos têm sido realizados também no monitoramento do desgaste da ferramenta (Waschkies et al. 1994), e na detecção de trincas devido à fadiga (Berkovits & Fang 1995).

O parâmetro predominantemente estudado em pesquisas prévias usando emissão acústica tem sido o valor da raiz média quadrática (RMS – *Root Mean Square*) do sinal de EA filtrado (EA_{rms}) sobre uma banda de frequência cuidadosamente selecionada. Este sinal tem sido um parâmetro razoável de estudo, pois o processo de retificação é muito rico em ondas sonoras, contendo, portanto, muita informação acústica disponível, sendo por isso utilizado como foco de pesquisas anteriores e atuais e também por limitações tecnológicas.

Aguiar (1997) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal de potência de corte, combinados, podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. O referido pesquisador tem usado uma configuração on-

de se utilizou um sensor fixo de EA acoplado próximo da peça obra e um sensor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para as medidas da força de corte. Da combinação entre os sinais, obteve um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, o qual consistia da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência média de corte por passada do rebolo. Embora para a maioria dos ensaios realizados o parâmetro denominado DPO tenha se mostrado um indicador da queima, para alguns casos não se comportou da mesma maneira.

O sinal bruto de emissão acústica também tem sido explorado recentemente no monitoramento do processo de retificação. Artigos técnicos (Jemielniak, 2001 e Wang et al., 2001) mostram que a utilização de ferramentas de processamento de sinais e redes neurais são eficientes no monitoramento da retificação.

A vantagem do uso de sinais de EA e técnicas computacionais é que técnicas laboratoriais de medidas de alta resolução, como difração de raios X, testes de dureza com indentadores e inspeção metalográfica, consomem muito tempo e não são realizados em tempo real. Em muitos casos a peça ainda tem que ser destruída para se obter informações sobre o estado da subsuperfície. Sendo assim, esforços para medição rápida de integridade superficial ganharão maior importância devido às maiores exigências sobre o comportamento funcional de peças retificadas.

2.13 Aquisição de Dados e Processamento de Sinais

A aquisição de dados se faz presente em quase todas as atividades cotidianas. Adquirir dados pode, de maneira simplista, ser definida como medir informações do mundo real, sendo que a maior parte dos eventos desse universo e a sua medição são de natureza analógica.

As quantidades físicas de interesse podem ser várias, tais como luz, temperatura, pressão, força, dentre outras. Todas essas grandezas apresentam uma energia. Deste modo, para sua medição é necessária a utilização de elementos capazes de receber esta energia, que se refere a uma determinada quantidade física da grandeza desejada, e convertê-la em uma forma de energia manipulável pelos circuitos eletrônicos. Estes elementos são os sensores e os transdutores.

Além da medição, um sistema de aquisição de dados deve garantir a confiabilidade dos dados coletados, assegurando que o desempenho das medições seja próximo aos dados

em análise. Para tanto, além dos sensores e transdutores, um sistema de aquisição de dados deve possuir elementos que analisem e validem os dados coletados. Desta forma, esses sistemas devem apresentar uma arquitetura onde os elementos se comunicam e se entendam mutuamente, interagindo entre si. Isso significa que um sinal gerado por um sensor ou transdutor pode ser analisado pelo condicionador de sinais que tem por função entregar um novo sinal, que se relaciona com o primeiro e pode ser tratado pelo conversor analógico-digital e assim sucessivamente.

O processamento digital de sinais, ou *Digital Signal Processing* (DSP), se diferencia de outras áreas da ciência da computação pelo único tipo de dados que usa: os sinais. Na maioria dos casos, estes sinais são originários de sensores do mundo real: vibrações sísmicas, imagens visuais, ondas de som, etc.

O DSP é interdisciplinar, ou seja, existem diversos campos agregados. A Figura 15 mostra as diversas áreas que são requisitos necessários para o aprendizado da tecnologia DSP. As áreas muitas vezes se sobrepõem e não são claramente definidas, pois variam de aplicação para aplicação.

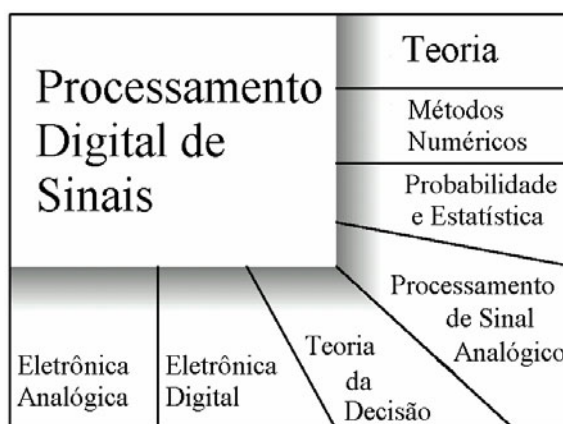


Figura 15 - Relação entre as áreas e o Processamento Digital de Sinais (Smith, 1999)

Dispositivos DSPs (do inglês *Digital Signal Processor*) são microprocessadores especializados em processamento digital de sinais usados para processar sinais de áudio, vídeo, etc., quer em tempo real ou não. Basicamente são implementações de funções matemáticas, algoritmos e técnicas usadas para manipular estes sinais depois de terem sido convertidos na forma digital. Isto inclui uma gama de aplicações, como: melhoria de imagens visuais, reconhecimento e geração de fala (voz), compressão de dados para armazenamento e transmissão, etc. (Smith, 1999; Oppenheim et al., 1999).

A capacidade que os DSPs têm de repetir em extrema velocidade uma instrução complexa faz com que sejam rapidamente resolvidas, por exemplo, as Transformadas Rápidas de Fourier (FFT), permitindo a implementação de filtros digitais.

Muitos autores (Bifano & Yi, 1992; Bennett, 1994; Berkovits & Fang, 1995; Aguiar 1997; Aguiar et al., 1999; Wang et al., 1999; Aguiar, 2002; Dotto et al., 2006; Khenai-fes, 2006) utilizaram técnicas de aquisição de dados e processamento de sinais no monitoramento do processo de retificação. Utilizando-se técnicas de processamento de sinais, Aguiar et al. (2002) e Pansanato et al. (2002) descobriram relações utilizando o sinal RMS de EA e o sinal de potência de retificação com o fenômeno da queima de peças durante o processo de retificação.

Desta forma, existem muitas ferramentas e formas de condicionamento e processamento de sinais.

2.13.1 Amplificação

Muitos sensores e transdutores produzem um nível de sinal de saída relativamente baixo, tipicamente na ordem de milivolts e microvolts. Estes sinais devem ser amplificados antes de serem convertidos precisamente para um código digital. Se um sinal proveniente de um transdutor possuir amplitude igual a um bit menos significativo do conversor analógico digital, a conversão torna-se impossível. Assim, um amplificador promove um ganho do sinal por meio de amplificadores operacionais e transistores para que este fique compatível com o sistema de aquisição de dados (Johnson, 1997; Miner, 1992).

2.13.2 Filtragem

Filtros são projetados para eliminar componentes de frequências indesejáveis de um sinal. Estas componentes indesejáveis são geralmente denominadas ruído. Alguns ruídos podem estar presentes na entrada, outros podem ser introduzidos por elementos de circuitos, outros podem consistir de sinais de interferências de vários pontos do sistema, e ainda outros são introduzidos pelo processo de amostragem (Miner, 1992). Existem muitos tipos diferentes de filtros. O filtro tradicional é o circuito analógico passivo constituído de resistores, capacitores e/ou indutores. Os filtros ativos adicionam elementos amplificadores tais como o transistor ou amplificador operacional para eliminar a necessidade dos indutores e reduzir o tamanho

dos capacitores. Filtros ativos podem ser implementados por circuitos discretos ou com circuitos integrados. Após um sinal contínuo ser convertido em um sinal digital é possível usar método digital para eliminar componentes indesejáveis, ou seja, o uso de filtros digitais. A filtragem procura extrair a característica física do sinal mais relacionada com o fenômeno (Miner, 1992).

2.14 Parâmetros Estatísticos para Detecção de Queima

Os sinais de emissão acústica e potência elétrica fornecem várias informações a respeito do processo de retificação. Entretanto, análises mais rigorosas podem ser obtidas via tratamento de sinais com o auxílio de parâmetros estatísticos. Com o auxílio de softwares de manipulação matemática, como o MatLAB, Origin, entre outros, é possível efetuar o tratamento de sinais e obter informações tais como: valor RMS, desvio padrão, autocorrelação, FFT, etc.

2.14.1 Valor RMS do Sinal de Emissão Acústica

Entre certo intervalo Δt , o valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela Equação (9) (Liu, 1991; Webster et al., 1996).

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t AE_{RMS}^2(\tau) d\tau} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N AE_{RMS}^2(i)} \quad (9)$$

Onde: T : tempo de integração;

N : número discreto de dados de EA no intervalo T ;

AE_{RMS} : emissão acústica obtida com o uso de filtro analógico ou digital RMS.

2.14.2 DPO

Aguiar (1997) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal da potência de corte, combinados, podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. Sua configuração utilizou um sensor fixo de EA acopla-

do próximo da peça e um sensor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para as medidas da força de corte. Da combinação entre os sinais, Aguiar (1997) obteve um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, que consiste da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência média de corte por passada do rebolo. O parâmetro DPO pode ser calculado conforme a Equação (10).

$$DPO = S(EA).MAX(POT) \quad (10)$$

Onde: $S(EA)$: desvio padrão do sinal de emissão acústica por passada [V];

$MAX(POT)$: potência máxima por passada [W].

2.14.3 DPKS

O parâmetro DPKS, desenvolvido por Dotto et al. (2006), surgiu da necessidade de se aumentar a sensibilidade do parâmetro DPO, entretanto, sem necessariamente se preocupar com a sua amplitude e sim com a variação entre as passadas. Por meio deste parâmetro, foi encontrado o momento exato onde a queima teve início num ensaio com várias passadas, aprofundando o rebolo constantemente.

O DPKS é calculado pelo desvio padrão da emissão acústica multiplicado pela somatória da potência subtraída do seu desvio padrão elevado à quarta potência, e pode ser representado conforme a Equação (11).

$$DPKS = \left(\sum_{i=1}^{i=m} (POT(i) - S(POT))^4 \right) * S(EA) \quad (11)$$

Onde: i : índice da potência que varia de 1 até m pontos de cada passada;

m : número de pontos da passada;

$POT(i)$: valor instantâneo da potência;

$S(POT)$: desvio padrão da potência na passada;

$S(EA)$: desvio padrão da Emissão Acústica RMS da passada.

2.15 Redes Neurais Artificiais

Rede Neural Artificial (RNA) é uma técnica de inteligência computacional que tenta simular em máquinas (computadores), de uma maneira simplificada, o funcionamento do cérebro humano. Ela é capaz de reconhecer padrões, extrair regularidades e detectar relações subjacentes em um conjunto de dados aparentemente desconexos. Além disso, ela apresenta habilidade de lidar com dados ruidosos, incompletos ou imprecisos, e de prever sistemas não lineares (Mello, 2004).

As redes neurais foram desenvolvidas, originalmente, na década de 40, pelo neurofisiologista Warren McCulloch, do MIT, e pelo matemático Walter Pitts, da Universidade de Illinois, os quais fizeram uma analogia entre células nervosas vivas e o processo eletrônico. O trabalho consistia num modelo de resistores variáveis e amplificadores representando conexões sinápticas de um neurônio biológico (Tafner, 2006).

Desde então, mais enfaticamente a partir da década de 80, diversos modelos de redes neurais artificiais têm surgido com o propósito de desenvolver e aplicar esta tecnologia. Algumas destas propostas tendem a aperfeiçoar mecanismos internos da rede neural para aplicação na indústria e negócios, outras procuram aproximá-las ainda mais dos modelos biológicos originais (Tafner, 2006).

2.15.1 Princípios das Redes Neurais Artificiais

De acordo com Haykin (2001), uma rede neural artificial é um processador distribuído de forma paralela e constituído de unidades de processamento simples, que tem a propensão natural de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso. Portanto, as redes neurais artificiais apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento por meio de experiência.

Uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento. Já o cérebro de um mamífero pode ter bilhões de neurônios. O sistema nervoso é formado por um conjunto extremamente complexo de células, os neurônios. Estes têm um papel essencial na determinação do funcionamento e comportamento do corpo humano e do raciocínio (Carvalho, 2006).

Os neurônios são formados pelos dendritos, que são um conjunto de terminais de entrada, pelo corpo central, e pelos axônios que são longos terminais de saída. Os neurônios

se comunicam via sinapses. Sinapse é a região onde dois neurônios entram em contato e por onde os impulsos nervosos são transmitidos entre os mesmos (Carvalho, 2006).

Os impulsos recebidos por um neurônio, em um determinado momento, são processados, e atingindo um dado limiar de ação provoca um disparo, produzindo uma substância neurotransmissora que flui do corpo celular para o axônio, que pode estar conectado a um dendrito de um outro neurônio.

O neurotransmissor pode diminuir ou aumentar a polaridade da membrana pós-sináptica, inibindo ou excitando a geração de pulsos em outros neurônios. Este processo depende de vários fatores, como a geometria da sinapse e o tipo de neurotransmissor. Em média, cada neurônio forma entre mil e dez mil sinapses. A Figura 16 apresenta a composição básica de um neurônio biológico.

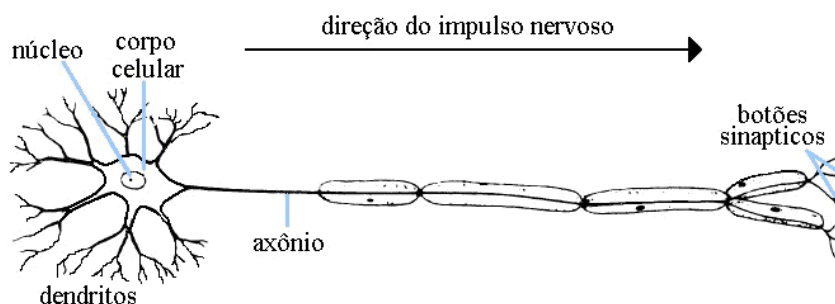


Figura 16 – Estrutura básica de um neurônio biológico (Adaptado de Haykin, 2001)

O cérebro humano possui cerca de 10 bilhões de neurônios, e o número de sinapses é de mais de 60 trilhões, possibilitando a formação de redes muito complexas (Carvalho, 2006).

2.15.2 Neurônios Artificiais

O neurônio artificial é uma estrutura lógico-matemática que procura simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. Assim sendo, os dendritos foram substituídos por entradas, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas por elementos denominados de peso (simulando as sinapses).

Os estímulos captados pelas entradas são processados pela função de soma, e o limiar de disparo do neurônio biológico é substituído pela função de ativação (Tafner, 2006).

O neurônio artificial, apresentado na Figura 17, representa uma região onde informações são processadas. Seus três elementos básicos são: os pesos sinápticos, a função de soma e a função de ativação. As conexões entre os neurônios, denominadas pesos sinápticos, são responsáveis pelo armazenamento das informações. Além disso, elas definem o efeito que a saída de um neurônio exerce sobre a entrada do neurônio seguinte. Os pesos sinápticos são de grande importância para uma rede neural, pois determinam toda a manipulação de valores da rede.

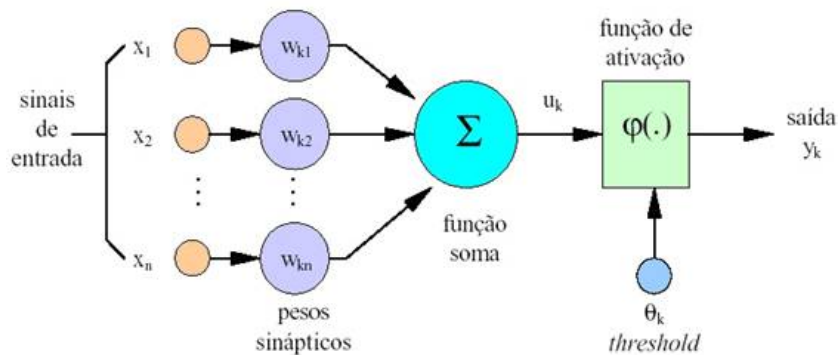


Figura 17 – Estrutura básica de um neurônio artificial (Adaptado de Haykin, 2001)

A função de soma, representada na Equação (12), processa os estímulos (x_j) ponderados pelos respectivos pesos (w_{ij}), onde y_i é a saída gerada por cada neurônio da camada anterior.

$$x_j = \sum_i w_{ij} y_i \quad (12)$$

Onde: w_{ij} : peso sináptico do neurônio k ;

y_i : saída gerada por cada neurônio da camada anterior.

Já a função de ativação, Equação (13), também chamada de função de transferência, limita a amplitude do intervalo do sinal de saída do neurônio para algum valor finito, geralmente no intervalo normalizado $[0,1]$ ou $[-1,1]$.

$$y_j = f(x_j) \quad (13)$$

Onde: x_j : estímulos dos sinais de entrada.

Além dos três elementos básicos já citados, o neurônio pode ainda apresentar um *bias* que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação (Haykin, 2001). O termo *bias* age como um peso extra nas conexões das unidades cuja entrada é sempre um (Fausett, 1994).

2.15.3 Tipos de Função de Ativação

Dentre as principais funções de ativação utilizadas, os tipos básicos são:

- função degrau;
- função linear;
- função sigmóide;
- função tangente hiperbólica.

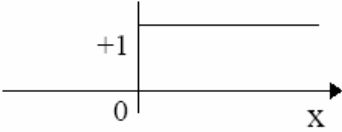
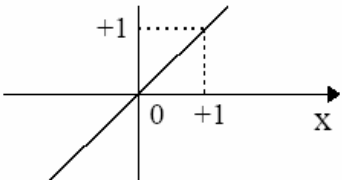
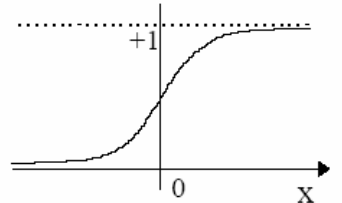
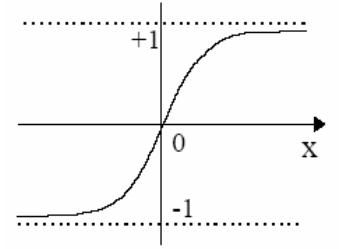
A escolha do tipo de função de ativação na concepção de uma rede neural é de extrema importância, uma vez que é usual o procedimento de normalização dos dados de entrada da rede para posterior aplicação. O processo de normalização visa adequar os dados a serem utilizados entre um limite de valores mínimos e máximos, os quais serão manipulados no processo de definição do menor erro de saída.

A função de ativação $\varphi(.)$ é também conhecida como função restritiva, já que limita o intervalo possível da saída (y) a um valor finito

A definição da função de ativação a ser utilizada pela rede neural é de extrema importância. Existem diversas funções matemáticas utilizáveis, entretanto, atualmente as funções do tipo sigmóide são as de maior utilização, pois possuem a importante característica de serem diferenciáveis, tornando-se uma propriedade valiosa na definição dos pesos w_{kn} . Esta característica permite a construção de algoritmos de aprendizagem e memorização, pois dada uma equação, pode-se determinar seus pontos de máximo e mínimo por meio da resolução das equações diferenciais encontradas.

As principais funções de ativação podem ser resumidas de acordo com o apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de funções de ativação

TIPO	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA	FUNÇÃO
Degrau		$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$
Linear		$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq \frac{1}{2} \\ x & -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \\ 0 & x \leq -\frac{1}{2} \end{cases}$
Sigmóide		$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha x)}$
Tangente Hiperbólica		$f(x) = \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}}$

2.15.3.1 Função Degrau

É o tipo mais simples de função de ativação. Sua resposta pode assumir dois valores: 0 ou 1. Normalmente é utilizada para criar neurônios que tomem decisões binárias, como nos classificadores. É limitada, porém não é derivável.

2.15.3.2 Função Linear

A função linear não é limitada. Neurônios com esta função de propagação podem ser utilizados como aproximadores lineares.

2.15.3.3 Função Sigmóide

Esta função assume valores em um intervalo contínuo entre 0 e 1. É uma função de ativação muito adotada em redes neurais em virtude de ser contínua, monotônica, não linear e facilmente diferenciável em qualquer ponto.

2.15.3.4 Função Tangente Hiperbólica

Esta função mapeia a entrada dos neurônios no intervalo $[-1, +1]$. Possui as mesmas características e emprego da função logística sigmoidal, possibilitando que as saídas sejam simétricas.

2.15.4 Topologias de Redes

Combinando diversos neurônios artificiais podemos formar o que é chamado de rede neural artificial. As entradas, simulando uma área de captação de estímulos, podem ser conectadas em muitos neurônios, resultando, assim, em uma série de saídas. Cada neurônio representa uma saída. Estas conexões, em comparação com o sistema biológico, representam o contato dos dendritos com outros neurônios, formando assim as sinapses. A função da conexão em si é transformar o sinal de saída de um neurônio em um sinal de entrada de outro, ou ainda, orientar o sinal de saída para o mundo externo (mundo real). As diferentes possibilidades de conexões entre as camadas de neurônios podem gerar n números de estruturas diferentes (Tafner, 2006).

Na prática, as redes neurais artificiais consistem de um grupo de elementos chamados de neurônios artificiais, que são interligados com outros grupos de neurônios por meio de conexões, chamadas de sinapses artificiais, as quais permitem que informações possam fluir entre os vários grupos ou camadas de neurônios. Um exemplo de uma rede neural artificial é apresentado na Figura 18.

Usualmente as redes neurais apresentam três níveis de camadas de neurônios: uma camada de entrada (onde os padrões são apresentados à rede); uma camada de saída (onde o resultado é apresentado) e camadas intermediárias ou ocultas (onde é feita a maior parte do processamento, por meio das conexões ponderadas).

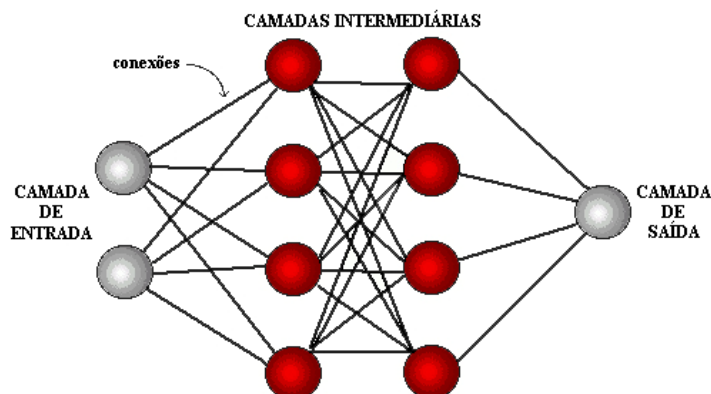


Figura 18 – Formato básico de uma rede neural artificial (Carvalho, 2006)

A camada de entrada, na verdade, não é formada por neurônios reais, pois eles não realizam nenhum processamento. Eles simplesmente distribuem os valores das entradas da rede para os neurônios da primeira camada oculta. Já a camada intermediária tem a função de processar a informação provinda da camada de entrada. Ela também pode ser denominada camada oculta, pois sua saída não é conhecida pelo usuário.

As camadas intermediárias situam-se entre a camada de entrada e a camada de saída. Estas camadas podem ser consideradas como extratoras de característica. O tipo de conexão, número de camadas de neurônios e o tipo de treinamento são os aspectos que diferem os tipos de redes neurais. Cada um é mais adequado para determinado tipo de tarefa. Os diferentes tipos de conexões entre os neurônios de uma rede determinam a topologia (ou arquitetura) desta rede. As principais topologias de rede são: redes alimentadas adiante (*feed-forward*); redes recorrentes.

2.15.4.1 Redes Alimentadas Adiante (*Feed-forward*)

Os neurônios estão dispostos em camadas conectadas por pesos unidirecionais na direção entrada-saída, ou seja, as conexões ocorrem apenas entre camadas diferentes e subsequentes. Esta estrutura é totalmente conectada uma vez que todas as saídas dos neurônios de uma camada são conectadas com as entradas de todos os neurônios da camada seguinte.

2.15.4.2 Redes Recorrentes

Um neurônio pode receber entradas de qualquer outra camada da rede. Destas fazem parte as redes com realimentação nas quais os neurônios da entrada recebem sinais vindos diretamente dos neurônios da saída.

2.15.5 Arquitetura de Redes

A rede neural deve ter a capacidade de generalização, ou seja, ela deve ser capaz não apenas de classificar as entradas para as quais ela recebe treinamento, mas também de generalizar e classificar entradas que não tenham sido apresentadas. Isto é possível graças a um processo de aprendizagem ao qual a rede é submetida. Esta propriedade permite que a rede encontre respostas corretas mesmo quando os dados disponíveis para as entradas estão incompletos ou danificados.

O desenvolvimento de uma rede neural ainda é um processo de tentativa e erro. A seleção da rede envolve a escolha da topologia da rede (ou arquitetura), da função de transferência e do algoritmo de aprendizagem.

2.15.6 Aprendizagem

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender de seu ambiente e com isso melhorar seu desempenho. Isto é feito por meio de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos conhecido como treinamento. O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas. O processo de aprendizagem nas redes neurais acontece internamente por meio do ajuste dos pesos sinápticos das conexões, durante a exposição dos exemplos, em resposta à quantidade de erros gerados pela rede. Ou seja, a rede neural é capaz de modificar-se em função da necessidade de aprender a informação que lhe foi apresentada (Tafner, 2006).

As redes neurais são treinadas para aprender a partir dos dados de entrada. Assim como o cérebro humano, elas aprendem a partir de experiências e não por meio de programação. Por este motivo, deve-se tomar bastante cuidado com a formação do conjunto de treinamento. Este conjunto deve ser gerado a partir de dados históricos, ou seja, a partir de experiências e fatos ocorridos no passado.

Como já mencionado anteriormente, a rede deve ser capaz de generalizar. Mas, ao mesmo tempo, deve-se tomar cuidado para que não aconteça um número excessivo de treinamentos (*overfitting*) e consequentemente a memorização dos dados. Se uma rede neural é submetida a um número excessivo de treinamentos ela perde a capacidade de reconhecer padrões fora do conjunto de treinamento. Para evitar esta situação deve-se ter um conjunto de

teste com dados diferentes do conjunto de treinamento, e a rede deve ser capaz de classificá-los corretamente, provando assim sua flexibilidade e capacidade de generalização.

De acordo com Haykin (2001), os principais modelos de aprendizagem são: aprendizagem supervisionada; aprendizagem não supervisionada e aprendizagem híbrida.

2.15.6.1 Aprendizagem Supervisionada

Também chamada de aprendizagem com professor, é caracterizada pela utilização de um agente externo que indica à rede a resposta desejada para o padrão de entrada. O ajuste dos pesos ocorre quando o sistema compara a saída da rede com a resposta desejada previamente conhecida.

O aprendizado supervisionado das RNAs caracteriza-se pela disponibilidade de um conjunto de treinamento composto por dados de entrada previamente classificados. Os estímulos de entrada, disponíveis no conjunto de treinamento, são apresentados à rede, a qual calcula uma resposta utilizando como parâmetros os valores de pesos atuais. A partir daí faz-se uma comparação entre a resposta oferecida pela rede e a resposta desejada àqueles estímulos. Com base na similaridade entre as duas respostas, os pesos são ajustados. Esse procedimento ocorre até que os pesos possibilitem à rede classificar o mais corretamente possível as entradas de treinamento, e conseqüentemente as entradas apresentadas durante a fase de teste.

Grande parte das implementações baseadas em redes neurais artificiais tem utilizado a aprendizagem supervisionada. Como exemplo de algoritmos de aprendizagem supervisionada podemos citar os algoritmos *backpropagation* e as redes com função de base radial.

2.15.6.2 Aprendizagem Não-Supervisionada

Também chamada de aprendizagem sem professor, possui como principal característica a não existência de um agente externo indicando a resposta desejada para os padrões de entrada. A rede neural utiliza os neurônios como classificadores, e os dados de entrada como elementos de classificação. Esse tipo de rede trabalha essas entradas e se organiza de modo a classificá-las mediante algum critério de semelhança.

O aprendizado não supervisionado permite à rede aprender sem que haja um conjunto de respostas desejadas para as saídas da rede. Neste caso, os pesos são ajustados à medida que a rede vai sendo provida de padrões de entrada selecionados como representativos de cada classe. Desta forma, os pesos das conexões são ajustados de acordo com sua similaridade aos padrões de entrada apresentados à rede.

Como exemplo de redes não supervisionadas podemos citar as redes de Kohonen.

2.15.6.3 Aprendizagem Híbrida

A aprendizagem híbrida mescla os conceitos apresentados anteriormente. Parte dos pesos é determinada via aprendizagem supervisionada, enquanto outras são obtidas via aprendizagem não-supervisionada.

2.15.7 Regras de Aprendizagem

Em um processo de aprendizagem, os pesos dos neurônios são ajustados por meio de um algoritmo de aprendizagem. O algoritmo de aprendizagem é um conjunto preestabelecido de regras bem-definidas para resolução de um problema de aprendizagem (Haykin, 2001). Ele tem como objetivo encontrar pesos para a rede que permitam que esta forneça saídas compatíveis com as desejadas. Os algoritmos existentes diferem entre si pela forma como ocorre o ajuste dos pesos sinápticos dos neurônios, ou seja, pela regra de aprendizagem adotada.

De acordo com Haykin (2001), existem cinco regras básicas de aprendizagem por meio das quais os pesos sinápticos de uma rede podem ser ajustados: aprendizagem por correção de erro; baseada em memória; hebbiana; competitiva e aprendizagem de Boltzmann.

2.15.7.1 Aprendizagem por Correção de Erro

A aprendizagem por correção de erro é baseada no paradigma de aprendizagem supervisionada no qual a saída desejada para cada padrão de entrada é fornecida para a rede. O sinal de saída gerado pela rede, representado por $y_k(n)$, é comparado com a resposta desejada, representada por $d_k(n)$, produzindo um sinal de erro $e_k(n)$. Este erro é apresentado pela Equação (14).

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (14)$$

Onde: d_k : resposta desejada da rede;

y_k : sinal de saída gerado pela rede.

O sinal de erro é então utilizado para ajustar os pesos das conexões com o objetivo de aproximar o sinal de saída $y_k(n)$ da resposta desejada $d_k(n)$, reduzindo o erro $e_k(n)$.

2.15.7.2 *Aprendizagem Baseada em Memória*

Nesta regra de aprendizagem todas as experiências passadas são armazenadas em uma grande memória de exemplos de entrada-saída classificados corretamente: (x_i, d_i) , onde i varia de 1 a n , x_i representa um padrão de entrada e d_i representa a resposta desejada correspondente (Haykin, 2001). Quando se deseja classificar um vetor de teste X , não visto anteriormente, o algoritmo responde buscando e analisando os dados de treinamento em uma “vizinhança local” de X .

2.15.7.3 *Aprendizagem Hebbiana*

O postulado de aprendizado de Hebb é a mais antiga regra de aprendizagem existente (Dandolini, 1997). O princípio básico desta regra é de que se dois neurônios em ambos os lados de uma conexão são ativados simultaneamente, então a força desta conexão é seletivamente aumentada. A forma mais simples de aprendizagem hebbiana é descrita por Haykin (2001), conforme Equação (15), onde w_{jk} é o peso sináptico do neurônio k , x_j e y_k são os sinais pré-sináptico e pós-sinápticos, respectivamente, deste peso, e η é uma constante positiva que define a taxa de aprendizagem.

$$w_{jk}(n+1) = w_{jk}(n) + \eta y_k(n) x_j(n) \quad (15)$$

Onde: w_{jk} : peso sináptico do neurônio k ;

η : constante positiva que define a taxa de aprendizagem;

y_k : sinal de saída gerado pela rede;

x_j : estímulos dos sinais de entrada.

Segundo Dandolini (1997), uma vantagem desta regra é que a aprendizagem é feita localmente, ou seja, a mudança nos pesos depende somente da ativação dos dois neurônios conectados pelo peso, o que simplifica bastante a complexidade da aprendizagem.

2.15.7.4 *Aprendizagem Competitiva*

Na regra de aprendizagem competitiva os neurônios da camada de saída competem entre si para se tornarem ativos, considerando que somente um neurônio pode estar ativo em um determinado instante. Este fenômeno é conhecido como ‘o vencedor leva tudo’.

Para um neurônio ser o vencedor, isto é, estar ativo, seu campo local induzido v_k para um padrão de entrada x deve ser o maior dentre todos os neurônios da rede (Haykin, 2001). Quando isto acontece, o sinal de saída y_k deste neurônio é igual a um. Caso contrário o sinal de saída é colocado em zero.

Nesta regra, a variação Δw_{jk} que é aplicada ao peso w_{jk} é definida pela Equação (16), onde η é a taxa de aprendizagem.

$$\Delta w_{jk} = \begin{cases} \eta(x_j - w_{jk}) & \text{se o neurônio } k \text{ vencer a competição} \\ 0 & \text{se o neurônio } k \text{ perder a competição} \end{cases} \quad (16)$$

Onde: w_{jk} : peso sináptico do neurônio k ;

η : constante positiva que define a taxa de aprendizagem;

y_k : sinal de saída gerado pela rede.

Como efeito desta regra de aprendizagem, o vetor de peso w_k é movido na direção do padrão de entrada x , a partir do neurônio vencedor k .

Este tipo de aprendizagem é adequado para descobrir características nos dados de entrada que podem ser utilizadas para agrupar padrões similares.

2.15.7.5 *Aprendizagem de Boltzmann*

A regra de aprendizagem de Boltzmann é um algoritmo de aprendizagem estocástico que realiza o ajuste dos pesos baseando-se na probabilidade e na mecânica estatística. A rede neural que utiliza esta regra é denominada máquina de Boltzmann (Haykin, 2001). Os neurônios nesta máquina formam uma estrutura recorrente e podem assumir dois estados: ligado (+1) ou desligado (-1). Os estados de cada neurônio na máquina determinam o valor de uma função de energia que caracteriza esta rede conforme determinado pela Equação (17), onde x_j é o estado do neurônio j e w_{jk} é o peso sináptico entre os neurônios j e k . A restrição

$j \neq k$ é para garantir que nenhum dos neurônios tenha auto-realimentação. O equilíbrio é alcançado quando esta função de energia alcança um mínimo.

$$E = -\frac{1}{2} \sum_j \sum_k w_{jk} x_j x_k \quad j \neq k \quad (17)$$

Onde: w_{jk} : peso sináptico do neurônio k ;

η : constante positiva que define a taxa de aprendizagem;

y_k : sinal de saída gerado pela rede.

A máquina escolhe um neurônio ao acaso e, em um determinado passo do processo de aprendizagem, troca seu estado de $+x_k$ para $-x_k$.

2.15.8 Perceptron

O Perceptron é uma forma simples de uma rede neural utilizada para a classificação de padrões. São constituídas por apenas uma camada de neurônios (possuindo pesos e bias), incluindo o caso particular de apenas um neurônio, limitado a classificar padrões em duas classes.

O Perceptron modela neurônios empregando uma soma ponderada de suas entradas ou sinapses e enviando o resultado $+1$ (um positivo) se esta soma for superior a um determinado limiar, caso não, o valor zero será nulo, ou ainda, -1 (um negativo) dependendo da função de ativação escolhida na modelagem da rede Perceptron. Pode-se notar com isso que as funções de ativação do Perceptron podem ser a função degrau para casos onde a resposta deva ser 0 ou $+1$, ou então a função degrau simétrico para situações onde a saída deve assumir os valores $+1$ e -1 .

Tipicamente as entradas e os pesos das conexões, neste modelo, assumem valores reais, portanto, que podem ser valores positivos ou negativos. Se uma entrada correspondente a uma característica tender a disparar o peso sináptico associado a esta entrada, terá seu valor como sendo positivo. Pode-se então dizer que tal característica tem função excitatória sobre o neurônio. Se o oposto ocorrer, ou seja, o neurônio for inibido por uma determinada característica, o valor do peso sináptico associado a esta entrada será negativo.

O algoritmo de treinamento dos Perceptrons foi baseado nos estudos desenvolvidos em 1949 pelo biólogo Hebb. Este propôs um princípio pelo qual o aprendizado em sistemas nervosos complexos poderia ser reduzido a um processo puramente local, em que a intensidade das conexões sinápticas é alterada em função dos erros detectáveis localmente (Kovacs, 1996).

O processo de atualização da matriz de pesos atinge seu ótimo quando a redução do gradiente do erro quadrático entre as saídas desejadas e as obtidas pelo Perceptron atinge seu mínimo. O Perceptron, depois de treinado, separa linearmente duas coleções por meio de um hiperplano contido no hiperespaço destes conjuntos. Este hiperplano é chamado de superfície de decisão. A aprendizagem, do ponto de vista geométrico, pode então ser resumida a um processo de determinação deste hiperplano no espaço multidimensional das entradas.

Embora o teorema da convergência garanta a classificação correta de dados linearmente separáveis, a maioria dos problemas reais não fornecem dados com esta característica. Um exemplo de um problema simples com dados não separáveis linearmente é a função Booleana OU Exclusivo (XOR). Para problemas com características não lineares o Perceptron é incapaz de fornecer uma hipersuperfície de separação adequada ao correto tratamento do problema, pois esta simplesmente não existe. Um exemplo de amostras linearmente separáveis e não linearmente separáveis é apresentado na Figura 19.

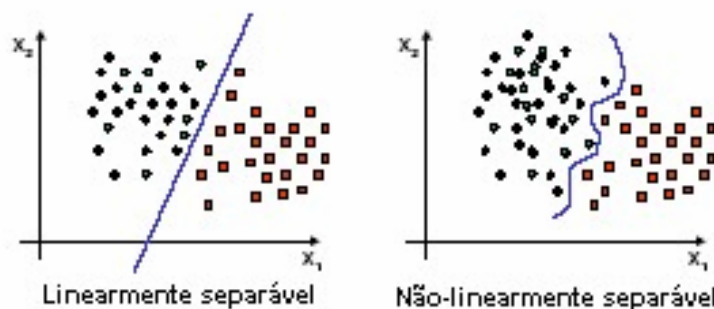


Figura 19 – Diferenças entre um problema linearmente separável e outro não-linearmente separável (Oliveira, 2006)

A deficiência apresentada não está no algoritmo de aprendizagem para Perceptrons, mas no modo como este tipo de rede representa o conhecimento. A solução deste tipo de problema foi encontrada em arquiteturas de Perceptrons Multicamadas (MLP) e da generalização da Regra Delta.

2.15.9 Rede Neural Backpropagation

A rede neural comumente denominada *backpropagation*, ou retropropagação, é na verdade uma rede neural *feed-forward*, multicamada, treinada pelo algoritmo *backpropagation*. O desenvolvimento deste algoritmo de aprendizagem foi um dos marcos mais importantes das pesquisas em redes neurais artificiais (Dandolini, 1997). Este trabalho foi o primeiro que possibilitou o ajuste dos pesos em redes multicamadas *feed-forward*, abrindo caminho para a elaboração de redes neurais mais genéricas. Devido a grande popularidade do método *backpropagation* seu nome é utilizado para denominar as redes que o utilizam no seu treinamento.

Uma das grandes vantagens apresentada pelo método *backpropagation* é que este possui um conjunto de equações bem definidas e explícitas para correção dos pesos da rede. Este algoritmo consiste em realizar a retropropagação do erro gerado na comparação entre a saída da rede e a saída desejada com o objetivo de minimizar o erro total da saída gerada pela rede.

O treinamento de uma rede com o uso deste algoritmo envolve três etapas: a propagação dos dados da camada de entrada para a camada de saída da rede, o cálculo e a retropropagação do erro gerado pela rede, e o ajuste dos pesos (Fausett, 1994).

Na primeira etapa, estímulos de entrada são apresentados à rede e as ativações fluem até chegarem à camada de saída, gerando um resultado. Já na segunda e terceira etapas, o resultado obtido pela rede é comparado com a saída desejada e o erro gerado é computado para as unidades de saída.

Os pesos conectados às unidades de saída são então ajustados para reduzir este erro. Em seguida, o erro da camada de saída é utilizado para derivar estimativas de erro para as unidades da(s) camada(s) oculta(s), para que o erro seja então propagado para trás até a conexão da camada de entrada. O fluxo de informação deste processo é ilustrado de uma forma resumida na Figura 20.

O método *backpropagation* atualiza os pesos incrementalmente, depois de analisar cada par entrada-saída. Depois da apresentação de todos os pares entrada-saída diz-se que uma época foi concluída. Este treinamento, em geral, requer muitas épocas.

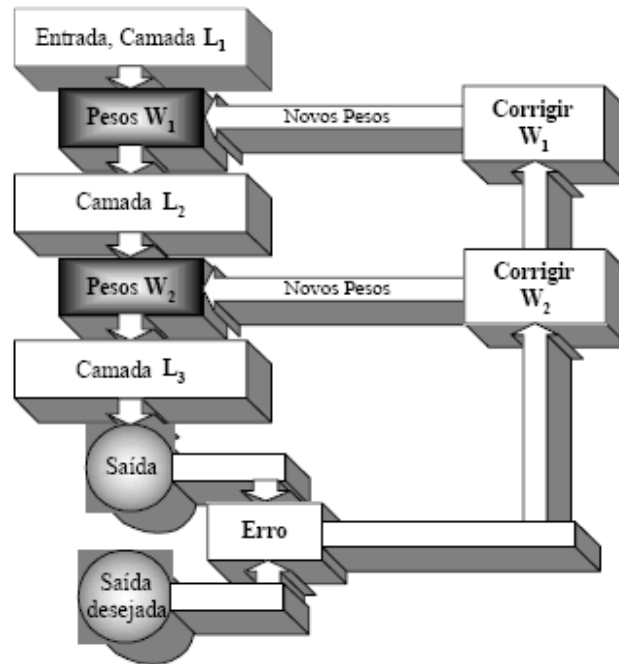


Figura 20 – Fluxo de correção dos pesos em uma rede backpropagation (Mello, 2004)

2.15.9.1 Ajuste dos Pesos

O algoritmo *backpropagation* é baseado na Regra Delta de Widrow-Hoff, desenvolvida para ajuste dos pesos sinápticos na entrada de cada neurônio (elementos de processamento), tendo por referência o erro existente entre a saída real e a saída desejada do neurônio, quando um dado vetor é apresentado à sua entrada. A correção do peso é feita utilizando-se método de otimização LMS (*Least Mean Square*), ou mínimos quadrados, com o objetivo de encontrar um valor para o peso que minimize o erro na saída da rede.

Em uma rede *backpropagation* o ajuste do erro é feito baseado na retropropagação do erro, onde o erro gerado pelos neurônios na camada de saída é distribuído para os demais neurônios da rede. Mesmo conhecendo o erro global da rede, não é possível determinar os pesos exatos para poder corrigi-lo. Entretanto, com base nesta informação, pode-se estabelecer a direção nas quais os pesos devem ser ajustados para minimizar o erro quadrático total da saída da rede. Conhecida esta direção é possível ajustar os pesos até que o menor erro global seja atingido. O ajuste de um peso w_{ij} que define seu valor para a próxima iteração é definido pela Equação (18).

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \Delta w_{ij}(n) \quad (18)$$

Onde: w_{jk} : peso sináptico do neurônio k ;
 η : constante positiva que define a taxa de aprendizagem;
 y_k : sinal de saída gerado pela rede.

A variação Δw_{ij} que é aplicada ao peso w_{ij} deve ser proporcional ao sinal de entrada x_j , que é definido pelos sinais de saída da camada anterior ponderados pelos pesos, e ao erro gerado na saída. Ela é dada pela Equação (19), onde η é a taxa de aprendizagem e δ_j é o gradiente local do erro para o neurônio j .

$$\Delta w_{ij}(n) = \eta \delta_j(n) x_j(n) \quad (19)$$

Onde: w_{jk} : peso sináptico do neurônio k ;
 η : constante positiva que define a taxa de aprendizagem;
 y_k : sinal de saída gerado pela rede.

2.15.9.2 Gradiente Descendente

O gradiente local do erro é determinado por meio do método gradiente descendente. Ele é o termo responsável pela distribuição do erro da camada de saída para as camadas anteriores. O ajuste dos pesos (Δw) deve ser realizado na direção contrária ao gradiente. Se o peso $w(n)$ (valor do peso na iteração n) está à esquerda do erro mínimo, o ajuste Δw deve ser positivo para que $w(n+1)$ (valor do peso da próxima iteração) esteja mais próximo do valor de w que minimiza o erro. Por outro lado, se o peso $w(n)$ está à direita do erro mínimo, o ajuste Δw deve ser negativo.

2.15.10 Taxa de Aprendizagem

A taxa de aprendizagem, ou *learning rate* (lr), é um valor positivo, geralmente menor do que 1, que regula a intensidade com que as atualizações dos parâmetros (pesos) serão efetuadas. Taxas muito baixas, próximas de zero, tendem a fazer com que o aprendizado seja bastante lento, porém taxas muito altas, próximas de 1, podem fazer com que a rede oscile, como se estivesse aprendendo e desaprendendo, e as vezes nem consiga chegar a um patamar aceitável de aprendizado. O valor da taxa de aprendizado não precisa permanecer fixo.

2.15.11 Termo Momentum

A inclusão do termo momentum, ou *momentum coefficient* (mc), tem por objetivo aumentar a velocidade de treinamento da rede neural e reduzir o perigo de instabilidade. Este termo pode ou não ser utilizado durante o treinamento e seu valor varia entre 0,0 (não utilização) a 1,0. O valor recomendado para o termo momentum é de 0,3 (Silva & Oliveira, 2005).

Esta taxa é um parâmetro de uso opcional, cuja utilização possibilita que o algoritmo livre-se de mínimos locais durante o processo de busca pelo mínimo global. Sua utilização é recomendada quando alguns dados de entrada são muito diferentes da maioria. Normalmente resulta em uma aprendizagem mais rápida, mas pode causar instabilidade em alguns casos se for muito grande. Quando a taxa de momentum μ é utilizada, a expressão para o ajuste dos pesos entre a camada de saída l e a camada $l-1$ passa a ser definida conforme a Equação (20).

$$\Delta w_{l-1,i,j}(n) = \eta \delta_{l,j}(n) y_{l-1,i}(n) + \mu [w_{l-1,i,j}(n) - w_{l-1,i,j}(n-1)] \quad (20)$$

2.15.12 Etapas de Projeto de uma Rede Neural

O projeto de uma rede neural é baseado diretamente nos dados do mundo real, permitindo-se que o conjunto de dados fale por si mesmo (Haykin, 2001).

O projeto de um sistema neural consiste de diversas etapas que devem ser executadas em sequência, de forma iterativa e até mesmo com diversos ciclos de repetição. A construção do sistema começa pela identificação e coleta dos dados históricos relevantes para o problema. O passo seguinte é a preparação e adequação dos dados ao formato requerido pela rede neural, ou seja, a formatação dos dados. Neste processo cria-se uma escala, estabelecendo um novo intervalo válido dentro do qual todos os dados são colocados. Os intervalos comumente utilizados são $[-1,1]$ ou $[0,1]$. Este processo também é conhecido como normalização dos dados.

Após a escolha de uma representação para os dados do problema, é necessário separar os dados em dois conjuntos: o conjunto de treinamento, o qual é gerado a partir de dados históricos, ou seja, a partir de experiências e fatos ocorridos no passado; e o conjunto de

teste com o qual o funcionamento da rede é testado. Cada dado do conjunto de teste é apresentado uma única vez ao sistema.

O próximo passo é realizar a escolha do modelo neural a ser adotado e definir a topologia da rede. Em seguida realiza-se o desenvolvimento, treinamento e otimização do modelo, seguidos pela validação do mesmo. Na etapa de validação faz-se uma comparação do resultado obtido pela rede com o resultado desejado.

2.15.13 Dimensionamento de uma Rede Neural

Um dos principais dilemas no dimensionamento de redes neurais é a definição de seus parâmetros. Trata-se de um processo pouco compreendido e que possui uma gama de variáveis que podem afetar significativamente os resultados esperados. Diversos pesquisadores têm estudado teorias que definam de maneira precisa os parâmetros mais adequados na concepção de redes neurais, porém, normalmente estas escolhas são feitas de forma empírica. A definição das configurações de redes neurais requer grande experiência dos projetistas.

2.15.13.1 Número de Camadas Escondidas

Não é recomendada a utilização de um grande número de camadas escondidas. A principal camada, responsável pela informação precisa do erro cometido pela rede, é a camada de saída. As camadas ocultas recebem estimativas do erro gerado na camada de saída. De uma maneira geral, para a maioria dos problemas utiliza-se de uma a três camadas escondidas.

2.15.13.2 Número de Neurônios nas Camadas Escondidas

O maior desafio no dimensionamento de uma rede neural é a escolha correta do número de neurônios das camadas ocultas. Na realidade, a camada oculta é uma camada generalizadora. Ela tende a combinar os neurônios das camadas de entrada e saída em metagrupos (Adamowicz, 2000).

Vários critérios são sugeridos para a escolha do número ótimo de neurônios das camadas ocultas.

Hecht-Nielsen e Kolmogorov sugerem que uma rede neural deve ser composta por três camadas (entrada, oculta e saída), sendo esta configuração suficiente para modelar qual-

quer função matemática contínua desde que a camada oculta contenha $2i + 1$ neurônios, onde i é o número de variáveis de entrada.

Kudricky verificou empiricamente que, numa rede neural com duas camadas ocultas consegue-se um desempenho ótimo quando se obedece a uma taxa de 3:1 entre o número de neurônios da primeira e segunda camada ocultas. A regra parece ser válida mesmo no caso de um grande número de variáveis de entrada.

Lippmann afirma que, no caso de redes neurais com duas camadas ocultas, a segunda camada deve conter o dobro do número de neurônios da camada de saída. Caso a rede neural seja composta por apenas uma camada oculta, ela deverá ter $s(I + i)$ neurônios, onde i é o número de neurônios da camada de entrada e s é o número de neurônios da camada de saída.

Outros autores preferem definir um número máximo de neurônios que a camada oculta deve conter de acordo com a Equação (21).

$$O_{\max} = \frac{c}{10 \cdot (i + s)} \quad (21)$$

Onde: $O_{\max}$: número máximo de neurônios da camada oculta;

c : número de registros de dados utilizados na fase de treinamento da rede neural;

i : número de neurônios da camada de entrada;

s : número de neurônios na camada de saída.

2.15.13.3 Definição da Taxa de Aprendizado e do Coeficiente Momentum

A definição destes parâmetros tem grande influência durante o processo de treinamento da rede neural. Sua escolha segue um procedimento empírico, sendo que seu ajuste está diretamente ligado ao padrão que proporciona o melhor desempenho da rede.

2.15.13.4 Critérios de Parada do Treinamento

Existem vários métodos para a determinação do momento em que o treinamento de uma rede neural deve ser encerrado. Uma boa determinação destes critérios é fundamental para um bom treinamento e consequentemente uma boa generalização. Os critérios de parada mais utilizados são: número de ciclos e erro.

O número de ciclos de treinamento representa o número de vezes em que o conjunto de treinamento é apresentado à rede. De acordo com Lawrence & Giles (2000), um número excessivo de ciclos pode levar a rede à perda do poder de generalização (*overfitting*). Um pequeno número de ciclos pode levar a rede a não obter o melhor desempenho (*underfitting*).

O critério de parada por erro consiste em encerrar o treinamento quando o erro médio quadrático, ou *mean square error* (MSE), ficar abaixo de um valor pré-definido. Um erro médio quadrático muito pequeno não implica necessariamente numa boa generalização. A definição do melhor valor depende diretamente do problema.

2.15.14 Redes Neurais Aplicadas à Manufatura

O cenário mundial tem apresentado um ambiente de alta competição industrial, pressionando cada vez mais as indústrias a tornarem seus processos produtivos cada vez mais eficientes, na busca de produtos com altos padrões de qualidade, alta produtividade e baixo custo. Além da eficiência, a precisão é de extrema importância num cenário onde as empresas tentam cada vez mais desenvolver e manter padrões e procedimentos que fiquem dentro de normas internacionais, como a ISO 9000, e sobreviver dentro de uma economia cada vez mais globalizada.

Considerando o contexto da acirrada competição, juntamente com o constante avanço tecnológico, cada vez mais as empresas estão buscando novas formas de alcançar vantagem competitiva e introduzir novos produtos no mercado mais rapidamente e a um custo menor, utilizando, por exemplo, o ambiente de Manufatura Virtual (Souza et al., 2002).

A grande oferta de softwares e ferramentas de modelamento e implementação de redes neurais artificiais, têm dispensado a necessidade de um engenheiro ou de um especialista em inteligência computacional. Desta forma, a RNA pode se comportar como uma caixa-preta no processo (Rowe et al., 1996).

Devido ao rápido desenvolvimento dos métodos e ferramentas relacionados à RNA, esta tem gerado um enorme interesse em soluções de problemas ligados à manufatura (França, 2005).

Nathan et al. (1999) conduziram estudos, utilizando redes neurais artificiais, monitorando a potência e a temperatura na região de corte em um processo de retificação cilín-

drica. Neste estudo, as redes neurais artificiais apresentaram sucesso na predição do momento de início de queima.

Kwak e Song (2001) utilizaram redes neurais artificiais treinadas com o algoritmo backpropagation para prever problemas frequentemente encontrados no processo de retificação cilíndrica. Foi analisada a ocorrência de queima e de vibração induzida em peças retificadas. A rede utilizada provou ser eficiente na predição destes padrões, obtendo índices de sucesso de 95% no diagnóstico de queima e vibrações.

Em um estudo similar conduzido por Saravanapriyan et al. (2001), a temperatura de queima foi estudada em função do sinal de EA, força normal de corte, vibração e do número de ciclos de retificação. Os dados provenientes dos ensaios experimentais foram aplicados em uma estrutura de redes neurais artificiais. O método utilizado provou ser eficiente no estudo proposto, reforçando a eficácia do uso de sinais de EA e das redes neurais artificiais no monitoramento de processos de retificação.

Wang et al. (2001) propuseram uma estrutura de redes neurais artificiais para detectar a ocorrência de queima em processos de retificação. Foram coletados sinais de EA para posterior uso nas redes estudadas. Os resultados concluíram que o uso de redes neurais alcançou excelente desempenho na predição de queima.

Aguiar et al. (2006b) apresentaram um estudo que consistiu no uso de redes neurais artificiais para predição de parâmetros de rugosidade e circularidade de peças retificadas pelo processo de retificação cilíndrica. Para condução deste estudo foram utilizados parâmetros provenientes dos ensaios experimentais, sendo utilizado os sinais de EA, força de corte, parâmetros DPO, entre outros. Os resultados mostraram que a predição de rugosidade e circularidade foram bem sucedidas, tendo os resultados obtidos das redes neurais ficado muito próximos aos resultados experimentais.

Paula et al. (2006) apresentaram um estudo onde foi implementada uma estrutura de rede neural artificial, com o emprego de sinais de EA e potência de corte como entradas, cujo objetivo era quantificar o percentual de queima na superfície de peças retificadas pelo processo de retificação tangencial plana. Para este estudo verificou-se que as RNAs aplicadas à detecção do comportamento de queima na superfície de peças retificadas descreveu com grande confiabilidade informações a respeito da integridade das peças.

As RNA's são utilizadas em áreas relacionadas à manufatura tais como: planejamento e controle de processos; dimensionamento de sistemas para a manufatura; sistemas de tomada de decisão operacional; gerenciamento de robôs; monitoramento, entre outros.

Observa-se um crescente aumento desse tipo de abordagem no tratamento de problemas relacionados às máquinas e processos nos últimos anos. Muitos são os exemplos de aplicações de RNA's em processos de usinagem e especificamente no processo de retificação (França, 2005).

Estudos recentes indicam que as redes neurais artificiais são utilizadas em aproximadamente 39% nos setores de produção ou manufatura, sendo que 35% da utilização está relacionada a atividades de controle, monitoração, modelamento e otimização de funções (Govindhasamy et al., 2005).

As RNA's são utilizadas no processo de retificação para: seleção de parâmetros e otimização do processo de *creep feed*; seleção de parâmetros na operação de dressagem; monitoramento e otimização; seleção do tipo de rebolo e monitoramento do mesmo; predição do tempo de queima, parâmetros do processo e acabamento final da peça.

2.15.15 Limitações das Redes Neurais

A principal limitação das redes neurais é não ter capacidade de explicação (Dandolini, 1997). Os dados entram na rede e uma previsão sai, mas o tipo de relacionamento entre as variáveis não é revelado (Francis, 2001), assim como detalhes de como as redes “raciocinam” com os dados para chegar às conclusões também não são fornecidos. Por este motivo, as redes neurais são recomendadas para serem aplicadas em áreas de conhecimento cujas teorias ainda não conseguem explicar adequadamente o comportamento dos fenômenos observados ou em áreas de grande complexidade que não necessitam de modelos precisos da realidade física do problema, onde os resultados do modelo são mais importantes que a compreensão de seu funcionamento.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Desenvolvimento Inicial

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessária a elaboração de uma pesquisa experimental, selecionando-se um dentre os vários processos de usinagem existente, selecionando os materiais a serem utilizados na confecção dos corpos de prova, o tipo de rebolo e as condições de usinagem dos ensaios.

Após seleção dos parâmetros, procedeu-se à aquisição dos dados proveniente dos ensaios, efetuando-se posteriormente o tratamento das informações obtidas para a concepção de três estruturas de redes neurais artificiais que subsidiassem a caracterização da qualidade superficial das peças de trabalho.

As etapas descritas a seguir foram seguidas ao longo do desenvolvimento da parte experimental do presente trabalho para que os objetivos principais deste projeto fossem alcançados.

3.2 Escolha do Tipo de Operação de Retificação

As operações de retificação são subdivididas, de acordo com norma ISO, da seguinte maneira: retificação cilíndrica, plana e de forma.

O processo de retificação plana é um dos mais utilizados nas indústrias dependentes de processos de usinagem por abrasão. Sendo assim, optou-se pela retificação plana para realização dos ensaios em função de sua importância no processo produtivo.

Os estudos foram conduzidos em uma máquina retificadora tangencial plana da fabricante SULMECÂNICA. Esta máquina retificadora contém uma base magnética para fixação da peça e controle de velocidade tangencial (V_w). Na retificadora estão acoplados dois motores:

- Motor de Rotação do Rebolo: motor de 2 pólos, controlado pelo inversor de frequência WEG, modelo CFW-02, de 380V e 7,5cv. Este motor é responsável pela velocidade tangencial do rebolo (V_s).

- Motor do Fuso: controlado pelo inversor de frequência WEG, modelo CFW-02, de 5,0cv. Este motor é responsável pela velocidade do fuso (deslocamento transversal), acionado para fazer a dressagem.

3.3 Seleção e Confeção dos Corpos de Prova

Existem vários sistemas de designação para os Aços, como o SAE (*Society of Automotive Engineers*), AISI (*American Iron and Steel Institute*), ASTM (*American Society of Testing and Materials*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). A normalização unificada vem sendo utilizada com frequência cada vez maior, e é designada pela sigla UNS (*Unified Numbering System*).

Aços equivalentes como o ABNT 1020, AISI 1020, SAE 1020, possuem como principais características: baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Assim, o motivo pelo qual foi selecionado o aço ABNT 1020 para a utilização neste projeto deu-se principalmente por ser um material onde seria possível obter, de maneira mais fácil, o fenômeno de queima quando submetido ao processo de retificação.

Uma barra de aço ABNT 1020 na forma de prisma foi inicialmente cortada em pedaços menores, por processo de oxi-corte, obtendo dimensões finais de 160,0 mm de comprimento, 12,7 mm de largura e 43,0 mm de altura. As peças não sofreram tratamento térmico posterior à aplicação dos ensaios experimentais.

Os corpos de prova foram tipografados para seu reconhecimento por códigos previamente estabelecidos que indicassem profundidade de corte e sentido de entrada do rebolo na ferramenta. A Figura 21 mostra um corpo de prova usado no ensaio.



Figura 21 – Corpo de prova previamente tipografado

A Tabela 3 apresenta as profundidades de corte determinadas para cada peça utilizada nos ensaios.

Tabela 3 – Profundidade de corte das peças utilizadas e sua codificação

PROFUNDIDADE DE CORTE DAS PEÇAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS								
Peça	Código	Prof. Corte(μm)	Peça	Código	Prof. Corte(μm)	Peça	Código	Prof. Corte(μm)
1	A1	5,0	16	F1	17,5	31	K1	30,0
2	A2	5,0	17	F2	17,5	32	K2	30,0
3	A3	5,0	18	F3	17,5	33	K3	30,0
4	B1	7,5	19	G1	20,0	34	L1	35,0
5	B2	7,5	20	G2	20,0	35	L2	35,0
6	B3	7,5	21	G3	20,0	36	L3	35,0
7	C1	10,0	22	H1	22,5	37	M1	40,0
8	C2	10,0	23	H2	22,5	38	M2	40,0
9	C3	10,0	24	H3	22,5	39	M3	40,0
10	D1	12,5	25	I1	25,0	40	N1	45,0
11	D2	12,5	26	I2	25,0	41	N2	45,0
12	D3	12,5	27	I3	25,0	42	N3	45,0
13	E1	15,0	28	J1	27,5	43	O1	50,0
14	E2	15,0	29	J2	27,5	44	O2	50,0
15	E3	15,0	30	J3	27,5	45	O3	50,0

3.4 Escolha do Rebolo

Os rebolos são freqüentemente escolhidos para uma determinada operação de retificação a partir de experiências vividas anteriormente pelo usuário e ou fornecedor. Entretanto, pode-se ter uma melhor oportunidade de acerto se forem observadas algumas orientações básicas como a correta determinação do tipo de grão abrasivo, granulometria, ligante, dureza e a porosidade do rebolo.

Neste trabalho, escolheu-se um rebolo convencional de óxido de alumínio de granulometria média e alta dureza visando obter, de maneira mais fácil, os níveis de queima de-

sejados nas peças trabalho. Foi selecionado um rebolo do fabricante Norton, conforme especificações constantes na Tabela 4.

Tabela 4 – Rebolo utilizado nos ensaios experimentais

REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (ART-FE-38A80PVH)	
Fabricante	Norton
Dimensões Originais	203,2x25,4x31,75mm (Saint Gobain)
ART	Tipo Reto
FE	Ferramentaria
38A	Rebolo de óxido de alumínio, indicado para aços sensíveis à queima
80	Granulometria média
P	Dureza (Duro)
VH	Liga vitrificada

3.5 Fluido de Corte

Todos os ensaios e operações de dressagem foram realizados com a presença de fluido de corte para fins de lubrificação e refrigeração do conjunto.

O composto usado foi de uma emulsão com 4% em volume de óleo lubrificante e o restante de água, valor este sugerido pela indústria Micro-Química e largamente difundido nas operações de retificação nas empresas.

A importância da conservação desta proporção está relacionada à função de cada um de seus componentes, sendo a água responsável pela refrigeração e o óleo pela lubrificação. Para a manutenção deste valor sempre constante, visto que com os ensaios um grande volume de fluido se perdia, seja por evaporação ou por pequenos vazamentos, a cada reposição de solução no reservatório de fluido era feita a medição da concentração da solução. Para isto utilizou-se um refratômetro da marca Atago, modelo N1-E, mostrado na Figura 22.

A medição pôde ser feita pela observação contra a luz, em uma escala graduada, de uma pequena amostra da solução colhida com o auxílio de uma pipeta e espalhada sobre a lente do aparelho.

O óleo da marca Shell, tipo DMS 3200 F-1, foi usado na preparação da solução.



Figura 22 – Refratômetro utilizado na medição da concentração do fluido de corte

3.6 Ajustes da Máquina Retificadora

Para a execução dos ensaios se fez necessária a execução das seguintes etapas: ajustes iniciais e correto posicionamento dos equipamentos, operação de nivelamento da superfície do rebolo, determinação da velocidade ideal de dressagem, operação de dressagem, ensaios preliminares para verificação do funcionamento do programa de aquisição de dados, determinação da potência em vazio, ensaio para remoção de material até a ocorrência de queima.

3.6.1 Balanceamento do Rebolo

O procedimento inicial, antes de montar o rebolo na máquina retificadora, foi o balanceamento do rebolo. Qualquer desbalanceamento pode provocar vibrações indesejáveis durante a retificação. Estas vibrações, além prejudicar a operação em si, provocam alterações nos sinais de emissão acústica. Esta entrada interferente dos sinais de emissão acústica no sensor prejudica a posterior análise dos dados.

Para balancear o rebolo, nivelou-se o suporte mostrado na Figura 23 em uma mesa comparadora totalmente plana, por intermédio de um nível.



Figura 23 – Suporte utilizado no balanceamento do rebolo

O rebolo foi acoplado a um pequeno eixo e colocado no suporte. Para se executar o balanceamento aplicou-se uma força manualmente ao rebolo para que ele percorresse o comprimento do suporte girando. Se, logo após parar, o rebolo tendesse a voltar, ele não estaria balanceado. Sendo assim deve-se rearranjar a posição das pequenas massas de metal presas a flange do rebolo para anular qualquer distribuição irregular de massa que estivesse provocando o desbalanceamento. A Figura 24 mostra as massas presas a flange do rebolo.



Figura 24 – Massas de metal utilizadas para o balanceamento do rebolo

Este método de tentativa e erro foi repetido até que o rebolo, ao parar depois de estar girando, não tendesse a voltar, não indicando, assim, a presença de desbalanceamento.

3.6.2 Fixação do Corpo de Prova

O corpo de prova a ser ensaiado foi parafusado a um suporte de fixação. O suporte possui entre o corpo de prova e a mesa uma parte de nylon para evitar que vibrações indesejáveis interfiram na aquisição de sinais de emissão acústica bem como isolar eletricamente o sensor de emissão acústica da máquina, diminuindo assim o problema de interferência eletromagnética e ruído.

No início do ensaio o suporte foi colocado na mesa da retificadora e alinhado paralelamente à superfície lateral do rebolo. Este procedimento foi utilizado para uniformizar as condições diante de todos os ensaios realizados.

Após o alinhamento, o magneto foi ligado para garantir uma fixação segura, prevenindo desta maneira que, com o movimento da mesa e o contato com o rebolo, a peça não

se deslocasse, comprometendo os resultados do ensaio. A Figura 25 mostra o corpo de prova preso ao suporte e posicionado na máquina para ensaios.



Figura 25 - Fixação e alinhamento do corpo de prova na máquina retificadora

Após o posicionamento correto do corpo de prova, a superfície a ser usinada foi nivelada, pois a presença de irregularidades poderia alterar a distribuição da força de corte na interface rebolo-peça. Caso esta operação seja ignorada, tem-se uma região da peça onde o volume removido será maior e, conseqüentemente, a potência e a força necessária para esta operação também.

Outra região com características opostas pode até mesmo apresentar ausência de forças dependendo do avanço fornecido. Esta situação não se adequou a este trabalho, pois o objetivo era coletar sinais de potência e EA uniformemente em toda a superfície da peça.

Para uniformizar a superfície foi necessário fornecer um avanço gradual, da ordem de micra, do rebolo em direção à peça. A velocidade da mesa era baixa, e assim que o rebolo usinasse por igual toda a superfície, era finalizada a operação. Este procedimento foi repetido para todos os corpos de prova antes de cada ensaio.

3.6.3 Ajuste da Velocidade Tangencial da Mesa

A velocidade tangencial da mesa da máquina retificadora pode ser regulada via controle mecânico da máquina. Esta velocidade foi ajustada em $V_w=2,60\text{m/min}$ (aproximadamente $V_w=0,044\text{m/s}$).

O valor supracitado foi adotado a partir de testes realizados, obedecendo algumas condições impostas pelos demais aparelhos usados. Como a uma taxa de aquisição nos sensores tinha frequência bastante elevada, 5MHz na soma de ambas, tempos maiores que 4 segundos de passada saturavam o buffer da placa de aquisição de dados, interrompendo a aquisição. Desta forma, escolheu-se uma velocidade que completasse a passada em um tempo mais próximo possível deste valor limite, sem risco a perda de sinais, e aproveitando o máximo da aquisição.

Para realização dessa medida foi utilizado um tacômetro digital da marca Lutron, modelo DT 2235 B, tendo sido acoplado à ponta do aparelho um cilindro emborrachado, especial para este tipo de medição, conforme apresentado na Figura 26. Com a mesa em movimento a ponta emborrachada do tacômetro foi apoiada ao trilho, permitindo a medição.



Figura 26 – Tacômetro utilizado na medição da velocidade tangencial da mesa retificadora

3.6.4 Ajuste da Velocidade do Rebolo

O motor responsável pelo acionamento do rebolo apresenta 2 pólos e 7,5cv. Este motor pode ter sua velocidade alterada por meio de um controlador de frequência que o aciona.

Com o objetivo de manter a velocidade tangencial de corte igual em todos os ensaios e condições testadas, a velocidade do rebolo foi alterada a partir da perda diametral sofrida pelo mesmo com as sucessivas dressagens. A cada duas ou três profundidades de corte ensaiada o diâmetro do rebolo era medido com o auxílio de paquímetros, e a velocidade então corrigida pela variação da frequência. A frequência foi calculada a partir da Equação (22).

$$V_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}{n} \quad (22)$$

Onde: f : frequência do inversor;

R : raio do rebolo;

n : número de par de pólos do motor.

A partir da profundidade de corte de 27,5µm um novo rebolo foi utilizado durante a realização dos ensaios. Isso foi necessário devido à elevada perda diametral sofrida pelo mesmo, tornando necessária a utilização de frequências muito altas para o projeto da máquina, o que poderia ocasionar riscos. Desta maneira, optou-se por utilizar um novo rebolo da mesma marca e com as mesmas especificações.

3.6.5 Controle de Dressagem

O controle da dressagem requer uma atenção especial no processo de retificação devido à sua grande importância no acabamento de peças retificadas.

Em condições normais, para melhores acabamentos, deve-se reduzir a interferência provocada pela formação do macroefeito da dressagem, que é a formação de uma rosca sobre a superfície do rebolo. Quanto maior for o passo desta rosca, ou o passo de dressagem, mais agressivo torna-se o rebolo, sendo mais eficiente ao desbaste e permitindo maiores profundidades de corte de retificação, apresentando, entretanto, um acabamento inferior.

Aços com baixo teor de carbono apresentam baixa dureza e alta ductilidade. Esta característica ocasiona a formação de cavacos longos e pouco quebradiços em todo processo de usinagem. Na retificação este fenômeno fica evidente pelo chamado “empastamento” do rebolo, que é o entupimento dos poros e espaços entre grãos pelo cavaco formado no corte.

O empastamento do rebolo reduz a capacidade de corte da ferramenta até um ponto crítico em que a re-afiação da mesma torna-se necessária à continuidade do trabalho.

Para este trabalho foi escolhido um grau de recobrimento de dressagem constante e igual a 1, tornando o rebolo mais agressivo, capacitando-o a retificações com profundidades de corte pouco maiores.

Visando obter dados comparáveis, este valor foi mantido constante para todos os ensaios. Para isto, foi necessária a medição da ponta do dressador antes do início de cada ensaio, e com o valor obtido, variou-se a velocidade de dressagem da máquina, alterando assim, o passo da dressagem.

A medição da ponta do dressador foi possível com o auxílio de um projetor de perfis da marca Nikon, modelo 6C, localizado no laboratório de Metrologia da Unesp – Campus de Bauru, e equipado com uma lente que permite o aumento de 1000 vezes a superfície. A Figura 27 mostra uma vista do projetor no momento da medição.

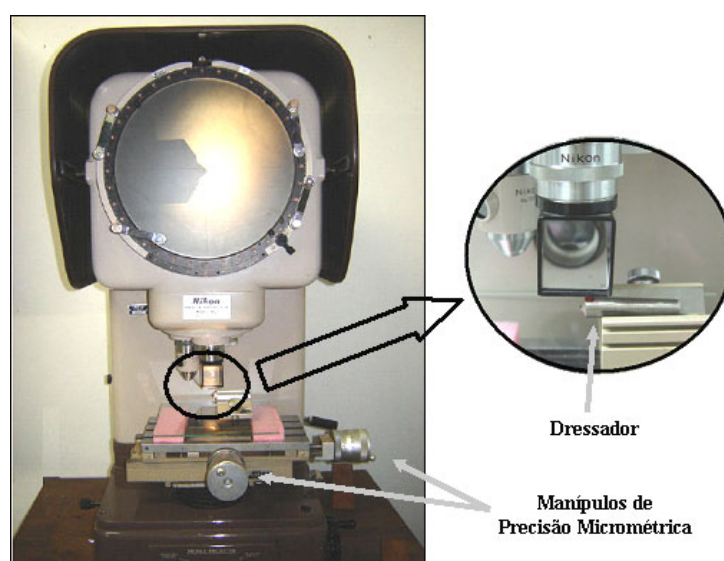


Figura 27 - Projetor de perfis usado na medição da largura da ponta do dressador

Para o controle da dressagem, após um determinado ensaio, o rebolo era dressado com passes de 40 μ m de profundidade até que toda a camada escura que representava o empastamento fosse eliminada. Neste momento eram realizados 4 passes sucessivos de 10 μ m de profundidade cada visando reduzir os efeitos dos passes anteriores sobre a superfície do rebolo.

O dressador era então retirado e levado ao projetor de perfil para medição da largura de atuação do dressador.

Com o valor de b_d conhecido foi possível calcular, com o auxílio da Equação (23), a frequência utilizada para gerar a velocidade de dressagem necessária à manutenção do grau de recobrimento constante.

$$t_d = \frac{L_r \cdot U_d \cdot 60}{n \cdot b_d} \quad (23)$$

Onde: U_d : grau de recobrimento de dressagem do rebolo;

L_r : largura do rebolo;

b_d : largura de atuação do dressador;

n : rotação do rebolo.

Sabendo que t_d pode ser obtido pela transformação da simples relação entre deslocamento e tempo, se conhecida a velocidade de dressagem, obtemos o tempo de dressagem pela Equação (24).

$$t_d = \frac{L_r}{V_d} \quad (24)$$

Onde: V_d : velocidade de dressagem;

L_r : largura do rebolo.

Portanto, com a variação da frequência do inversor, e utilizando o tacômetro, similar ao feito com a velocidade da mesa, chegou-se a um tempo de dressagem capaz de manter igual o valor do grau de recobrimento.

3.7 Sensor de Emissão Acústica

O sensor de emissão acústica usado foi um sensor de alta sensibilidade da marca Sensus. Seu posicionamento, para correta aquisição dos ensaios, foi encontrado por métodos de tentativa e erro. Devido à elevada sensibilidade do sensor era preciso encontrar uma posição que permitisse a leitura do sinal de emissão acústica nas condições mais brandas de ensaio (profundidades de corte de $5\mu\text{m}$), de tal forma que não saturasse, chegando ao máximo de seu valor possível de aquisição e impedindo a correta leitura dos sinais nas condições de usinagem mais severas (profundidades de corte de $50\mu\text{m}$).

Sabendo-se que o princípio de funcionamento deste sensor se dá pela leitura das ondas mecânicas geradas por determinado fenômeno, posicionou-se o sensor em um dos can-

tos da mesa magnética da máquina retificadora. A Figura 28 apresenta uma fotografia retirada em laboratório demonstrando a posição adotada.

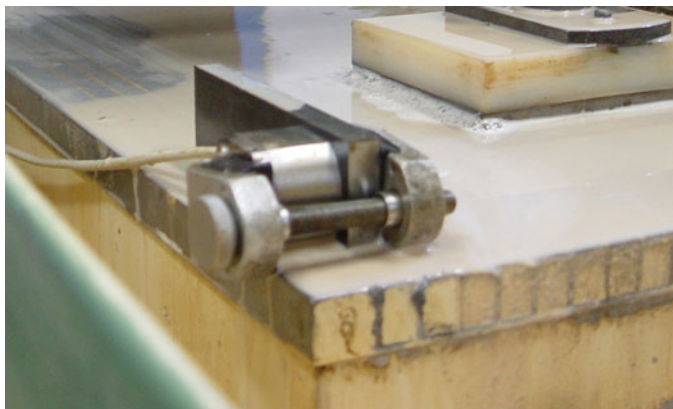


Figura 28 – Posicionamento do sensor de emissão acústica sobre a bancada de ensaios

Esta posição permitiu a correta leitura dos sinais para todas as condições analisadas. A vibração ocasionada pela passagem do rebolo sobre a peça causava vibrações que se propagavam pela mesa da máquina retificadora, chegando até o sensor de emissão acústica, onde era feita a leitura e conversão destes sinais vibratórios em sinais elétricos.

O sinal colhido no sensor era transmitido até o módulo de aquisição, também da marca Sensis, modelo DM42, conforme apresentado na Figura 29.



Figura 29 – Sistema de monitoração de EA do fabricante Sensis

As configurações utilizadas neste módulo são apresentadas conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados na aquisição do sinal de EA

PARÂMETROS DO MÓDULO DE EA	
Fabricante	Sensis
Modelo	DM42
Ganho de Sinal	1
Ganho de Entrada	10
Redução de Ruído	0
Filtro Passa Alta	200Hz
Filtro Passa Baixa	Sem filtro passa baixa
Constante de Tempo	1ms

3.8 Sensor de Potência Elétrica

Para a medição de potência elétrica do motor de indução trifásico de 7,5cv, responsável pelo acionamento do eixo árvore da retificadora, utilizou-se um sensor de efeito Hall do fabricante Nana Eletronics Co. Ltd, bem como um transdutor de tensão LV 25-P.

A corrente e a tensão do inversor de frequência foram monitoradas por um módulo desenvolvido pelo Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LA-DAPS), da Unesp de Bauru. De acordo com Aguiar (2003) o módulo converte os valores na potência conforme a Equação (25).

$$P_{elétrica} = 765,2.V - 3,37 \quad (25)$$

Onde: V : tensão de saída do módulo, dada em Volts;

$P_{elétrica}$: potência elétrica do motor, em Watts.

3.9 Sistema de Aquisição de Sinais

Para a aquisição dos sinais provenientes dos sensores de emissão acústica e potência foi utilizada uma placa de aquisição de dados, DAQ, com 12 bits de precisão, do fabricante *National Instruments*, modelo PCI-6111, com máxima frequência de amostragem de 5 milhões de pontos por segundo, instalada no interior de um computador dedicado a realização dos ensaios.

Respeitando os limites da placa e usando o máximo de sua capacidade, os sinais foram lidos com uma frequência de 2 milhões de amostras por segundo para cada canal, o que representou um tempo máximo de aquisição de 4 segundos, sem que houvesse a saturação do buffer da placa.

Os arquivos gerados pela aquisição dos dados de emissão acústica e potência foram obtidos com o auxílio do software LabVIEW, da *National Instruments*, com aplicativo especialmente desenvolvido para este fim pelo Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS), da Unesp de Bauru. A interface do programa LabView utilizado nos ensaios é mostrada na Figura 30.



Figura 30 – Interface do programa LabVIEW utilizado nos ensaios

3.10 Processamento de Sinais

De posse dos arquivos de dados de emissão acústica e potência elétrica provenientes da placa de aquisição de dados, os sinais foram processados com auxílio do software MatLab.

3.11 Software de Detecção de Queima

Para conhecer e quantificar os danos térmicos nas peças ensaiadas foi utilizado um programa desenvolvido pelo Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) da Unesp de Bauru, capaz de calcular a porcentagem de queima na superfície do corpo de prova pela análise de sua imagem digitalizada.

Após inspeção visual, os corpos de prova foram fotografados em um ambiente de pouca luz, visando reduzir os reflexos da iluminação, e com tempo de abertura da objetiva igual a 1s. Para este procedimento foi utilizada uma câmera digital da marca SONY, modelo *CyberShot* DSC-S60, em posição fixa.

As fotos foram tratadas com o auxílio do software Adobe Photoshop. Inicialmente as superfícies foram recortadas da imagem e, com o auxílio de uma ferramenta de redimensionamento de escala, foi refeita sua forma original de retângulo, perdida com o efeito provocado pela angulação entre máquina e objeto fotografado.

Para reduzir os efeitos residuais do reflexo da luz sobre a superfície, a imagem foi transformada a partir da barra de ferramentas “*Mode*”, presente no menu “*Image*”, em modo “*LabColor*”, e então foram apagados os canais “*a*” e “*b*” da imagem. Posteriormente, para finalizar sua preparação, a figura foi transformada em modo “*GrayScale*”, ou “Escala de Cinza” e então salva para ser utilizada no programa de Quantificação de Queima.

3.12 Medição de Rugosidade

O contorno de superfície de uma peça apresenta menor espaçamento entre picos e vales em sua seção transversal que em seu eixo longitudinal. De acordo com Malkin (1989), a análise espectral de um perfil produzido por um processo de retificação revelou a predominância de efeitos de ondulações no eixo longitudinal à direção de retificação. Já em seu eixo transversal observou-se maior incidência de efeitos de rugosidade. Assim, para se proceder à quantificação de rugosidade em uma peça, o eixo transversal apresenta uma medida mais crítica, caracterizando de melhor forma os efeitos das marcas provocadas pelos grãos abrasivos em um processo de retificação.

Para o levantamento da rugosidade de cada uma das peças ensaiadas foi utilizado um rugosímetro portátil, da marca Taylor Robson, modelo Surtronic 3+. Desta forma, foram realizadas leituras transversais ao corte, em 15 subdivisões da peça, e três repetições para cada

medida. Tais medições foram realizadas no Laboratório de Metrologia da Unesp – Campus de Bauru, com o uso de uma mesa e suporte especial para fixação dos equipamentos.

A Figura 31 mostra uma foto onde é possível ver o posicionamento dos equipamentos.

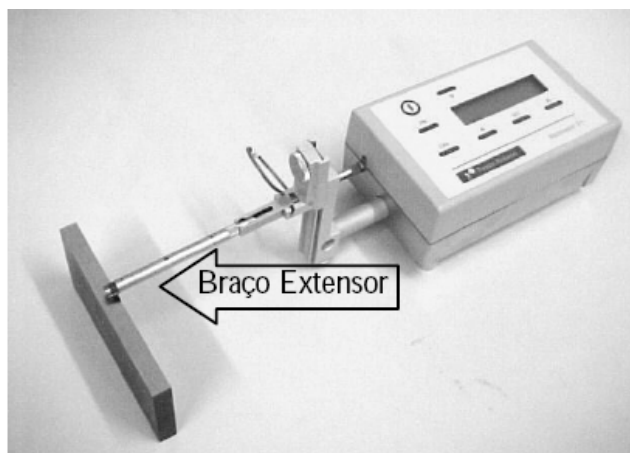


Figura 31 – Medição de rugosidade das peças ensaiadas

A rugosidade média aritmética (R_a) foi o padrão utilizado na leitura. Este valor é a média aritmética obtida entre todos os picos e vales percorridos pela ponta do aparelho.

O comprimento de amostragem foi configurado pelo instrumentista em 0,8mm, e o filtro de *cutt-off*, valor que suprime 1/5 do comprimento no cálculo da média, auto-ajustado pelo aparelho em função do comprimento de amostragem escolhido.

A importância do filtro de *cutt-off* está relacionada à eliminação dos erros provocados pelas vibrações do aparelho no momento de sua saída da posição de inércia estática. A Figura 32 apresenta as 15 divisões feitas nas peças, espaçadas entre si em 1 cm.

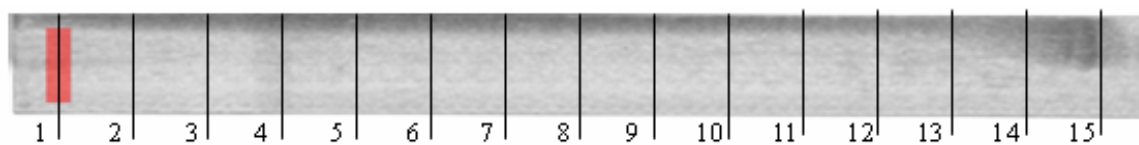


Figura 32 - Divisão da peça para medição de rugosidade média

A região demarcada por uma faixa na linha 1 mostra o sentido usado na medição da rugosidade.

3.13 Medição de Microdureza

As medidas de microdureza foram realizadas num aparelho da marca Otto Wolpert-Werke, tipo M-Testor, Baujahr, 1962. Utilizou-se a escala Vickers para medição da microdureza por ter sido essa a mais indicada ao tipo de metal e à dureza envolvida. O peso utilizado foi de 100 gramas e o espaçamento entre os pontos ao longo da peça foi de aproximadamente 10 mm.

A Figura 33 apresenta a máquina utilizada para os ensaios de microdureza das peças retificadas.



Figura 33 – Equipamento de medição de microdureza

Estes testes consistiram em medir a microdureza ao longo da superfície da peça a fim de que se pudesse conhecer melhor o comportamento da transformação metalúrgica do material quando da ocorrência de queima na peça. Esse tipo de ensaio gera informações conizentes sobre a integridade da peça, facilitando sobremaneira as comparações do processamento digital dos sinais de emissão acústica, e assim, ajudando a encontrar a melhor ferramenta para a detecção da queima no processo de retificação.

Para minimizar erros nas medições, devido à variação da microdureza pelo material, realizaram-se três medidas na mesma faixa perpendicular da peça conforme Figura 34.

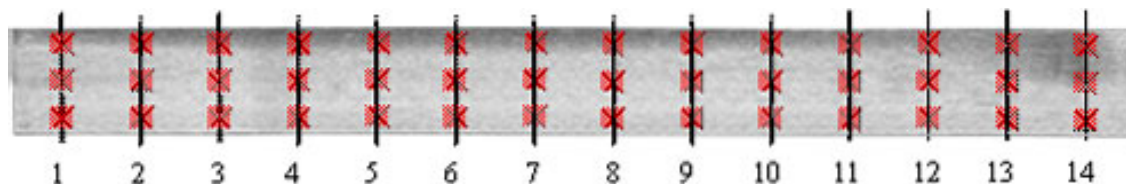


Figura 34 – Divisões da peça para medição de microdureza

3.14 Dimensionamento das Redes Neurais Artificiais

As redes neurais utilizadas neste trabalho foram construídas com a utilização do software MatLab, que contém funções específicas e pacotes matemáticos para elaboração de redes neurais.

Diversas estruturas foram testadas para obter a configuração que fornecesse os melhores resultados ao tipo de sinal empregado.

A rede escolhida para o treinamento e validação dos dados do presente trabalho foi a *Multi Layer Perceptrons - Backpropagation (MLP)*, ou perceptrons de múltiplas camadas com treinamento por retropropagação. A escolha foi baseada nas ótimas características que este modelo de RNA possui em relação ao foco desta pesquisa.

Esta estrutura caracteriza-se por uma rede de múltiplas camadas, ou camadas ocultas, com realimentação de entradas.

Para o treinamento, foi usado o critério “traingdx”, que é uma função de treinamento de rede que atualiza os valores de peso e *bias* de acordo com o momento do gradiente descendente e da taxa de aprendizagem adaptativa.

Na arquitetura da rede foram utilizadas funções de transmissão “tansig” (tangente sigmoidal), uma vez que os dados de entrada e saída da rede foram normalizados entre valores -1 e +1.

O número de ciclos de treinamento foi fixado em 20000 épocas, tendo sido adotado este valor para que o número de vezes que o conjunto de treinamento fosse apresentado à rede não se tornasse excessivo, levando à perda de generalização; nem pequeno o suficiente de tal forma a não atingir o seu melhor desempenho.

Outro parâmetro fixo para todas as redes foi o erro médio quadrático. O valor estimado, o qual apresentou bons resultados de generalização e convergência em ensaios preliminares, foi fixado em 10^{-2} . Assim, o treinamento das redes era encerrado quando qualquer um dos critérios acima fosse atendido.

3.14.1 Estruturas das Redes Neurais Artificiais

Para este trabalho foram estudadas três (3) estruturas diferentes para o dimensionamento das redes neurais, de tal forma a determinar a estrutura que apresentasse os melhores resultados na predição dos parâmetros adotados como saída.

O conjunto de variáveis de entrada utilizadas para alimentação das redes neurais foi selecionado dentre os parâmetros estabelecidos na elaboração dos ensaios experimentais, além de parâmetros provenientes do processo de retificação das peças. As variáveis de entrada selecionadas para estudo foram:

- Valor Médio do Sinal de Emissão Acústica (EA_{rms});
- Valor Médio do Sinal de Potência de Corte (POT_{rms});
- Profundidade de Corte das peças ensaiadas;
- Parâmetro DPKS, derivado do sinal de potência e EA;
- Parâmetro DPO, derivado do sinal de potência e EA.

O conjunto de variáveis de saída das redes neurais foi adotado de tal forma a proporcionar uma boa caracterização da qualidade superficial das peças submetidas aos ensaios de retificação. O conjunto de saída selecionado foi composto por:

- Indicador de Queima;
- Rugosidade Média;
- Microdureza Média.

A estrutura de análise deste projeto pode ser sintetizado conforme apresentado na Figura 35.

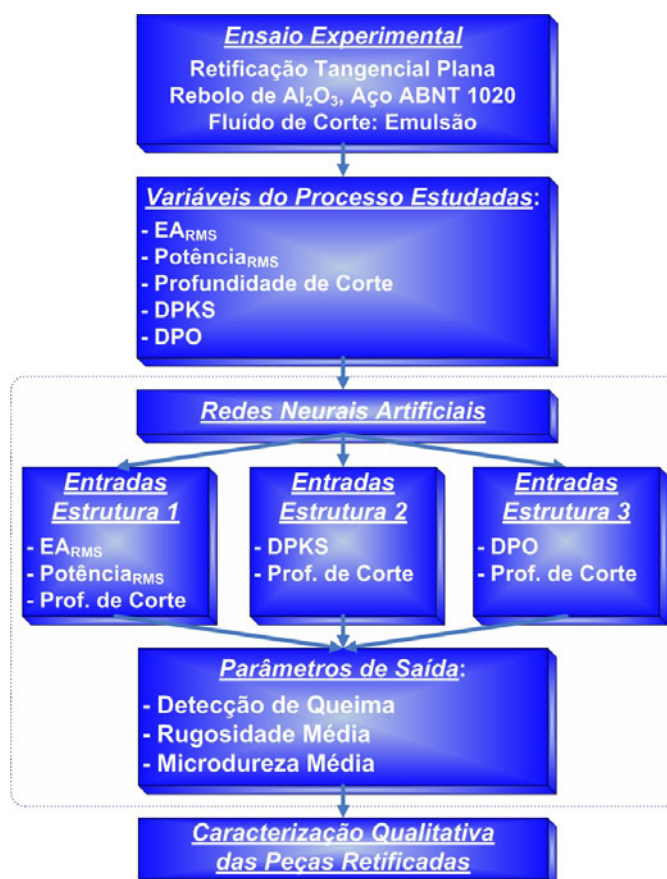


Figura 35 - Estruturas das redes neurais utilizadas no projeto

3.14.2 Conjunto de Dados de Entrada das Redes Neurais

Os dados coletados na elaboração dos ensaios experimentais foram separados em duas categorias: dados de treinamento, utilizados no treinamento das redes; e dados de validação, utilizados para verificar o desempenho das predições.

Foram selecionadas 31 peças, dentre as 45 obtidas nos ensaios, para compor o conjunto de treinamento das redes neurais. Tais peças foram mantidas invariáveis para que se pudessem efetuar as comparações de desempenho de cada estrutura implementada.

Para a etapa de validação foram selecionadas 9 peças. Foram tomados os cuidados necessários para que fossem selecionadas peças de diferentes profundidades. As peças utilizadas representam uma amostra significativa do processo, cobrindo amplamente o domínio dos ensaios, considerando as mais diversas amostras obtidas no estágio experimental.

As peças excluídas – B2, B6, D3, H3, I2 – foram selecionadas dentre as que apresentaram maiores divergências dos padrões coletados no procedimento experimental.

A fundamentação inicial de seleção das peças de entrada visou atender, de forma aproximada, à distribuição sugerida por diversas literaturas (75% do total de peças destinadas ao estágio de treinamento e 25% do total das peças destinadas ao estágio de validação).

3.14.3 Conjunto de Dados de Saída das Redes Neurais

O conjunto de saída das redes neurais foi selecionado tendo em vista a proposta do projeto, uma vez que os parâmetros de detecção de queima, rugosidade e microdureza são ótimos indicadores da qualidade de superfícies de peças usinadas pelo processo de retificação tangencial plana.

Os dados obtidos nos testes pós-ensaio foram tomados como base para a concepção do conjunto de saída das estruturas estudadas.

As predições dos parâmetros de saída das redes mesclam o reconhecimento de padrões, para o caso da detecção de queima da peça, e de funções de aproximação, para os casos de predição de rugosidade e microdureza.

Este conjunto serviu como base de dados para o treinamento supervisionado, além de possibilitar aferir o desempenho das estruturas modeladas. Observa-se que para os parâmetros de rugosidade e microdureza foram considerados os valores médios obtidos ao longo das peças retificadas.

3.14.4 Determinação dos Parâmetros das Redes Neurais

Para a determinação dos parâmetros das redes neurais foram construídas várias redes com configurações diferentes. Para cada estrutura foram geradas redes com parâmetros distintos, visando à determinação da configuração que apresentasse a melhor generalização do problema. Os principais parâmetros variados foram: número de camadas intermediárias; número de neurônios das camadas intermediárias; taxa de aprendizagem e coeficiente momentum.

Inicialmente foi fixado o número de camadas intermediárias, procedendo à variação do número de neurônios que a compunha. Para cada estrutura proposta foram gerados treinamentos com diversas taxas de aprendizagem e termo momentum. A taxa de aprendizagem foi testada para o intervalo de 0.1 a 0.9, e para cada valor, o momentum foi variado também de 0.1 a 0.9. Para cada combinação de taxa de aprendizagem e momentum foram realiza-

dos treinamentos. Após o treinamento realizou-se a validação com as 9 peças previamente selecionadas.

Para que se procedesse aos testes comparativos, alguns parâmetros foram mantidos constantes ao longo das estruturas estudadas. Foi mantido o número de épocas em 20000 e estimado um erro médio quadrático (MSE) em 10^{-2} . Da mesma forma, foram fixadas as peças C1, E3, G1, J2, K3, L2, M3, N1 e O3 para que as comparações de desempenho dos testes de validação de cada rede fossem tomadas sobre as mesmas condições.

Por meio da observação do desempenho da rede e de testes de validação foram calculados os erros de predição das peças validadas efetuando-se a comparação com os valores obtidos nos ensaios experimentais.

Tendo sido obtida a configuração que apresentava o melhor desempenho para redes com uma única camada intermediária, foram repetidos os passos descritos anteriormente para redes compostas por duas camadas intermediárias.

Testes adicionais para redes compostas por três camadas intermediárias foram conduzidos, porém, como o desempenho ficou abaixo dos obtidos pelas redes com números menores de camadas intermediárias, as mesmas foram desconsideradas nos testes comparativos.

A Figura 36 apresenta uma síntese dos ensaios elaborados na busca da arquitetura da rede que apresentasse o melhor desempenho na predição de qualidade superficial das peças retificadas.

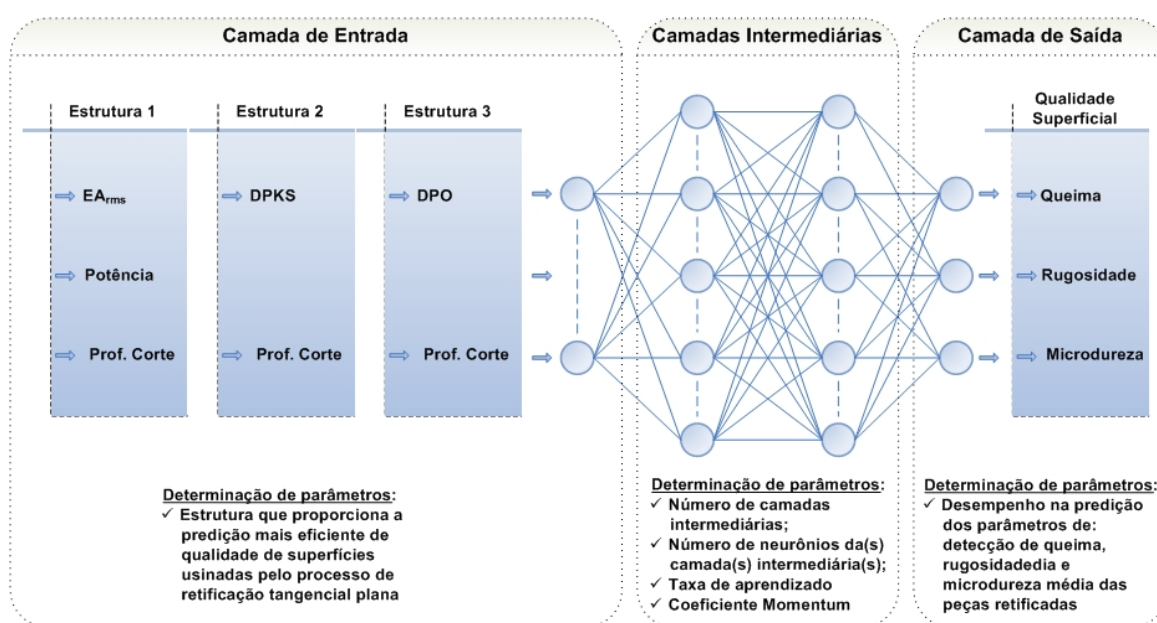


Figura 36 – Síntese dos ensaios elaborados para definição das redes neurais

CAPÍTULO 4

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 Introdução

Aqui são apresentados os ensaios experimentais realizados na máquina retificadora plana para as peças de aço ABN1020 retificadas com rebolo de óxido de alumínio, bem como as configurações e instrumentações utilizadas nos ensaios de integridade superficiais pós-retificação das peças usinadas.

No Anexo IV são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios elaborados de caracterização de queima, rugosidade e microdureza da peça.

4.2 Banco de Ensaios

Os ensaios experimentais foram realizados numa máquina retificadora plana Sul-mecânica, onde um banco de ensaios foi desenvolvido conforme apresentado na Figura 37.

Por meio dos sensores previamente ajustados, dados do sinal puro de emissão acústica e potência elétrica foram coletados para quarenta e cinco (45) ensaios utilizando-se o aço ABNT 1020.

Os sinais dos sensores de Emissão Acústica e de Potência entravam no Bloco Terminal NI BNC-2110 da *National Instruments*, o qual efetuava a interface dos módulos com a placa de aquisição.

Para a aquisição dos dados foi utilizada uma placa de aquisição de dados (DAQ) de 2 canais, com máxima frequência de amostragem de 5.000.000 amostras por segundo (5MHz), 12 bits de precisão, modelo PCI-6111, acoplada a um microcomputador desktop. Além da instalação física, a placa foi inicializada pelo software LabView, utilizando-se aplicativo especialmente projetado para este fim. Os dados coletados foram armazenados em arquivos do tipo texto.

Também foi utilizado um filtro anti-aliasing com o objetivo de filtrar frequências inferiores a 1 MHz, obedecendo desta forma o critério de amostragem de Nyquist.

Foi efetuada apenas uma passada do rebolo sobre a peça trabalho para todas as peças utilizadas nos ensaios.

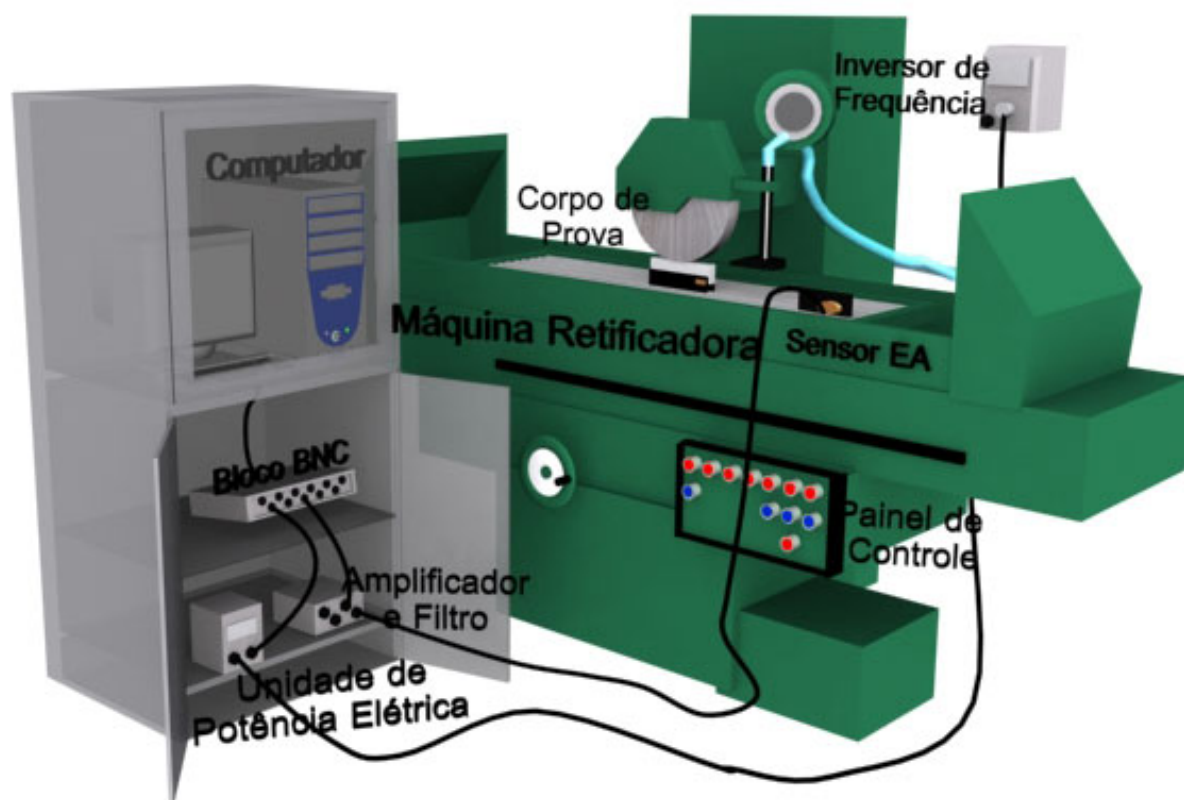


Figura 37 – Banco de ensaios experimentais

A maioria dos parâmetros foi mantida constante ao longo dos ensaios. Entretanto, a profundidade de corte foi variada pelo avanço do rebolo sobre a peça.

A Figura 38 apresenta uma foto do processo de retificação, onde podem ser observados o rebolo, o bocal de saída do fluido, o suporte da peça, o sensor de EA e a peça a ser usinada.



Figura 38 – Processo de usinagem utilizado no banco de ensaios

Os ensaios foram conduzidos via seleção prévia de quinze (15) profundidades de corte das peças, adotando-se três (3) repetições para cada profundidade de corte. Desta forma, foram gerados 45 ensaios que serviram como base de dados para alimentação das entradas das redes neurais artificiais.

Os parâmetros de usinagem utilizados para a confecção do banco de ensaios podem ser sintetizados conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de usinagem

PARÂMETROS DE USINAGEM DO BANCO DE ENSAIOS	
Velocidade Periférica do Rebolo (V_s)	30m/s
Velocidade da Peça (V_w)	0,044m/s
Quantidade de Passadas	1
Tipo de Fluido Refrigerante	Emulsão Água-óleo 4 %
Tipo de Rebolo	38A80PVH – Norton
Diâmetro Original do Rebolo	203,2mm
Largura Original do Rebolo	31,75mm
Dimensões da Peça	160mm x 12,7mm x 43mm

4.3 Medidas Pós-Retificação

Posteriormente aos ensaios de retificação, as peças trabalhadas foram submetidas a testes visando à quantificação de parâmetros tais como: queima, rugosidade e microdureza.

Para classificar a ocorrência de danos térmicos causados às peças retificadas foi utilizado o programa *Grinding Analyses*, desenvolvido no LADAPS da UNESP de Bauru. Para classificação de queima da peça foi adotado um valor referência para queima de 10% do total da peça. Desta forma, todas as peças que apresentaram um limiar superior a 10% de queima foram classificadas como “com queima”. Valores inferiores ao limite de 10% de queima foram classificados como “sem queima”.

Adicionalmente foram conduzidos testes posteriores à execução dos ensaios experimentais para levantamento dos parâmetros de rugosidade e microdureza das peças ensaiadas.

Os valores médios obtidos para os ensaios das peças trabalho são apresentadas conforme tabela constante no Anexo IV.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução

Nesta seção serão apresentados os diversos resultados das análises realizadas nos ensaios experimentais e as devidas discussões sobre os resultados obtidos.

5.1.1 Sinais de Emissão Acústica e Potência

Os ensaios foram realizados para 15 profundidades de corte diferentes utilizando para cada uma delas três peças, totalizando 45 peças ensaiadas. A Tabela 7 apresenta o resumo dos ensaios realizados, considerando as profundidades de corte adotadas.

Depois de realizados os ensaios, os sinais foram processados com auxílio do software MatLab e calculado o valor RMS do sinal puro de emissão acústica e de potência elétrica do motor. As Figuras 39 a 53 apresentam os gráficos dos sinais de emissão acústica RMS e potência do motor de acionamento para cada ensaio realizado.

Tabela 7 – Profundidades adotadas para os ensaios realizados

PROFUNDIDADE DE CORTE					
Peça	Profundidade de Corte (μm)	Peça	Profundidade de Corte (μm)	Peça	Profundidade de Corte (μm)
A1-A2-A3	5,0	F1-F2-F3	17,5	K1-K2-K3	30,0
B1-B2-B3	7,5	G1-G2-G3	20,0	L1-L2-L3	35,0
C1-C2-C3	10,0	H1-H2-H3	22,5	M1-M2-M3	40,0
D1-D2-D3	12,5	I1-I2-I3	25,0	N1-N2-N3	45,0
E1-E2-E3	15,0	J1-J2-J3	27,5	O1-O2-O3	50,0

Pode ser observado que a partir da profundidade de corte de 35 μm (gráficos da Figura 50), onde se inicia o fenômeno de queima, a intensidade dos sinais de EA e Potência de Corte aumentam significativamente. Outro comportamento que pode ser notado é a geração de oscilações abruptas nos valores médios de EA para as peças que apresentaram ocorrência de queima superficial.

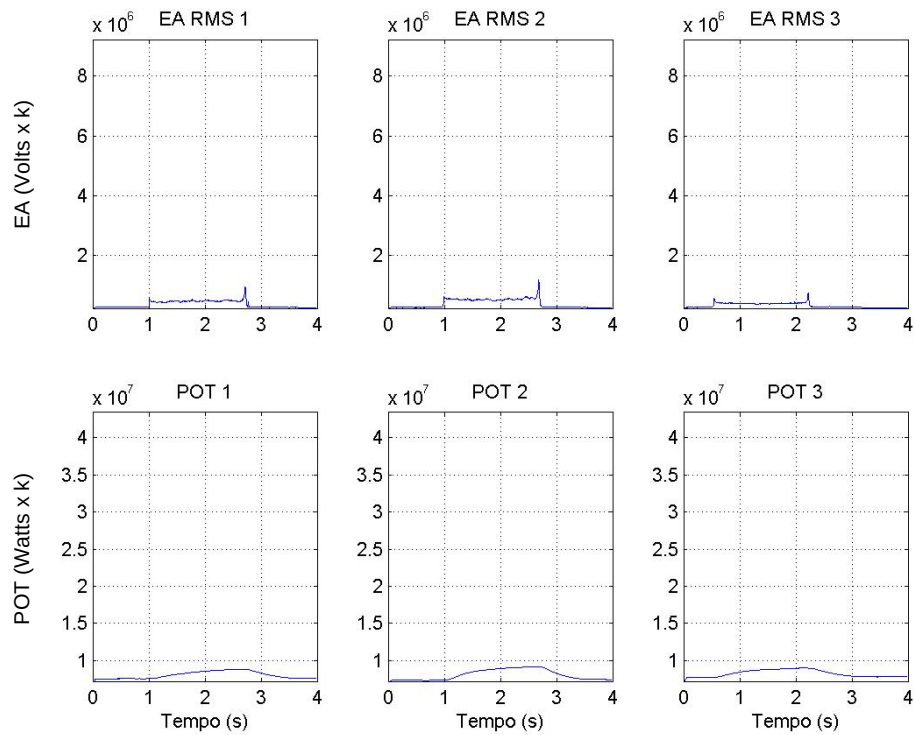


Figura 39 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 5,0μm (Peça A)

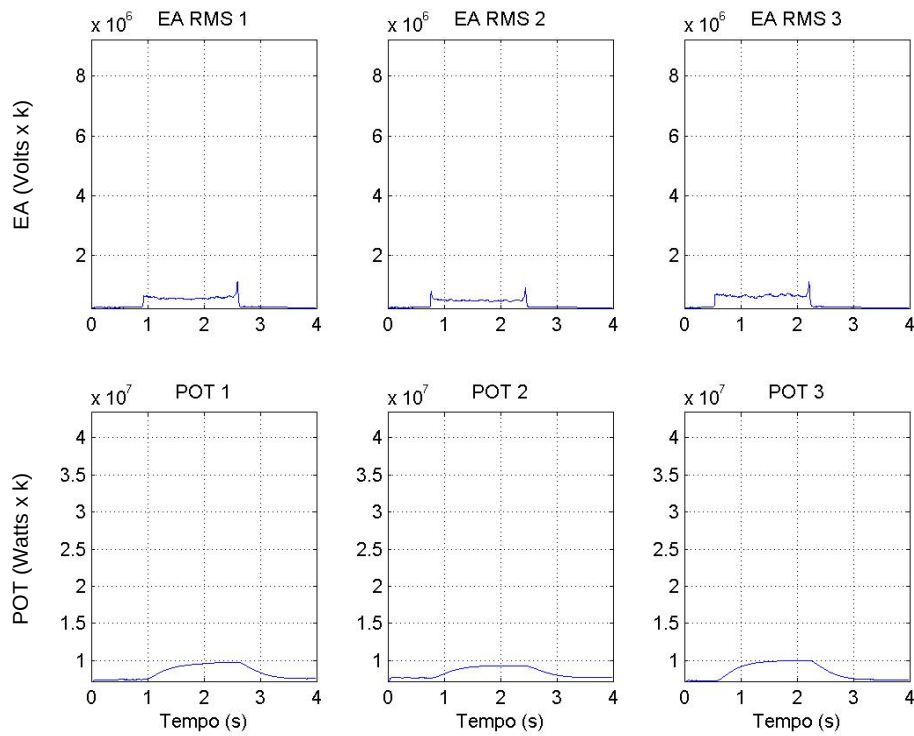


Figura 40 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 7,5μm (Peça B)

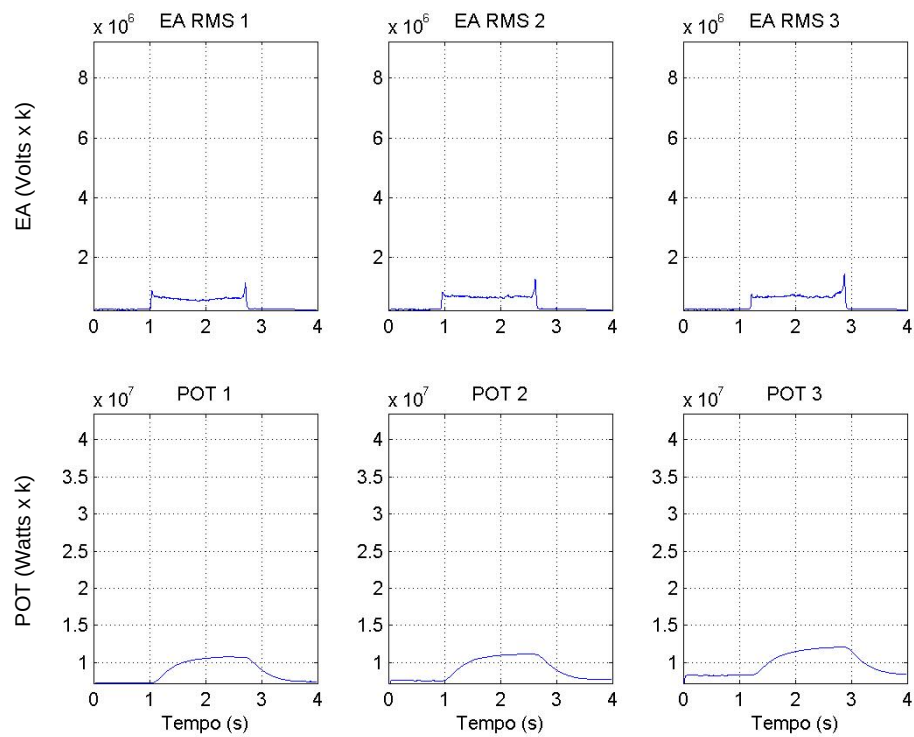


Figura 41 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 10µm (Peça C)

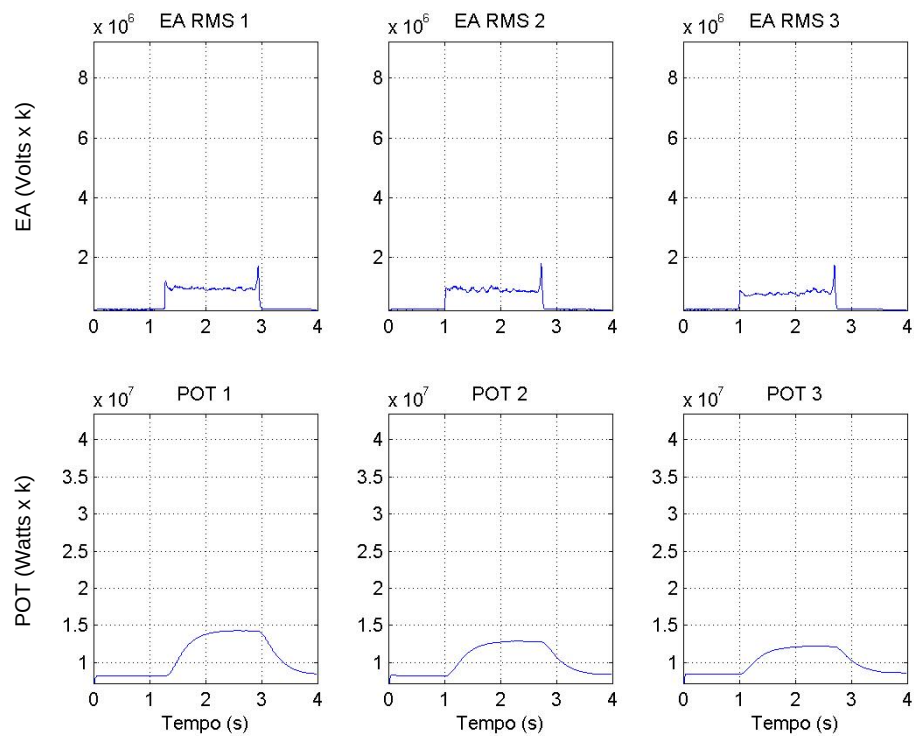


Figura 42 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 12,5µm (Peça D)

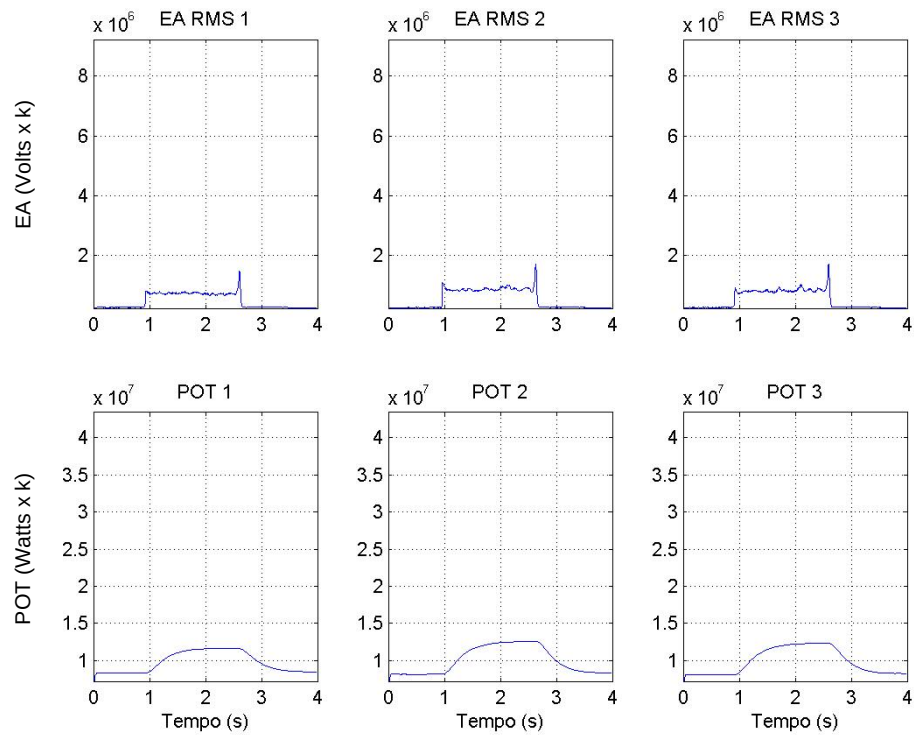


Figura 43 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 15µm (Peça E)

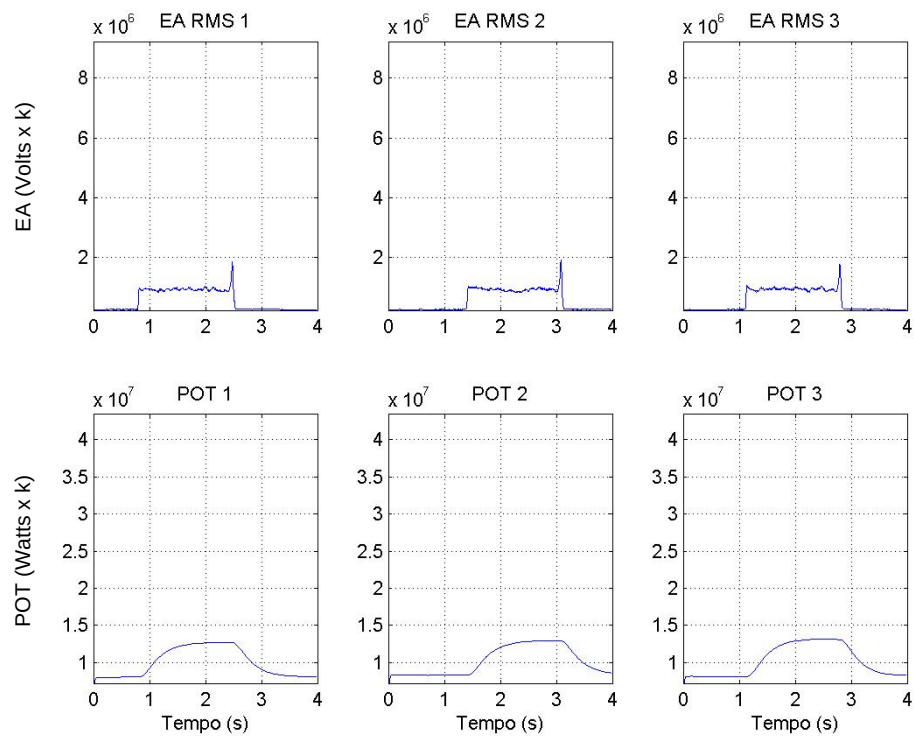


Figura 44 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 17,5µm (Peça F)

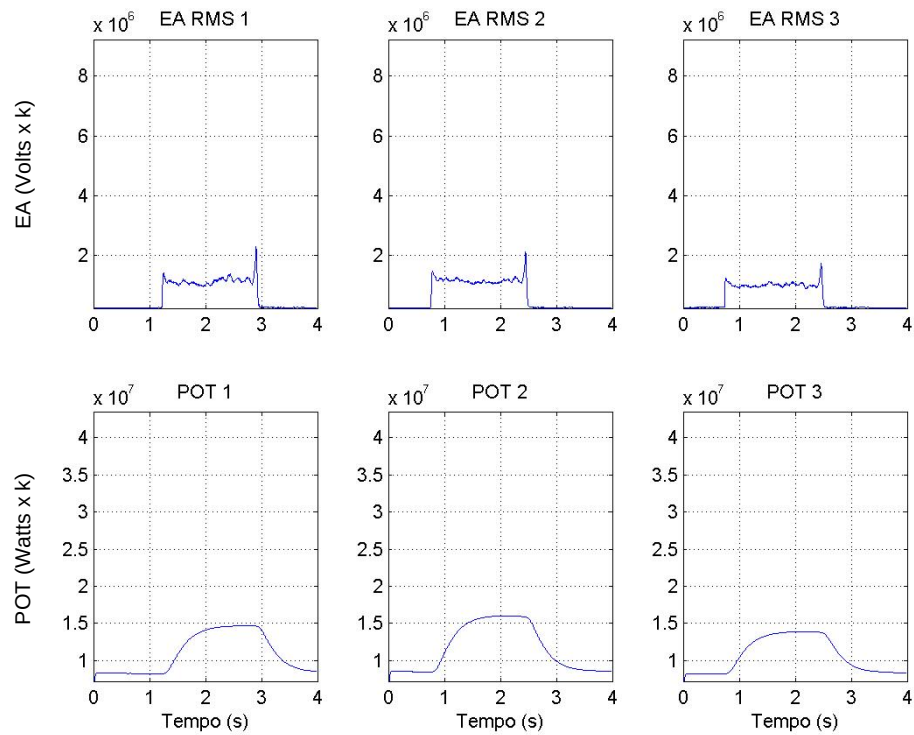


Figura 45 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 20 μm (Peça G)

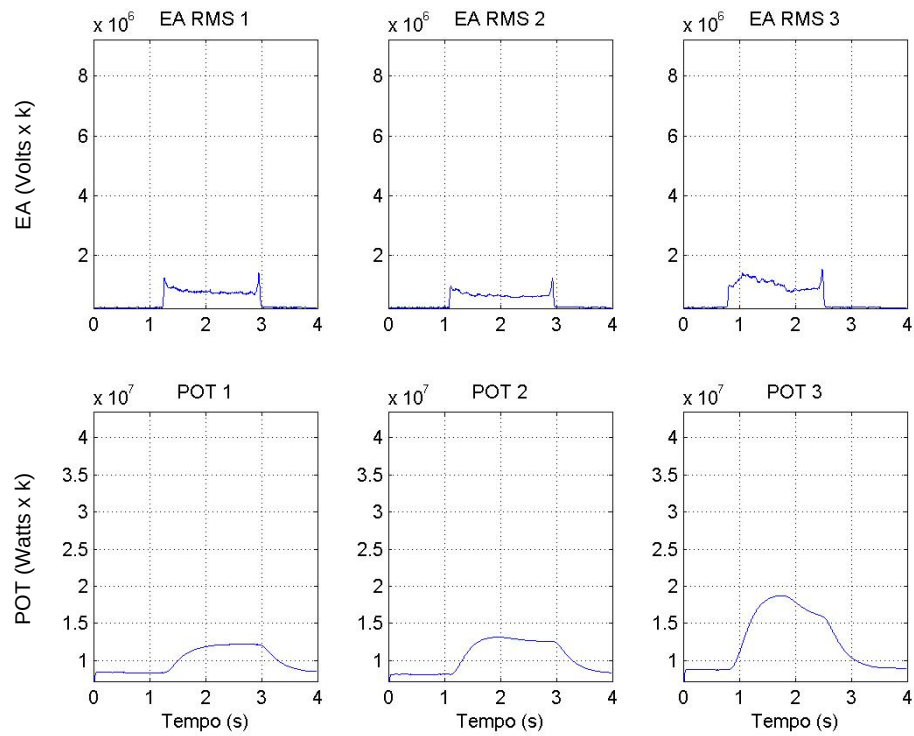


Figura 46 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 22,5 μm (Peça H)

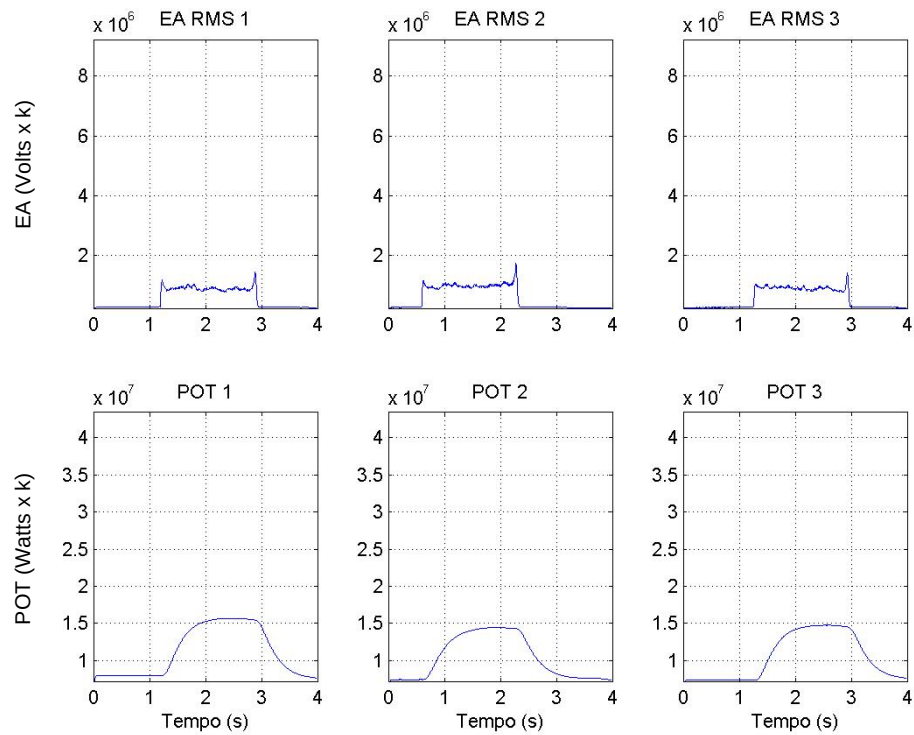


Figura 47 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 25µm (Peça I)

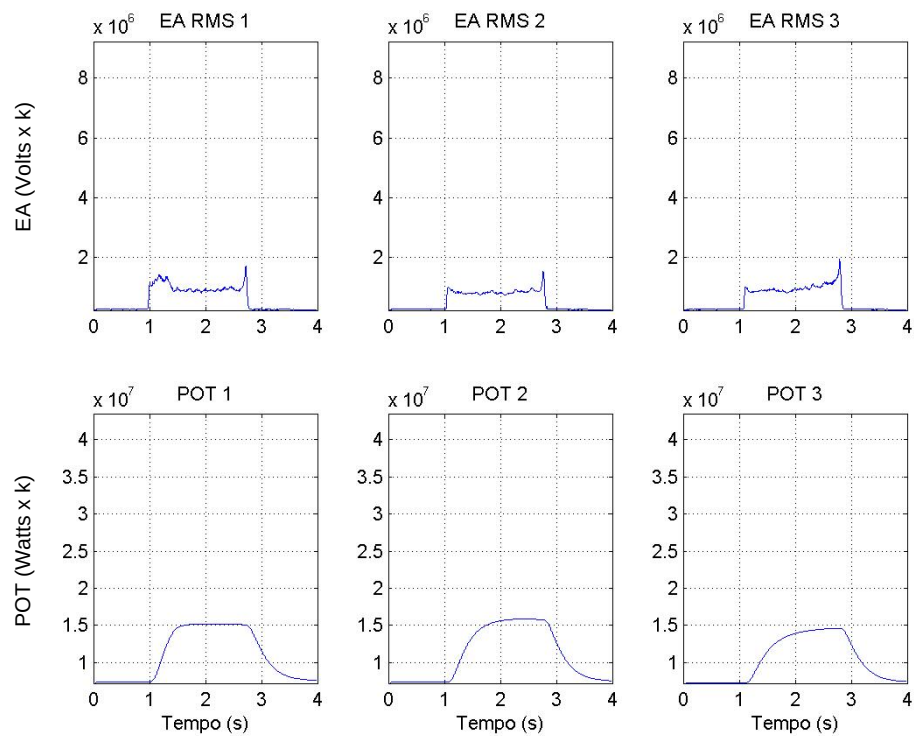


Figura 48 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 27,5µm (Peça J)

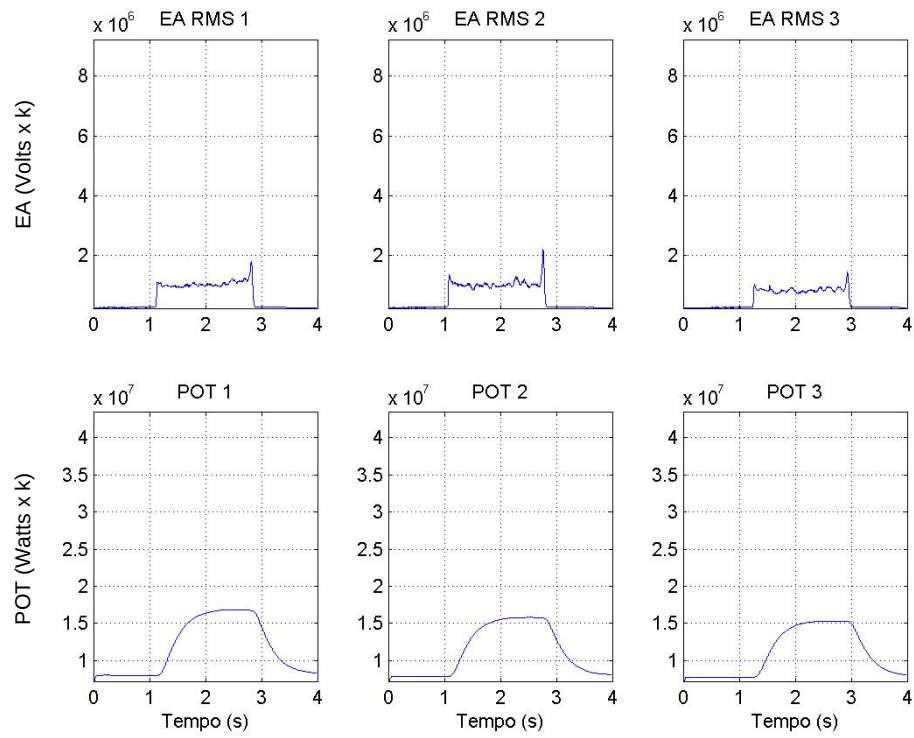


Figura 49 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 30μm (Peça K)

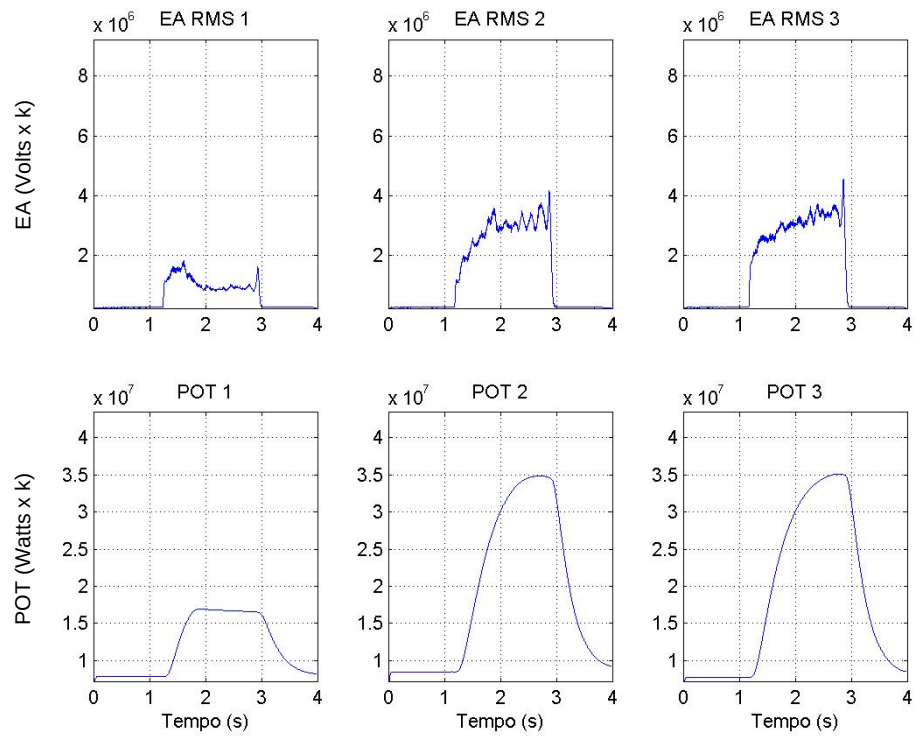


Figura 50 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 35μm (Peça L)

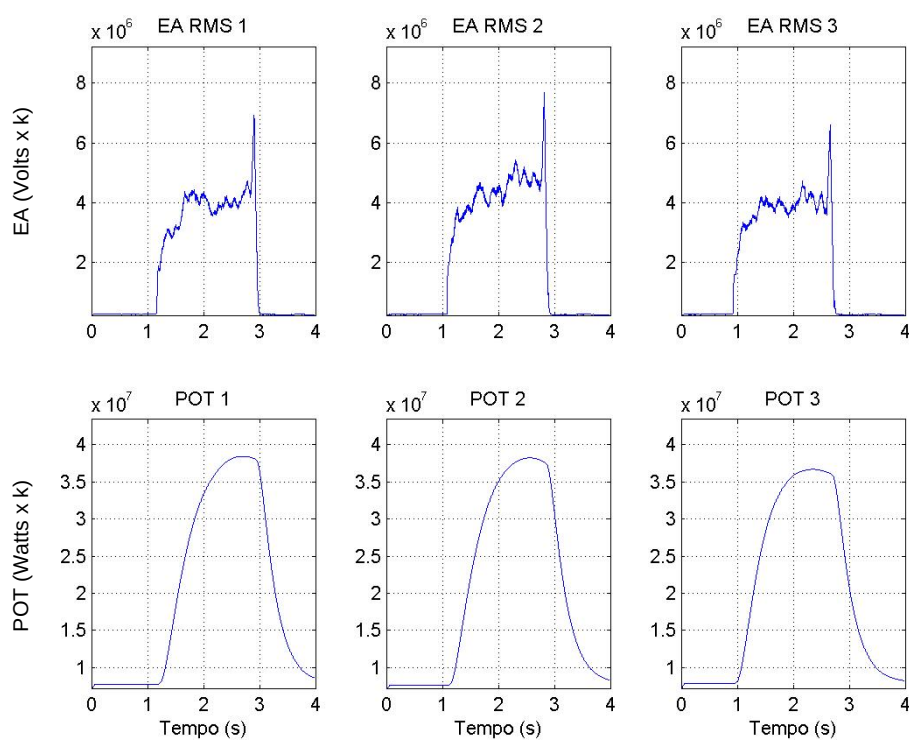


Figura 51 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 40μm (Peça M)

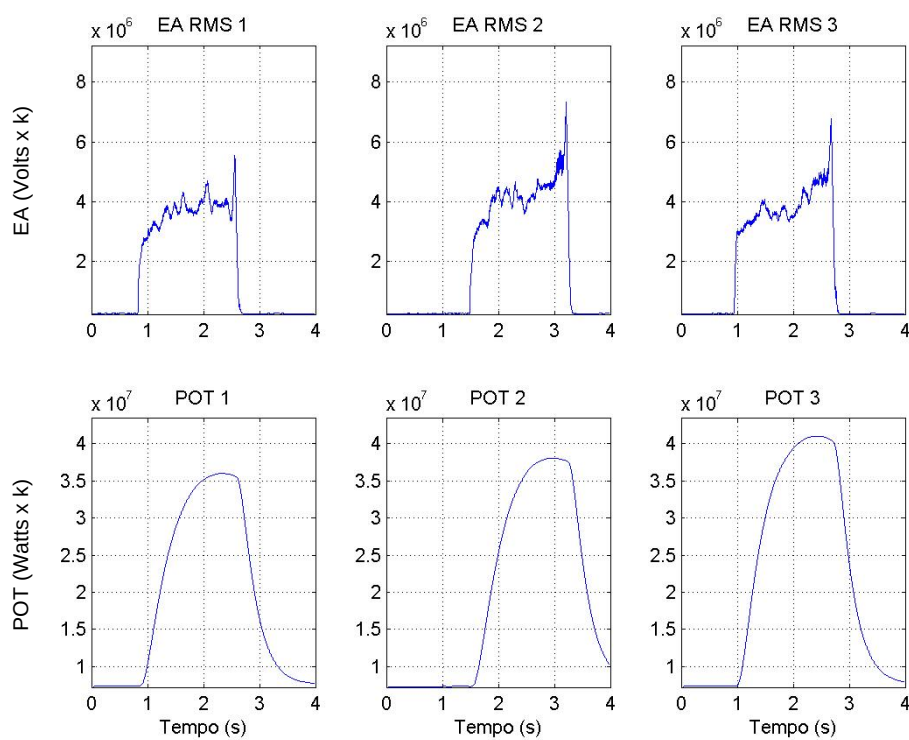


Figura 52 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 45μm (Peça N)

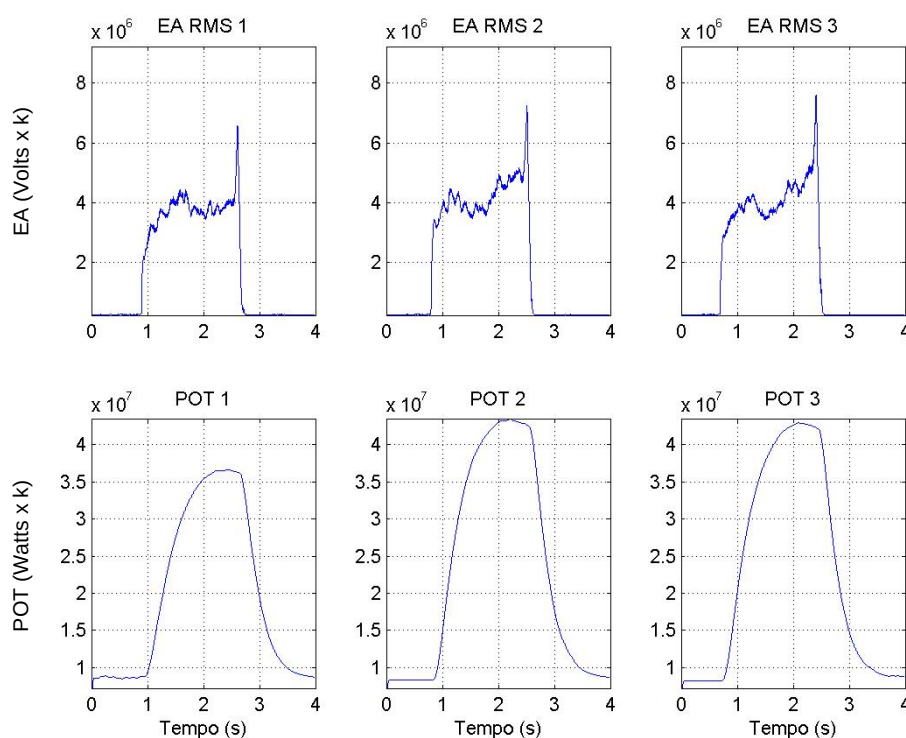


Figura 53 – Sinais de EA e POTÊNCIA para os três ensaios com profundidade de 50 μ m (Peça O)

Foi necessário utilizar um filtro passa baixa, implementado por meio do software Matlab, para que os gráficos ficassem compreensíveis ao olho humano, uma vez que a alta frequência do sinal confundiria o comportamento médio do sinal. A frequência de corte que consiste no ponto de 3dB é de 5kHz, sendo este o parâmetro utilizado na implementação do filtro digital para geração dos gráficos.

A escala vertical para o sinal de emissão acústica corresponde a Volts multiplicados por uma constante k (utilização de filtragem), e para o sinal de potência corresponde a Watts multiplicados por uma constante k (devido à filtragem).

5.1.2 Resultados de Quantificação de Queima

Após a execução dos ensaios, as peças usinadas foram fotografadas e, posteriormente, analisadas pelo software de Quantificação de Queima desenvolvido por Dotto (2004). A Tabela 8 apresenta as faces das peças usinadas.

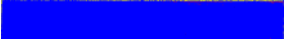
Tabela 8 – Fotografias das peças usinadas na retificadora plana

PROF. (μm)	FOTOGRAFIA DAS PEÇAS		
	A1	A2	A3
5,0			
	B1	B2	B3
7,5			
	C1	C2	C3
10,0			
	D1	D2	D3
12,5			
	E1	E2	E3
15,0			
	F1	F2	F3
17,5			
	G1	G2	G3
20,0			
	H1	H2	H3
22,5			
	I1	I2	I3
25,0			
	J1	J2	J3
27,5			
	K1	K2	K3
30,0			
	L1	L2	L3
35,0			
	M1	M2	M3
40,0			
	N1	N2	N3
45,0			
	O1	O2	O3
50,0			

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos com o auxílio do software de quantificação de queima.

Tabela 9 – Quantificação percentual de queima das peças

Prof. [μm]	Peça	Área Descon-siderada %	Região Sem Queima %	Região Com Queima %	Imagem da Peça Digitalizada
5,0	A1	8,38	99,28	0,72	
	A2	0,15	98,61	1,24	
	A3	0,00	99,18	0,82	
7,5	B1	3,92	93,93	6,03	
	B2	0,37	98,62	1,01	
	B3	0,07	99,17	0,76	
10,0	C1	0,21	99,05	0,74	
	C2	0,71	98,46	0,83	
	C3	0,50	96,33	3,17	
12,5	D1	0,00	99,15	0,85	
	D2	0,69	97,13	2,17	
	D3	0,60	96,65	2,75	
15,0	E1	0,40	97,78	1,82	
	E2	0,53	98,49	0,98	
	E3	0,00	96,75	3,22	
17,5	F1	0,18	97,26	2,55	
	F2	0,18	97,26	2,55	
	F3	0,77	94,80	4,43	
20,0	G1	0,97	96,05	2,98	
	G2	0,56	98,21	1,23	
	G3	0,28	97,90	1,81	
22,5	H1	0,24	97,39	2,37	
	H2	0,58	98,72	0,69	
	H3	0,50	86,33	13,17	
25,0	I1	2,56	99,31	0,67	
	I2	0,11	99,19	0,69	
	I3	0,38	98,71	0,91	

Prof. [μm]	Peça	Área Desconsiderada %	Região Sem Queima %	Região Com Queima %	Imagem da Peça Digitalizada
27,5	J1	0,45	98,85	0,70	
	J2	0,15	98,92	0,93	
	J3	0,00	99,22	0,78	
30,0	K1	1,07	97,97	0,96	
	K2	0,89	97,82	1,28	
	K3	0,12	97,60	2,29	
35,0	L1	0,79	97,00	2,20	
	L2	0,72	25,10	74,17	
	L3	0,00	6,74	93,26	
40,0	M1	0,47	20,83	78,69	
	M2	0,16	8,64	91,20	
	M3	0,22	11,45	88,33	
45,0	N1	1,26	11,32	87,42	
	N2	1,12	12,79	86,09	
	N3	1,37	18,93	79,70	
50,0	O1	0,27	3,40	96,34	
	O2	0,76	4,94	94,30	
	O3	0,63	21,44	77,92	

Observa-se que para estas condições experimentais – tipo de aço e rebolo, características de dressagem, velocidades, fluido de corte e máquina retificadora – houve uma faixa de profundidade de corte a partir da qual a queima passa a ocorrer. Assim, de acordo com a Tabela 9, após profundidade de corte de 35μm sobre as superfícies usinadas, a região com queima passou de valores menores que 4,43% (peça F3) para valores percentuais maiores que 74,17% (peça L2). No entanto, antes disso, houve queima considerável na peça H3 (13,17%). Isso pode ter sido causado por alguma variação nas condições de usinagem, como dressagem, concentração do fluido de corte ou vibrações da máquina ferramenta.

Destaca-se com isso que a profundidade de corte é necessariamente importante para as condições de queima na retificação. Outra observação é que a queima apresentada no Aço ABNT 1020 não ocorre de forma gradativa.

Nas condições deste trabalho, devido aos problemas de luminosidade no momento das fotografias e diferenças nos cortes das peças realizado no software Adobe Photoshop, foi considerado com queima a peça que apresentasse valores acima de 10% de sua área queimada, obtendo-se, dessa forma, a classificação das condições de queima das peças conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação de queima das peças retificadas

CLASSIFICAÇÃO DE QUEIMA								
Peça	Prof. (μm)	Queima	Peça	Prof. (μm)	Queima	Peça	Prof. (μm)	Queima
A1	5,0	Sem Queima	F1	17,5	Sem Queima	K1	30,0	Sem Queima
A2	5,0	Sem Queima	F2	17,5	Sem Queima	K2	30,0	Sem Queima
A3	5,0	Sem Queima	F3	17,5	Sem Queima	K3	30,0	Sem Queima
B1	7,5	Sem Queima	G1	20,0	Sem Queima	L1	35,0	Sem Queima
B2	7,5	Sem Queima	G2	20,0	Sem Queima	L2	35,0	Com Queima
B3	7,5	Sem Queima	G3	20,0	Sem Queima	L3	35,0	Com Queima
C1	10,0	Sem Queima	H1	22,5	Sem Queima	M1	40,0	Com Queima
C2	10,0	Sem Queima	H2	22,5	Sem Queima	M2	40,0	Com Queima
C3	10,0	Sem Queima	H3	22,5	Com Queima	M3	40,0	Com Queima
D1	12,5	Sem Queima	I1	25,0	Sem Queima	N1	45,0	Com Queima
D2	12,5	Sem Queima	I2	25,0	Sem Queima	N2	45,0	Com Queima
D3	12,5	Sem Queima	I3	25,0	Sem Queima	N3	45,0	Com Queima
E1	15,0	Sem Queima	J1	27,5	Sem Queima	O1	50,0	Com Queima
E2	15,0	Sem Queima	J2	27,5	Sem Queima	O2	50,0	Com Queima
E3	15,0	Sem Queima	J3	27,5	Sem Queima	O3	50,0	Com Queima

5.1.3 Resultados de Rugosidade

As Figuras 54 a 68 mostram os gráficos elaborados para os valores de rugosidade colhidos com o auxílio do rugosímetro.

Cada figura apresenta um total de quatro curvas, sendo três para a rugosidade medida para cada peça ensaiada e uma curva (superior) contendo a rugosidade média medida para a profundidade de corte ajustada.

A média geral de todos os valores de rugosidade ao longo da peça é apresentada na Figura 69.

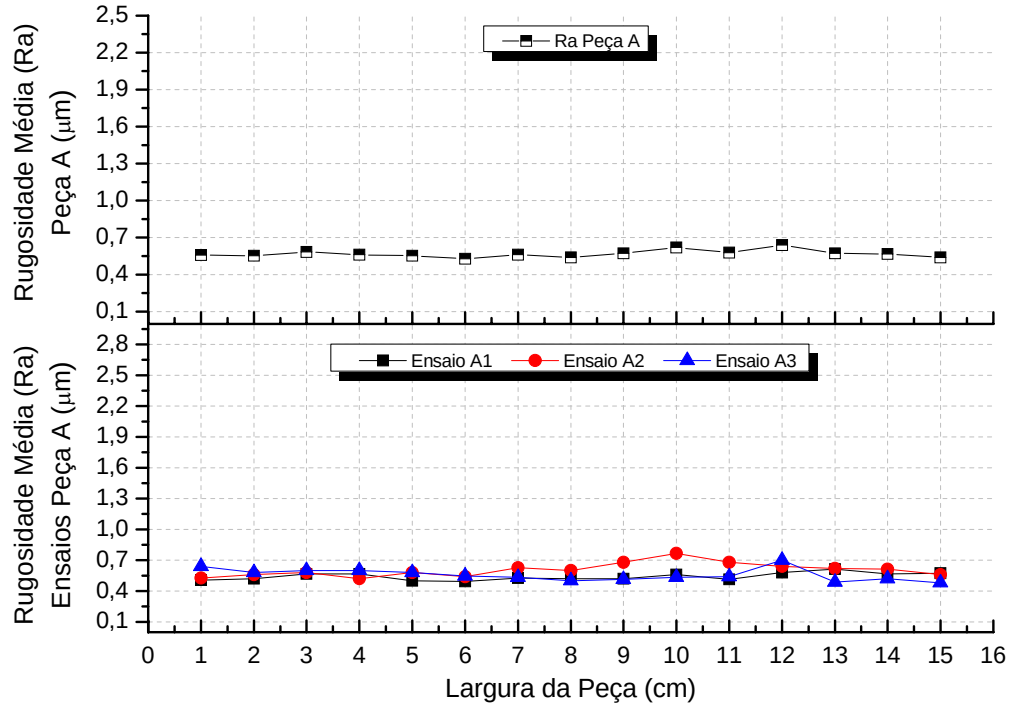


Figura 54 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 5µm (Peça A)

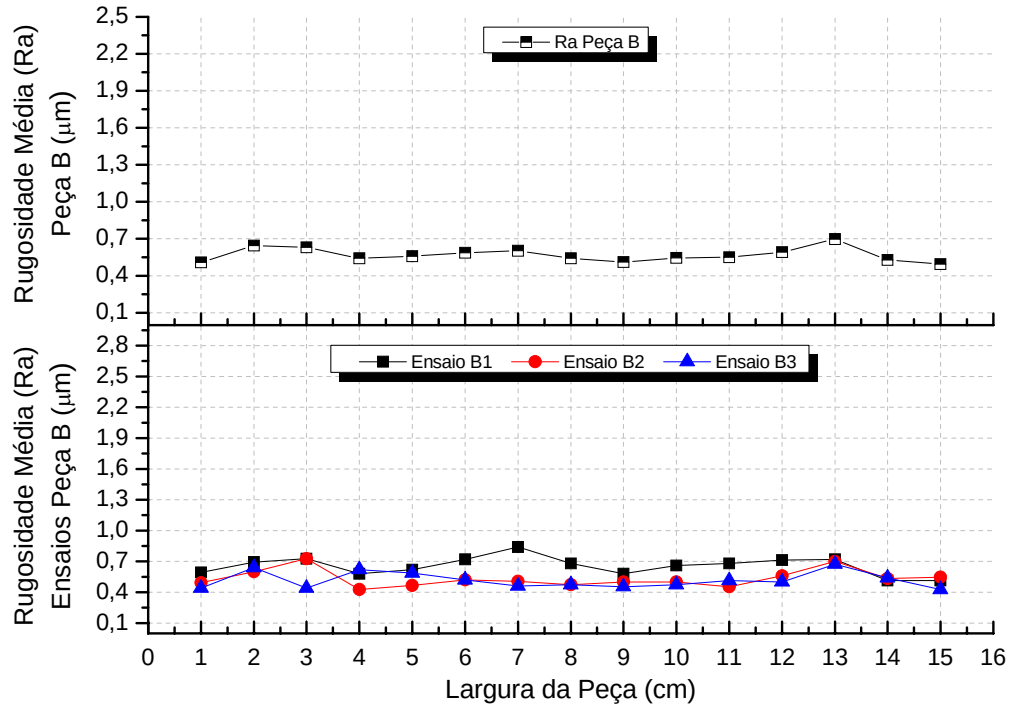


Figura 55 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 7,5µm (Peça B)

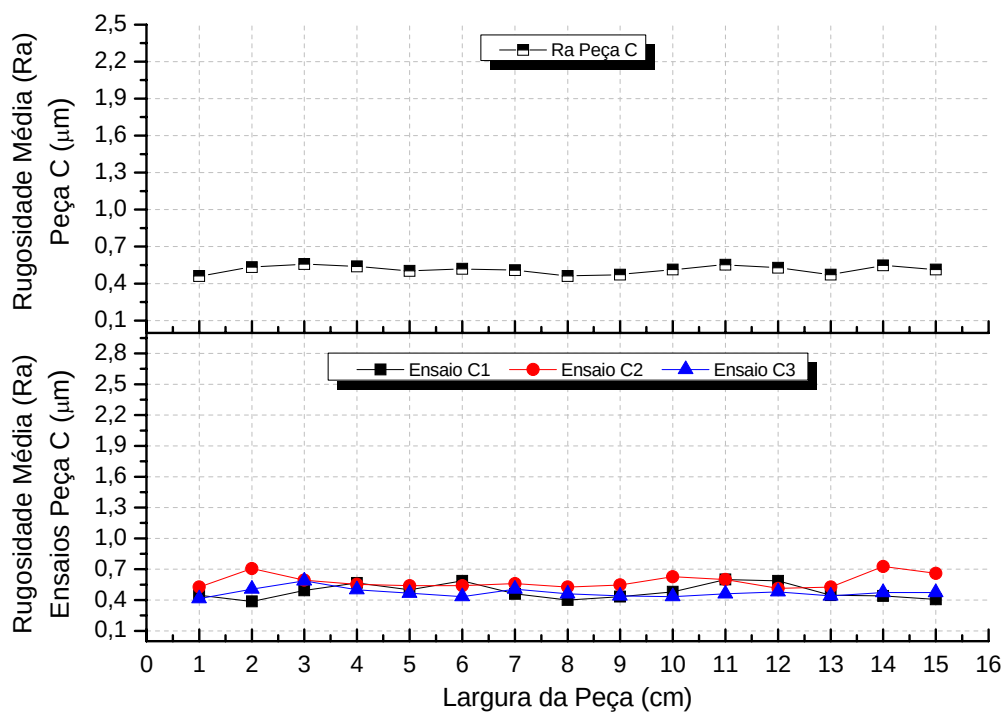


Figura 56 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 10µm (Peça C)

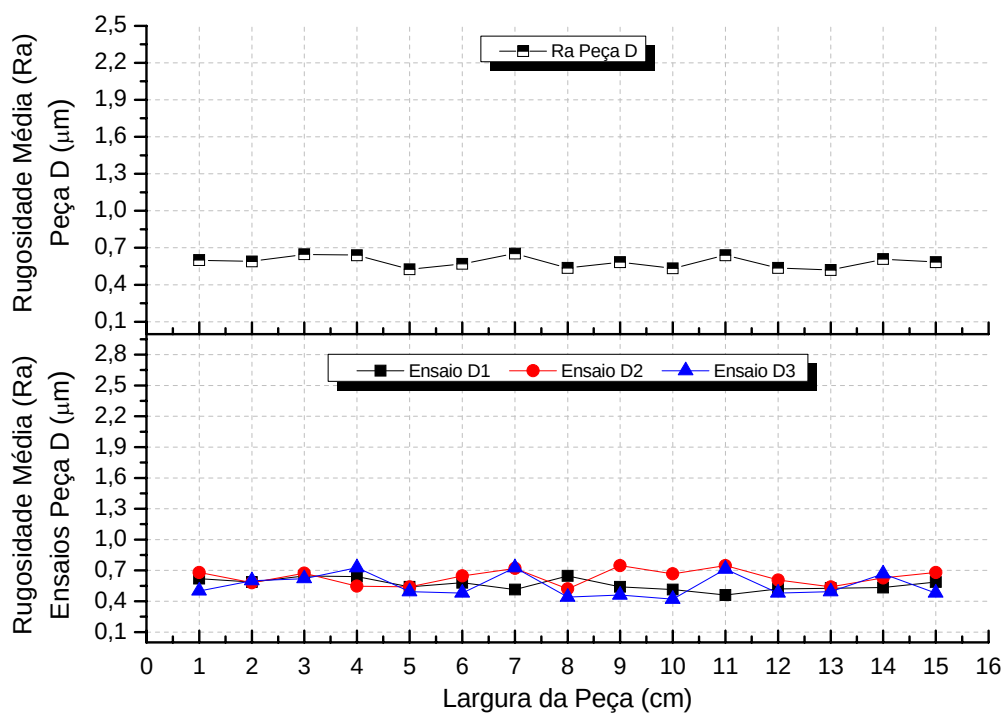


Figura 57 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 12,5µm (Peça D)

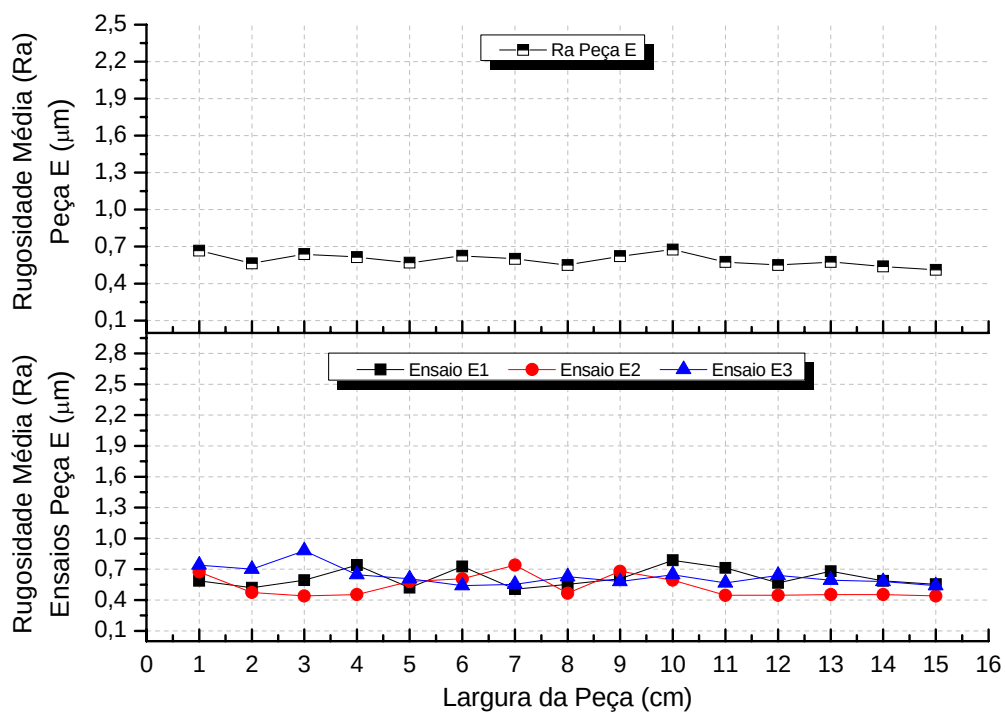


Figura 58 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 15µm (Peça E)

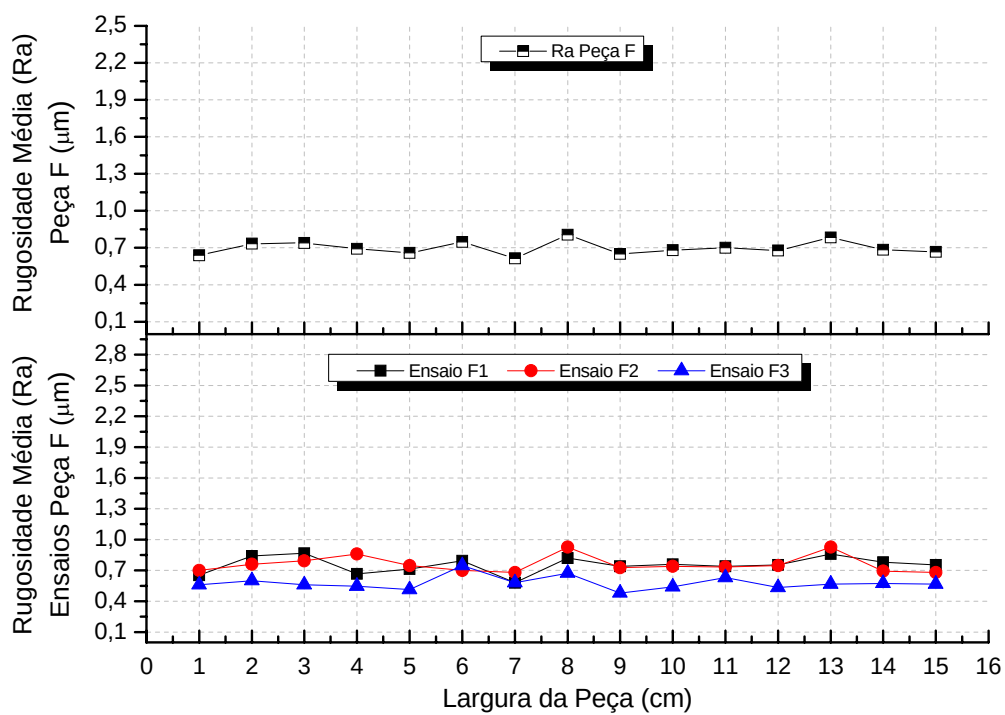


Figura 59 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 17,5µm (Peça F)

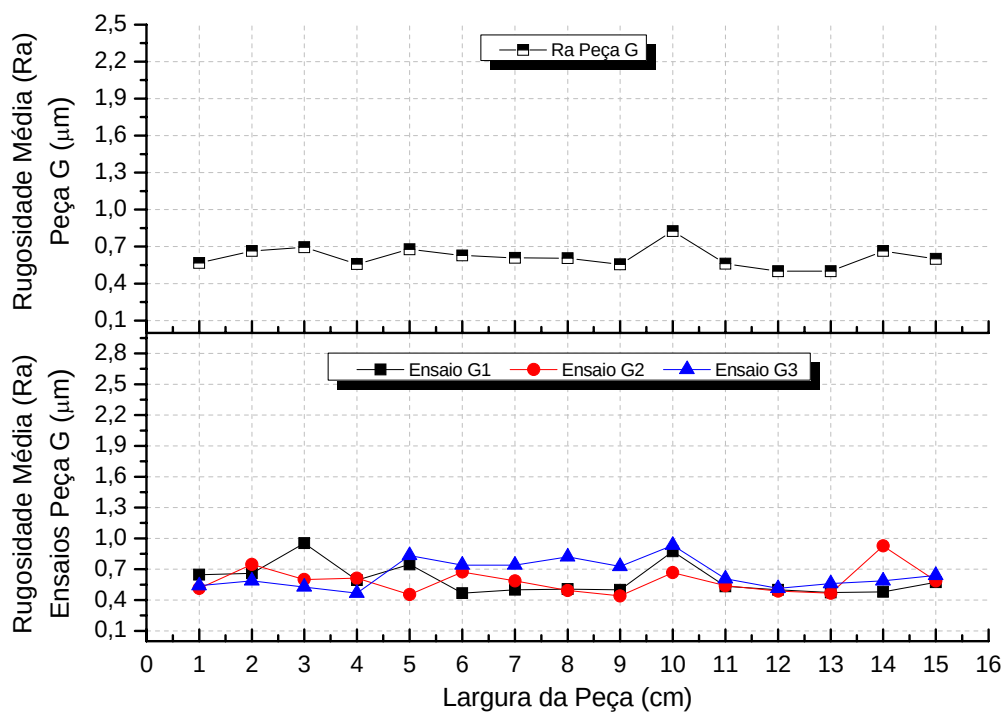


Figura 60 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 20μm (Peça G)

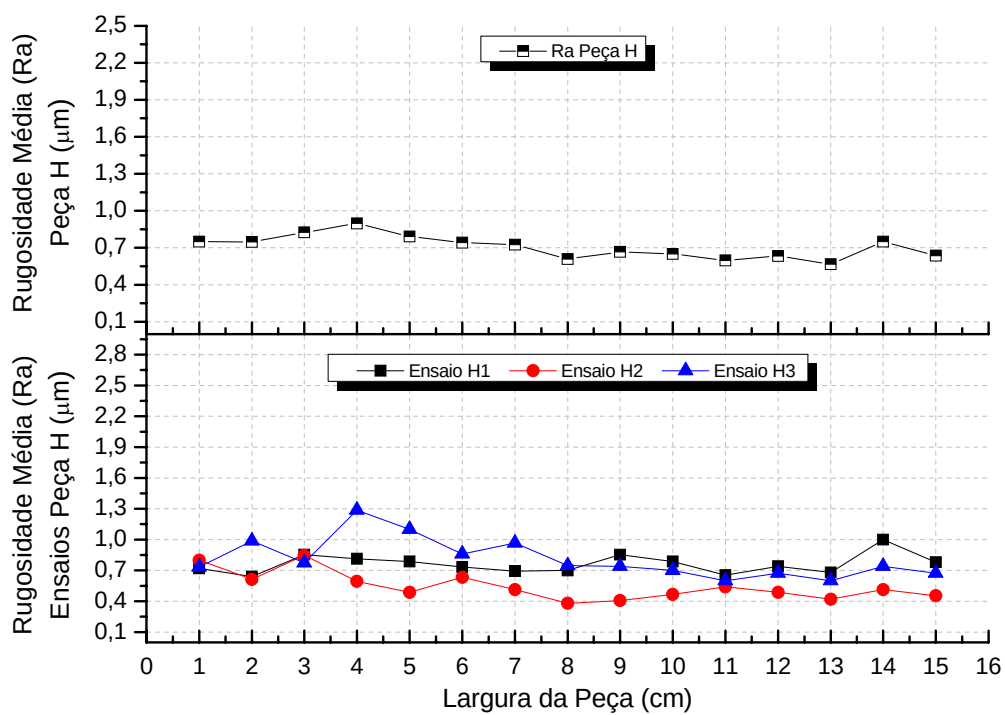


Figura 61 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 22,5μm (Peça H)

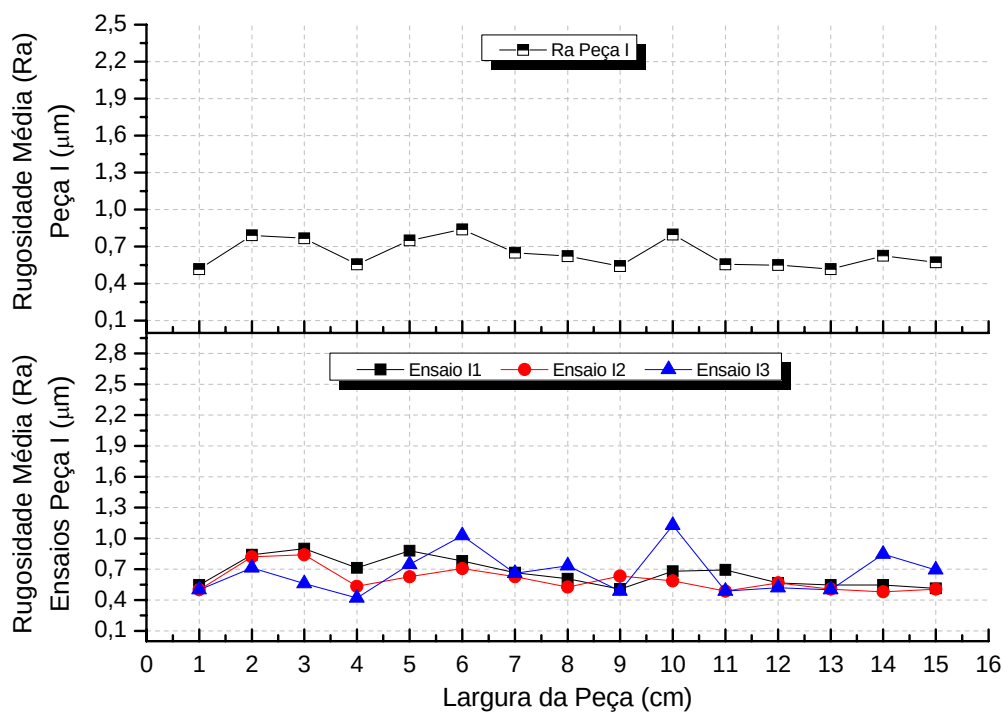


Figura 62 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 25μm (Peça I)

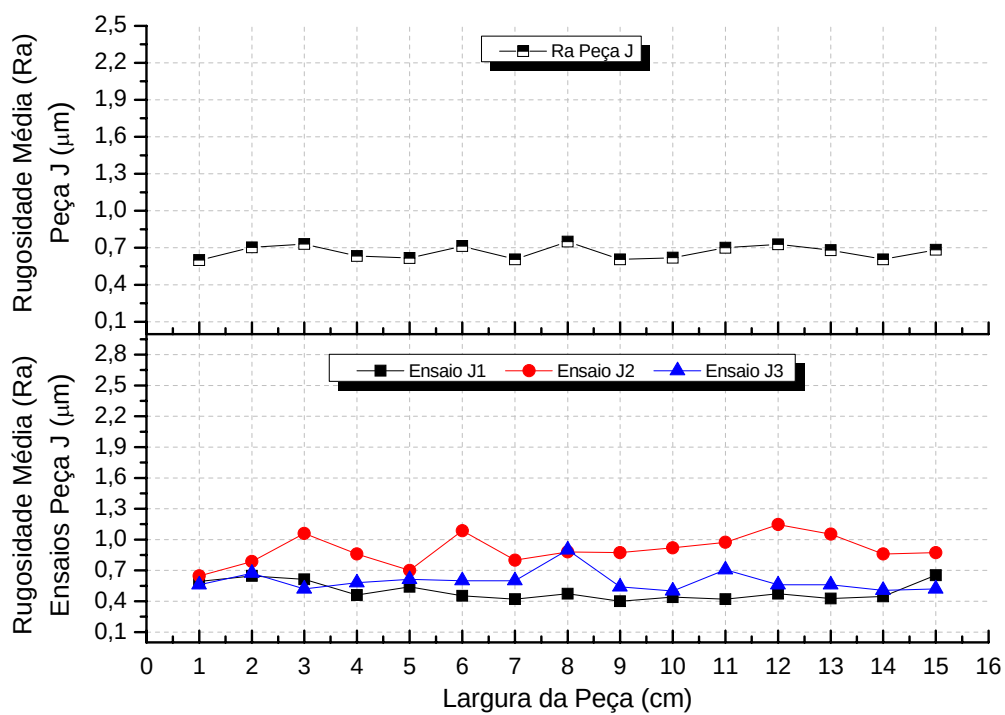


Figura 63 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 27,5μm (Peça J)

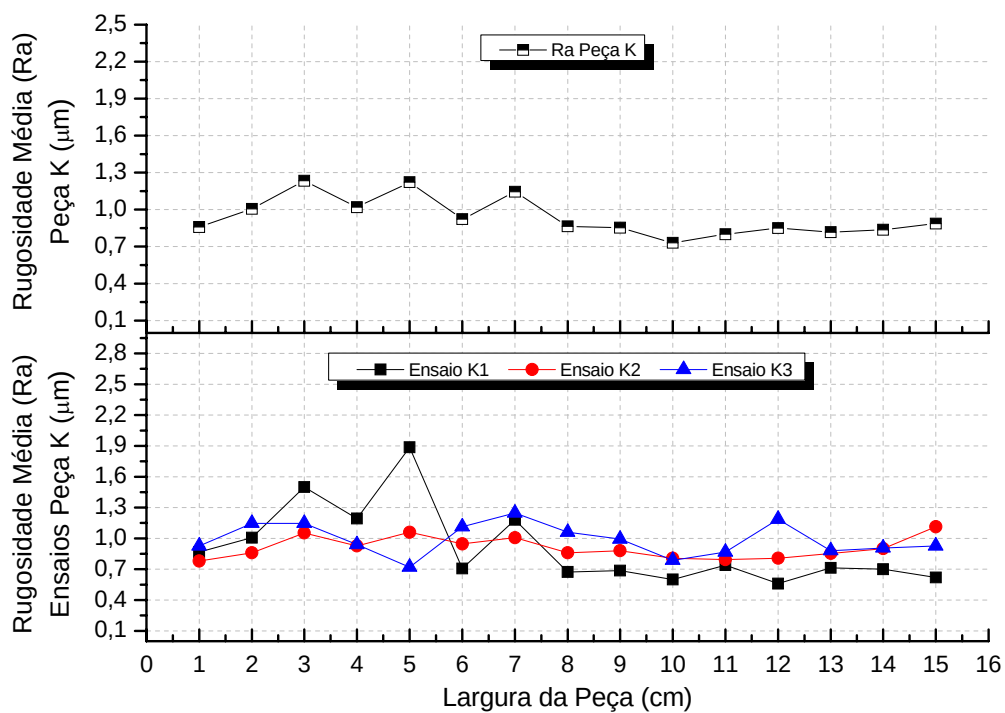


Figura 64 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 30µm (Peça K)

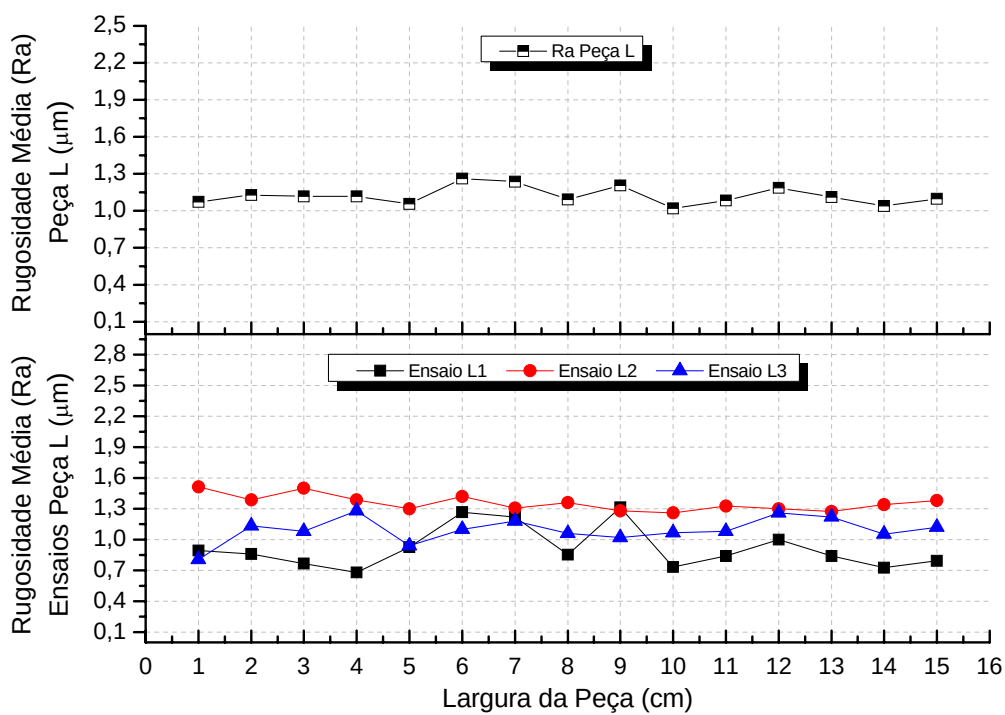


Figura 65 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 35µm (Peça L)

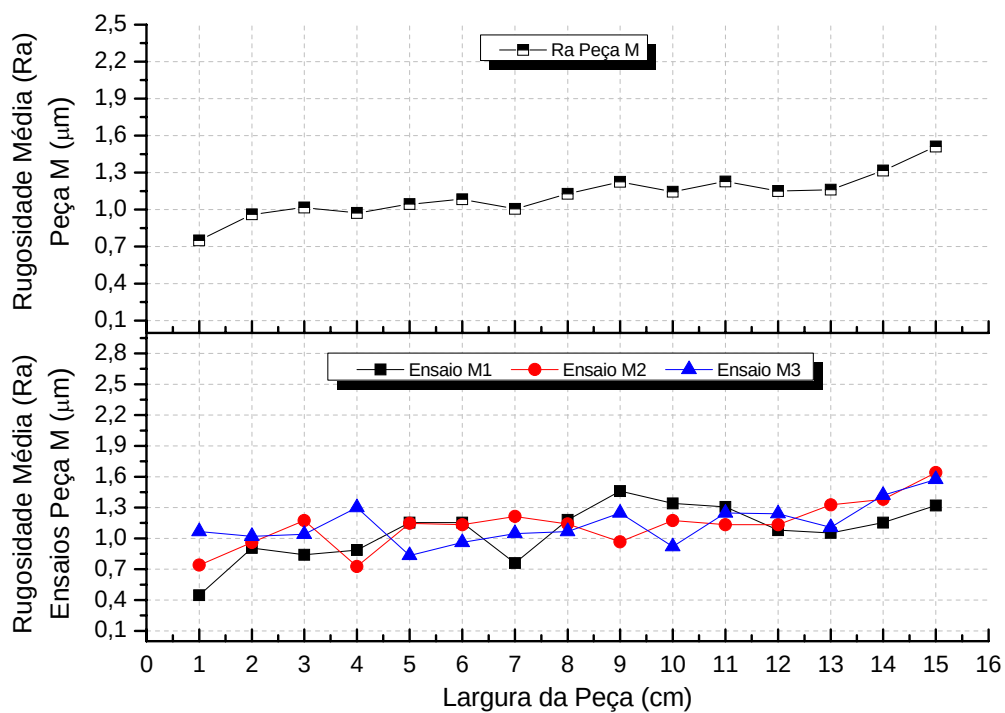


Figura 66 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 40μm (Peça M)

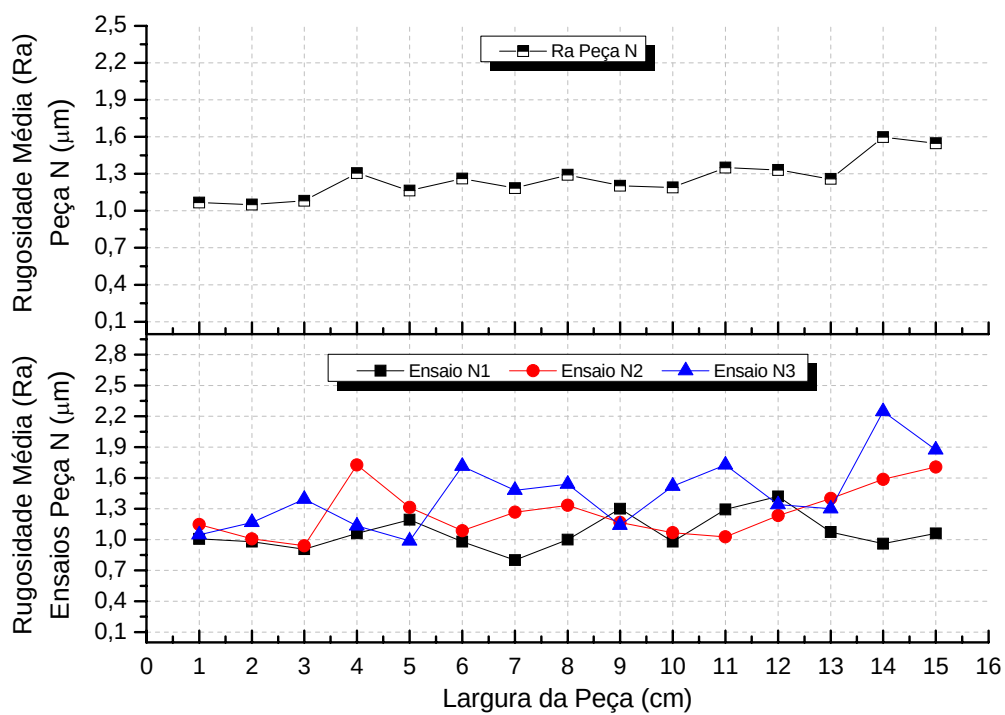


Figura 67 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 45μm (Peça N)

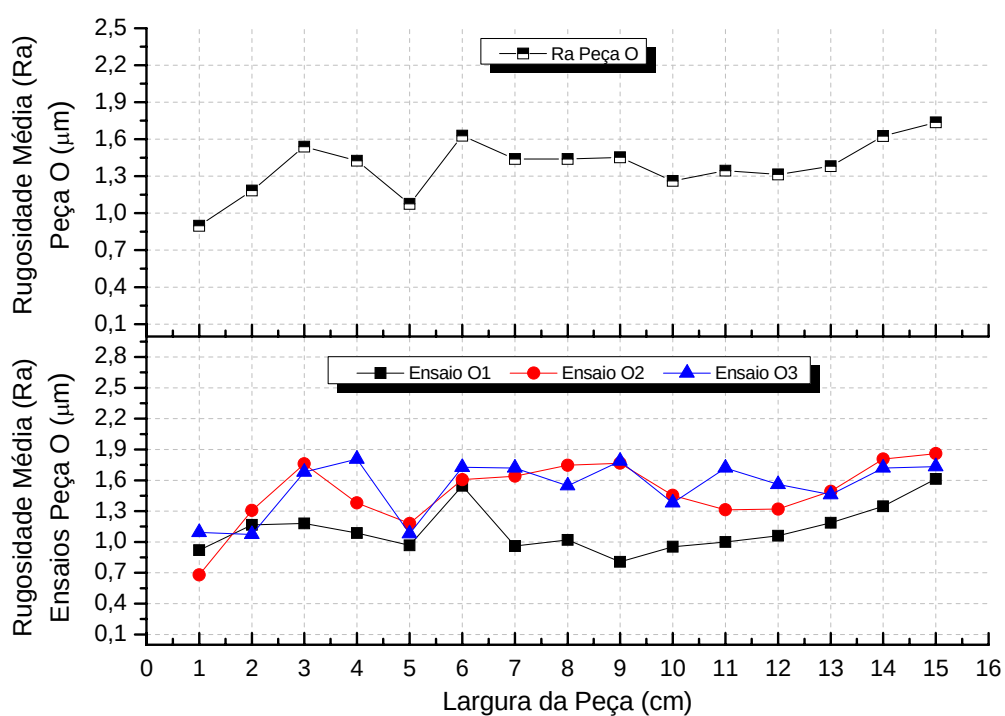


Figura 68 – Medidas de rugosidade para a profundidade de 50 μm (Peça O)

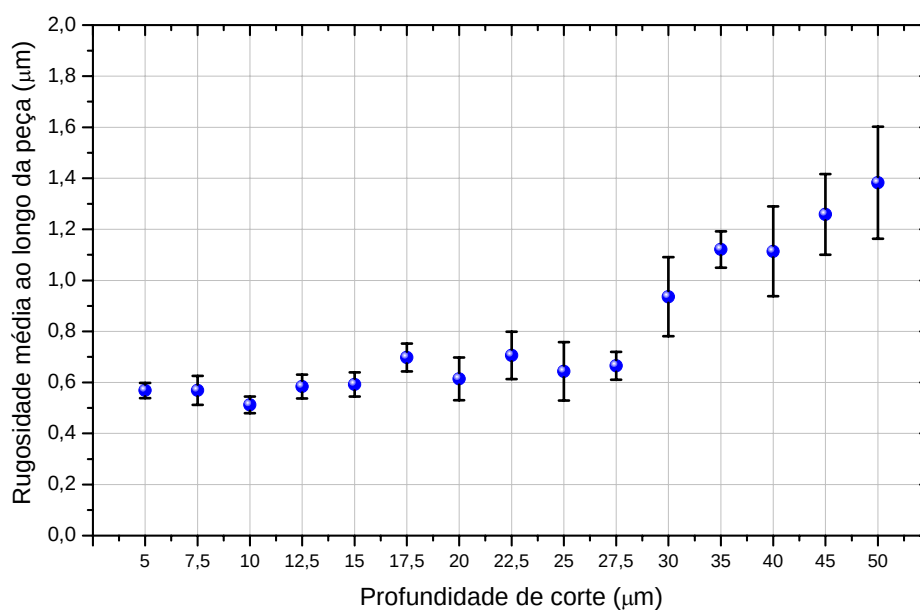


Figura 69 – Rugosidade média obtida para as profundidades de corte ajustadas

Nota-se que o aumento mais significativo na rugosidade inicia-se na profundidade de 30 μ m. Esta profundidade também representa o início do processo de queima da peça, conforme analisado anteriormente.

A análise da Figura 69 permite visualizar que a variação da rugosidade ao longo das peças aumenta para profundidades de corte maiores, fato também observado pelas dimensões dos desvios padrões ao redor da média. Profundidades de corte menores tendem a gerar superfícies de rugosidade mais uniforme. Este fato vem ao encontro dos estudos apresentados por Bianchi et al. (1996).

Também vale lembrar que todos os valores da média geral de rugosidade obtida estão dentro da faixa esperada para o processo, citada por Agostinho et al. (1981), de 0,3 μ m a 1,5 μ m. Os valores que excederam este limite são pontuais e apresentaram o defeito da queima, evidenciando erro de retificação, como citado pelo próprio autor.

5.1.4 Resultados de Microdureza

Após os ensaios experimentais de retificação e medição de rugosidade foram efetuados ensaios para se medir a microdureza das peças trabalho. Os testes foram executados pelo método Vickers, dado em g/mm².

Visando minimizar erros nas medições devido à variação da microdureza ao longo do material, foram realizadas três medidas ao longo de faixas perpendiculares às peças.

As Figuras 70 a 84 mostram os gráficos elaborados para os valores de microdureza observados por meio dos ensaios.

Cada figura apresenta um total de quatro curvas, sendo três para a microdureza medida para cada peça ensaiada e uma curva (superior) contendo a microdureza média medida para a profundidade de corte ajustada.

A média geral de todos os valores de rugosidade ao longo da peça é apresentada na Figura 85.

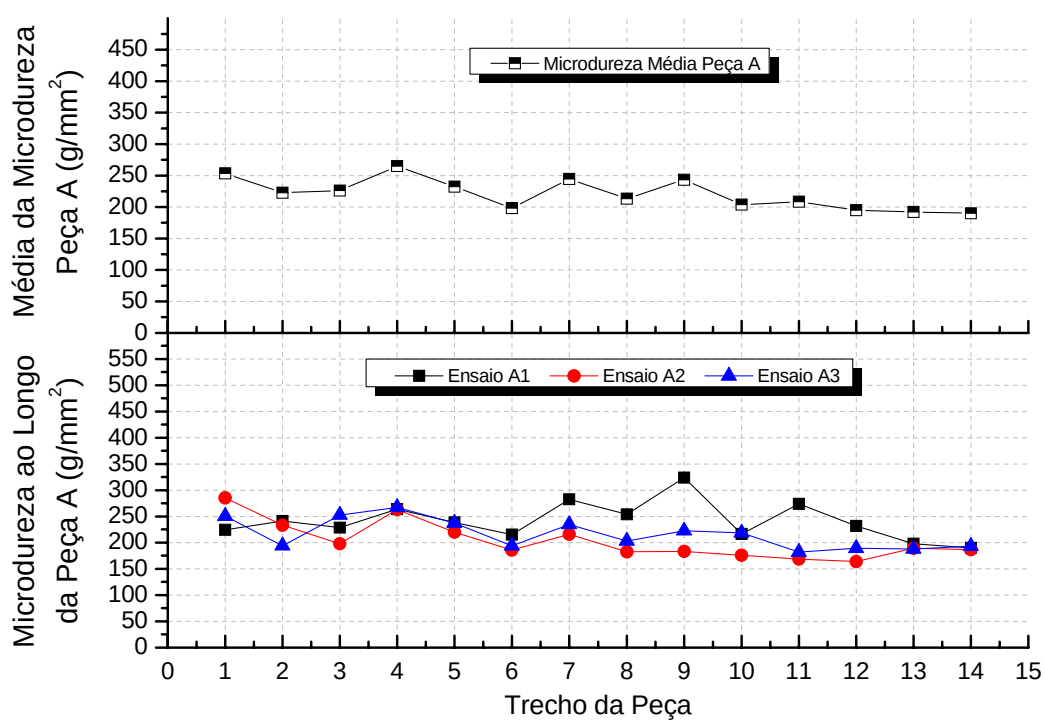


Figura 70 – Medidas de microdureza para a profundidade de 5μm (Peça A)

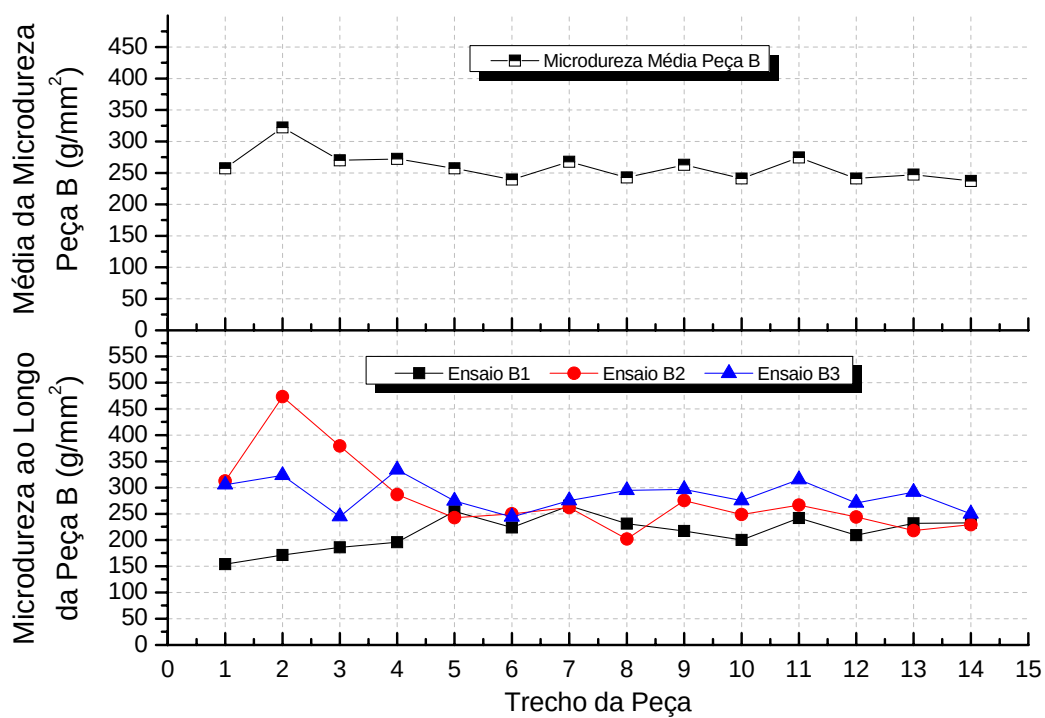


Figura 71 – Medidas de microdureza para a profundidade de 7,5μm (Peça B)

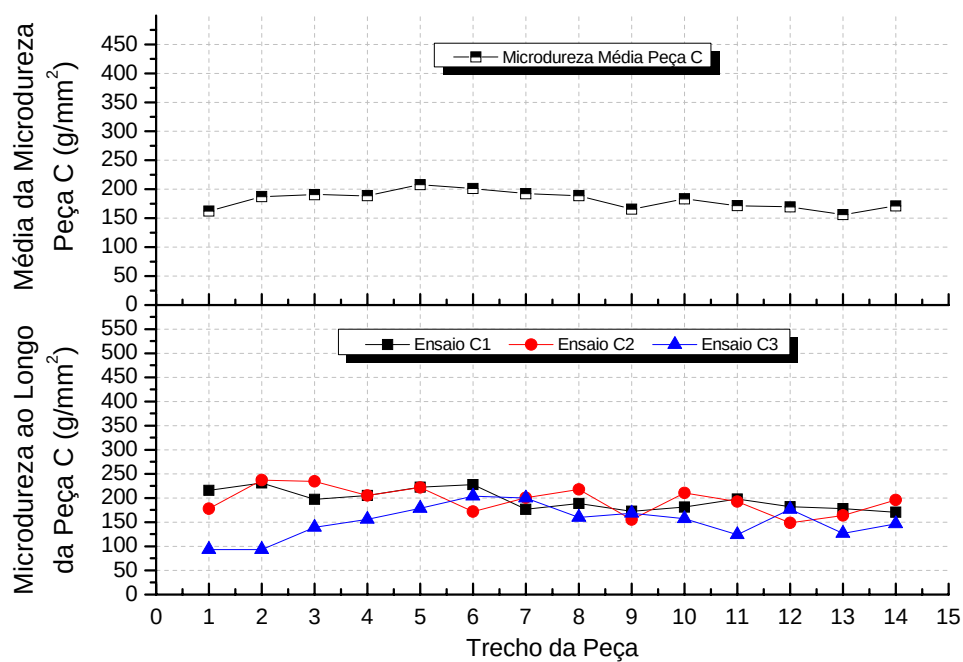


Figura 72 – Medidas de microdureza para a profundidade de 10µm (Peça C)

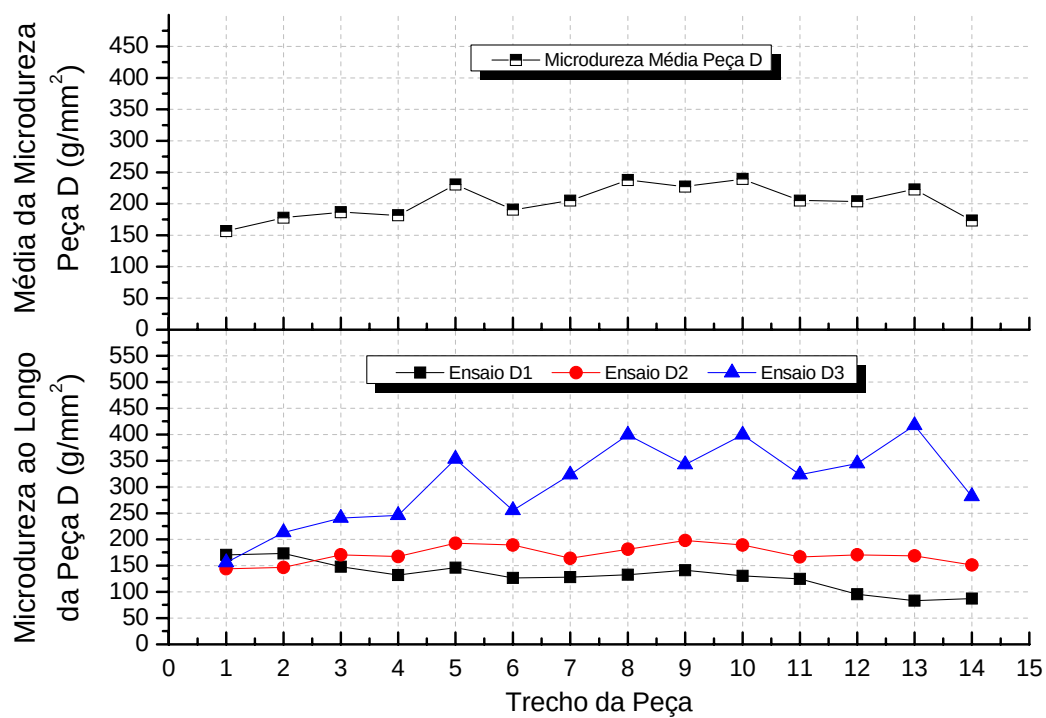


Figura 73 – Medidas de microdureza para a profundidade de 12,5µm (Peça D)

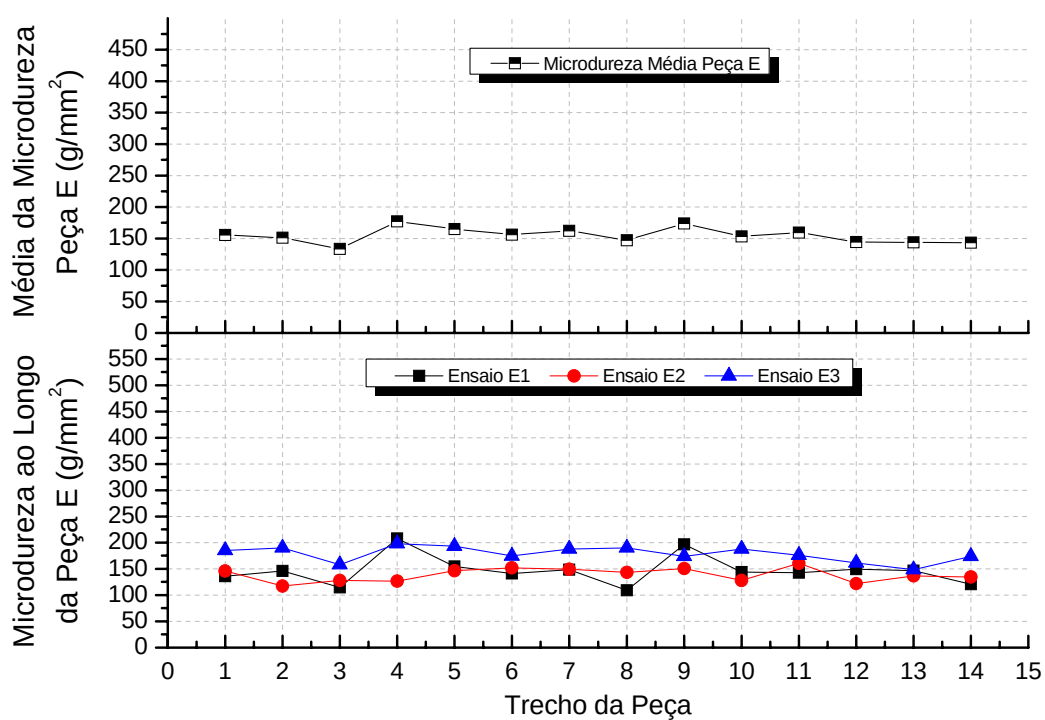


Figura 74 – Medidas de microdureza para a profundidade de 15µm (Peça E)

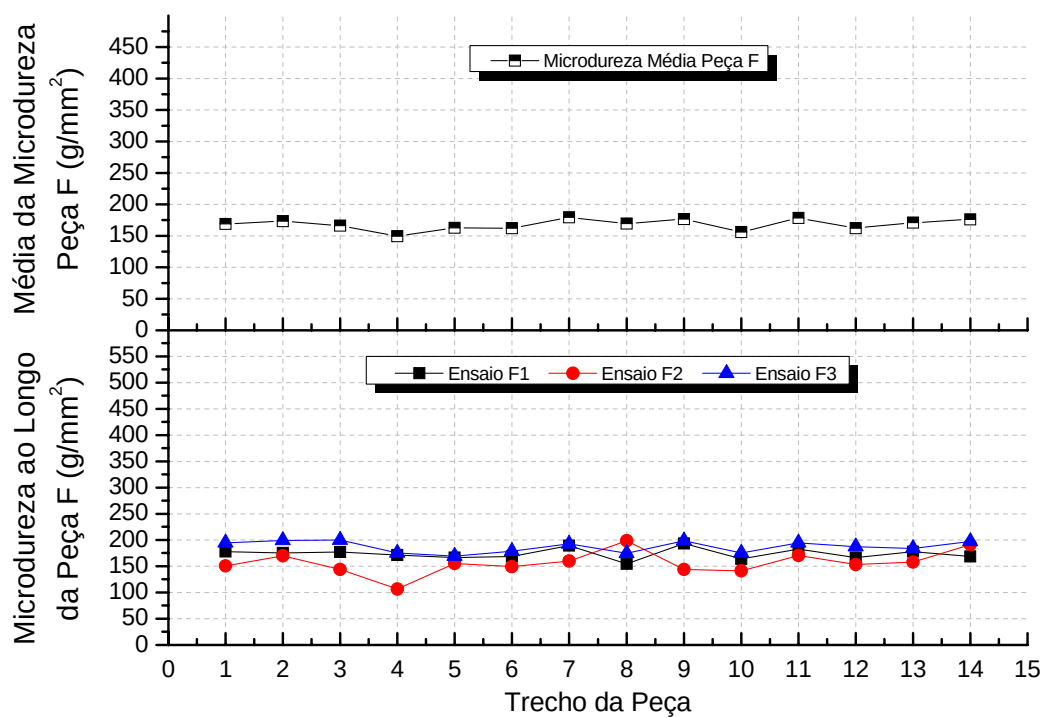


Figura 75 – Medidas de microdureza para a profundidade de 17,5µm (Peça F)

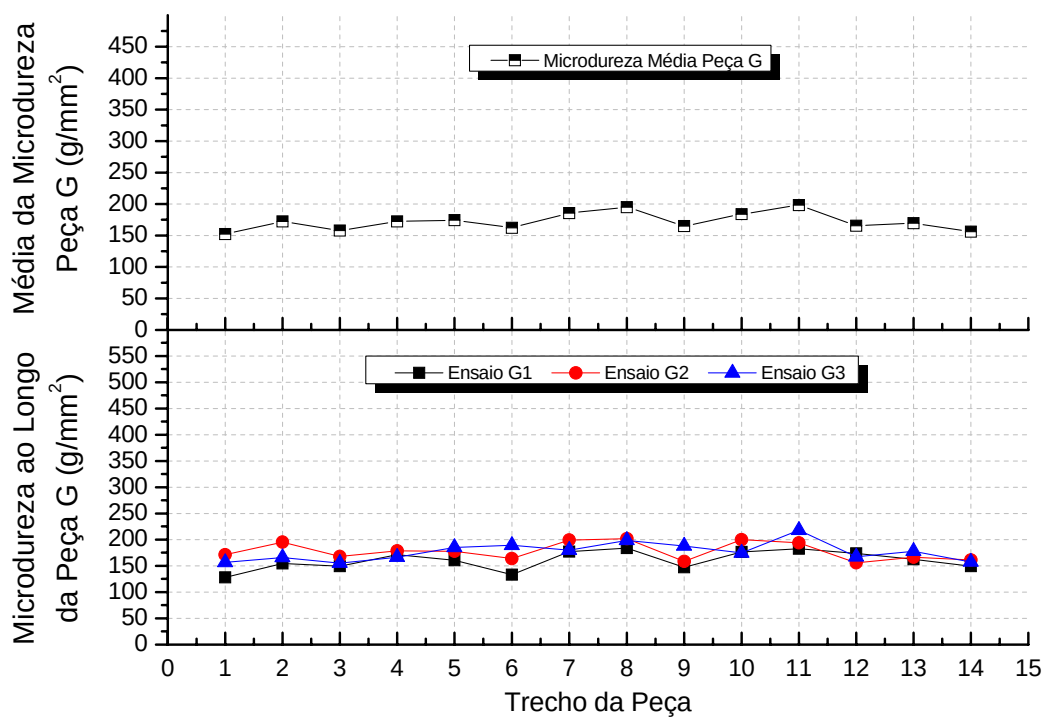


Figura 76 – Medidas de microdureza para a profundidade de 20μm (Peça G)

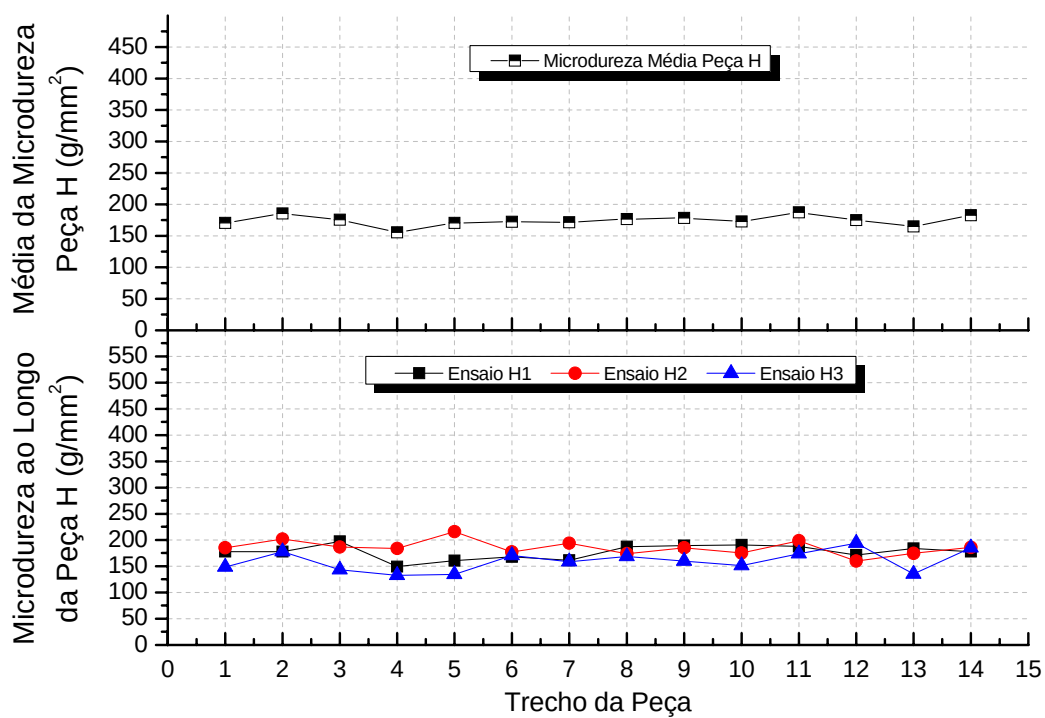


Figura 77 – Medidas de microdureza para a profundidade de 22,5μm (Peça H)

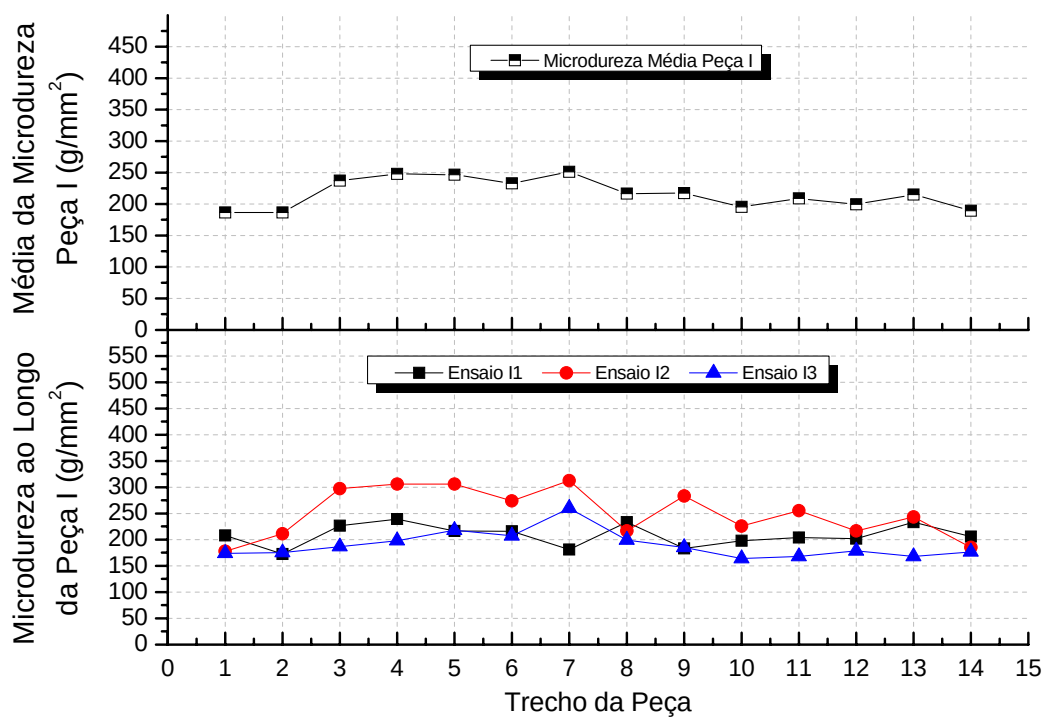


Figura 78 – Medidas de microdureza para a profundidade de 25µm (Peça I)

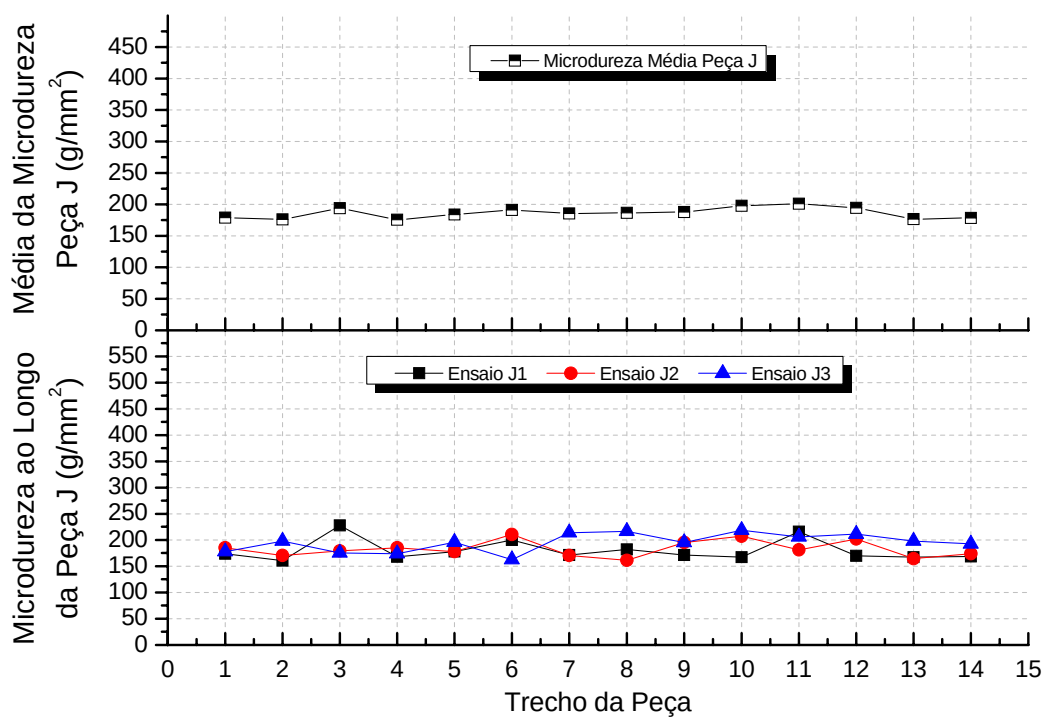


Figura 79 – Medidas de microdureza para a profundidade de 27,5µm (Peça J)

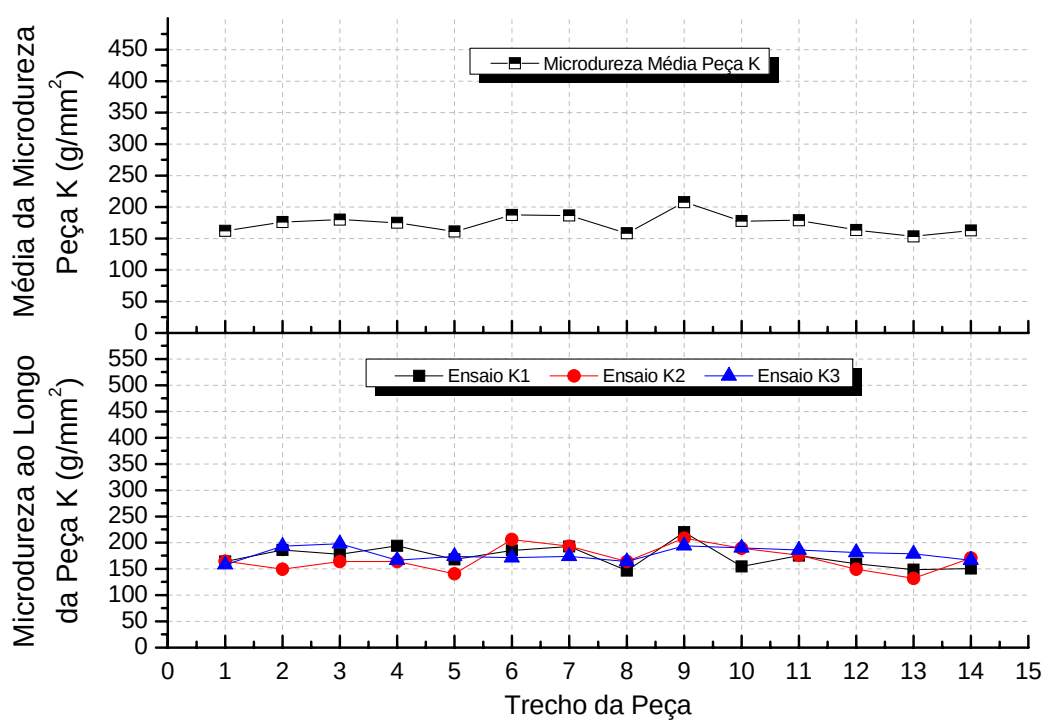


Figura 80 – Medidas de microdureza para a profundidade de 30µm (Peça K)

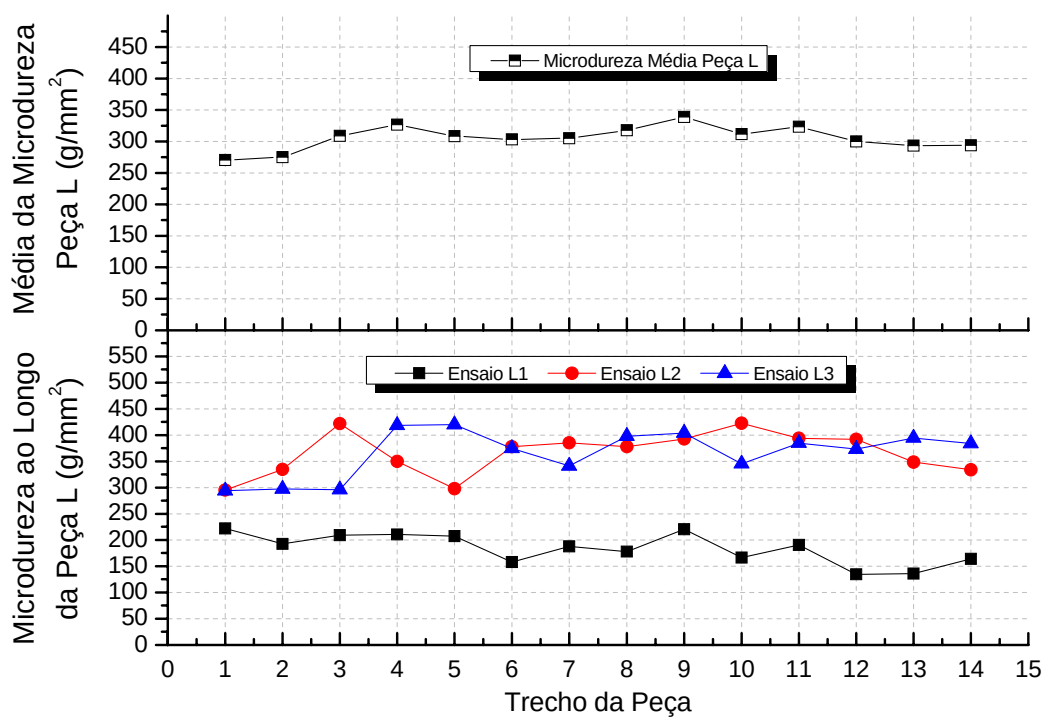


Figura 81 – Medidas de microdureza para a profundidade de 35µm (Peça L)

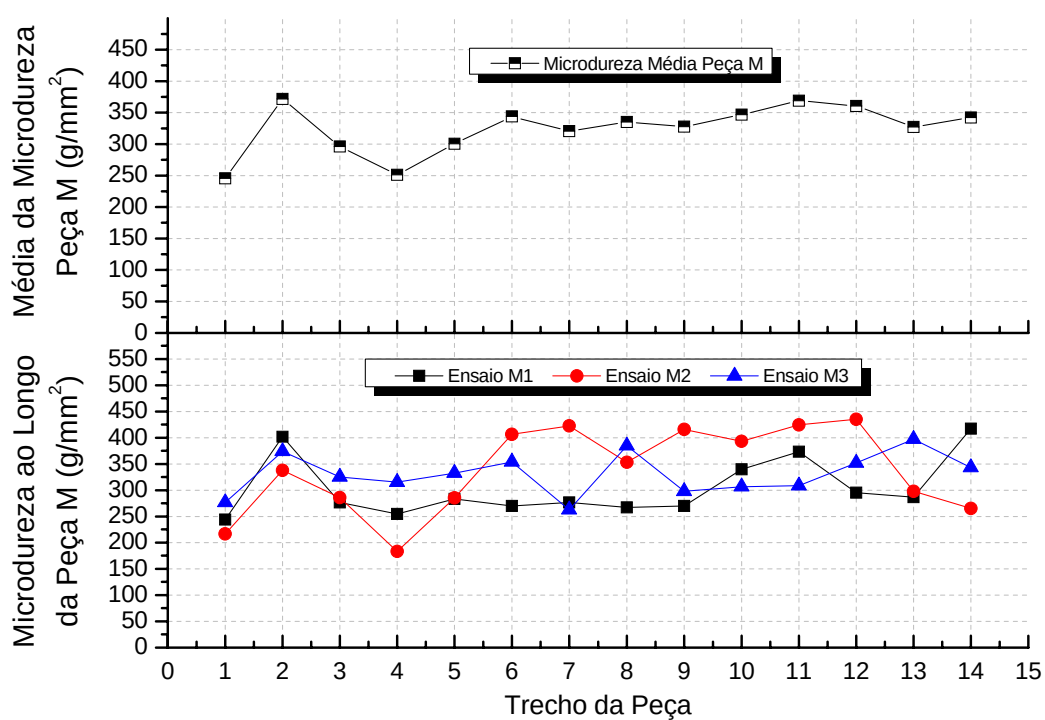


Figura 82 – Medidas de microdureza para a profundidade de 40µm (Peça M)

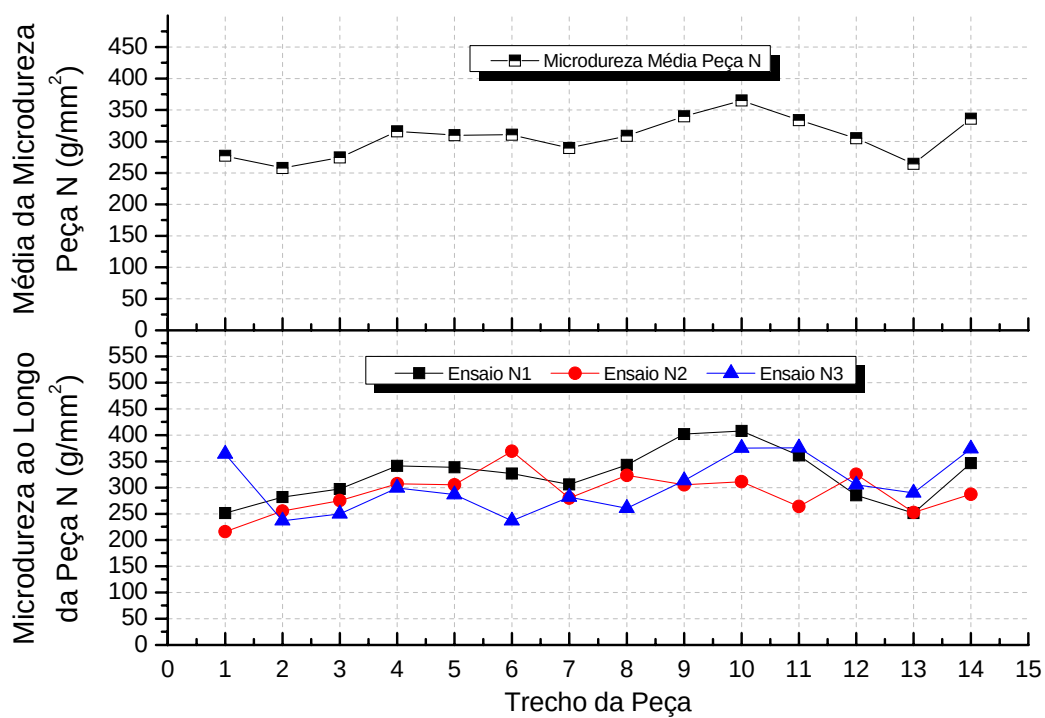


Figura 83 – Medidas de microdureza para a profundidade de 45µm (Peça N)

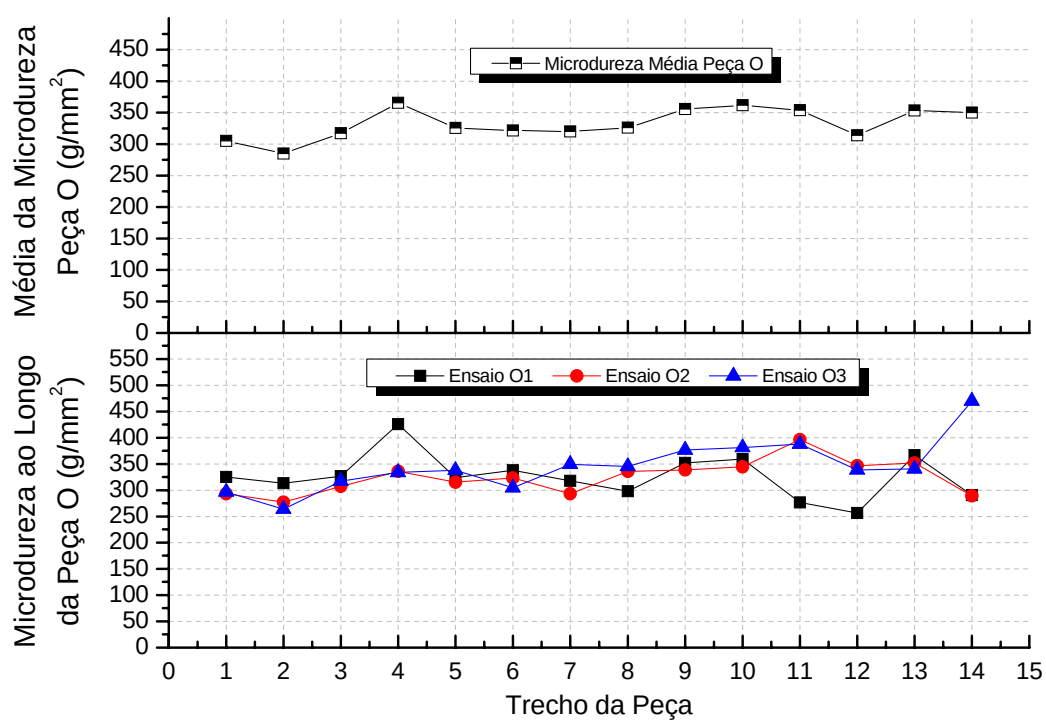


Figura 84 – Medidas de microdureza para a profundidade de 50 μ m (Peça O)

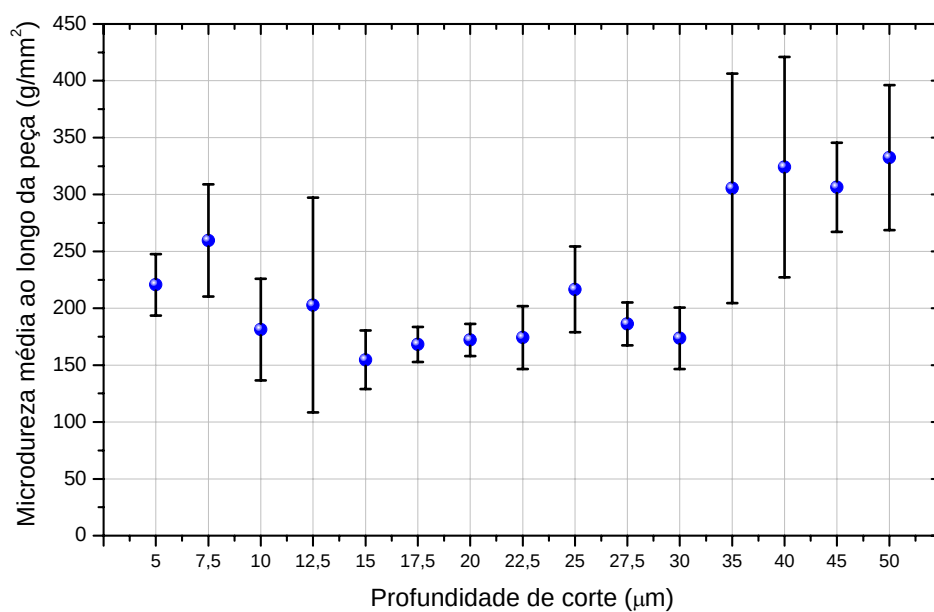


Figura 85 - Microdureza média obtida para as profundidades de corte ajustadas

Percebe-se na Figura 85 que o valor de microdureza aumenta significativamente para as peças retificadas com profundidade de corte a partir de $35\mu\text{m}$, onde ocorre o fenômeno de queima, não tendo uma relação direta apenas com a profundidade de corte. Isso é muito bem observado na Figura 81, onde a peça L1 não apresentou queima para as condições dos ensaios, o que não ocorreu nas peças L2 e L3, as quais apresentaram valores maiores de microdureza.

Observou-se que para os ensaios com profundidade até $35\mu\text{m}$ houve variação nos valores de microdureza, como a queda do valor de microdureza dos corpos de prova B em relação ao C e I em relação ao K, que provavelmente é consequência de variações no estado de retificação causadas por fatores diferentes dos que estavam sendo controlados.

O parâmetro de microdureza é, desta forma, um bom indicativo da ocorrência de queima no metal.

5.1.5 Comportamento do Conjunto de Variáveis de Entrada e Saída das RNAs

O comportamento dos parâmetros selecionados como variáveis de entrada e saída das redes neurais podem ser observados conforme apresentado nas Figuras 86 e 87.

Os gráficos dos sinais de EA e Potência de Corte são representados por meio do valor médio obtido para todas as medidas coletadas na execução do banco de ensaios. Observa-se que o comportamento destes sinais apresenta acentuado aumento em seus valores médios à medida que danos térmicos são gerados nas peças trabalho.

A adoção dos parâmetros de profundidade de corte, sinal DPKS e sinal DPO foram selecionados de tal modo a auxiliarem as redes neurais estudadas a alcançarem uma boa predição dos parâmetros adotados para caracterização da qualidade superficial das peças retificadas.

Pela análise da Figura 87 observa-se que o comportamento dos parâmetros de microdureza e rugosidade são bons indicadores da ocorrência de queima, porém, não são suficientes para detecção exata de tal fenômeno.

É possível notar aumentos significativos nos valores de microdureza da superfície da peça, bem como da rugosidade média, quando da incidência de danos térmicos gerados pelo processo.

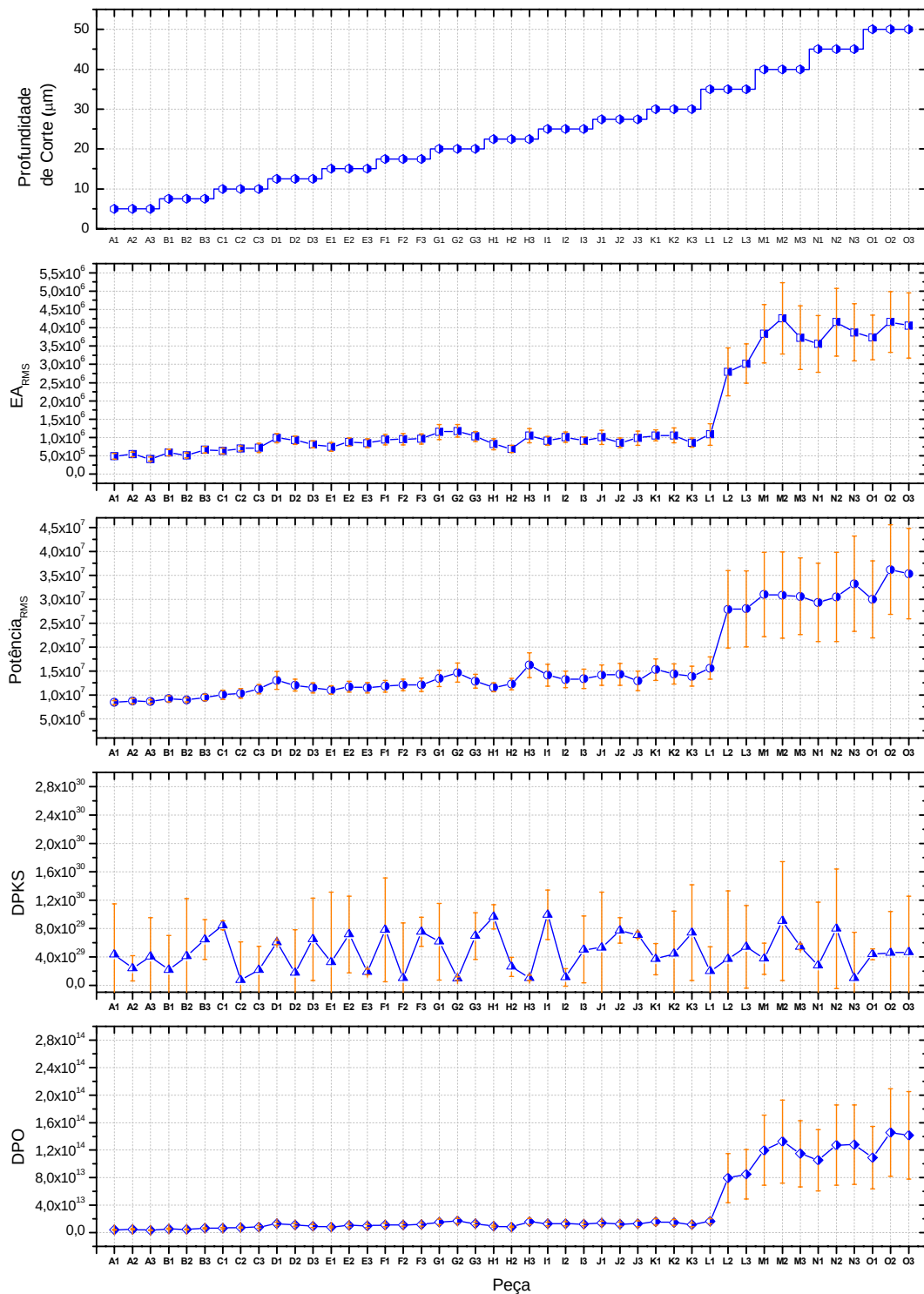


Figura 86 – Comportamento dos parâmetros de entrada das RNAs

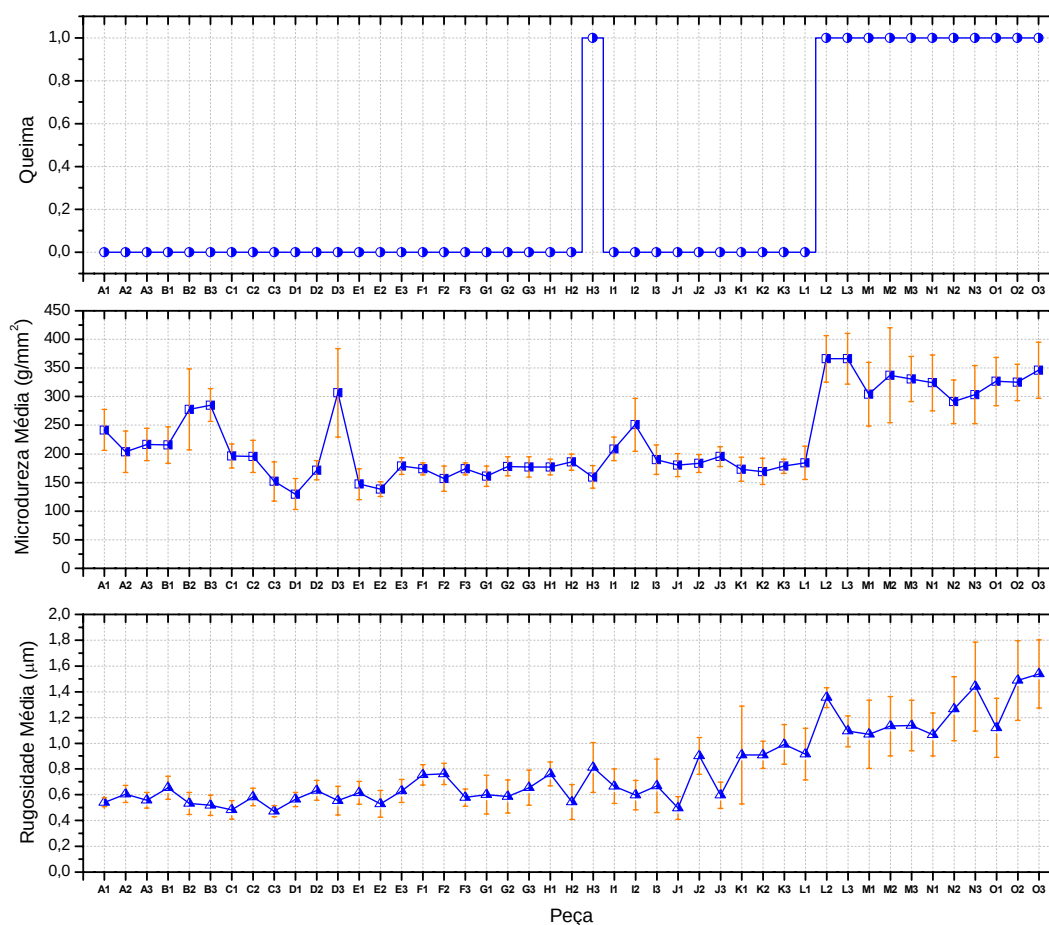


Figura 87 - Comportamento dos parâmetros de saída das RNAs

5.1.6 Resultados das Redes Neurais Artificiais

Após a aplicação de diversos testes e a determinação das melhores configurações para todas as estruturas de redes neurais proposta inicialmente neste projeto, pôde-se efetuar a comparação de eficiência dos resultados obtidos. Para cada uma das estruturas foram efetuados testes, por meio de ajustes nos parâmetros de taxa de erro, coeficiente de momentum, número de camadas intermediárias e número de neurônios das camadas intermediárias, visando à comparação entre os valores de predição apresentados pela rede e os valores obtidos nos ensaios experimentais. Os testes comparativos foram baseados na média do erro de predição dos parâmetros de saída da rede, ou seja, da detecção de queima, da rugosidade média e da microdureza média das peças.

As Tabelas 11, 12 e 13 demonstram alguns resultados obtidos, destacando as combinações de parâmetros que geraram os menores erros de predição pelas estruturas implementadas na arquitetura das redes neurais. Trata-se de uma amostra selecionada dentre as diversas redes estudadas.

Tabela 11 – Resultados das redes neurais para a Estrutura 1

Configuração	Épocas	lr	mc	Média do Erro de Predição
3-10-3	2878	0,5	0,4	6,03%
3-20-3	1233	0,3	0,4	5,54%
3-5-10-3	1848	0,4	0,3	6,42%
3-10-15-3	2099	0,4	0,3	6,51%

Tabela 12 – Resultados das redes neurais para a Estrutura 2

Configuração	Épocas	lr	mc	Média do Erro de Predição
2-10-3	4096	0,5	0,4	6,31%
2-20-3	519	0,4	0,3	6,12%
2-5-10-3	5804	0,5	0,4	5,96%
2-10-15-3	1004	0,4	0,3	6,08%

Tabela 13 – Resultados das redes neurais para a Estrutura 3

Configuração	Épocas	lr	mc	Média do Erro de Predição
2-10-3	5725	0,5	0,4	6,55%
2-20-3	298	0,4	0,3	6,43%
2-5-10-3	1601	0,4	0,6	6,37%
2-10-15-3	2634	0,4	0,3	6,08%

Observa-se que, para as redes apresentadas nas Tabelas 11, 12 e 13, os resultados obtidos para a predição da rede são extremamente satisfatórios, uma vez que os erros médios obtidos giram em torno de 6,2%.

Um teste comparativo utilizando-se as estruturas com menor índice de erros de predição é apresentado na Figura 88. Por meio deste gráfico pode-se observar a evolução de desempenho das redes à medida que o número de camadas intermediárias e/ou número de neurônios eram modificados.

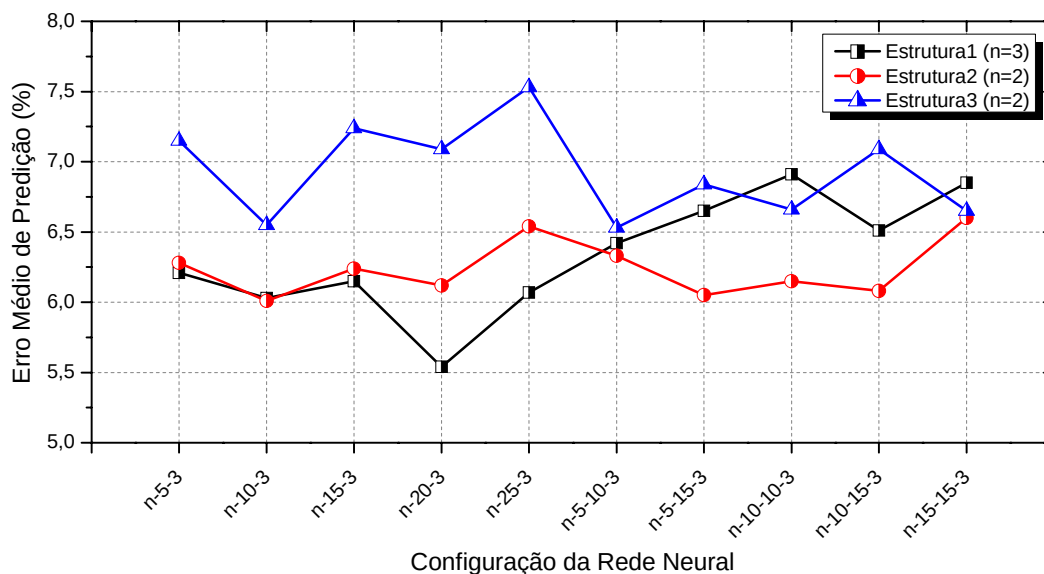


Figura 88 – Comparativo de desempenho das estruturas desenvolvidas para as redes neurais

Da análise do gráfico de desempenho das estruturas estudadas, apresentada pela Figura 88, observa-se que as redes cujos sinais de entrada utilizaram as estruturas 1 e 2 apresentaram ótimo desempenho na predição dos parâmetros de saída. Os resultados para a estrutura 3 também foram bons, porém, inferiores aos obtidos pelas estruturas 1 e 2.

Também foi possível observar que a estrutura 1 apresentou perda de desempenho para redes compostas por duas camadas intermediárias, fato não observado para as estruturas 2 e 3.

De uma maneira geral, a estrutura que apresentou o melhor desempenho na predição dos parâmetros de detecção de queima, rugosidade e microdureza foi o apresentado pela rede neural com uma camada intermediária, composta por vinte neurônios, para a estrutura 1, onde são utilizados como conjunto de dados de entrada os parâmetros de Emissão Acústica, Potência de Corte e Profundidade de Corte. O erro médio de predição obtido na saída desta rede foi de 5,54%.

O desempenho de predição da rede 3-20-3 da estrutura 1 é apresentado na Figura 89. Estes gráficos demonstram os erros médios de cada peça utilizada na etapa de validação para cada um dos parâmetros de saída.

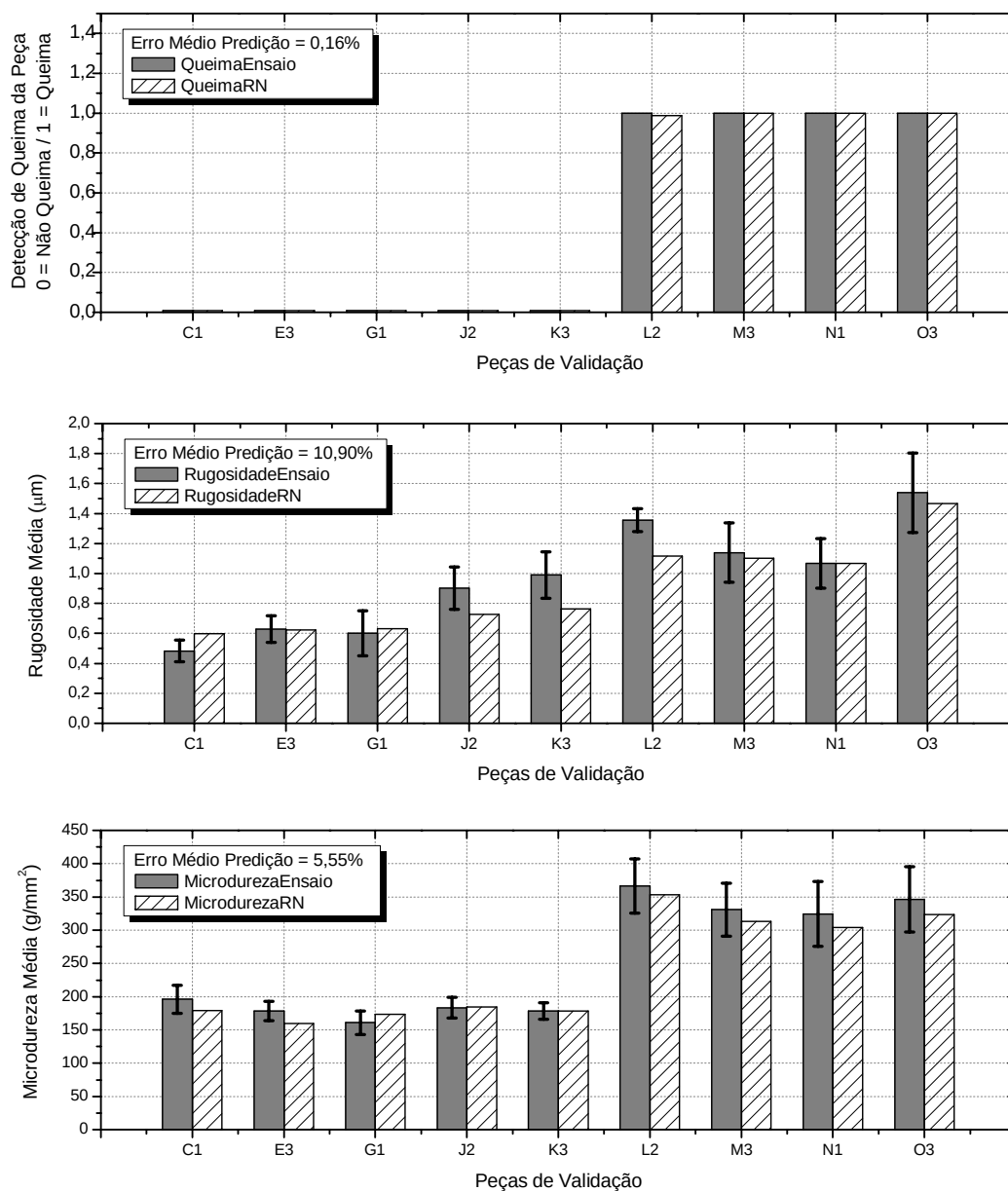


Figura 89 – Desempenho da rede 3-20-3 obtido pela estrutura 1

A predição de ocorrência de queima da peça apresenta os melhores índices de acerto, sendo o valor médio do erro de predição de 0,16%, garantindo para fins práticos um índice de acerto de 100%. Desta forma, a detecção de ocorrência de queima foi obtida de maneira muito precisa por meio da rede neural implementada.

Analisando-se o comportamento da rede nos testes de validação, observa-se que os maiores erros obtidos foram os de predição do parâmetro de rugosidade. O erro médio al-

cançado é de 10,90%, sendo que o maior erro fora obtido para a peça de validação C1, com erro de predição de 23,87%. Este fato pode ser explicado pela observação da faixa de variação de pequena ordem obtido nos testes de rugosidade.

O rugosímetro da marca Taylor Robson, modelo Surtronic 3+, utilizado nas medidas de rugosidade deste trabalho apresenta duas casas decimais após a vírgula (décimos e centésimos de micra) na exposição dos dados em seu visor eletrônico. Sabe-se que, para este aparelho, a segunda casa decimal após a vírgula é considerada como Algarismo de Incerteza, estando o último algarismo significativo da medida em décimos de micra. Desta forma é aceitável dizer que erros da ordem de 10^{-2} micra podem ser considerados como acertos da rede na predição da rugosidade. Corrobora também para o maior índice de erro a menor faixa de variação, sendo diferenciada pelas casas decimais.

Para a predição de microdureza efetuada pela rede observa-se um alto grau de precisão dos acertos, sendo que o erro médio obtido é de apenas 5,55%. O maior erro observado foi o da peça de validação E3, com um índice de 10,49%. Por se tratar de uma predição de valores quantitativos, o erro obtido pode ser considerado baixo se comparado aos valores obtidos nos ensaios. Para este parâmetro todos os valores preditos pela rede encontram-se dentro da faixa de tolerância dos valores experimentais, o que pode ser observado na Figura 89, analisando-se os desvios padrões dos valores de referência.

O gráfico apresentado na Figura 90 demonstra a convergência da rede que apresentou melhor desempenho, sendo esta constituída por uma camada intermediária, com vinte neurônios, utilizando o conjunto de dados de entrada proposto pela estrutura 1.

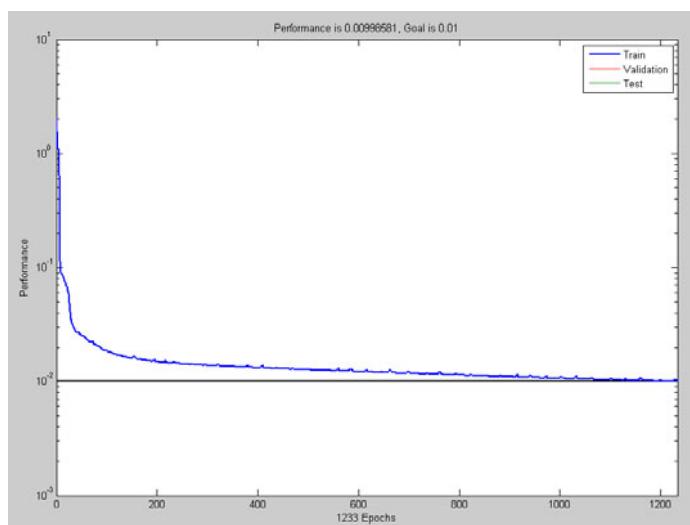


Figura 90 – Curva de desempenho da rede de arquitetura 3-20-3 no estágio de treinamento

Observa-se que houve convergência da rede para o erro médio quadrático estipulado em 10^{-2} , sendo necessário um número total de 1233 épocas.

Baseado nos resultados apresentados, conclui-se que os sinais de emissão acústica e potência de corte, aliado aos valores de profundidade de corte das peças usinadas, fornecem um excelente conjunto de dados capazes de alimentar entradas de redes neurais para a predição de parâmetros indicativos de queima, rugosidade e microdureza. Mesmo com estruturas pouco refinadas, ou seja, sem o ajuste dos parâmetros mais otimizados da rede, é possível obter bons indicadores da qualidade de superfícies retificadas com o auxílio desta poderosa ferramenta.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Considerações Finais e Conclusões

A investigação de sistemas de monitoração de processos de retificação tem atraído o interesse tanto de pesquisadores quanto de profissionais da área. A disponibilidade de recursos computacionais tem possibilitado o desenvolvimento de métodos capazes de alcançar resultados importantes, como a capacidade de realizar previsões de parâmetros qualitativos de peças usinadas em processos industriais.

Desta forma, por meio da revisão bibliográfica foram estudados os principais fatores que contribuem em um processo de retificação, tendo sido possível observar que, por se tratar de um processo com múltiplas variáveis, ainda merece atenção de pesquisadores. Da mesma forma, o fenômeno de queima de peças retificadas pode ser influenciado por diversas variáveis inerentes ao processo. Ressalta-se que as condições de dressagem do rebolo também apresentam suma importância para a obtenção de acabamentos superficiais de alta qualidade, tendo sido uma etapa fundamental no controle do processo.

Por meio dos ensaios experimentais foi possível verificar que o uso de sensores de emissão acústica e potência se mostraram eficientes para atingir os objetivos inicialmente propostos por este trabalho. Dos gráficos gerados pela aquisição de tais sinais, apresentado nas Figuras 39 a 53, pôde-se observar um significativo aumento dos valores obtidos para ambos os sinais à medida que as profundidades de corte selecionadas foram implementadas.

Os procedimentos posteriores aos ensaios experimentais, ensaios de rugosidade e microdureza, se mostraram satisfatórios na busca de parâmetros capazes de caracterizar e serem utilizados como referência para o estudo qualitativo do processo de retificação implementado no trabalho. Pôde ser observada uma estreita relação dos efeitos da profundidade de corte sobre tais parâmetros. Pela análise dos gráficos apresentados nas Figuras 69 e 85, verificamos que os maiores índices de rugosidade e microdureza foram obtidos a partir das profundidades de corte onde o fenômeno de queima superficial teve início. Assim, o acabamento final da

superfície, e conseqüentemente sua precisão, sofrem influências significativas do processo de retificação.

O uso de redes neurais artificiais na análise de qualidade de superfícies retificadas pelo processo de retificação tangencial plana, proposta e implementada neste trabalho, apresentou resultados satisfatórios, tanto em relação ao desempenho quanto à precisão obtida na classificação de ocorrência de queima superficial e na aproximação de valores de rugosidade e microdureza.

Dentre as estruturas que constituíam o conjunto de entradas das redes neurais estudadas, a que apresentou melhor desempenho foi a estrutura 1, cujos dados de entrada foram obtidos dos sinais de emissão acústica, potência de corte e profundidade de corte. O erro médio de predição alcançado por esta rede neural foi de 5,54%, levando a uma taxa de acerto da rede de 94,46%, apresentando bons índices de acerto para os indicadores selecionados. Para obter tal índice, a estrutura modelada foi baseada em uma rede neural com três neurônios na camada de entrada, uma camada intermediária composta por vinte neurônios e três neurônios na camada de saída.

As estruturas 2 e 3, compostas respectivamente pelos conjuntos de entrada: profundidade de corte e parâmetro DPKS e profundidade de corte e parâmetro DPO, também apresentaram desempenhos razoáveis na predição de parâmetros indicadores de qualidade superficial das peças retificadas. A estrutura 2 teve um desempenho cujo comportamento foi bastante estável ao longo das configurações testadas, entretanto, o menor erro de predição foi alcançado com a estrutura 1 para a configuração 3-20-3.

Um dos pontos a serem ressaltados na concepção do dimensionamento das redes neurais é a sensibilidade que parâmetros tais como taxa de aprendizagem, coeficiente momentum, número de camadas intermediárias e número de neurônios das camadas intermediárias, possuem como influência no desempenho das redes. A seleção dos parâmetros ótimos para a rede demanda um processo empírico na busca de resultados satisfatórios.

Assim, sinais de emissão acústica e potência de corte são ótimos indicadores na caracterização de qualidade superficial de peças. Aliada às redes neurais artificiais, apresenta-

se como importantes ferramentas em atividades de usinagem, como a retificação, sendo capaz de agregar valor a processos produtivos na busca de caracterização qualitativa do produto final.

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS

A utilização de redes neurais artificiais em processos de produção final, como o caso de operações de retificação, continuará sendo uma área de estudo de grande interesse para pesquisadores e profissionais da área. Portanto, são inúmeras as possibilidades de trabalhos futuros dentre as quais destacam-se:

a) Implementação de outros tipos de redes neurais: a realização de testes com diferentes topologias de rede e/ou diferentes algoritmos de aprendizagem pode vir a melhorar o desempenho do modelo, aproximando ainda mais a saída obtida do resultado desejado.

b) Construção de um sistema híbrido formado por uma rede neural artificial e um algoritmo genético: a inclusão do algoritmo genético no modelo tem como objetivo definir os pesos que os principais parâmetros envolvidos no processo de retificação devem ter visando otimizá-la.

c) Aprofundamento de ensaios visando melhor caracterização das peças retificadas: poderão ser agregados ensaios pós-retificação, como análise metalográfica, para melhor caracterização dos efeitos de queima das peças, utilizando-se destas informações para a alimentação das redes neurais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMOWICZ, E. C. **Reconhecimento de padrões na análise econômico-financeira de empresas**. 2002. 123f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

AGUIAR, P. R. **Monitoramento da queima superficial em processo de usinagem por retificação usando a potência elétrica do motor de acionamento e emissão acústica**. 1997. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1997.

AGUIAR, P. R.; WILLETT, P.; WEBSTER, J. **Acoustic emission applied to detect workpiece burn during grinding**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ACOUSTIC EMISSION: STANDARDS AND TECHNOLOGY UPDATE, 1999, S. Vahaviolos, Ed., Fort Lauderdale, FL, January 1999.

AGUIAR, P. R. et al. **A detecção da queima por redes neurais na retificação cilíndrica externa**. In: 8as Jornadas Portuguesa de Tribologia, 2002, Aveiro. Novos desenvolvimentos da tribologia: análise teórica e aplicações em processos industriais. Aveiro, Portugal: Editora da Universidade de Aveiro, 2002. p. 239-243.

AGUIAR, P. R. **Controle automático de danos térmicos na usinagem por abrasão através do processamento de sinais de emissão acústica e potência elétrica**. 2003. xxxf. Tese (Livre Docência em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP, Bauru, 2003.

AGUIAR, P. R. et al. **Neural network applied to detect burn in grinding**. In: The IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, Innsbruck-Austria, 2005.

AGUIAR, P. R. et al. **In-process grinding monitoring through acoustic emission**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, São Paulo, v. XXVIII, n. 1, p. 118-124, 2006a.

AGUIAR, P. R. ; FRANÇA, T. V.; BIANCHI, E. C. **Roughness and roundness prediction in grinding**. In: 5th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME'06), Ischia, Italy, v. 1. p. 183-188, 2006b.

BADGER, J. A.; TORRANCE, D. A. **Burn awareness**. Cutting Tool Engineering Magazine. Northbrook, v. 52, n. 12, dez. 2000.

BENNETT, R. **Acoustic emission in grinding**. Thesis (Master's Thesis) - University of Connecticut, Connecticut, 1994.

BERKOVITS, A.; FANG, D. **Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission**. Engineering Fracture Mechanics, v 51, n. 3, p. 401-416, 1995.

BIANCHI, E. C. **Ação das condições de dressagem na retificação de precisão.** 1990. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1990.

BIANCHI, E. C. et al. **Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços dúcteis.** In: IV Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, Recife, p. 387-392, jun. 1996.

BIFANO, T. G.; YI, Y. **Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining.** Precision Engineering, v. 4, n. 4, p. 219-227, out. 1992.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of machining and machine tools.** 2. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1989.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

CARVALHO, A. P. L. F. **Redes neurais artificiais.** Disponível em: <<http://www.icmc.usp.br/~andre/research/neural/>>. Acesso em: 10 out. 2006.

CHANG, Y. P., DORNFELD, D. A. **Chatter and surface pattern detection for cylindrical grinding using a fluid coupled acoustic emission sensor.** 1993, Gaithersburg. Proceedings... International Conference on Machining of Advanced Materials, NIST, p. 159-167, 1993.

DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; McCONNEL, K. G. **Instrumentation for engineering measurements.** 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1993.

DANDOLINI, G. A. **Um procedimento para avaliação da saúde financeira de pequenas empresas: estudo de um caso usando redes neurais artificiais.** 1997. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

DINIZ, A. E.; CUPINI, N. L.; VILELLA, R. C. **Monitoramento do processo de usinagem por emissão acústica.** In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, dez. 1991.

DORNFELD, D. A. **Application of acoustic emission techniques in manufacturing.** In: NDT International, v. 25, n. 6, p. 259-269, 1992.

DOTTO, F. R. L. et al. **Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring.** In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. 2006, São Paulo, v. XXVIII, n. 2, p. 153-160, 2006.

DOTTO, F. R. L. **Sistema de detecção automática on-line de danos térmicos no processo de retificação com monitoramento via internet.** 2004. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.

FAUSETT, L. V. **Fundamentals of neural networks: architecture, algorithms, and applications**. 94. ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994.

FRANÇA, T. V. **Estudo da predição da circularidade e rugosidade de peças retificadas utilizando as redes neurais artificiais**. Bauru, 2005. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

FRANCIS, L. **The basics of neural networks demystified**. Contingencies, p. 56-61, nov./dez. 2001.

FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2005.

GOVINDHASAMY et al. **Neural modelling, control and optimisation of an industrial grinding process**. In: Control Engineering Practice, 13, p. 1243–1258, 2005.

HELLMEISTER, C.F.L.P. **Monitoramento da dressagem na retificação através do sinal puro de emissão acústica**. 2004. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.

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, S. **Redes neurais, princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

INASAKI, I., **Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes**. In: ULTRASONIC, v.36, n. 1, p. 273-281, fev. 1998.

JEMIELNIAK, K. **Some aspects of acoustic emission signal processing**. In: Journal of Materials Processing Technology, v. 109, n. 3, p. 242-247, 2001.

JOHNSON, C. D. **Process control instrumentation technology**. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

KHENAIFES, M. **Investigação de novas ferramentas estatísticas e utilização de microcontrolador no monitoramento da queima na retificação plana tangencial**. 2006. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

KIM, J. **Comparison of conventional and high speed grinding of AISI 52100 Steel**. 1997. 144f. Thesis (PhD. Thesis) - University of Connecticut, Connecticut, 1997.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of modern grinding technology**. 3. ed. New York: Chapman and Hall, 1986.

KLUFTH, W. **A monitoração dos processos reduz custos e desperdícios.** Revista Máquinas & Metais, São Paulo, v. 10, p. 60-80, out. 1994.

KONIG, W.; KLUMPEN, T. **Monitoring and sensor concepts for higher process reliability.** In: 5th International Grinding Conference, p. 26-28, Cincinnati, out. 1993.

KOVACS, Z. L. **Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações.** Texto Básico Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2. ed., São Paulo, 1996.

KRAR, S. F. **Grinding technology.** 2 ed, New York: Thomson Delmar, 1995.

KWAK, J. S.; SONG, J. B. **Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals**” In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 41, p. 899-913, 2001.

KWAK, J. S.; HA, M. K. **Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals.** In: Journal of Materials Processing Technology, v. 147, n. 1, p. 65-71, 2004.

LAWRENCE, S.; GILES, C. L. **Overfitting and neural networks: conjugate gradient and backpropagation.** In: International Conference on Neural Networks, Como, Italy, p. 114-119, jul. 2000.

LETA, F. R.; MENDES, V. B.; MELLO, J. C. S. **Medição de identificações de dureza com algoritmos de visão computacional e técnicas de decisão com incertezas.** ENGEVISTA, v. 6, n. 2, p. 15-35, ago. 2004.

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

LIU, Q.; CHEN, X; GINDY, N. **Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn.** In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p. 284-292, 2006.

LYONS, R. G. **Understanding digital signal processing.** 1. ed. New York: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, 1997.

MALKIN, S. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives.** 1. ed. England: Ellis Horwood Limited, 1989.

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

MELLO, M. T. **Aplicação de redes neurais artificiais no processo de precificação de ações.** 2004. 49f. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2004.

MINER, G. F.; COMER, D. J. **Physical data acquisition for digital processing**: components, parameters, and specifications. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

MONICI, R. D. **Análise da mínima quantidade de refrigeração e da refrigeração convencional na retificação de aços endurecidos**. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia – UNESP, Bauru, 2002.

NATHAN, R. D., VIJAYARAGHAVAN, L., KRISHNAMURTHY, R., **In process monitoring of burn in the cylindrical grinding of steel**. In: Journal of Materials Processing Technology, v. 91, p. 37-42, 1999.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, Publicação 048/89, 1998.

OLIVEIRA, A. C. **Aplicação – redes neurais**. Disponível em: <http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat_didatico/ic_grad2002_aula4.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

PANSANATO, L. et al. **O processamento do sinal bruto de emissão acústica e velocidade de corte na detecção de dano térmico na retificação plana**. In: CONGRESSO SAE BRASIL, São Paulo, p. 1-6, 2002.

PAULA, W. C. F. et al. **Redes neurais artificiais aplicadas na detecção da queima**. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, ano XLIII, n. 489, p. 104-119, 2006.

PRESS, W. H. et al. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital signal processing**: principles, algorithms, and applications. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

ROSA, L. C. Apostila de Oficina Mecânica para Automação. **Acabamento de superfícies - rugosidade superficial**. Apostila do curso de Engenharia de Controle e Automação, UNESP - Unidade Diferenciada - Sorocaba/Iperó, Sorocaba/SP, 2006.

ROWE, W. B.; LI, Y.; MILLS, B.; ALLANSON, D. R. **Application of intelligent CNC in grinding**. In: Computers in Industry, v. 31, p.45-60, 1996.

SALMON, S. C. **Unpublished work**. University of Bristol, 1988.

SARAVANAPRIYAN, S. N. A.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. **On-line detection of grinding burn by integrated sensing**. In: SICON'01 Sensors For Industry Conference, Illinois, p.89-94, nov. 2001.

SCHWARZ, J. **O ótimo superacabamento começa pelo acabamento certo.** Revista Máquinas e Metais, p. 126-L33, dez. 1999.

SHAFTO, G. R. **Creep feed grinding.** 1975. Thesis (Ph.D. Thesis) - University of Bristol, Bristol, 1975.

SHI, J.; ZHANG, S.; ZHONG, B.; HAANG, R. **A study of on-line identification of grinding burn and wheel wear based on self clustering neural network.** Proceedings... IEEE International Conference on Industrial Technology, Shanghai, p. 369-371, 1996.

SHIN, Y. C.; CHEN, Y. T.; & KUMARA, S. **Framework of an intelligent grinding process advisor.** In: Journal of Intelligent Manufacturing, v. 3, p. 135-148, 1992.

SILVA, E.J.; OLIVEIRA, J. F. G. **Monitoramento por emissão acústica para rebolos de CBN vitrificado**, Revista Máquinas e Metais, v. 1, n. 468, p. 98-117, 2005.

SMITH, S. W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing.** 2. ed. California: California Technical Publishing, 1999.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquina e Metais, São Paulo, v. 1, n. 436, p. 140-157, 2002.

SOUZA, M. C. F. et al. **Manufatura virtual: conceituação e desafios.** Revista Gestão e Produção, v. 9, n. 3, p. 297-312, dez. 2002.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos.** 1. ed. Florianópolis: Editora da UFS, 1992.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TAFNER, M. A. **O que são as redes neurais artificiais.** Disponível em: <<http://www.cerebromente.org.br/n05/tecnologia/rna.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2006.

VIEIRA J. M. et al. **Como o calor pode afetar a integridade superficial das peças.** Revista Máquina e Metais, n. 397, p. 28-36, fev. 1999.

WANG, Z. et al. **Improved wheel/workpiece contact detection during grinding via AE.** Abrasives Magazine, USA, p. 7-13, jun./jul. 1999.

WANG, Z. et al. **Neural network detection grinding burn from acoustic emission.** In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 41, p. 283-309, 2001.

WASCHKIES, E.; SKLARCZYK, C.; HEPP, K. **Tool wear monitoring at turning.** In: ASME Journal of Engineering and Industry, v. 116, p. 521-524, 1994.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R. **Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding.** Annals of the CIRP, v. 43, n. 1, p. 299-304, 1994.

WEBSTER, J.; DONG, W. P.; LINDSAY, R. **Raw acoustic emission signal analysis of grinding process.** In: CIRP, Annals of the CIRP, v. 45, n. 1/1195, p. 335-340, 1996.

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

YANG, J. F.; CHEN, F. K. **Recursive discrete fourier transform with unified IIR filter structures.** Signal Processing, v. 82, p. 31–41, 2002.

YASUI, H.; TSUKUDA, S. **Influence of fluid type of wet grinding temperature.** Bull. Japan Soc. of Precision Engineering, v. 17, n. 2, p. 133-134, 1983.

ANEXO I

PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

Sistemas de Medição de Rugosidade

São usados dois sistemas básicos de medida: o da linha média M e o da envolvente E. O sistema da linha média é o mais utilizado. Alguns países adotam ambos os sistemas. No Brasil é adotado o sistema M.

No sistema da linha média, ou sistema M, todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir do conceito de linha média: Linha média, conforme apresentado na Figura 91, é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento da amostragem (l_m).

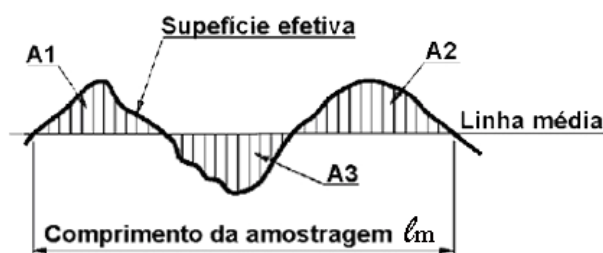


Figura 91 – Linha média de um perfil de rugosidade (Adaptado de Agostinho et al., 1981)

Onde: A1 e A2: áreas acima da linha média;

A3: área abaixo da linha média;

$$A1 + A2 = A3.$$

Rugosidade Média

A rugosidade média, ou *Roughness Average* (R_a), é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples (Agostinho et al., 1981). Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil a uma linha média. Outra boa definição seria a distância

média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido. Matematicamente, a rugosidade média pode ser expressa conforme Equação (26).

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (26)$$

Um exemplo gráfico desta aplicação numérica pode ser observado na Figura 92.

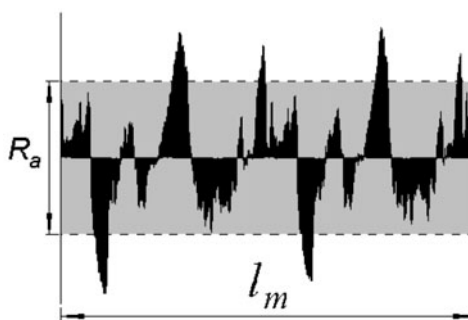


Figura 92 – Parâmetro de rugosidade R_a (Agostinho et al., 1981)

Rugosidade Máxima

Outro parâmetro criado para caracterizar a rugosidade é a rugosidade máxima, ou R_y . O parâmetro R_y é definido como sendo a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo dentro de um comprimento medido de um perfil de rugosidade. A Figura 93 apresenta um exemplo deste parâmetro.

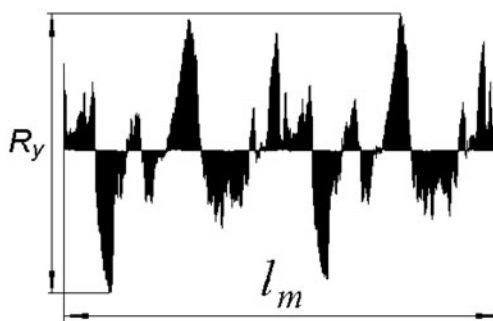


Figura 93 – Parâmetro de rugosidade R_y (Agostinho et al., 1981)

O parâmetro R_y tem vantagens e desvantagens. Este parâmetro é um verdadeiro indicador da distância máxima dos limites de picos e vales de um comprimento medido. Con-

tudo, o pico mais alto pode estar no começo do perfil analisado, enquanto o vale mais profundo pode estar no final deste perfil. Assim, estas duas ocorrências estão muito pouco correlacionadas, e o parâmetro R_y registrado pode transmitir uma idéia incorreta sobre a superfície.

Rugosidade Parcial

Para evitar tais situações, há um outro parâmetro de rugosidade semelhante à R_y . Trata-se do parâmetro R_z , o qual indica a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos dentro de um comprimento medido. Matematicamente R_z pode ser expresso de acordo com a Equação (27).

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (27)$$

Um exemplo gráfico da aplicação numérica da rugosidade parcial (R_z) pode ser observado pela Figura 94.

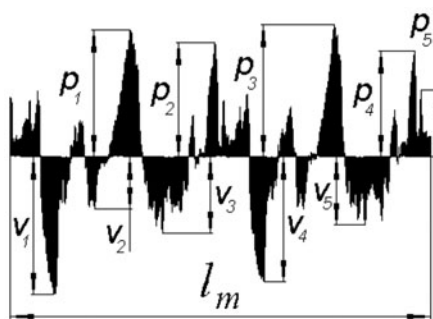


Figura 94 – Parâmetro de rugosidade R_z (Agostinho et al., 1981)

ANEXO II

RUGOSIDADE MÉDIA EM PROCESSOS DE MANUFATURA

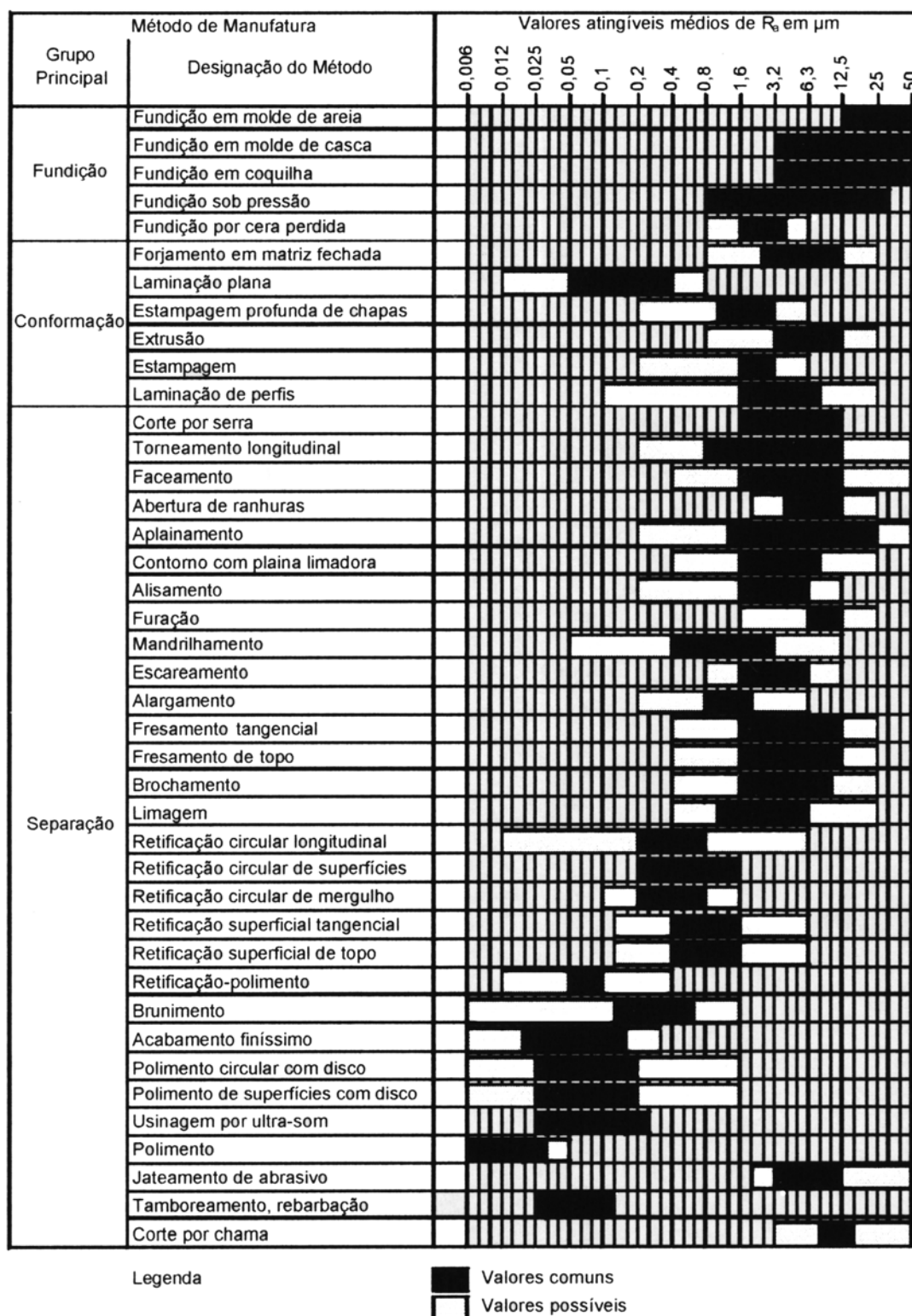


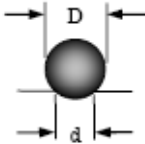
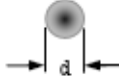
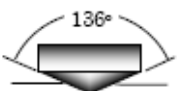
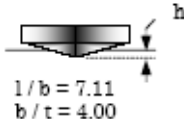
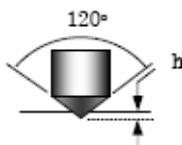
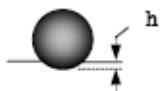
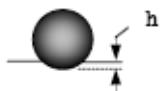
Figura 95 – Valores de R_a para diferentes processos de fabricação (Adaptado da Norma DIN 4766)

ANEXO III

PRINCIPAIS ENSAIOS DE DUREZA

A Tabela 14 apresenta, resumidamente, os ensaios de dureza mais comuns, descrevendo o método utilizado, tipo de indentador e cargas envolvidas.

Tabela 14 – Ensaios de dureza (Callister, 2002)

Ensaio	Indentador	Forma da Indentação		Carga	Fórmula para cálculo de dureza		
		Vista Lateral	Vista de Topo				
Brinell	Esfera de aço ou de carboneto de tungstênio			P	$HB = \frac{2 P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$		
Vickers micro-dureza	Pirâmide de diamante			P	$HV = \frac{1.854 P}{d_1^2}$		
Knoop micro-dureza	Pirâmide de diamante			P	$HK = \frac{14.2 P}{l^2}$		
Rockwell				Rockwell			
A } C } D }	Cone de diamante			60 kg			
				100 kg			
				150 kg			
B } F } G }	Esfera de aço φ 1/16"			Rockwell superficial			
				15 kg			
				30 kg			
				45 kg			
E } H } K }	Esfera de aço φ 1/8"						

ANEXO IV

VALORES OBTIDOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Tabela 15 – Dados provenientes dos ensaios experimentais

AÇO ABNT 1020 – REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO						
Código Peça	Prof. Corte (μm)	EA _{RMS} (Média)	Potência _{RMS} (Média)	Queima da Peça	Rugosidade (Média) (μm)	Microdureza (Média) (g/mm ²)
A1	5,0	488145,7	8420033	Sem Queima	0,541778	241,7321
A2	5,0	545117,1	8699956	Sem Queima	0,606222	203,7157
A3	5,0	414491,3	8626625	Sem Queima	0,556889	216,3421
B1	7,5	595783,1	9202655	Sem Queima	0,655556	215,4107
B2	7,5	510826,9	8969939	Sem Queima	0,533778	277,7864
B3	7,5	668945,9	9478364	Sem Queima	0,517333	285,3271
C1	10,0	636968,5	10023002	Sem Queima	0,482222	196,2786
C2	10,0	697649,2	10339104	Sem Queima	0,583111	195,4857
C3	10,0	721897,7	11213932	Sem Queima	0,471556	151,7571
D1	12,5	985571,5	13015672	Sem Queima	0,563556	129,9764
D2	12,5	931264,6	12036225	Sem Queima	0,634667	171,5036
D3	12,5	817205,2	11478928	Sem Queima	0,553333	306,8021
E1	15,0	750650,7	11019764	Sem Queima	0,616000	147,0057
E2	15,0	883372,5	11715878	Sem Queima	0,529778	138,7064
E3	15,0	844977,0	11502669	Sem Queima	0,629333	178,4536
F1	17,5	946201,8	11803685	Sem Queima	0,754667	173,9621
F2	17,5	956117,2	12099454	Sem Queima	0,760889	156,5900
F3	17,5	962582,6	12137925	Sem Queima	0,578044	173,9621
G1	20,0	1152598	13487373	Sem Queima	0,600444	160,855
G2	20,0	1179318	14657729	Sem Queima	0,586222	178,2243
G3	20,0	1029340	12895247	Sem Queima	0,654667	177,2864
H1	22,5	818800,6	11567567	Sem Queima	0,762222	177,3571
H2	22,5	690589,6	12267231	Sem Queima	0,543556	185,5929
H3	22,5	1052317	16209988	Com Queima	0,812000	159,6857
I1	25,0	914533,8	14140341	Sem Queima	0,665778	208,6986
I2	25,0	1012616	13214011	Sem Queima	0,596444	250,8829
I3	25,0	914891,7	13348637	Sem Queima	0,668000	189,9771
J1	27,5	1006712	14107754	Sem Queima	0,497333	180,1786
J2	27,5	858132,8	14327666	Sem Queima	0,901333	183,2657
J3	27,5	987535,3	12946421	Sem Queima	0,596000	195,4193
K1	30,0	1059733	15282022	Sem Queima	0,908889	173,1714
K2	30,0	1059366	14370433	Sem Queima	0,909778	169,4357
K3	30,0	860274,1	13917924	Sem Queima	0,989778	178,3143
L1	35,0	1085638	15595611	Sem Queima	0,914222	184,2357
L2	35,0	2794533	27872803	Com Queima	1,355556	366,2071
L3	35,0	3021211	27989103	Com Queima	1,093333	366,1214
M1	40,0	3836922	31010258	Com Queima	1,069333	304,2357
M2	40,0	4255590	30852157	Com Queima	1,132444	337,4500
M3	40,0	3726310	30587362	Com Queima	1,139111	330,8714
N1	45,0	3557872	29334630	Com Queima	1,067556	324,3757
N2	45,0	4150932	30470108	Com Queima	1,267111	291,1100
N3	45,0	3872406	33202783	Com Queima	1,440444	303,5336
O1	50,0	3735360	29979505	Com Queima	1,120889	326,4786
O2	50,0	4158437	36164740	Com Queima	1,487556	324,9929
O3	50,0	4061542	35338258	Com Queima	1,539111	346,0929

ANEXO V

SOFTWARE DE DETECÇÃO DE QUEIMA

O software de detecção de queima Grinding Analyses, desenvolvido por Dotto, 2004, é um programa capaz de calcular a porcentagem de queima na superfície do corpo de prova via análise de sua imagem digitalizada.

As Figuras 96 e 97 mostram a aparência da janela de inicialização (Figura 96) e da janela principal (Figura 97) do software desenvolvido.

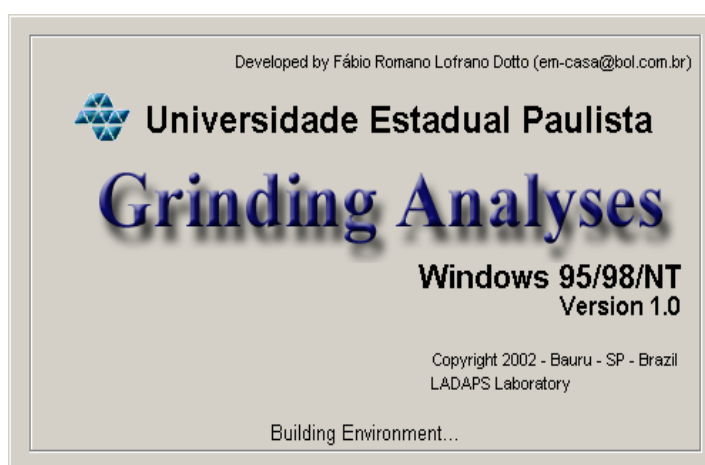


Figura 96 – Janela de inicialização do software Grinding Analyses (Dotto, 2004)



Figura 97 – Janela principal do software Grinding Analyses (Dotto, 2004)

O software de Quantificação de Queima utiliza a imagem digitalizada da peça trabalho para detectar o percentual de queima de peças usinadas. As imagens digitalizadas são

utilizadas para classificação das áreas de queima por meio da padronização de cores ajustada pelo usuário. A interface com o usuário do software “Quantificador de Queima” é apresentado na Figura 98. A Barra de Cores permite a modificação do limiar entre as situações de queima e não queima. Esse limiar, o qual é convertido em um padrão de cor de referência na caixa Padrão de Cor, é o que determina qual o valor de luminosidade que será considerado como queima na imagem da peça.



Figura 98 – Tela do software de Quantificação de Queima

ANEXO VI

CÓDIGO FONTE MATLAB – REDES NEURAI

```

%% criação do banco de dados a partir da matriz de dados coletados
clear;
clc;
load dados_por_passada.mat
prof_corte = medias(:,2)';
ea_rms = medias(:,1)';
pot_med = medias(:,21)';
dpks = medias(:,11)';
dpo = medias(:,9)';
queima = medias(:,3)';
rugo = medias(:,4)';
mico = medias(:,5)';

%% definição da estrutura de entrada
ix1 = cat(1, prof_corte, ea_rms, pot_med);

%% definição da estrutura de saída
iy = cat(1, queima, rugo, mico);

%% normalização
[ix1_n, ps1] = mapminmax(ix1);
[iy_n, ps] = mapminmax(iy);

%% separação de peças para validação
pecas = [7 15 19 29 33 35 39 40 45];
exclusao = [5 6 12 24 26];

%% processo de separação
Vl1.indices = pecas;
for i = 1:length(pecas)
    Vl1.P(:,i) = ix1_n(:,pecas(i));
    Vl1.T(:,i) = iy_n(:,pecas(i));
end
pecas = sort(cat(2, pecas, exclusao));
Tr1.P = ix1_n;
Tr1.T = iy_n;
Tr1.indices = 1:45;
for i = length(pecas):-1:1
    Tr1.P = cat(2, Tr1.P(:,1:pecas(i)-1), Tr1.P(:,pecas(i)+1:end));
    Tr1.T = cat(2, Tr1.T(:,1:pecas(i)-1), Tr1.T(:,pecas(i)+1:end));
    Tr1.indices = cat(2, Tr1.indices(:,1:pecas(i)-1),
    Tr1.indices(:,pecas(i)+1:end));
end

%% criando a estrutura da rede neural
net = newff(minmax(Tr1.P), [20 3], ...
    {'tansig' 'tansig'}, 'traingdx');

%% ajuste de parâmetros
net.trainParam.epochs = 20000;
net.trainParam.goal = 1e-2;
net.trainParam.lr = 0.4;
net.trainParam.mc = 0.3;
net.trainParam.show = 1000;

%% treinando a rede
net = train(net, Tr1.P, Tr1.T);

%% simulando
resultado = sim(net, Vl1.P);

```

ANEXO VII

TRABALHOS PUBLICADOS

PAULA, Wallace Christian Feitosa; AGUIAR, Paulo Roberto; BIANCHI, Eduardo Carlos. **Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais.** In: 1a. Reunião Técnica do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, 2005, Bauru. p. CD-ROM.

PAULA, Wallace Christian Feitosa; AGUIAR, Paulo Roberto; LEITE, Ricardo Robles; BIANCHI, Eduardo Carlos; LIMA, André Jordan. **Redes neurais artificiais aplicadas na detecção da queima.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, ano XLIII, n. 489, p. 104-119, 2006.

PAULA, Wallace Christian Feitosa; SPADOTTO, Marcelo Montepulciano; LEITE, Ricardo Robles; AGUIAR, Paulo Roberto; BIANCHI, Eduardo Carlos; SOUZA, Carlos. **Redes neurais artificiais aplicadas na detecção da queima no processo de retificação.** In: IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2006, Recife, PE. 2006. p. CD-ROM.

AGUIAR, Paulo Roberto; PAULA, Wallace Christian Feitosa; BIANCHI, Eduardo Carlos; CRUZ, Carlos Eduardo Dorigatti. **Neural network approach for surface roughness prediction in surface grinding.** In: The IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA 2007), Innsbruck, 2007.