



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**MONITORAMENTO DA QUEIMA DA PEÇA
NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PLANA
BASEADO NO ESTUDO ESPECTRAL DO
SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA COM
IMPLEMENTAÇÃO POR HARDWARE**

MARCELO MARCHI

BAURU – SP
2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**MONITORAMENTO DA QUEIMA DA PEÇA
NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PLANA
BASEADO NO ESTUDO ESPECTRAL DO
SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA COM
IMPLEMENTAÇÃO POR HARDWARE**

MARCELO MARCHI

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da
UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica.**

BAURU – SP
2012

Marchi, Marcelo.

Monitoramento da queima da peça no processo de retificação plana baseado no estudo espectral do sinal de emissão acústica com implementação por hardware / Marcelo Marchi, 2012. 135 f.

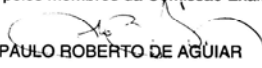
Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

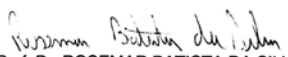
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

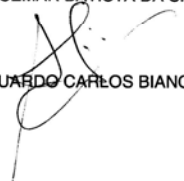
1. Retificação. 2. Monitoramento. 3. Emissão acústica. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCELO MARCHI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 14 dias do mês de dezembro do ano de 2012, às 08:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO TÉCNICA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCELO MARCHI, intitulado "MONITORAMENTO DA QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM IMPLEMENTAÇÃO POR HARDWARE". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR


Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



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



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

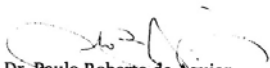
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
MARCELO MARCHI

DE: "MONITORAMENTO DA QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO COM
IMPLEMENTAÇÃO POR HARDWARE"

PARA:

Monitoramento da queima da peça no processo de
retificação plana baseada no estudo espectral do
sinal de emissão acústica com implementações por
hardware.

Bauru, 14 de dezembro de 2012.


Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar
Orientador

Dedico este trabalho a meu irmão Luiz Afonso Marchi, *in memoriam*, que foi o responsável por me inserir no mundo da eletrônica, fazendo de mim uma pessoa curiosa.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar pelos seus ensinamentos sobre retificação e processamento de sinais, pelas sugestões no decorrer do desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, pelas lições de vida.

Aos colegas do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais - LADAPS, Cesar Martins, Mauricio Eiji Nakai e Hildo Ghillard Júnior que me ajudaram a superar dificuldades no decorrer da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela minha aceitação como pesquisador e pelos recursos financeiros que proporcionaram o pagamento de despesas em congressos onde esse trabalho foi apresentado, propagando o programa à comunidade científica.

Meus agradecimentos também, e de forma geral, à UNESP e à CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa para o desenvolvimento de meu mestrado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.2. MOTIVAÇÃO	3
1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	3
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. ELEMENTOS BÁSICOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	5
2.2. PARÂMETROS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	7
2.2.1. Parâmetro G	10
2.2.2. Vida do Rebolo.....	10
2.2.2.1. Operação de Dressagem.....	12
2.2.2. Espessura Equivalente de Corte (heq).....	14
2.2.3. Profundidade de Corte	15
2.2.4. Velocidade de Corte	16
2.2.5. Velocidade da Peça.....	17
2.2.6. Rugosidade.....	18
2.2.6.1 Parâmetros de Superfície Geométrica	19
2.2.7. Dureza por Microindentação Vickers	21
2.3. A QUEIMA NA RETIFICAÇÃO.....	22
2.3.1. Energia Específica de Retificação	25
2.3.2. Emissão Acústica e Potência na Retificação	26
2.3.3. Monitoramento da Queima.....	28
2.3.4. Parâmetros Estatísticos para a Detecção da Queima.....	29
2.4. ANÁLISE DE SINAIS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	30
2.4.1. Transformada Discreta de Fourier (DFT).....	31
2.4.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT)	33
2.4.3. Teorema da Amostragem	34
2.5. FILTROS DIGITAIS	35
2.5.2. Filtros Butterworth	37
2.6. TECNOLOGIA DSPIC	38
3.4.3. Conversor Analógico Digital.....	39
3.4.4. Recursos e Características do A/D do dsPIC 30F4013	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. INTRODUÇÃO	43
3.2. MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIOS.....	43
3.2.1. Aquisição de Dados e Processamento de Sinais	45
3.2.2. Dressagem.....	48
3.2.3. Teste Rugosidade.....	48
3.2.4. Teste de Microdureza.....	49
3.2.5. Ensaios com Rebolo de Óxido de Alumínio.....	49
3.2.6. Ensaios com Rebolo de CBN	51
3.2.7. Teste de Visualização das Peças.....	53
3.3. PROCESSAMENTO DE SINAIS	55
3.3.1. Estudo dos Parâmetros Estatísticos.....	58
3.4. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE	59
3.4.1 Sistema de Monitoramento.....	59
3.4.3. Circuito Eletrônico	61
3.4.4. Firmware.....	64
3.5. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	67
3.5.1. Desenvolvimento do Software.....	68

3.5.2. Construção do Software	70
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1. ESTUDO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA	73
4.2. REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO PARA O AÇO ABNT1045.....	76
4.2.1. Rugosidade Média Aritmética	76
4.2.2. Microdureza (Vickers).....	77
4.2.3. Médias RMS e DPO	78
4.3. REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO PARA O AÇO VC131.....	80
4.3.1. Rugosidade Média Aritmética	80
4.3.2. Microdureza (Vickers).....	81
4.3.3. Médias RMS e DPO	82
4.4. REBOLO DE CBN PARA O AÇO ABNT1045.....	84
4.4.1. Rugosidade Média Aritmética	84
4.4.2. Microdureza (Vickers).....	85
4.4.3. Médias RMS e DPO	86
4.5. REBOLO DE CBN PARA O AÇO VC131.....	88
4.5.1. Rugosidade Média Aritmética	88
4.5.2. Microdureza (Vickers).....	88
4.5.3. Médias RMS e DPO	89
4.6. RESULTADOS A PARTIR DO HARDWARE DESENVOLVIDO	90
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES.....	95
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	95
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
TRABALHOS PUBLICADOS	106
ANEXO I - CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE	107
ANEXO II - CÓDIGO FONTE DO FIRMWARE (DSPIC).....	111
ANEXO III - ROTINAS CRIADAS NO MATLAB.....	115
ANEXO IV – TABELAS DOS RESULTADOS DE RUGOSIDADE	118
ANEXO IV – TABELAS DOS RESULTADOS DE MICRODUREZA	122

Lista de Figuras

Figura 1- Os seis elementos envolvidos na retificação plana (MARINESCU et al, 2007).....	8
Figura 2 - Esquema ilustrativo de retificação plana (KING E HAHN, 1986 - adaptado).....	9
Figura 3 - Mecanismos de desgaste do rebolo (KÖNIG apud TAWAKOLI et al., 2007 adaptada).	12
Figura 4 - Processo de dressagem (DOTTO, 2004 - adaptado).	13
Figura 5- Influência do tempo de contato na força tangencial de corte em um grão abrasivo (Ft1g) (AGUIAR et al., 1999).....	17
Figura 6 - Tipos de acabamento superficial (WHITEHOUSE, 1994).....	18
Figura 7 - Rugosidade média R_a (WHITEHOUSE, 1994).	19
Figura 8 - Parâmetro Rz DIN (TAYLOR, 2000).	20
Figura 9 - Parâmetro R_t DIN (TAYLOR,2000).	21
Figura 10 - (a) Base quadrada; (b) Angulação; (c) Indentação Vickers (FERREIRA, 2004).	22
Figura 11 - Microdureza em função da profundidade abaixo da superfície com e sem queima (Malkin, 1989 – Adaptado).	23
Figura 12 - Distribuição de energia térmica na retificação (König apud Severiano, 2002).	25
Figura 13 - Sinal no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b) – Adaptado de (CHUGANI et al., 1998).	32
Figura 14 - Efeitos de diferentes frequências de amostragem (Adaptado de Chugani et al., 1998)	34
Figura 15 - Tipos de filtro (Chugani et al., 1998 -adaptado)	37
Figura 16 - Resposta em frequência de um Filtro Butterworth de ordem 2, 5 e 20 (Chugani et al., 1998 -adaptado).....	37
Figura 17 - Diagrama arquitetura família dsPIC30F (Microchip, 2012).	39
Figura 18 - Conversão de um sinal analógico em digital (Proakis; Manolakis, 1996 – adaptado)..	40
Figura 19 - Entrada ADC do dsPIC 30F4013 (Microchip, 2012).	41
Figura 20 - Ensaio para Rebolo Convencional (a) e Ensaio para Rebolo de CBN (b).	44
Figura 21 - Dimensões dos corpos de prova.	45
Figura 22 - Esquema do banco de ensaios e sistema de aquisição de dados.	46
Figura 23 - Sensor de EA	46
Figura 24 – Tela principal do programa feito no software LABVIEW.	47
Figura 25 - Diagrama de blocos do programa no software LABVIEW.	48
Figura 26 - Peças de aço ABNT 1045 de 1 a 7, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de Óxido de Alumínio.	54
Figura 27 - Peças de aço VC131 de 1 a 8, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de Óxido de Alumínio.	54
Figura 28 - Peças de aço ABNT 1045 de 1 a 6 e 9, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de CBN.	55
Figura 29 - Peças de aço VC131 de 1 a 6, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de CBN.	55
Figura 30 - Sinal puro de EA.....	56
Figura 31 - Formação dos vetores conforme o nível de queima	57
Figura 32 – Vetores do sinal puro de EA com 400.00 amostras para diferentes níveis de queima.	57
Figura 33 - Seleção das quinze bandas de frequência.	58
Figura 34 - Divisão dos vetores de EA puro.....	58
Figura 35 – Processo de geração dos gráficos do sinal RMS médio e desvio padrão para cada banda de frequência.	59
Figura 36 - Diagrama em blocos do sistema de monitoramento	60
Figura 37 - dsPIC 30F4013.	61
Figura 38 - Imagem do diagrama esquemático simplificado	63
Figura 39 - Imagem do circuito	64
Figura 40 - Ambiente de desenvolvimento da MickroElectronika	65
Figura 41 - Fluxograma da função principal main	66

Figura 42 - Imagem frontal do hardware detector de queima	67
Figura 43 - Diagrama de caso de uso do software	68
Figura 44 - Ambiente de desenvolvimento Delphi 7	69
Figura 45 - Diagrama de blocos do software.....	70
Figura 46 - Tela com gráficos de EArms e potência elétrica do motor	71
Figura 47 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço ABNT1045 com rebolo de CBN.	74
Figura 48 - RMS do sinal puro de EA sem filtro (a) e RMS do sinal de EA filtrado (b) com rebolo de CBN e aço ABNT1045.	74
Figura 49 – (a) DPO e média RMS sem o emprego de filtro no sinal puro de EA (b) Com emprego de filtro no sinal puro de EA na faixa de 60kHz a 100kHz com rebolo de CBN e aço ABNT1045.	75
Figura 50 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de óxido de alumínio e aço ABNT 1045 para 20 medidas equidistantes de 5 mm ao longo da peça	77
Figura 51 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de AIO e aço 1045 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.	78
Figura 52 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço ABNT1045 com rebolo de óxido de alumínio.	79
Figura 53 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 50kHz a 100kHz (b) e de 900kHz a 1000kHz (c) do aço ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio.	80
Figura 54 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de óxido de alumínio e aço VC131 para 20 medidas equidistantes de 5 mm ao longo da peça.....	81
Figura 55 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de AIO e aço VC131 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.	82
Figura 56 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço VC131 com rebolo de óxido de alumínio.....	83
Figura 57 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 400kHz a 600kHz (b) e de 700kHz a 800kHz (c) do aço VC131 com rebolo de óxido de alumínio.....	84
Figura 58 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de CBN e aço ABNT 1045 para 20 medidas equidistantes de 5 mm ao longo da peça.....	85
Figura 59 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de CBN e aço 1045 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.	86
Figura 60 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço ABNT1045 com rebolo de CBN.	86
Figura 61 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 50kHz a 100kHz (b) e de 800kHz a 900kHz (c) do aço ABNT1045 com rebolo de óxido de CBN.....	87
Figura 62 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de CBN e aço VC131 para 20 medidas equidistantes de 5 mm ao longo da peça	88
Figura 63 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de CBN e aço VC131 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.	89
Figura 64 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço VC131 com rebolo de CBN.	90
Figura 65 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 800kHz a 850kHz (b) e de 900kHz a 1000kHz (c) do aço VC131 com rebolo de CBN.	90
Figura 66 - Sistema de simulação	91
Figura 67 - Sinais a serem emulados (a) emissão acústica (b) potência elétrica	92
Figura 68 - Imagem do display indicando processo de aquisição (a) imagem do display apresentando resultado do calculo do DPO (b).....	92
Figura 69 - Imagem do painel de controle do software de monitoramento	93

Lista de tabelas

Tabela 1 - Ensaios de Retificação de Aço ABNT 1045 com Rebolo Óxido de Alumínio	50
Tabela 2 - Ensaios de Retificação de Aço VC131 com Rebolo Óxido de Alumínio	51
Tabela 3 - Ensaios de Retificação de Aço VC131 com Rebolo CBN	52
Tabela 4 – Ensaios de Retificação com Rebolo CBN e aço Aço ABNT 1045	53
Tabela 5 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço 1045 – Rebolo AlO	118
Tabela 6 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço VC131 – Rebolo AlO	119
Tabela 7 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço 1045 – Rebolo CBN	120
Tabela 8 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço VC131 – Rebolo CBN	121
Tabela 9 - Resultados de Microdureza (Vickers) para o Aço VC131 – Rebolo AlO	122
Tabela 10 - Resultados de Microdureza (Vickers) para o Aço 1045 – Rebolo AlO	122
Tabela 11 - Resultados de Microdureza (Vickers) para o Aço 1045 – Rebolo de CBN	123
Tabela 12 - Resultados de Microdureza (Vickers) para Aço VC131 – Rebolo de CBN	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- a – profundidade de corte [μm]
 b - largura de retificação [mm]
 b_d - largura de atuação do dressador [mm]
 d_e - diâmetro externo de equivalente [mm]
 d_s - diâmetro do rebolo [mm]
 d_w - diâmetro da peça [mm]
 F_n - força normal de corte [N]
 F_t - força tangente de corte [N]
 G - Relação entre volume de material retificado e volume desgastado do rebolo [-]
 h_{eq} - espessura equivalente de corte [μm]
 $h_{\max}$ – espessura teórica máxima do cavaco [mm]
 h_c' – profundidade de corte crítica [μm]
 l_c - comprimento de contato [mm]
 L – espaçamento médio entre grãos abrasivos [μm]
 n – rotação do rebolo [rpm]
 P – potência de corte na retificação [W]
 Q_w – taxa de remoção [mm^3/s]
 Q_w' – taxa de remoção por unidade de largura [mm^2/s]
 R_a – Rugosidade média [μm]
 S_d - passo de dressagem [mm]
 u - energia específica de retificação [J/mm^3]
 U_d - grau de recobrimento de dressagem do rebolo [-]
 V_s - velocidade de corte do rebolo [m/s]
 V_w - velocidade da peça [m/s]
 Z_w - volume de metal retificado [mm^3]
 Z_s - volume de rebolo gasto [mm^3]
ADC – conversor analógico para digital
CBN - nitreto cúbico de boro
EA - emissão acústica
LCD – display de cristal líquido
MCU – unidade microcontroladora
dsPIC – controlador de sinais digitais da Microchip
POT – potência de corte

RMS – “root mean square” Valor médio quadrático

FFT - *Fast Fourier Transform*

Spark-out – tempo de centelhamento na retificação após a retirada do material pelo rebolo

RESUMO

O processo de retificação é considerado um dos últimos na cadeia de produção de peças de precisão. O aumento excessivo da temperatura na zona de corte pode causar a queima superficial ou modificações estruturais do material que está sendo usinado. Assim, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um método de detecção da queima da peça no processo de retificação plana, baseado na análise do espectro do sinal de emissão acústica (EA) puro e com a aplicação de filtros digitais, e posterior implementação por hardware. Ensaio experimentais foram realizados numa máquina retificadora plana, onde um banco de ensaios foi desenvolvido empregando dois tipos de rebolos: óxido de alumínio e CBN com ligante resinoide; dois tipos de materiais: aço ABNT 1045 e VC131. Para a caracterização da superfície das peças quanto aos níveis de queima, inspeção visual e medidas de rugosidade e microdureza foram realizadas após os ensaios. Notou-se no espectro do sinal de EA faixas de frequências com amplitudes mais significativas entre 15kHz a 1MHz, e, portanto, quinze bandas de frequência foram selecionadas para estudo. Filtros digitais do tipo Buterworth, passa-faixa, ordem 6, foram aplicados nos sinais puros de EA e, posteriormente, o valor EA RMS e o parâmetro DPO foram obtidos com e sem a aplicação dos filtros. Os resultados obtidos da comparação dos valores RMS de EA e do parâmetro DPO demonstraram que o uso de filtros digitais, em determinadas frequências, produziu um sistema de detecção da queima mais eficiente. Além disso, foi desenvolvido um hardware microcontrolado e um software que coletam os sinais de EA (RMS) e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo por intermédio de um controlador digital de sinais (dsPIC). Em seguida, esses sinais foram processados por meio de um algoritmo de detecção de queima, gerando um sinal de controle, avisando o operador ou interrompendo o processo, além de disponibilizar informações sobre o monitoramento.

Palavras-chave: retificação, detecção de queima, monitoramento, microcontrolador, emissão acústica.

ABSTRACT

The result of the grinding process depends on the conditions of the grinding wheel surface. With use, the grinding wheel pores are impregnated with the chip, resulting in loss of ability to cut and thus increasing the temperature in the region of contact between the surface of the grinding wheel and the workpiece. This increase in temperature when excessive can cause burning surface or changes in the structure of the material. Thus, this paper aims to propose a method for detecting burning in the grinding process based on the analysis of the spectrum of the raw acoustic emission (AE) signal and application of digital filters, followed by hardware implementation. Experimental tests were performed using aluminum oxide grinding wheel and the CBN superabrasive resinoid in a grinding machine, where a test bench was developed. Data were collected using ABNT 1045 and VC131 steels. It was noted in the spectra of the AE signal frequency bands with significant magnitudes between 15kHz to 1MHz, and therefore, fifteen frequency bands were selected for this study. Buterworth type digital filters, bandpass, 6th order, were applied to the raw AE signal, and RMS AE values and DPO parameter were obtained with and without filtering. The results showed a more efficient burn detection system when using digital filtering at certain frequency bands. Additionally, a microcontroller hardware and software were developed, which collected the AE signals (RMS) and electric power from the induction motor drive of the wheel via a digital signal controller (dsPIC). Then, these signals were processed by a burn detection algorithm, generating a control signal when grinding burn occurs, making the operator aware of it or interrupting the process, in addition to provide information about the monitoring.

Keywords: grinding, burning detection, monitoring, microcontroller, acoustic emission.

Capítulo 1. Introdução

As empresas de manufatura enfrentam uma pressão cada vez maior sobre sua produção, gerada pela demanda por melhor qualidade do produto, maior variabilidade, redução dos custos e competição global, levando os fabricantes a buscar cada vez mais a automação dos meios de produção, como uma solução eficaz para atender estas demandas e se manterem competitivos (LIANG *et al.*, 2004). Os autores enfatizam que o sucesso da automação depende primeiramente da eficácia dos sistemas de monitoramento e controle do processo.

O sistema de monitoramento tem como função processar e interpretar as medidas obtidas pelo sensor (potência, força, emissão acústica) determinando o estado do processo. A função do sistema de controle é a manipulação das variáveis (ex: velocidade, profundidade de corte, etc.) para regular o processo (LANDERS *et al.*, 1999).

Buscando contribuir com a automação no processo de fabricação, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um método de detecção da queima da peça no processo de retificação plana.

Segundo Malkin (1989) a retificação é um processo abrasivo largamente empregado na indústria, quase tudo que nós usamos foi retificado em algum estágio da produção ou foi processado por máquinas que devido a sua precisão passaram por operações abrasivas durante sua fabricação. Entre os processos de usinagem é usualmente o mais caro por unidade de volume de material removido. Também apresenta algumas particularidades como várias arestas de corte, geometria irregular e pequena profundidade de corte que varia de grão para grão. Por isso a importância como processo de fabricação e a necessidade de estudos.

O processo de retificação requer um elevado grau de energia por unidade de volume de material removido. Praticamente toda esta energia é dissipada na forma de calor na zona de retificação, onde o rebolo interage com a peça. Isto conduz à geração de altas temperaturas, que podem causar vários tipos de danos térmicos, tais como a queima superficial, transformações metalúrgicas,

diminuindo a têmpera da camada superficial, possível re- endurecimento, tensões de tração residual, fissuras e redução da resistência à fadiga. Dano térmico é um dos principais fatores que afetam a qualidade da peça e limita as taxas de produção que podem ser alcançados através da retificação, por isso, é particularmente importante para compreender os fatores subjacentes que afetam as temperaturas na retificação. A partir de investigações metalúrgicas das superfícies retificadas em aços endurecidos relatado em 1950, foi conclusivamente demonstrado que a maior parte dos danos na retificação é de origem térmica. A primeira tentativa de correlacionar reais temperaturas de retificação, com mudanças estruturais metalúrgicas na peça foi relatada cinco anos mais tarde (MALKIN; GUO, 2007).

Os sistemas de monitoramento da retificação devem ser capazes de detectar com elevada confiabilidade os problemas (vibração, queima e deterioração da rugosidade superficial do rebolo) que podem ocorrer durante o processo, de modo que a produção de peças fora do padrão especificado possa ser minimizada (INASAKI; KARPUSCHEWISKI, 2001).

A tendência mundial é produzir peças sempre mais sofisticadas com tolerâncias mais apertadas e com acabamento superficial de alta qualidade (MONICI *et al.*, 2006).

Sinais de emissão acústica e potência de corte combinados têm sido utilizados com sucesso na determinação de parâmetros indicativos da queima. Estes sinais tratados e combinados podem possibilitar a implementação de um sistema de controle em tempo real da queima, otimizando o processo de retificação (AGUIAR *et al.*, 2006). Neste trabalho é aplicada essa técnica utilizando os sinais de potência e emissão acústica, sendo esses os mais utilizados na indústria segundo Byrne (1995).

1.1. Objetivo do Trabalho

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um método de detecção da queima de peças no processo de retificação plana baseado na análise

do espectro do sinal de emissão acústica (EA) puro e na aplicação de filtros digitais, com posterior implementação por hardware.

1.2. Motivação

A dificuldade fundamental de controlar os danos causados no processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo.

Com isso, a implementação de sistemas de monitoramento de queima superficial de peças na operação de retificação pode possibilitar uma melhoria na confiabilidade das operações, aliada a um aumento de qualidade da peça e redução de custos. Porém, ainda são encontradas dificuldades na sua implementação devido a diversos fatores e à falta de critérios bem definidos para a sua perfeita aplicação prática. Este fato caracteriza bem a necessidade de uma ferramenta computacional capaz de suprir esta limitação.

1.3. Estrutura do Documento

A estrutura deste trabalho conta com cinco capítulos:

- O primeiro capítulo 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.
- O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre o sistema de retificação, com foco no monitoramento e controle de danos térmicos ocorridos nesse processo. Neste capítulo são comentados ainda os tópicos sobre a aquisição de dados e processamento de sinais necessários para a fundamentação do presente trabalho.
- O terceiro capítulo reporta a metodologia utilizada, com a implementação de cálculos num microcontrolador e a preparação e a realização dos ensaios de retificação, de rugosidade e de microdureza.

- O quarto capítulo, apresenta os resultados e discussões, ilustra e descreve as análises visuais das peças utilizadas nos ensaios, as medidas de rugosidade e de microdureza, assim como os resultados dos processamentos dos sinais realizados com as ferramentas estatísticas. Também mostra os resultados apresentados no monitoramento com o microcontrolador.
- Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho.
- São apresentados ao final do trabalho a bibliografia consultada e referenciada bem como os anexos finalizam o trabalho.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

2.1. Elementos Básicos Envolvidos no Processo de Retificação

A retificação é uma operação de usinagem de alto custo que deveria ser utilizada tão eficientemente quanto possível. Ao contrário dos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como o fresamento ou torneamento, na retificação a remoção de cavaco é realizada por uma infinidade de arestas de corte geometricamente não definidas. Além disto, têm-se seções e comprimentos de cavaco variáveis e distintos. Procedendo a uma análise estatística dos processos de remoção de cavaco, obter-se-ão leis equivalentes às que podem ser deduzidas da cinemática do processo. A pesquisa bibliográfica descrita a seguir objetiva a formação de uma base teórica para aplicação no procedimento experimental desta pesquisa.

A tendência mundial é produzir peças sempre mais sofisticadas com tolerâncias mais apertadas e com acabamento superficial de alta qualidade (MONICI *et al.*, 2006).

Diante dessa realidade, a retificação ocupa posição de destaque e é uma das mais importantes operações de usinagem empregada na produção de peças com dimensões mais exatas e de ótimo acabamento, pois sua utilização é tanto para remover sobre metal em peças com geometria especiais quanto para introduzir geometria desejada e propriedades superficiais que geralmente não poderiam ser obtidas por outros processos convencionais com geometria definida ou até mesmo por processos não convencionais de usinagem. A retificação, que já foi considerada somente como uma operação secundária de acabamento, tem sido amplamente empregada em varias etapas de fabricação (SHAW, 1996).

Segundo Malkin (1989), retificação é a designação para processos de usinagem que utilizam partículas abrasivas duras como o meio de corte. Isto é, o material é removido por meio da ação de grãos abrasivos que possuem alta dureza e que apresentam arestas que possuem formas e orientação irregulares.

Os métodos de retificação são todos similares. Geralmente é um rebolo o qual é pressionado contra uma peça com uma força perpendicular à zona de contato, e assim, o material é removido da interação peça e a ferramenta (LINDSAY, 1995).

As principais vantagens da retificação são: elevada exatidão das peças e a usinagem de materiais duros e frágeis. Mas apesar dessas vantagens, esse processo não é isento de problemas, sendo os mais comuns nas operações os danos térmicos na peça, difícil controle da rugosidade superficial, vibrações excessivas e desgaste prematuro da ferramenta abrasiva (MARINESCU *et al.*, 2007).

Fathallah *et al.*, (2009) descreveram que as operações de retificação envolvem a geração de grandes forças de corte e fluxo de calor o que pode causar efeitos negativos na integridade superficial das peças, como a queima superficial. Em razão disto, as pesquisas relacionadas à retificação aumentam a cada ano.

Ao se comparar a retificação com os processos de geometria definida, uma das principais diferenças que surge tem a ver com a velocidade de remoção do cavaco, sendo que, a velocidade do grão abrasivo pode chegar a ser até 10 vezes maior quando comparada com a velocidade utilizada no processo de torneamento. Igualmente, a energia total requerida para o processo de retificação é da ordem de 2 a 20 vezes maior que para outros processos de usinagem, para o mesmo volume de cavaco removido na unidade de tempo (DINIZ *et al.*, 2008). Este fato aliado às altas forças normais (radiais) empregadas gera altas temperaturas de corte (1000 a 1600°C), podendo atingir e superar sua temperatura de fusão, porém sem se fundir, pois o tempo de exposição a essa temperatura é curto.

Segundo Diniz *et al.*, (2008), a maior parcela do calor gerado no processo de retificação vai para a peça (85%). O rebolo é pouco afetado pelo calor, já que geralmente é feito de material refratário e possui uma área grande para dissipação do calor gerado (10%). A parcela de calor restante (5%) é transmitida para o cavaco. Diante disso, a alta parcela de calor recebida pela peça

pode gerar mudanças microestruturais numa camada superficial, erros de forma e dimensão, o qual se soma o estado do material que geralmente já foi tratado termicamente antes da retificação. Para minimizar os efeitos prejudiciais devidos ao calor gerado na peça é utilizado fluido de corte de maneira abundante e contínuo durante a remoção de material.

De uma maneira geral, segundo a intensidade do processo de retificação da superfície, são induzidas no componente diferentes características e propriedades físicas, mecânicas, metalúrgicas e químicas que podem levar a alterações no desempenho funcional (GRIFFITHS, 2001).

2.2. Parâmetros do Processo de Retificação

A retificação é um processo de usinagem usado na indústria metal mecânica em operações de acabamento de componentes de precisão, tais como os virabrequins de motores de combustão interna, que são retificados para atender às rígidas tolerâncias requeridas. Outros exemplos seriam os barramentos e prismas de precisão das próprias máquinas operatrizes, que são acabados em suas medidas finais por retificadoras planas e cilíndricas (SANTOS, 2007). No meio industrial, as peças usinadas geralmente são submetidas à retificação como última operação de acabamento. Dessa forma, o processo requer controle e atenção constantes, pois os danos à peça causariam a perda do valor agregado (oriundo de operações anteriores), sendo impossível recuperar as dimensões anteriores à retificação. A qualidade de peças retificadas, principalmente em operações manuais, depende em grande parte da experiência do operador. A utilização de materiais resistentes ao desgaste abrasivo, máquinas potentes e tecnologias mais adequadas leva a um aumento considerável na eficiência do processo (ARAÚJO, 2010).

Segundo Durgumahanti *et al.*, (2010), as vantagens relacionadas ao custo, assim como a qualidade final das peças viabilizam e incentivam o desenvolvimento de novas tecnologias, além da criação de novos métodos de acabamento. Para a melhor produtividade do processo de retificação, é necessário otimizar os parâmetros envolvidos, a fim de que todo o potencial possa ser

aproveitado. Sendo, ainda de acordo com os autores, a retificação é um processo muito complexo, com diversas variáveis dependentes entre si. Pesquisas têm sido conduzidas no que concerne à modelagem com base em diferentes parâmetros, tais como temperatura, força de corte, rugosidade, etc.

Segundo Marinescu *et al.*, (2007), o processo de retificação é composto por seis elementos básicos: máquina-ferramenta, neste caso a retificadora; o rebolo; peça a ser retificada; fluido de corte; atmosfera, isto é, a interação dos gases ambiente com os elementos de retificação e os resíduos provenientes da operação de retificação. A Figura 1 ilustra todos os elementos básicos de uma operação de retificação plana.

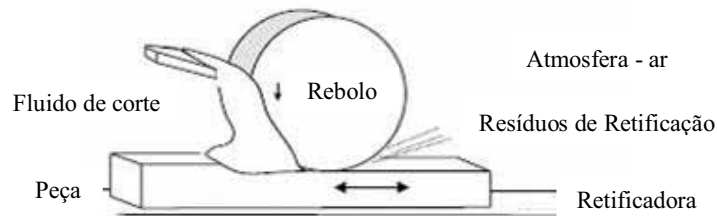


Figura 1- Os seis elementos envolvidos na retificação plana (MARINESCU *et al.*, 2007).

Existem vários tipos de operações de retificação e elas diferem uma das outras as quais variam de acordo com a forma do rebolo e a peça a ser retificada como também pelo movimento cinemático da peça e o cabeçote (MALKIN, 1989).

A Figura 2 ilustra a configuração da retificação tangencial plana representando a força tangencial (F_t), a força normal (F_n), a velocidade periférica de corte (V_s), velocidade da peça (V_w) e a profundidade de corte (a) no processo de retificação tangencial plana.

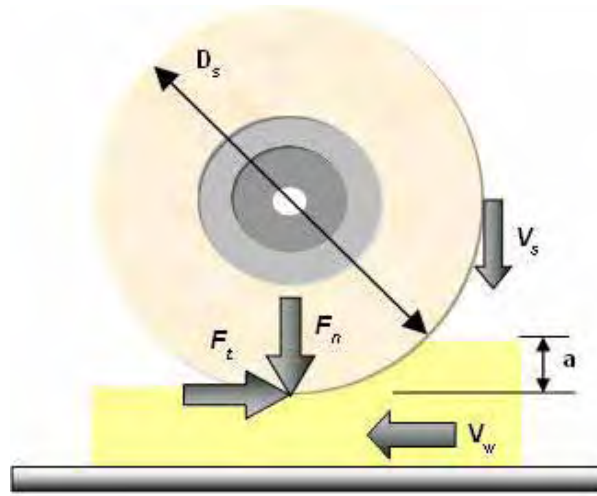


Figura 2 - Esquema ilustrativo de retificação plana (KING E HAHN, 1986 - adaptado).

A seguir, serão apresentados os parâmetros referentes ao processo de retificação.

A taxa de remoção de material Q_w é a quantidade de material removida por unidade de tempo, expressa em mm^3/s e pode se calculada através da Equação (1).

$$Q_w = a.V_w.b \quad (1)$$

Onde b é a largura de contato rebolo-peça [mm].

A taxa de remoção específica Q'_w (taxa de remoção volumétrica de material por unidade de largura do rebolo) pode ser obtida pela Equação (2).

$$Q'_w = a.V_w \quad (2)$$

A distância de contato da área de retificação (l_c) é a distância que o grão abrasivo percorrerá na superfície da peça, removendo o material devido ao deslocamento angular (θ). Seu valor pode ser calculado pela Equação

(3), onde a é a profundidade de corte [mm] e d_s é o diâmetro do rebolo [mm] (POLINI *et al.*, 2004).

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_s} \quad (3)$$

A rotação tem influência sobre o desempenho do rebolo e sobre a rugosidade. Um valor muito elevado pode provocar danos devido à intensidade do calor oriundo do atrito, bem como o surgimento de trincas.

2.2.1. Parâmetro G

Segundo Malkin (1989), o parâmetro G é definido como sendo a relação entre o volume de metal retificado e o desgaste volumétrico do rebolo. Este parâmetro é representado pela Equação (4):

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

Sendo: Z_w é o volume de metal retificado (mm^3)

Z_s é o volume de rebolo gasto (mm^3)

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 (MALKIN, 1989).

2.2.2. Vida 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 frequentemente 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 perda do diâmetro ou desgaste radial 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 integral de grãos ou grupos de grãos por uma sollicitação mecânica demasiada do ligante ou em decorrência da deterioração mecânica ou química do ligante.

A Figura 3 apresenta os tipos de desgaste do rebolo.

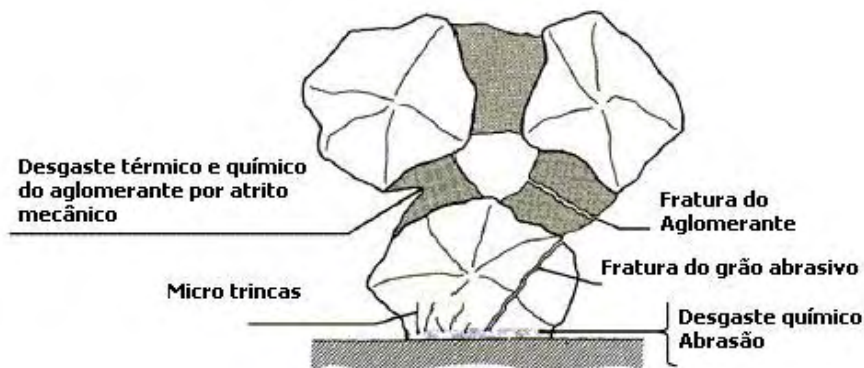


Figura 3 - Mecanismos de desgaste do rebolo (KÖNIG *apud* TAWAKOLI *et al.*, 2007 adaptada).

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 ou arredondadas, em virtude de uma maior ação da força, quebram e permitem a ação de novos gumes.

Segundo Marinescu (2007), fabricantes de rebolos e de máquinas retificadoras são geralmente os mais indicados para fazer previsões quanto ao desempenho do rebolo. As previsões são baseadas em testes de laboratório ou experiência anterior em aplicações comparáveis. Os testes laboratoriais tendem a reproduzir as condições ideais, mas podem cometer pequenos erros por deficiência na estrutura ou no uso de fluido refrigerante, etc. Na verdade, o autor testemunhou uma situação em que os resultados do laboratório e da vida real do rebolo em campo diferiram por um fator de 40. A perda da vida do rebolo no campo foi causada pela vibração da parte da fixação e erosão do rebolo e da pressão do fluido refrigerante excessivamente elevado. Dados laboratoriais foram capazes de informar ao operador que havia um problema importante e proporcionam evidências para solucionar o problema.

2.2.2.1. Operação de Dressagem

A dressagem é considerada diretamente responsável pela topografia dos rebolos, um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante as operações de retificação. A vida do rebolo, o tempo do 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 (SENA, 2007; MARINESCU *et al.*, 2007).

Após o uso o rebolo na retificação não se encontram em condições adequadas para nova utilização, pois podem apresentar gumes cegos e não estar numa forma geométrica 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, como apresentado na Figura 4 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, roletes de esmagamento dentre outros. Cada tipo apresenta vantagens específicas.

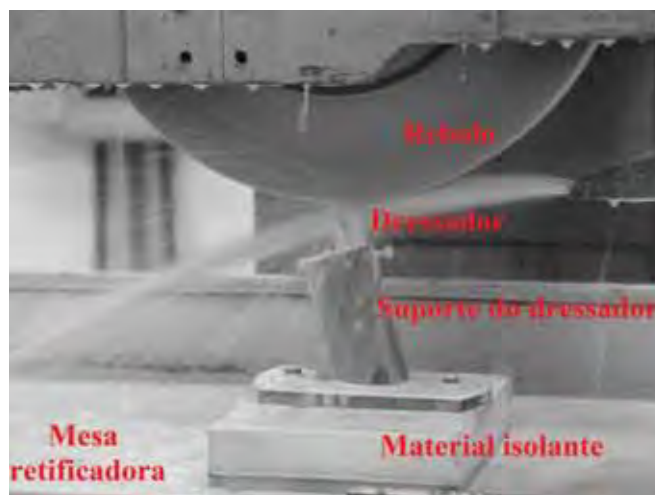


Figura 4 - Processo de dressagem (DOTTO, 2004 - adaptado).

As principais finalidades da operação de dressagem são: obtenção de concentricidade da face de trabalho do rebolo com o eixo de rotação;

perfilamento e avivamento da superfície de corte do rebolo para uma operação de forma; arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de corte do rebolo.

Segundo Hassui (2002), a definição do momento correto de dressagem do rebolo é fundamental no processo de retificação. Isso pode ser feito de maneira conservadora, ou seja, antes do fim da vida do rebolo. Desta forma, ocorrerá 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 rebolo 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.

Para que durante a dressagem seja possível a remoção de material do rebolo, os dressadores devem ser mais duros que o material do rebolo. Em decorrência disso, para a dressagem de rebolos convencionais são empregadas ferramentas de diamantadas. Além da dressagem do rebolo por corte, também é usual se empregar uma sobrecarga de retificação sobre o rebolo, produzindo um efeito de remoção de material de sua superfície do rebolo. Este procedimento permite que retificação de materiais extremamente duros, sob condições extremas de usinagem, sejam produzidas grandes forças de cortes nos contornos dos grãos abrasivos. Estas forças fazem com que os grãos abrasivos cegos lasquem, sendo expulsos do ligante.

2.2.2 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Malkin (1989), 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 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 (5):

$$h_{eq} = \frac{V_w}{V_s} a \quad (5)$$

Por se tratar de uma medida relativa à severidade das condições de corte, a espessura equivalente de corte correlaciona muito bem não somente as forças de retificação e energia, mas também outras características de desempenho, como a rugosidade e o desgaste do rebolo (MALKIN, 1989).

2.2.3. Profundidade de Corte

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 resultam 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 riscamento entre os cavacos removidos e a peça elevam a temperatura na região de corte, tendo como consequência a elevação de rugosidade, do nível de emissão acústica e da força de corte (normal e tangencial).

No processo de retificação, tem sido observado que a força de retificação é geralmente proporcional à quantidade de material removido, e, se a profundidade de corte é reduzida, a força diminui. Outro fator que influencia a força de retificação são as propriedades do material a ser retificado, a área de contato entre o rebolo e a peça, e a velocidade do eixo do rebolo (HEKMAN & LIANG, 1999).

Srivastava *et al.*, *apud* 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. Os autores concluem que o

empastamento aumenta com o aumento da profundidade de corte, mas não é influenciado pela velocidade da peça.

Segundo Lee (1998), com pequenas profundidades de corte, materiais frágeis estão num regime dúctil gerando cavacos mais contínuos. Quando a profundidade de corte é aumentada excedendo esse regime dúctil, começam a surgir danos a estrutura da subsuperfície do material. Esse ponto é conhecido como profundidade de corte crítica, que não é uniforme ao longo do material. Os exatos conceitos físicos da formação do regime dúctil não são ainda claramente explicados.

Uma retificação fica com menos danos quando o volume de material removido por grão do rebolo é pequeno o bastante com melhor rendimento da fratura exposta do grão. Na prática, isto significa manter a profundidade de corte de cada grão abaixo da transição dúctil-frágil. A fim de reduzir o tempo de manufatura e seus custos elevados, o processo necessita ser automatizado visando uma retirada maior de material, acelerando o processo através de profundidades de corte maiores. Para automatizar o regime dúctil, no caso de cerâmicas, a máquina deve ser equipada com sensores de emissão acústica bastante sensíveis à quebra da microestrutura cerâmica (AKBARI *et al.*, 1996).

2.2.4. Velocidade de Corte

Segundo Malkin *apud* 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, pelo 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.

2.2.5. Velocidade da Peça

Segundo Malkin *apud* 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, como são apresentados na Figura 3. Assim, a força em um grão abrasivo é pequena e atua durante um tempo longo (Figura 5a). 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, pelo 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 (Figura 5b). 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 (MALKIN, 1989).

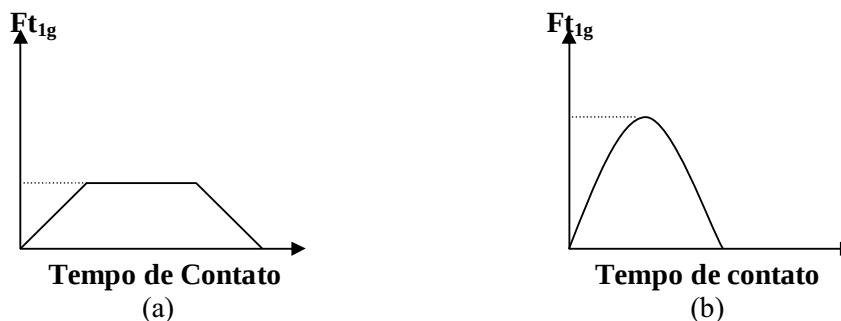


Figura 5- Influência do tempo de contato na força tangencial de corte em um grão abrasivo (F_{t1g}) (AGUIAR *et al.*, 1999).

2.2.6. Rugosidade

Rugosidade são imperfeições contidas em uma superfície, podendo ser mensurada com recursos e equipamentos apropriados. A importância do acabamento superficial aumenta quando cresce a precisão de ajuste entre as peças. Uma menor tolerância de ajuste não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado (MARTINS, 2008).

Quando as superfícies são observadas com recursos apropriados, revelam irregularidades. As orientações das irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem a superfície (OLIVEIRA, 2004). É importante lembrar que as superfícies reais de engenharia são compostas do perfil sem filtragem, ou seja, compostas de forma, ondulações e rugosidade.

A melhor maneira de analisar uma superfície está relacionada às orientações dos sulcos provenientes do processo de fabricação (WHITEHOUSE, 1994). Essas marcas oriundas dos processos de fabricação podem ser exemplificadas na Figura 6.

Paralelo		
Perpendicular		
Cruzado		
Multidirecional		
Particular		
Circular		
Radial		

Figura 6 - Tipos de acabamento superficial (WHITEHOUSE, 1994).

O comprimento, a forma e avanço do apalpador, as características do amplificador, a precisão do raio a ser medido e efeitos de filtragem mecânica são algumas das variáveis que podem afetar os resultados de uma medição de superfície (WHITEHOUSE, 1994).

2.2.6.1 Parâmetros de Superfície Geométrica

A rugosidade média (R_a) pode ser expressa como o desvio aritmético médio do perfil avaliado. A Figura 7 ilustra a obtenção da grandeza R_a .

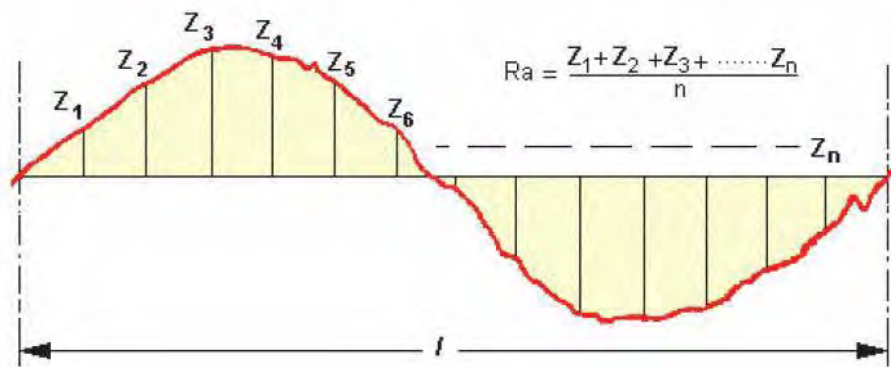


Figura 7 - Rugosidade média R_a (WHITEHOUSE, 1994).

Devido à variação do parâmetro R_a , é possível indicar se o processo mudou em alguma variável (velocidade de corte, quantidade de fluidos, etc.); no entanto o R_a é um parâmetro de natureza média e, dependendo do tipo de processo, é ideal que ele seja associado com outros parâmetros de rugosidade (MARTINS, 2008).

Matematicamente, a expressão da rugosidade média é dada pela Equação (6):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (6)$$

O parâmetro R_a tem a desvantagem de não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado. Sua aplicação dentro da indústria é grande e é, normalmente, utilizado no acompanhamento de vários processos de fabricação. Devido à variação do parâmetro R_a é possível indicar se o processo mudou em alguma

variável, como por exemplo, a velocidade de corte, quantidade de fluido, etc., (MARTINS, 2008).

Também conhecido como parâmetro R_{tm} , R_z (DIN) é a média de todos os valores de Z no comprimento de avaliação, em que Z é a altura máxima das rugosidades medidas no comprimento de amostragem. O parâmetro de rugosidade R_z fornece uma ideia mais clara para monitoração da variação do acabamento no processo de fabricação, visto que é a altura máxima do perfil analisado (MARTINS, 2008).

Fazendo uma comparação entre o parâmetro R_a e R_z , pode-se dizer que o parâmetro R_z é mais sensível às mudanças no acabamento superficial. A Figura 8 traz a análise da rugosidade de um perfil pelo parâmetro R_z .

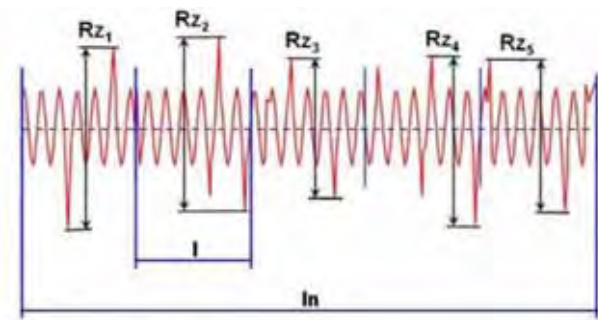


Figura 8 - Parâmetro R_z DIN (TAYLOR, 2000).

Sendo:

ln = comprimento de avaliação

l = comprimento de amostragem (cut-off)

A Equação que define a rugosidade média R_z ou R_{tm} é dada pela relação:

$$(R_z(DIN) = R_{tm}) = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 \dots Z_n}{n} \quad (7)$$

A aplicação do parâmetro R_z é semelhante à aplicação de outro parâmetro, como o R_t (definido em seguida), sendo que a diferença entre eles está na consequência de uma amplitude isolada entre picos e vales, e na amplitude média entre todos os picos e vales (MARTINS, 2008).

A rugosidade R_t , mostrada na Figura 9, corresponde à distância entre o pico mais alto e vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_n).

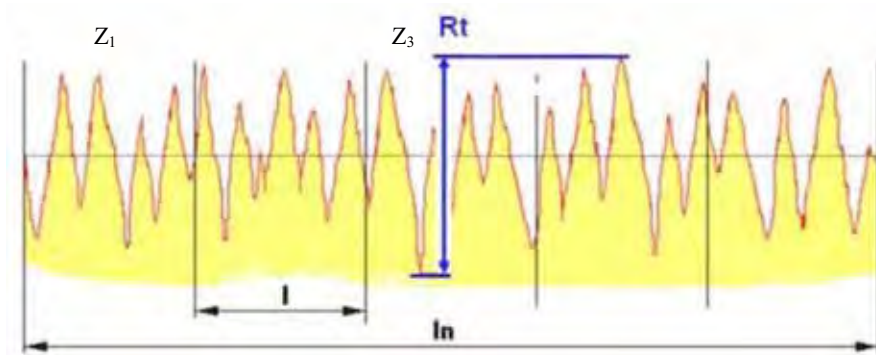


Figura 9 - Parâmetro R_t DIN (TAYLOR,2000).

Sendo:

l_n = comprimento de avaliação

l = comprimento de amostragem (cut-off)

2.2.7. Dureza por Microindentação Vickers

A dureza é uma propriedade mecânica que avalia a resistência à deformação plástica localizada. Esta propriedade é obtida através da aplicação de uma carga a um indentador sobre a superfície do material. Dividindo o valor da carga aplicada pela área residual projetada de indentação obtém-se o valor da dureza.

O ensaio de dureza é amplamente aplicado em pesquisas e no ramo industrial, por ser um método barato e de rápida execução, sendo possível utilizar aparelhos portáteis e de fácil manuseio. Existem vários testes qualitativos

para a análise de dureza de materiais, entre os quais se pode citar a dureza Rockwell, a Brinell, e a microdureza Knoop e Vickers.

A dureza por microindentação Vickers é obtida com um penetrador de diamante em forma de pirâmide, de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas (Figura 10a, Figura 10b e Figura 10c). É utilizada carga menor que 1kgf, a qual produz uma impressão em forma de losango regular (FERREIRA, 2004).

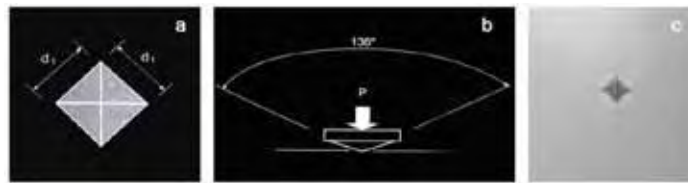


Figura 10 - (a) Base quadrada; (b) Angulação; (c) Indentação Vickers (FERREIRA, 2004).

Durante a retificação, dependendo da temperatura alcançada no processo de corte pode ocorrer alterações de dureza na peça. A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, relacionado com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de átomos de carbono, sendo dependente da temperatura e do tempo de corte do processo (MALKIN, 1989).

2.3. A Queima na Retificação

A queima na retificação ocorre durante o processo de corte, quando a quantidade de energia gerada na zona de contato produz um aumento na temperatura suficientemente elevada para provocar uma mudança de fase no material usinado. Esse fenômeno tem sido investigado principalmente na retificação de carbono puro e ligas de aço, embora seja também um problema com alguns outros materiais metálicos. A queima superficial visível nos aços é caracterizada pela cor azulada sobre a peça, que é uma consequência da formação de camada de óxido. A coloração da tempera é geralmente removida pelo spark-out no final do ciclo de retificação, especialmente a cilíndrica, mas este efeito é

apenas visual, e a ausência de óxidos na superfície da peça não significa necessariamente que a queima superficial não ocorreu (MALKIN, 1992).

A queima é esperada quando uma temperatura crítica ($\sim 720^\circ\text{C}$) é ultrapassada na zona de contato da peça com o rebolo (MALKIN, 1989; NATHAN *et al.*, 1999; KWAK *et al.*, 2001).

A queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado. Através da análise da distribuição de microdureza em peças que apresentam queima visível, nota-se que estas apresentam reaustenitização. Um aço endurecido, retificado sem queima, apresenta uma pequena diminuição de dureza na superfície devido ao revenimento. Ocorrendo a queima, há a tendência de um aumento da dureza superficial e queda da dureza subsuperficial como é mostrado na Figura 11. Este aumento de dureza se deve a reaustenitização, seguida de formação de martensita não revenida (MALKIN, 1989).

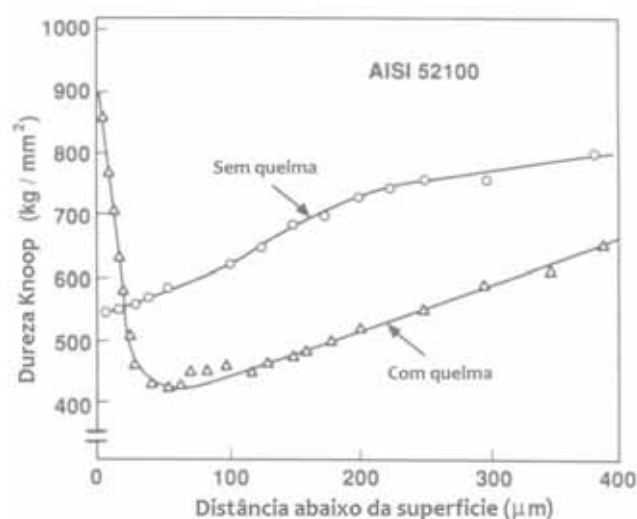


Figura 11 - Microdureza em função da profundidade abaixo da superfície com e sem queima (Malkin, 1989 – Adaptado).

De acordo com Ali e Zhang (2004) existem modelos térmicos analíticos para a previsão da queima superficial durante a retificação, porem são limitados por causa de sua dependência de parâmetros que não são facilmente obtidos na prática. Um exemplo de modelo térmico utilizado na retificação é o da

teoria do movimento da fonte de calor com diferentes condições de contorno para estimar a distribuição de temperatura no interior da zona de retificação. Esta distribuição é então utilizada para prever a geração de tensões residuais, uma fina película de ebulição, a ocorrência da queima superficial, ou outras características de integridade de superfície. Embora estes modelos contribuam para uma melhor compreensão dos fundamentos da retificação, eles exigem o conhecimento de parâmetros tais como partição de energia, consumo de energia real da máquina, comprimento de contato real, espaçamento inter-granular, ou desgaste superficial. Muitas destas informações não são obtidas facilmente em um ambiente de chão de fábrica. Além disso, propriedades térmicas de muitos materiais utilizados no processo de retificação como fluidos refrigerantes e grãos abrasivos não são conhecidas. Consequentemente, os engenheiros continuam a contar com a experiência e as habilidades dos operadores de máquina. A dificuldade de controlar os danos térmicos causados durante o processo de retificação é a ausência de um modelo confiável que apoie a prevenção de danos superficiais causados às peças.

Segundo Bell *et al.*, (2011), diagramas do limiar de queima são úteis para a previsão de dano induzido termicamente na retificação e foram originalmente desenvolvidos para descrever o processo de retificação superficial. Com o desenvolvimento de novos processos de retificação com alto nível de remoção de material como o HEDG (*High Efficiency Deep Grinding*), a prevenção do dano térmico na peça é motivo de grande preocupação. O HEDG é um processo de retificação que atinge altas taxas de remoção de material e permite uma melhora na eficiência do processo em controlar a integridade da superfície da peça; seu princípio é baseado em torno da mudança nas características térmicas do processo de retificação em números de *Pecle* (número adimensional relevante no estudo de fenômenos de transporte em fluxos fluidos), onde menos calor é transferido para a peça. Diagramas de limite de queima são válidos para números de *Peclet* abaixo de 50, sendo este muito abaixo dos valores esperados em HEDG.

2.3.1. Energia Específica de Retificação

Segundo Polini e Turchetta (2004), os modelos da força e da energia específica de corte possuem um papel importante na retificação, em função da espessura equivalente de corte.

A energia mecânica introduzida no processo pode ser dividida em quatro regiões conforme mostra a Figura 12. Em decorrência dos poucos gumes afiados, a maior parte da energia é transformada em energia térmica pelo atrito no flanco dos gumes e em deformação plástica na região superficial da peça. Além disso, tem-se a produção de calor ou a transformação de energia em calor, nas faces do grão, durante a remoção de cavaco propriamente dito. Deve-se mencionar que uma parte da energia, principalmente quando se trata de rebolos ligados, é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante sobre a superfície da peça (KÖNIG *apud* SEVERIANO, 2002).

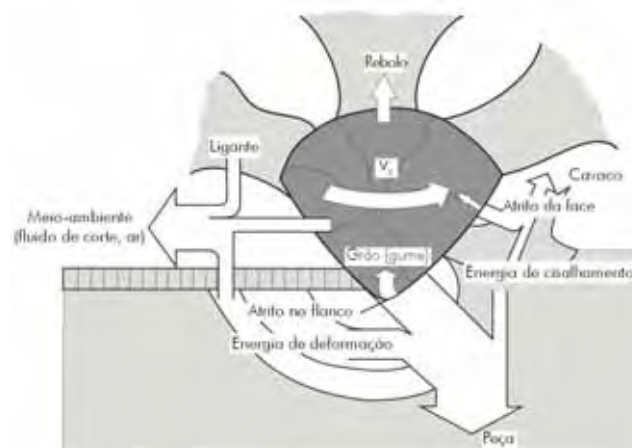


Figura 12 - Distribuição de energia térmica na retificação (König *apud* Severiano, 2002).

Na usinagem com ferramentas de geometria não-definida, as principais fontes de calor se encontram abaixo do gume, de forma que a maior parte do calor, inicialmente, flui para dentro da peça e lá provoca um aumento localizado de temperatura. Esse aumento de temperatura pode, dependendo da sua ordem de grandeza e do tempo de atuação, provocar mudanças na estrutura cristalina do material da peça, bem como fenômenos de oxidação superficial da peça (camada termicamente afetada pelo calor). Pela utilização de fluidos de

corte, é possível reduzir o tempo de atuação do calor e a magnitude do aumento de temperatura de uma maneira favorável. Assim, a lubrificação do fluido de corte leva a uma redução do atrito e, com isso, reduz a geração de calor, ao passo que o fluido, propriamente dito faz com que se dê uma remoção rápida do calor da peça. Além disso, a lubrificação traz outra vantagem como a redução do desgaste do grão abrasivo (KÖNIG *apud* SEVERIANO, 2002).

Segundo Malkin e Guo (2007), rebolos convencionais de óxido de alumínio utilizados no processo de retificação produzem mais danos térmicos em comparação com rebolos superabrasivos de CBN, pois as temperaturas são mais altas induzindo assim os danos térmicos. O fato do rebolo superabrasivo de CBN reduzir a ocorrência de dano térmico pode ser atribuído à condutividade térmica muito elevada dos grãos, de modo que uma maior quantidade de calor é conduzida para o rebolo, em vez de ir para a peça. A partição de energia é tipicamente cerca de 20% ou menos com rebolos de CBN vitrificados e galvanizados devido ao uso adicional de fluido refrigerante na zona de retificação.

2.3.2. Emissão Acústica e Potência na Retificação

O sinal de emissão acústica é o resultado de uma rápida liberação de energia que se propaga na forma de uma onda elástica longitudinal transiente em corpos sólidos e pode ser detectada por sensores de emissão acústica. Ela ocorre de modo semelhante em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A fonte da emissão acústica em corpos sólidos pode ser um agente externo – impacto de um corpo externo sobre o corpo na qual está sendo verificada a emissão acústica – ou uma fonte interna – deformação plástica, fratura, formação de uma trinca, transformação de fase e outros (LIAO *et al.*, 2006).

As ondas de emissão acústicas possuem frequências na faixa de 50 kHz a 1000 kHz, o que supera a faixa de frequência de muitos ruídos advindos de fontes exteriores ao processo em análise. Por isto, é um método sensível e adequado para o monitoramento do processo de retificação (SENA, 2007).

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

Sensores de emissão acústica têm sido utilizados na detecção de contato entre o rebolo e dressador (OLIVEIRA *et al.*, 1994; KARPUSCHEWSKI & INASAKI, 2000), no monitoramento da profundidade de dressagem (INASAKI, 1985), monitoramento da ponta do dressador (INASAKI, 1985; WEBSTER *et al.*, 1994), e no diagnóstico de falhas na dressagem (KARPUSCHEWSKI & INASAKI, 2000; KONIG & MEYEN, 1990; KWAK & HA, 2004; LEE *et al.*, 2006).

Por outro lado, o consumo da potência de usinagem e as forças de retificação são parâmetros característicos da transferência de energia na área de contato (BRINKSMEIER *et al.*, 1998). De acordo com KWAK & HA (2004), a potência de usinagem tem sido usada como uma forma de monitoramento do processo de retificação. CHEN *et al.*, (1996) reportaram que o efeito das condições de retificação na força de corte e potência está relacionado com a espessura do cavaco, e observou-se que a força de corte e potência podem estar relacionados com a operação de dressagem, considerando a densidade efetiva das arestas de corte na superfície do rebolo.

Kwak & Ha (2004) reportaram que o sinal de potência de corte observado consiste da potência estática e dinâmica, sendo que a primeira é a potência do ponto de início ao ponto de acomodação, e apresenta um nível absoluto de potência gerado na zona de usinagem. Já a potência dinâmica é uma componente de potência de alta frequência, e flutua em torno do nível da potência estática. Normalmente, a potência estática permanece constante com uma pequena variação do processo, mas quando uma falha ocorre o nível desta potência é alterado. Na ocorrência de vibração e queima, a potência estática e dinâmica apresenta uma amplitude bem diferente daquela do estado normal de operação.

Assim, estados de usinagem podem ser detectados pelo monitoramento da potência estática e dinâmica.

2.3.3. Monitoramento da Queima

Tönshoff *et al.*, (2000) afirmam que o sinal de EA para avaliação do comportamento do processo de usinagem tem sido muito utilizado, sendo um dos métodos de monitoramento mais estudado nos últimos anos. O uso de sensores de EA no processo de retificação permite o monitoramento contínuo, sem a necessidade de interferência ou interrupção durante o corte.

O valor médio quadrático (RMS) do sinal de emissão acústica ainda tem sido o principal parâmetro estudado em pesquisas sobre queimas na retificação, em um intervalo de frequência previamente selecionado. Este sinal é um parâmetro satisfatório devido aos sinais ricos em ondas sonoras, transportando grande quantidade de informações úteis (AGUIAR *et al.*, 1999). Atualmente o uso de sinais de emissão acústica é empregado com sucesso por pesquisadores como Liao (2010) e Wegener *et al.*, (2011) para o monitoramento de operações de engenharia como a retificação.

Uma técnica de diagnóstico de vibração e queima foi aplicada por Kwak & Há (2004) no processo de retificação, empregando um sensor de emissão acústica com resposta em frequência para medir os sinais gerados durante o processo de retificação. Foram calculados os valores do pico máximo do sinal RMS, FFT (*Fast Fourier Transform*) do sinal e o desvio padrão do sinal de emissão acústica. Esses valores foram introduzidos em uma rede neural, sendo as saídas do sistema: condição normal, queima e vibração. O percentual de acerto dos dados inferidos para a rede chegou a 90%.

Liao *et al.*, (2006) extraíram características do sinal de emissão acústica coletados a 1MHz no processo de retificação da alumina com rebolo diamantado de liga resinóide, e aplicou em um algoritmo genético adaptativo para extrair características afim de distinguir diferentes estados da ferramenta de corte.

Em 2007, Liao *et al.*, propuseram um novo método, onde primeiro eram extraídas as informações do sinal de emissão acústica aplicando correlação, e depois os dados eram introduzidos no algoritmo adaptativo. Para uma taxa maior de remoção o algoritmo conseguiu acertar 97%, e para uma baixa taxa de remoção a eficiência caiu para 86,7%. Liao *et al.*, (2010) monitoraram a

condição da ferramenta de corte extraindo características novamente da emissão acústica aplicando em algoritmos que serviam como classificadores. Os resultados mostraram a eficácia da extração e seleção de características da emissão acústica para o monitoramento da queima.

2.3.4. Parâmetros Estatísticos para a Detecção da Queima

Segundo Aguiar *et al.*, (2002) e Tönshoff *et al.*, (2000), os sinais de emissão acústica e de potência elétrica fornecem uma variedade de informações sobre o processo de retificação. No entanto, uma análise mais rigorosa pode ser realizada por meio do tratamento dos sinais com a ajuda de parâmetros estatísticos. Com a ajuda de um software de manipulações matemáticas estes sinais podem ser tratados afim de se obter informações tais como o valor RMS, desvio padrão, autocorrelação, FFT, etc. Emissão acústica (EA) pode ser definida como ondas de tensão elásticas geradas pela rápida libertação de energia de deformação interna de um material submetido a um estímulo externo. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos sobre a superfície do material que podem ser detectadas por um sensor piezo-elétrico que transforma os deslocamentos em sinais elétricos (TÖNSHOFF *et al.*, 2000). A gama de frequência desses sinais variam de 50 kHz a 2MHz, que está acima da faixa de muitos ruídos originários de fontes externas ao processo de retificação. Assim, é um método sensível e adequado para monitorar o processo de retificação (TÖNSHOFF *et al.*, 2000; LIU *et al.*, 2006).

O parâmetro que tem sido estudado predominantemente em pesquisas anteriores usando emissão acústica tem sido a raiz média quadrática (RMS) do sinal de EA (EARMS) filtrada através de uma faixa de frequência cuidadosamente selecionada. Este sinal tem sido um bom parâmetro para estudo, uma vez que o processo de retificação é muito rico em ondas sonoras, contendo assim uma grande quantidade de informação acústica disponível (LIU *et al.*, 2006).

O valor RMS do sinal puro de EA pode ser expresso pela equação (8).

$$EA_{RMS} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} EA^2(t).dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N EA^2(i)} \quad (8)$$

Onde:

T : intervalo do tempo para o cálculo do valor RMS;

T_0 : ponto de início de análise no tempo para cálculo do valor RMS;

N : número discreto de dados do sinal EA no intervalo de tempo T ;

EA : sinal puro ou bruto;

EA_{RMS} : valor RMS.

De acordo com Aguiar *et al.*, (2002), a análise do sinal RMS da emissão acústica combinado com o sinal de potência de corte durante a retificação, pode fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. Dessa maneira, a estatística DPO consiste na relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e o valor máximo da potência de corte na passada do rebolo. Essa estatística é determinada pela Equação (9).

$$DPO = EA_{RMS} * POT_{MAX} \quad (9)$$

Onde:

EA_{RMS} : desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica;

POT_{MAX} : máximo valor de potência em uma passada de retificação.

2.4. Análise de Sinais no Domínio da Frequência

Na prática, a maioria dos sinais está no domínio do tempo na sua forma original e possui uma variável independente que é o tempo e uma variável dependente que é a amplitude.

As transformadas permitem que um sinal no domínio do tempo possa ser representado no domínio da frequência. A seguir serão descritas duas das principais técnicas de decomposição espectral de sinais, a saber: a transformada de Fourier e a transformada rápida de Fourier.

2.4.1. Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Um sinal obtido a partir de uma placa de aquisição de dados fornece amostras cuja representação esta no domínio de tempo. Esta representação fornece as amplitudes do sinal nos instantes de tempo durante o qual ele foi amostrado. No entanto, em muitos casos, se deseja saber o conteúdo de frequência de um sinal, em vez das amplitudes das amostras individuais. A representação de um sinal em termos das suas frequências individuais é conhecida como sinal no domínio da frequência. A representação do sinal no domínio da frequência pode dar uma ideia mais clara sobre o sinal e sua fonte.

O algoritmo utilizado para transformar as amostras do domínio do tempo para o domínio da frequência é conhecido como a Transformada Discreta de Fourier ou DFT. A DFT estabelece a relação entre as amostras de um sinal no domínio do tempo e a sua representação no domínio da frequência. A DFT é amplamente utilizada nos campos da análise espectral, mecânica aplicada, acústica, processamento de imagens, análise numérica, instrumentação e telecomunicações.

Imagine N amostras de um sinal a partir de uma placa de aquisição de dados. Se aplicar a DFT em N amostras do sinal representado no domínio do tempo, o resultado é também de comprimento N amostras, mas a informação nela contida é a representação no domínio da frequência. A Figura 13 mostra um sinal no domínio do tempo em (a) e no domínio da frequência em (b).

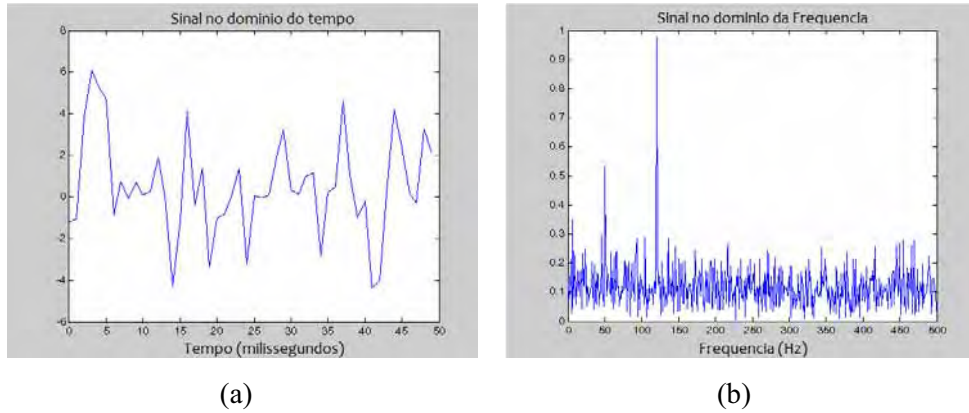


Figura 13 - Sinal no domínio do tempo (a) e no domínio da frequência (b) – Adaptado de (CHUGANI *et al.*, 1998).

Se o sinal é amostrado a uma taxa de amostragem de f_s Hz, então o intervalo de tempo entre as amostras (isto é, o intervalo de amostragem) é Δt , em que:

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (10)$$

As amostras dos sinais são indicadas por $x[i]$, $0 \leq i \leq N-1$ (ou seja, um total de N amostras). A Transformada Discreta de Fourier é definida por:

$$X(k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) e^{-j2\pi i k / N} \quad (11)$$

Para $k=0,1,2,3,\dots,N-1$

A equação (11) é aplicada a essas N amostras, sendo a saída resultante ($X[k]$, $0 \leq k \leq N-1$) a representação no domínio de frequência de $x[i]$. Nota-se que ambos os sinais x no domínio do tempo e X no domínio da frequência possuem um total de N amostras. De forma análoga ao espaçamento de tempo Δt entre as amostras de x no domínio do tempo, ocorre um espaçamento em frequência entre os componentes de X no domínio da frequência dado por:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t} \quad (12)$$

O espaçamento em frequência (Δf) é também conhecido como a resolução da frequência. Para aumentar a resolução da frequência (diminuir Δf) é necessário aumentar o número de amostras N (com f_s constante) ou diminuir a frequência de amostragem f_s (com N constante) (CHUGANI *et al.*, 1998).

2.4.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Embora a transformada discreta de Fourier (DFT) é a técnica matemática mais direta para se determinar o conteúdo em frequência de uma sequência no domínio do tempo, ela é ineficiente. A implementação direta da DFT de um conjunto de dados N requer aproximadamente N^2 operações complexas, e o processo se torna bem demorado.

Um artigo publicado em 1965 por Cooley e Tukey descreve um algoritmo muito eficiente para implementar a DFT, o qual é conhecido por FFT (fast Fourier transform). Antes do advento da FFT, o cálculo de milhares de pontos da DFT levava muito tempo, o que tornava o seu uso apenas para grandes centros computacionais.

Quando o tamanho da amostra (N) de um sinal é em potência de 2 (128, 256, 512, etc), o número de cálculos da DFT pode ser reduzido a aproximadamente $(N/2)\log_2(N)$, tornando o processo computacional da DFT muito mais rápido.

Muito tem sido escrito sobre a FFT, e o desenvolvimento desse algoritmo tornou a disciplina Processamento Digital de Sinais muito mais acessível com o uso da análise de Fourier (LYONS, 2001; CHUGANI *et al.*, 1998).

2.4.3. Teorema da Amostragem

De acordo com Chugani *et al.* (1998), a taxa na qual se amostra um sinal analógico na entrada de um conversor analógico-digital é outro parâmetro importante em sistemas com entrada analógica. A taxa ou frequência de amostragem determina a rapidez com que uma conversão ocorre em um conversor analógico-digital. Uma taxa rápida de amostragem coleta mais pontos em um dado tempo e pode constituir uma representação melhor do sinal original do que uma taxa lenta de amostragem. Amostragem muito lenta pode resultar em uma representação de baixa qualidade do sinal analógico.

A Figura 14 mostra um sinal amostrado adequadamente bem como outro sinal amostrado muito lentamente (*undersampling*). Com o efeito do *undersampling*, o sinal aparece como se tivesse uma frequência diferente daquela do sinal original. Esse tipo de distorção de um sinal é chamado de *aliasing*.

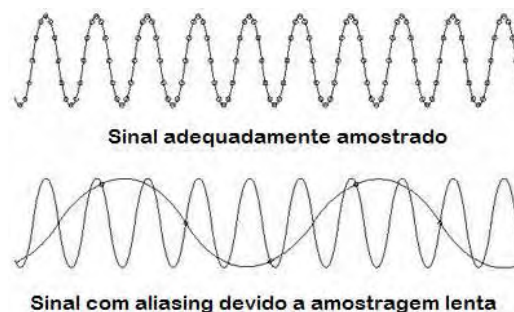


Figura 14 - Efeitos de diferentes frequências de amostragem (Adaptado de Chugani *et al.*, 1998)

O teorema da amostragem, também conhecido como teorema de Nyquist-Shannon, mostra que um sinal analógico $x(t)$, limitado em banda, que foi amostrado, pode ser perfeitamente recuperado a partir de uma sequência infinita de amostras, se a taxa de amostragem (f_s) for maior que duas vezes a maior frequência (F_m) contida no sinal analógico original. No entanto, se um sinal contiver uma componente exatamente em F_m Hertz, e amostras espaçadas de

exatamente $F_m/2$ segundos, não se consegue recuperar totalmente o sinal (Ogata, 1995).

Interpretações mais recentes do teorema são cuidadosas ao excluir a condição de igualdade, isto é, a condição de que $x(t)$ não contém frequências maiores ou iguais a F_m . Tal condição é equivalente à exceção prevista por Shannon, quando uma função inclui uma componente estável senoidal exatamente na frequência F_m . A frequência de Nyquist é definida como metade da frequência de amostragem de um sistema de tempo discreto (Ogata, 1995).

2.5. Filtros Digitais

De acordo com Smith (1999), filtros digitais é uma parte muito importante do Processamento Digital de Sinais. Na realidade, seu extraordinário desempenho é uma das razões chave que levou o DSP (Processamento Digital de Sinais) a se tornar tão popular.

Os filtros têm duas finalidades: separação de sinais e restauração de sinais. A separação de sinais é necessária quando um sinal foi contaminado com uma interferência, ruído ou outra fonte de sinal. Por exemplo, imagina-se um dispositivo para medir a atividade elétrica do coração de um bebê (EKG) enquanto ele ainda está no ventre da sua mãe. O sinal puro será provavelmente corrompido pela respiração e batimento cardíaco da mãe. Portanto, um filtro deve ser usado para separar estes sinais de forma que eles possam ser individualmente analisados.

A restauração de sinais é usada quando um sinal foi distorcido de alguma maneira. Por exemplo, uma gravação de áudio feita com um equipamento de baixa qualidade deve ser filtrada para melhorar a representação do som deixando o mais próximo ao original. Outro exemplo é a nitidez de uma imagem adquirida com uma lente fora de foco, ou mesmo um tremor na câmera. Neste caso filtros também devem ser usados.

Esses problemas podem ser resolvidos tanto com filtros analógicos quanto digitais. A dúvida mais comum é qual o melhor tipo de filtro: analógico ou digital? Os filtros analógicos são baratos, rápidos e tem uma grande

abrangência em amplitude e frequência. Os filtros digitais, em comparação, são amplamente superiores em termos de desempenho, podendo se tornarem milhares de vezes melhores em desempenho que os filtros analógicos.

Com filtros analógicos, a ênfase está no tratamento das limitações da eletrônica, como a precisão e a estabilidade de resistores e capacitores. Em comparação, os filtros digitais são tão bons que o desempenho do filtro é frequentemente ignorado. A ênfase, nesse caso, muda para as limitações dos sinais, e as questões teóricas relacionadas ao processamento desses sinais.

Os filtros possuem característica de respostas muito importantes para análise, projeto e implementação, as quais são resposta ao degrau, resposta ao impulso e resposta em frequência. Cada uma dessas respostas contém informação completa sobre o filtro de uma forma particular. Se uma dessas três formas é especificada, as outras duas são fixadas e podem ser calculadas diretamente. Todas essas três representações são importantes, porque elas descrevem como o filtro reagirá sob diferentes circunstâncias.

A maneira mais direta de se implementar um filtro digital é pela convolução do sinal de entrada com a resposta ao impulso do filtro digital. Todos os possíveis filtros lineares podem ser realizados dessa maneira.

Existe também outra maneira de se obter filtros digitais, a qual é chamada de recursão. Filtros recursivos são uma forma eficiente de obter resposta ao impulso longa, sem a necessidade de realizar a convolução. Eles possuem execução muito rápida, mas seu desempenho e flexibilidade são menores do que outros filtros digitais. Os filtros recursivos também são chamados de filtros com resposta ao impulso infinita (IIR), pois a resposta ao impulso possui decaimento exponencial. Isto distingue esses filtros daqueles que são obtidos por convolução, e que são chamados de filtros com resposta ao impulso finita (FIR).

Os tipos de filtros mais comuns são: passa-baixa, passa-alta, passa-banda, e rejeita-banda, como mostra a Figura 15.

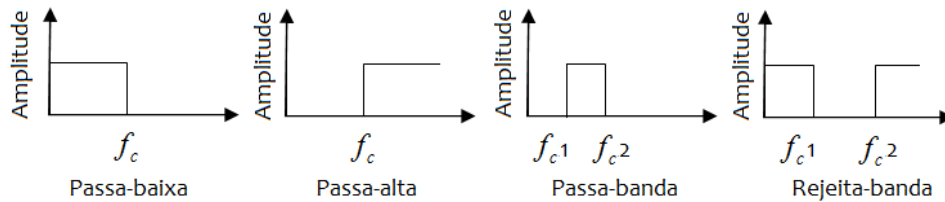


Figura 15 - Tipos de filtro (Chugani *et al.*, 1998 -adaptado)

2.5.2. Filtros Butterworth

Quanto aos tipos de filtro comumente utilizados, pode-se citar o Butterworth, que é conhecido por possuir a resposta mais plana por não apresentar oscilação (ripple) em ambas as bandas. Assim, sua resposta em frequência é caracterizada uma curva suave em todas as frequências (Chugani *et al.* (1998)). A Figura 16 mostra a resposta de um filtro passa-baixa Butterworth de diferentes ordens. O dimensionamento do eixo x está em termos de f / fs (onde fs é a frequência de amostragem), enquanto que o eixo y está dimensionado de modo que o ganho é unitário na faixa de baixas frequências.

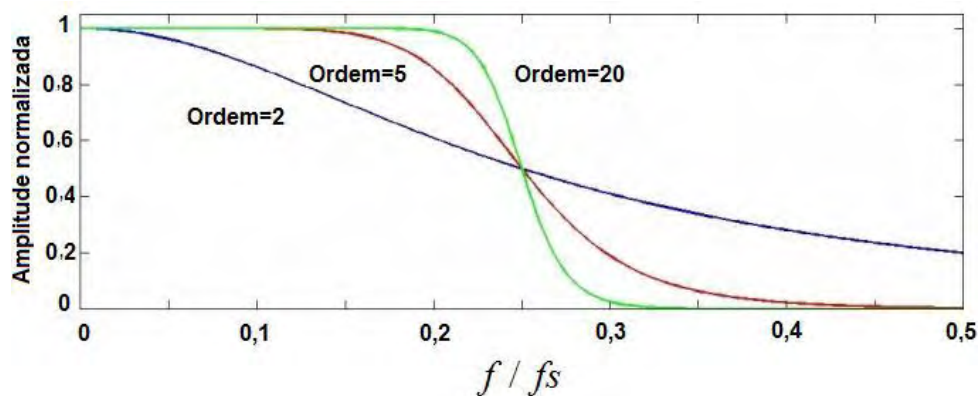


Figura 16 - Resposta em frequência de um Filtro Butterworth de ordem 2, 5 e 20 (Chugani *et al.*, 1998 -adaptado)

A região em que a saída do filtro é igual a 1 (ou muito próxima de 1) é a faixa de passagem do filtro ou faixa de baixas frequências. A região em que a saída é 0 (ou muito próxima de 0) é a faixa de rejeição ou faixa de altas

frequências. A região entre a faixa de baixas frequências e a faixa de altas frequências é conhecida como região de transição, onde a saída muda gradualmente de 1 para 0. A vantagem dos filtros Butterworth é uma resposta em frequência suave e monotonicamente decrescente na região de transição. Como pode ser observado na Figura 14, quanto maior a ordem do filtro maior o decaimento na região de transição.

2.6. Tecnologia dsPIC

A tecnologia dsPIC, especialmente da família dos microcontroladores da Microchip ds30F, possui uma arquitetura Harvard modificada com instruções de suporte a DSP (*Digital Signal Processor*). A CPU possui um barramento de programa de 24 bits com um tamanho de *opcode* (programa em linguagem de máquina) variável. O contador de programa tem o tamanho de 23 bits, permitindo o endereçamento de até 4Mbytes de memória de programa. Todas as instruções são executadas em um único ciclo de máquina, com exceção das instruções que alteram o fluxo do programa e a instrução de movimento de uma palavra dupla.

Esta família possui duas classes de instruções: As instruções do tipo MCU (unidade microcontroladora) e as instruções da classe DSP. Ambas estão implementadas na mesma arquitetura do microcontrolador.

A memória de dados pode ser endereçada em 32k *Words* ou 64k *bytes* dentro de dois blocos de RAM (memória de acesso aleatório) denominados X e Y. Cada bloco tem a sua própria unidade de geração de endereço (*Address Generation Unit* - AGU). A classe de operação do tipo MCU opera somente com a memória do tipo X com o acesso a toda a memória como uma região de dados linear. Certas instruções do tipo DSP operam com a região X e Y dividindo desta forma a região de dados em duas partes.

O dsPIC30F, por exemplo, tem vários vetores de interrupção somando ao total de 50 fontes de interrupção, e cada uma destas podem ser configuradas para 7 níveis de prioridade. A Figura 17 apresenta o diagrama de blocos da família dsPIC 30F.

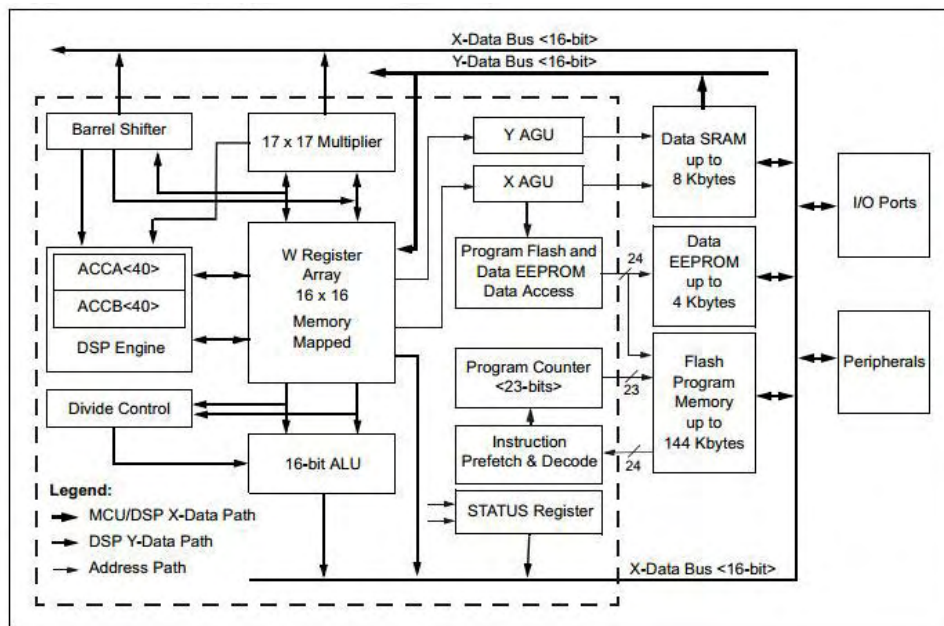


Figura 17 - Diagrama arquitetura família dsPIC30F (Microchip, 2012).

3.4.3. Conversor Analógico Digital

Um dos principais periféricos do microcontrolador PIC com maior relevância para este trabalho é o conversor A/D interno.

O sistema de aquisição, armazenamento e processamento de sinais necessita de um conversor analógico digital (A/D). A grande maioria das variáveis que precisamos medir é de natureza analógica, tais como: temperatura, pressão, luminosidade, pH entre outras.

O conversor A/D tem a propriedade de realizar a conversão de um sinal analógico (valor de uma medida de tensão elétrica) em uma palavra digital de “n” bits, como é apresentado na Figura 18. Após a conversão é que o programa consegue processar e armazenar o sinal adquirido.



Figura 18 - Conversão de um sinal analógico em digital (Proakis; Manolakis, 1996 – adaptado)

A conversão analógica para digital envolve diversas características elétricas que são:

- Resolução em bits – quanto maior melhor, porém é mais caro e complexo o conversor.
- Tempo mínimo para realizar uma conversão de um sinal, ou seja, quanto mais rápido melhor para medir sinais variáveis no tempo tais como: áudio e vídeo, por exemplo.
- Possibilidade de utilizar diversos valores de tensão de referência, podendo rescalonar o valor obtido.

3.4.4. Recursos e Características do A/D do dsPIC 30F4013

O conversor A/D do dsPIC possui diversos recursos para sua correta operação. O funcionamento do conversor A/D possui os seguintes recursos e características:

- Conversor A/D interno com 10 bits ou 12 bits;
- Resolução de 5mV aproximadamente;
- Quatro tipos de referência: V_{DD} (interna), V_{SS} (interna), V_{REF+} (externa) e V_{REF-} (externa);
- Frequência de clock baseada no clock da máquina ou em RC interno dedicado;

- Até 16 canais de entrada;
- Tensão de trabalho de 2,7 a 5,5 Volts;
- Taxa de amostragem de 200 kSps em 5 Volts;
- Capacidade de conversão durante repouso da CPU ou em módulo inativo;

O início da conversão pode ser manual ou sincronizada com uma das três fontes de disparo (Automático, TIMER3, ou interrupção externa).

A Figura 19 mostra um ADC com um circuito de amostragem e retenção (Sample/Hold).

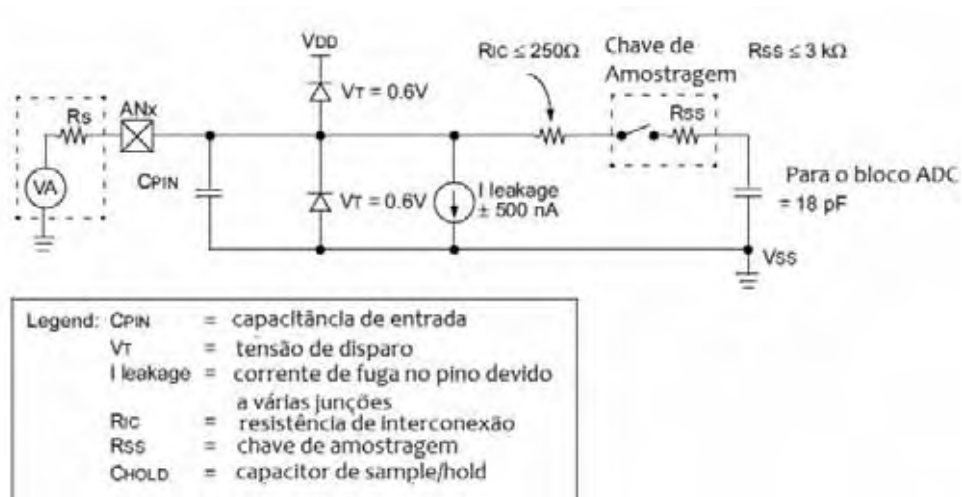


Figura 19 - Entrada ADC do dsPIC 30F4013 (Microchip, 2012).

O conversor A/D do dsPIC é do tipo de aproximação sucessiva e utiliza um processo chamado *Sample and Hold*, o qual coleta uma amostra e a retém por um determinado tempo para uma conversão bem sucedida. O dsPIC possui um capacitor interno de 18pf que é ligado ao canal analógico em uso. Após iniciar a conversão, o capacitor é desligado da entrada analógica, mas a tensão sobre o capacitor é mantida constante (*Hold*) com o valor da entrada do canal que ele estava ligado. A tensão do capacitor é ligada ao comparador que ao igualar-se com o valor do conversor D/A gera um sinal de disparo, mandando o registrado de

aproximação sucessiva parar a contagem e armazenar o valor obtido no registrador de saída A/D.

O capacitor de *Sample Hold* interno do conversor A/D possui um tempo de resposta, que é dependente da soma das resistências do circuito interno da soma da resistência interna da fonte do sinal de entrada, e de um coeficiente de temperatura.

Inicialmente o ADC zera todos os bits. Depois converte os valores calculados em bits no seu respectivo valor de tensão. Ao comparar essa tensão com o valor da tensão de entrada, caso seja maior ou menor, ativa ou não o bit que está sendo testado. Ao testar todos os bits, do mais significativo ao menos significativo, gera um valor binário de saída correspondente ao seu valor de entrada.

Observa-se que para um ADC de 10 bits, gastam-se 10 ciclos de instruções. Para um ADC de 16 bits levaria 16 ciclos (TOCCI & WIDMER, 2003). Como o ADC sempre gasta um tempo para responder a mudança dos bits, devido ao tempo de atraso de propagação dos transistores internos do seu circuito, o conversor possui uma limitação natural de frequência, não conseguindo nestes ciclos ter um tempo zero.

Resumidamente, para converter um valor se gasta um tempo de conversão, o que limita a frequência de conversão, ou seja, a taxa de amostragem relativa ao seu número de bits de precisão. Para o dsPIC30F4013, o máximo da taxa de amostragem é aproximadamente de 200.000 amostras por segundo.

3. Materiais e Métodos

3.1. Introdução

A detecção da queima no processo de retificação foi realizada através da aplicação de parâmetros nos sinais coletados por meio de uma placa de aquisição de dados ou conversor analógico-digital. Para que a detecção seja feita em tempo real, conforme proposto neste trabalho, foi necessário o desenvolvimento de um banco de ensaios para coletar o sinal puro de emissão acústica e o sinal de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para vinte e oito (28) ensaios no total. Foram empregados o aço ABNT 1045 e o aço VC131 com rebolos de óxido de alumínio e CBN resinoide.

Para a realização deste trabalho foi feito o estudo do conteúdo harmônico dos sinais de emissão acústica, aplicação de filtros digitais, e a implementação de rotinas computacionais em hardware dsPIC que permitiram identificar os níveis de queima por meio dos parâmetros estatísticos DPO e RMS. Posteriormente, ensaios foram realizados para validação dos parâmetros estatísticos implementados no hardware. Assim, este capítulo apresenta os materiais e método desenvolvidos para a realização desta pesquisa.

3.2. Montagem do Banco de Ensaios

A experimentação neste trabalho visa à aquisição de dados experimentais durante a operação de retificação tangencial plana de mergulho, para posterior análise do comportamento dos sinais de emissão acústica e da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do rebolo. Essa potência será denominada neste trabalho de potência de corte, pois a potência elétrica do motor que aciona o rebolo está relacionada com a potência de corte por uma curva de calibração fornecida pelo fabricante do motor, acrescida das perdas mecânicas.

Previamente aos ensaios definitivos, as seguintes etapas foram realizadas: ajustes iniciais e correto posicionamento dos equipamentos, operação de balanceamento 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, ensaios para determinação do volume de material removido até a ocorrência da queima.

O corpo de prova foi aparafusado 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.

A Figura 20a mostra o corpo de prova preso ao suporte e posicionado na máquina para ensaios com o rebolo de óxido de alumínio, e a Figura 20b para o rebolo de CBN com resinoide.

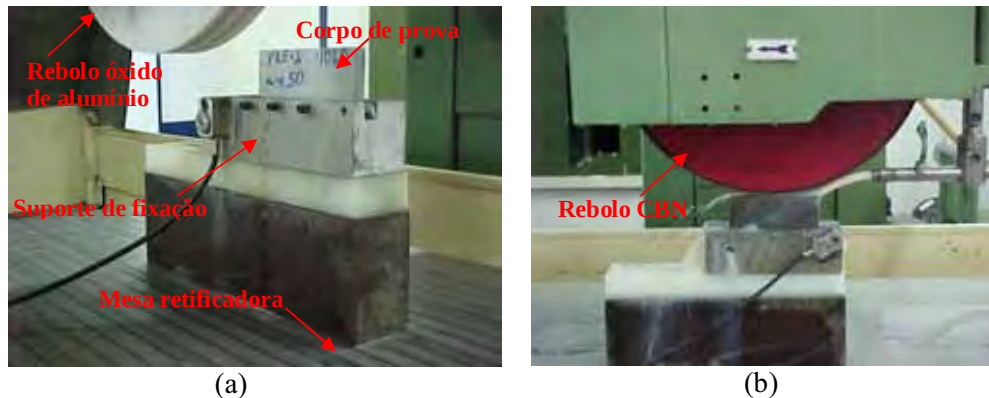


Figura 20 - Ensaio para Rebolo Convencional (a) e Ensaio para Rebolo de CBN (b).

Após o posicionamento correto do corpo de prova a superfície a ser usinada deve ser nivelada, pois apresenta irregularidades que podem 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 necessárias para esta operação também.

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando os aços ABNT 1045 e VC131, pois se trata de aços largamente usados em indústrias.

Para os ensaios foram produzidos trinta corpos de prova, os quais foram fresados e, posteriormente, retificados, com dimensões finais de 98,58 mm de comprimento por 8,74 mm de largura como apresentado na Figura 21, sendo dois descartados por problemas relacionados à aquisição dos sinais.

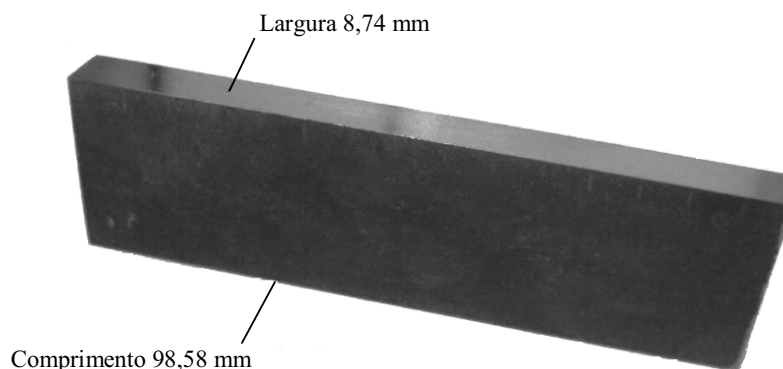


Figura 21 - Dimensões dos corpos de prova.

3.2.1. Aquisição de Dados e Processamento de Sinais

Para aquisição dos dados foi utilizada uma placa da *National Instruments*, modelo PCI-6111E, de 2 canais, operando à frequência de amostragem de 2,5 MHz, instalada em um *slot* do tipo PCI de um microcomputador. Um filtro *anti-aliasing* foi projetado com o objetivo de filtrar frequências superiores a 1 MHz, e, assim, obedecer o critério de amostragem de Shannon-Nyquist (OGATA, 1995). A maioria dos parâmetros foi mantida constante ao longo dos ensaios. Entretanto, a profundidade de corte foi variada através do avanço do rebolo sobre a peça ou pelo uso de uma geometria da peça previamente construída. Todas as peças foram submetidas à testes pós-retificação, e os sinais de queima foram assinalados.

Para a definição do banco de ensaios foi utilizada a configuração mostrada na Figura 22.

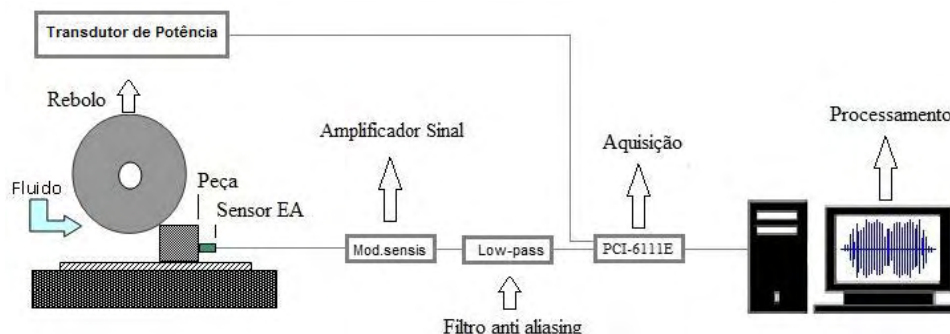


Figura 22 - Esquema do banco de ensaios e sistema de aquisição de dados.

Para a medição de potência elétrica do motor de indução trifásico de 7,5 cv, responsável pelo acionamento do eixo árvore da retificadora, utilizou-se um módulo contendo sensores de efeito *Hall* de tensão e corrente elétricas. O motor foi alimentado por um inversor de frequência de 380V, do fabricante *WEG*.

A emissão acústica gerada no processo de retificação foi medida por intermédio de um sensor do tipo piezelétrico do fabricante *Sensis*, modelo BM12, acoplado ao suporte próximo à peça para garantir sinal de boa qualidade, como mostra a Figura 23. O sinal de emissão acústica coletado do módulo amplificador foi o sinal puro ou bruto de emissão acústica, pois o presente trabalho visou o estudo do espectro desse sinal quando da ocorrência da queima nas superfícies das peças retificadas.



Figura 23 - Sensor de EA

Para a aquisição dos sinais e geração dos arquivos de dados no formato binário um programa (também chamado de instrumento virtual) foi desenvolvido no software LABVIEW® 8.0. O programa foi dividido em dois blocos, o primeiro para aquisição dos sinais de emissão acústica e o segundo para os sinais de potência elétrica. Os arquivos binários gerados pela aplicação podem ser nomeados de acordo com a escolha do usuário, bem como o local onde serão salvos. Também é possível parar a aquisição em qualquer momento, bastando escolher a opção apropriada. Os dois sinais coletados são exibidos no painel frontal do programa, conforme a aquisição ocorre em tempo real.

A Figura 24 apresenta a tela principal do programa desenvolvido.

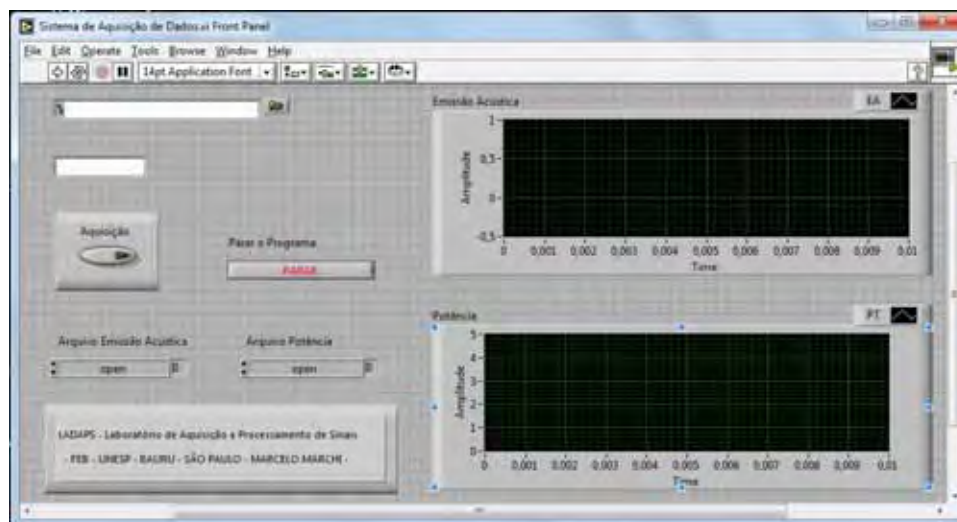


Figura 24 – Tela principal do programa feito no software LABVIEW.

O diagrama de blocos do programa é apresentado na Figura 25.

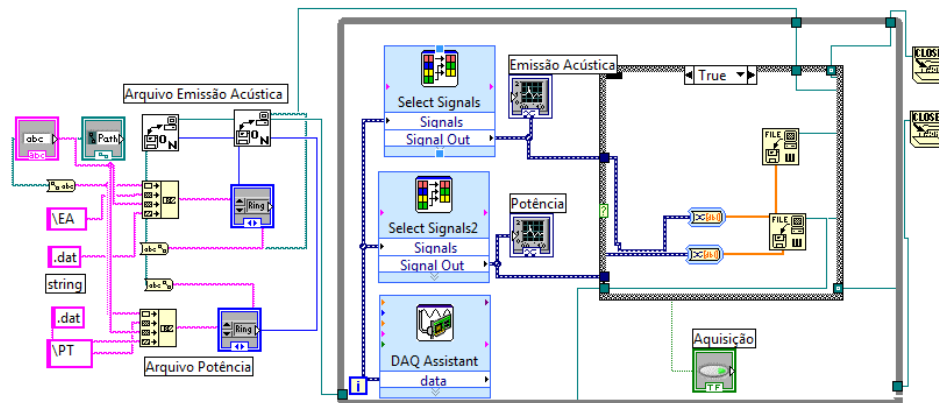


Figura 25 - Diagrama de blocos do programa no software LABVIEW.

Os arquivos gerados pelo programa foram posteriormente submetidos ao processamento digital no software MATLAB.

3.2.2. Dressagem

Para o rebolo superabrasivo foi realizado apenas o perfilamento do mesmo através de uma ferramenta de dressagem conglomerada, ou seja, de múltiplas pontas de diamante. A dressagem do rebolo de óxido de alumínio se empregou um dressador de ponta única, na qual se utilizou grau de recobrimento igual a 5 ($U_d = 5$) para todos os ensaios. A largura de atuação do rebolo (b_d) foi medida em um projeto de perfis, A profundidade de dressagem e a largura de atuação do rebolo foram de 0,04 mm e 2,1217 mm, respectivamente.

3.2.3. Teste Rugosidade

Após os ensaios experimentais de retificação, testes de rugosidade foram realizados nas peças usinadas a fim de se obter informações sobre a qualidade superficial de cada uma das peças, e, assim, comparar com os resultados advindos do processamento de sinais.

Para os testes, foi utilizado o rugosímetro Taylor Hobson Surtronic 3⁺⁺, onde medidas espaçadas entre si de 5 mm foram tomadas ao longo de cada corpo de prova, totalizando cinco medições.

3.2.4. Teste de Microdureza

Os testes de microdureza foram realizados na Faculdade de Odontologia da USP de Bauru, no Laboratório de Materiais Dentários, sob a coordenação do Professor Dr. César Antunes de Freitas.

Estes testes consistiram em medir a microdureza ao longo da superfície da peça a fim de identificar possível transformação metalúrgica do material durante os testes de usinagem. Esse tipo de ensaio vem corroborar, junto com as medidas de rugosidade e inspeção visual, as informações condizentes sobre a integridade da peça, facilitando sobremaneira as comparações quando do processamento digital dos sinais de emissão acústica, e, assim, ajudando a identificar a ferramenta que possibilite a detecção da queima da peça no processo de retificação.

As medidas foram realizadas num equipamento da marca Otto Wolpert-Werke, tipo M-Testor, Baujahr, onde se utilizou a escala Vickers para a medição da rugosidade por ter sido essa a que mais se adequou aos testes, e proporcionou as melhores medidas. O peso utilizado foi de 100 gramas para ambos os aços, e o espaçamento entre os pontos ao longo da peça foi de 15 mm, exceto para o último ponto onde se mediu 10 mm. Para cada ponto considerado, três medições foram realizadas, e a média aritmética foi considerada para o valor da microdureza naquela posição.

3.2.5. Ensaio com Rebolo de Óxido de Alumínio

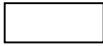
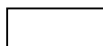
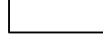
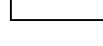
Os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio podem ser sintetizados conforme Tabelas 1 e 2, nota-se na Tabela 1, que para cada amostra do aço ABNT1045, buscou-se variar a profundidade de corte, mantendo constante a velocidade da mesa, de maneira que diferentes condições de usinagem fossem obtidas. Outro ponto importante foi quanto ao uso de corpos de prova de geometrias diferentes, pois assim foi possível variar a profundidade de corte ao longo da peça obtendo diferentes níveis de queima. Observa-se nas Tabelas 1 e 2 que se procurou obter situações de peças sem queima, peças levemente

queimadas, e peças com queimas, proporcionando, assim, sinais de EA a serem processados e analisados para diferentes situações.

Os parâmetros de usinagem incluem:

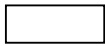
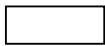
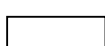
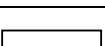
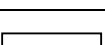
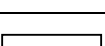
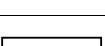
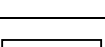
- Velocidade periférica do Rebolo: 27,94 m/s
- Velocidade da peça: 0,044 m/s
- Tipo de fluido refrigerante: Emulsão Água-óleo 4 %
- Tipo do Rebolo: Óxido de Alumínio – 38A80-PVS - Norton
- Diâmetro do Rebolo: 296,50 mm
- Largura do Rebolo: 40,21 mm
- Dimensões da Peça: 98,58 x 8,74 mm (comprimento x largura)

Tabela 1- Ensaios de Retificação de Aço ABNT 1045 com Rebolo Óxido de Alumínio

Amostra	Profundidade de corte (µm)	Velocidade da mesa (m/s)	Perfil de corte	Comentário
1	10 - 0	0,044		Sem queima
2	30 - 0			Queima média no início e final
3	20			Queima severa desde próximo do início até o fim
4	90 - 10			Queima severa do início até próximo ao fim
5	20 - 2,5			Queima severa do início até o fim
6	40 - 5			Queima severa ao longo da peça
7	15			Queima severa no meio da peça

Os ensaios com o Aço VC131 são apresentados na Tabela 2, onde a velocidade da mesa também foi constante, variando apenas a profundidade de corte com o objetivo de se obter diferentes níveis de queima. A amostra de número cinco com profundidade de corte de 2,5µm não apresentou queima, de maneira que os sinais de EA desta amostra foram utilizados como valores de referência para comparar com sinais onde ocorre a queima. As condições das demais amostras do ensaio são descritas na coluna comentário.

Tabela 2 - Ensaios de Retificação de Aço VC131 com Rebolo Óxido de Alumínio

Amostra	Profundidade de corte (µm)	Velocidade da mesa (m/s)	Perfil de corte	Comentário
1	5	0,044		Sem queima
2	10			Com queima média e severa ao longo da peça
3	15			Com queima média no início aumentando para severa até próximo do final
4	20			Queima severa ao longo da peça
5	2,5			<i>Sem queima</i>
6	7,5			Queima branda ao longo da peça
7	7,5			Queima branda ao longo da peça
8	4			Queima branda próximo do início até o final

3.2.6. Ensaios com Rebolo de CBN

De forma semelhante, 15 ensaios foram realizados com rebolo superabrasivo de CBN, ligante resinóide, os quais empregaram o mesmo banco de ensaios. A tabela 3 e 4 mostram os detalhes dos ensaios realizados para os aços ABNT 1045 e VC131, respectivamente.

Nesses ensaios, também se procurou obter situações que forneceram peças sem queima, levemente queimadas, e com queimas severas a fim de correlacionar com os sinais de EA.

Os parâmetros de usinagem incluem:

- Velocidade periférica do Rebolo: 33 m/s
- Velocidade da peça: 0,044 m/s
- Tipo de fluido refrigerante: Emulsão Água-óleo 4 %
- Tipo do Rebolo: CBN – Resinóide 14AI V180 B126
- Diâmetro do Rebolo: 350 mm
- Largura do Rebolo: 10 mm
- Dimensões da Peça: 98,58 x 8,74 mm

Tabela 3 - Ensaios de Retificação de Aço VC131 com Rebolo CBN

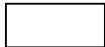
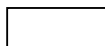
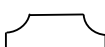
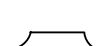
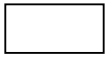
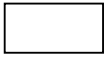
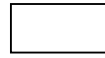
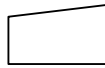
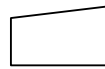
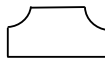
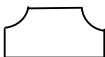
Amostra	Profundidade de corte (μm)	Velocidade da mesa (ms)	Perfil de corte	Comentário
1	10	0,044		Sem queima
2	50			Queima média no final da peça
3	60			Queima severa do meio até o final
4	55			Queima branda do meio para o final
5	60 - 10			Queima branda no meio da peça
6	80 - 15			Queima média no meio da peça

Tabela 4 – Ensaios de Retificação com Rebolo CBN e aço Aço ABNT 1045

Amostra	Profundidade de corte (μm)	Velocidade da mesa (m/s)	Perfil de corte	Comentário
1	10	0,044		Sem queima
2	30			Sem queima
3	60			Queima branda no final
4	70			Queima branda do início até o final
5	70 - 20			Queima branda no meio aumentando gradualmente
6	75 - 20			Queima branda no final
7*	100 - 30			Queima média no meio da peça até o final
8*	100 - 20			Queima branda no meio da peça
9	85 - 25			Queima severa no meio da peça e branda no final

*Ocorreu um problema com o sinal de emissão acústica para os ensaios com as amostras 7 e 8, portanto não foram considerados para análise.

3.2.7. Teste de Visualização das Peças

Após os ensaios, as peças retificadas foram submetidas a inspeção, em que se observou os diferentes níveis de queima pela mudança de coloração na superfície das mesmas. Esta coloração vai do cinza claro até o preto bem escuro, dependendo do grau de queima ocorrido, conforme relatado por Malkin (1989). As imagens das peças são mostradas nas Figura 26, Figura 27, Figura 28, e Figura 29.

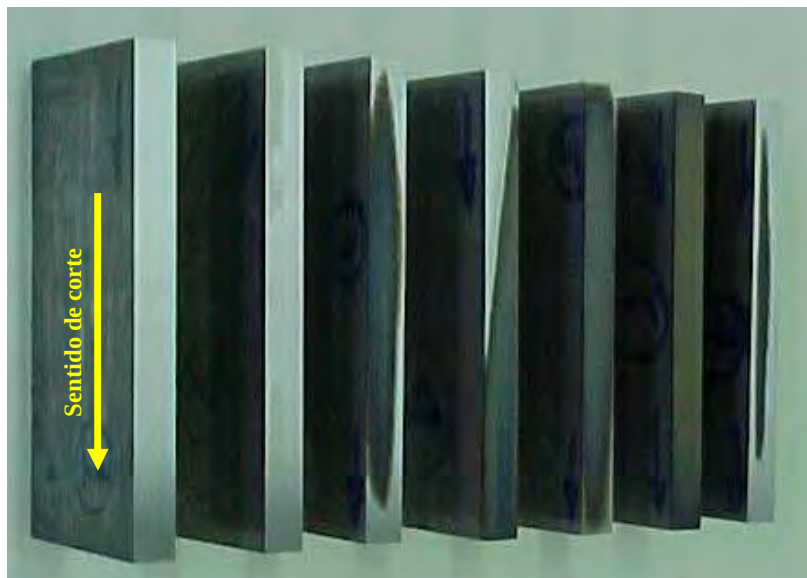


Figura 26 - Peças de aço ABNT 1045 de 1 a 7, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de Óxido de Alumínio.



Figura 27 - Peças de aço VC131 de 1 a 8, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de Óxido de Alumínio.



Figura 28 - Peças de aço ABNT 1045 de 1 a 6 e 9, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de CBN.

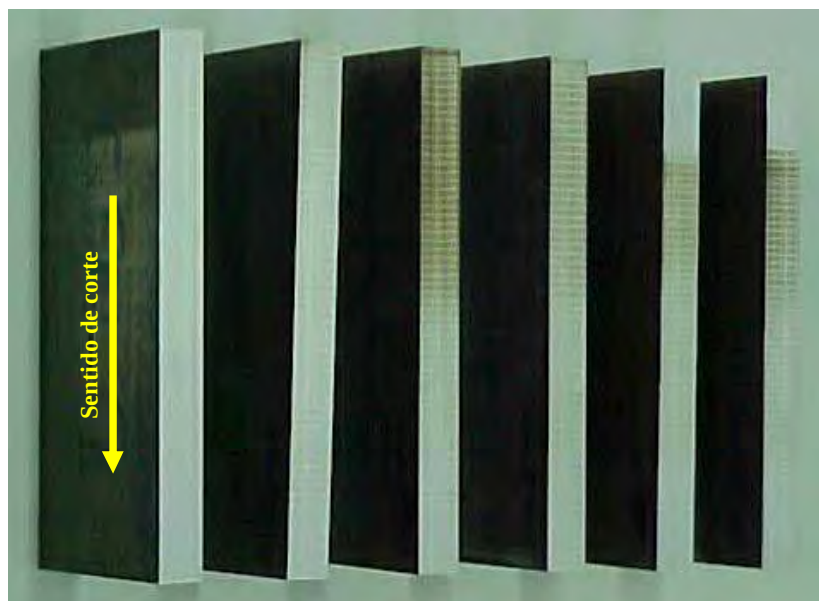


Figura 29 - Peças de aço VC131 de 1 a 6, da esquerda para direita, usinadas com Rebolo de CBN.

3.3. Processamento de Sinais

Para o processamento dos sinais, rotinas foram desenvolvidas no software MATLAB, as quais permitiram a criação do conjunto de dados para análise.

O processamento digital dos sinais teve início depois de realizados todos os ensaios para cada um dos rebolos. Após a aquisição dos sinais de EA puro e seu posterior armazenamento em arquivos binários, foram gerados vetores com comprimento de 15×10^6 amostras, como mostra a parte (a) da Figura 30, que corresponde a 6 segundos de aquisição por passada. Esses vetores foram divididos em partes menores, de acordo com o nível de queima observado na superfície das peças, e posteriormente, aplicados às rotinas computacionais, desenvolvidas no MATLAB, para o estudo do espectro de frequência e da determinação do valor RMS do sinal EA. O detalhe na parte (b) da Figura 30 ilustra um trecho do vetor do sinal puro de EA.

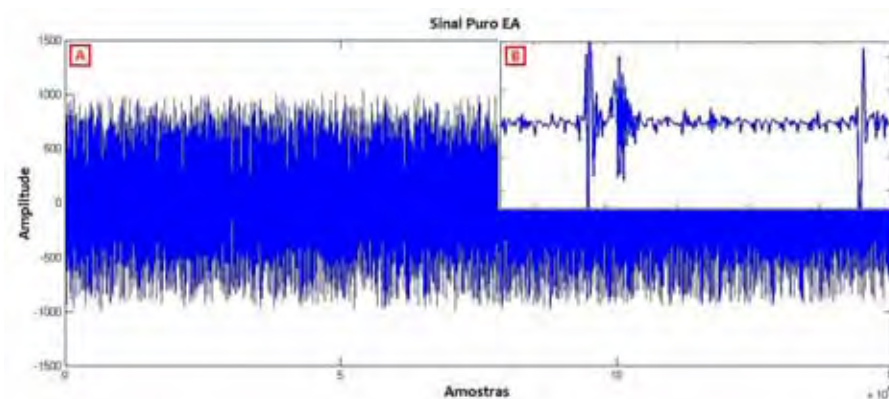


Figura 30 - Sinal puro de EA

A classificação adotada neste trabalho das superfícies das peças retificadas foram as seguintes: peça sem queima, nível de queima média, e nível de queima severa. De posse dos vetores de EA puro, formaram-se vetores menores correspondentes aos diferentes níveis de queima observados na inspeção visual, como mostra a Figura 31.

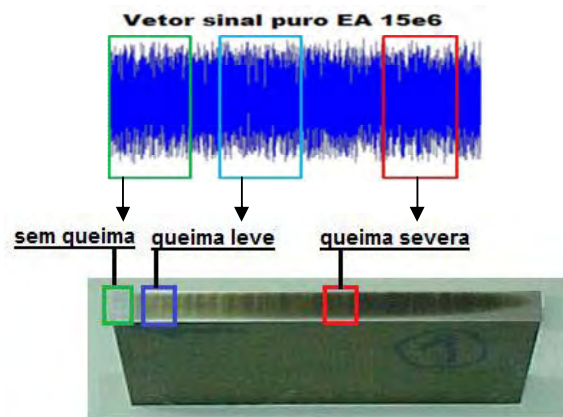


Figura 31 - Formação dos vetores conforme o nível de queima

Para cada nível de queima identificado foram gerados vetores com 400.000 amostras retiradas do vetor principal, referente a uma determinada peça, que, posteriormente, foram processados por meio da FFT para o estudo do conteúdo harmônico do sinal de EA. Isso possibilitou, como será visto posteriormente, a seleção de bandas de frequência para a caracterização dos diferentes níveis de queima, como ilustra a Figura 32. Para o cálculo da FFT foi empregado um conjunto de 8192 pontos do sinal de EA puro, e a janela Hamming para minimizar os efeitos de espalhamento e vazamento (leakage) espectral do sinal (LATHI, 2008).

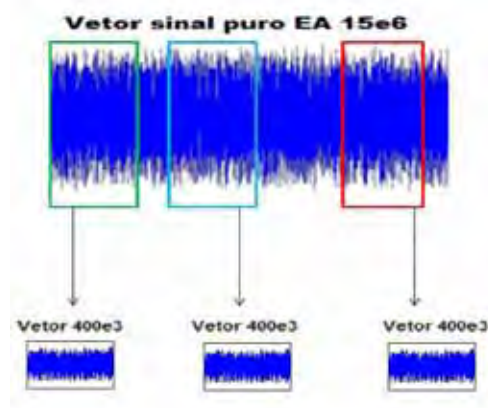


Figura 32 – Vetores do sinal puro de EA com 400.00 amostras para diferentes níveis de queima.

Após a análise dos espectros do sinal puro de EA para os diferentes níveis de queima, notaram-se amplitudes mais significativas para determinadas faixas de frequências. Assim, foram escolhidas para estudo quinze bandas de frequência dentro da faixa de 30kHz a 1,2MHz, como ilustra a Figura 33.

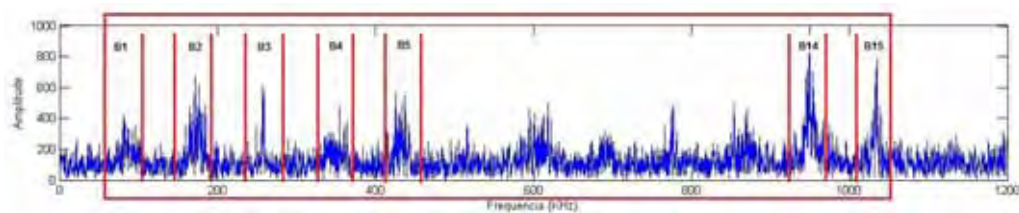


Figura 33 - Seleção das quinze bandas de frequência.

3.3.1. Estudo dos Parâmetros Estatísticos

Para cada vetor do sinal puro de emissão acústica com 400.000 amostras, referentes a cada um dos níveis de queima considerados, geraram-se outros quatro vetores com 100.000 amostras. A Figura 34 apresenta a divisão dos vetores. O sinal referente a esses vetores foi filtrado para cada uma das quinze bandas de frequência selecionadas com o uso do software MATLAB. Para as filtragens foram utilizados filtros *Butterworth* passa-banda, de ordem 6, sendo essa configuração que apresentou melhor resultado. Em seguida, a raiz média quadrática (RMS) foi obtida para cada vetor de 100.000 pontos, e o valor médio calculado, fornecendo um ponto estatístico para cada frequência, gerado-se, portanto, um vetor com 15 pontos.

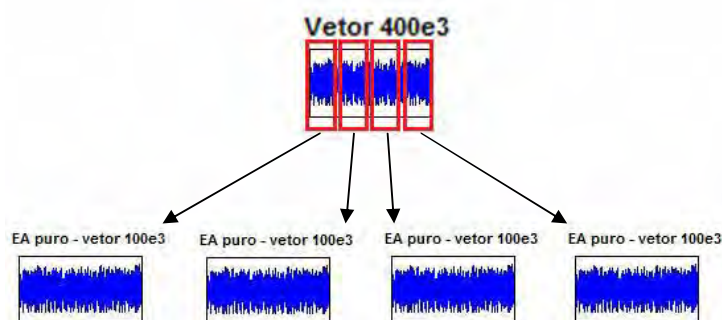


Figura 34 - Divisão dos vetores de EA puro

Os quatro vetores das médias do sinal RMS foram transferidos para uma matriz transposta, onde cada linha corresponde às médias RMS de uma determinada banda de frequência. Para cada uma das linhas da matriz a média e o desvio padrão foram calculados, gerando-se um gráfico em que cada valor médio e desvio padrão corresponde a uma dada banda de frequência, como é mostrado na Figura 35.

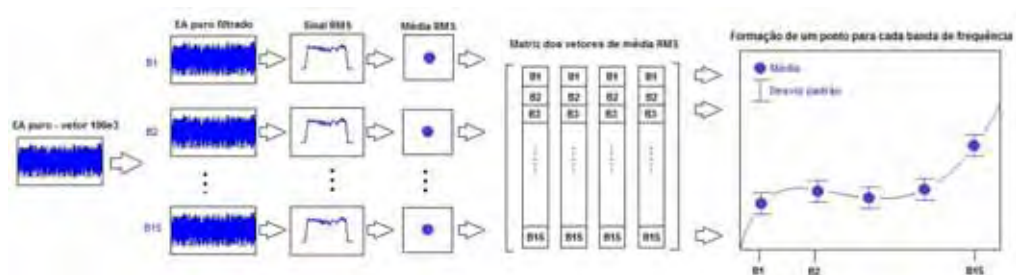


Figura 35 – Processo de geração dos gráficos do sinal RMS médio e desvio padrão para cada banda de frequência.

3.4. Projeto e Desenvolvimento do Hardware

O objetivo do projeto e desenvolvimento do hardware intitulado “*Burning Detector*” foi de contribuir para o monitoramento da queima no processo de retificação tangencial plana, ou seja, uma ferramenta que, em associação com outras ferramentas de retificação possa agregar novas funções ao controle do processo. O sistema de monitoramento e detecção proposto consiste em um hardware microcontrolado operando junto com o processo de retificação plana, com a finalidade de fornecer ao operador informações da peça retificada em termos de queima e dos sinais de emissão acústica e potência.

Para o processamento foi especificado o controlador digital de sinais dsPIC30f4013 da Microchip.

3.4.1 Sistema de Monitoramento

O funcionamento se dá pela análise da estatística DPO, que utiliza os sinais RMS de emissão acústica filtrados nas bandas de frequência que melhor indicam o fenômeno da queima, de acordo com os resultados dos estudos do conteúdo harmônico e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo.

A Figura 36 apresenta o diagrama em blocos do sistema de monitoramento.

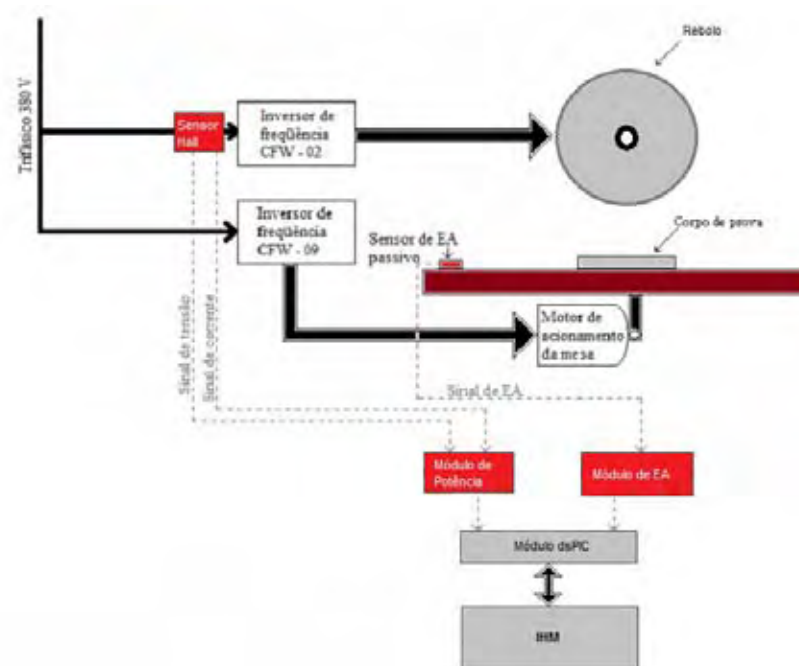


Figura 36 - Diagrama em blocos do sistema de monitoramento

Quando ativado, o hardware realiza a amostragem do sinal RMS de emissão acústica e do sinal de potência elétrica ativa do motor que aciona o rebole da máquina retificadora. Esses dois sinais são coletados pelas entradas analógicas do controlador de sinais, que usa a taxa de 1.000 amostras por segundo para o sinal de emissão acústica e de 500 amostras por segundo para o sinal de potência, sendo armazenados para o processamento. Com os dados armazenados, a estatística DPO foi calculada e, posteriormente, os vetores dos sinais são enviados para o microcomputador.

Devido à limitação de memória do controlador, é necessário que apenas os dados relevantes ao processamento sejam efetivamente armazenados, ou seja, os dados referentes ao momento em que esteja havendo a retificação. Para isso, um algoritmo de detecção de passada foi empregado, de maneira que a aquisição dos sinais seja iniciada apenas no momento em que o rebole esteja em contato com a peça.

Este algoritmo, a partir de um nível de referência para o sinal de emissão acústica, monitora a variação desse sinal de forma que, quando se ultrapassa um limite estabelecido com relação a amplitude do sinal de EA, e por um determinado intervalo de tempo, considera-se que o rebolo está em contato com a peça, ou seja, esta havendo a retificação (passada de retificação).

Uma vez detectado o início da passada, os sinais coletados passam a ser gravados na memória interna do controlador até ser detectado o final da passada. A detecção do final da passada se dá de forma semelhante à detecção de início da passada.

Quando o sistema detecta o final da passada, a aquisição dos sinais é interrompida, e o processamento da estatística é iniciado. Primeiramente é calculada a média, o desvio padrão e o máximo valor do sinal de potência. Após esses cálculos, a estatística DPO é processada.

Nota-se no diagrama de blocos a ausência do estágio de conversão A/D entre o módulo de emissão acústica e o controlador. Isso se dá pelo fato do controlador já possuir um conversor A/D com as funções de *sample & hold* integrados.

3.4.3. Circuito Eletrônico

O circuito eletrônico foi construído em uma placa de circuito impresso do tipo matriz, utilizando o microcontrolador dsPIC 30F4013 apresentado na Figura 37.



Figura 37 - dsPIC 30F4013.

Também foi utilizado um circuito integrado MAX232, que é um duplo driver/receptor para a interface TIA/EIA- 232, protocolo também conhecido como RS-232, que compatibiliza as tensões e correntes com as normas V.24, V.28 e ISO 2110. Este circuito faz a interface de comunicação serial do MCU com a porta serial do microcomputador, COMX, por meio de um conector DB9 usando apenas três fios – TX, RX e terra.

O dsPIC 30F4013 contém internamente um módulo USART, *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*, que se comunica com o MAX232. Este módulo contém *buffers*, registradores, controles e temporizações necessárias para a conversão paralelo-serial, para transmissão, e serial-paralela para recepção, sem que a MCU pare suas funções, sendo tudo configurado via software interno.

Também foi utilizado um LCD alfanumérico, Display de Cristal Liquido, de 2 linhas por 16 colunas de caracteres, com matriz de pontos para cada caractere de 8x5. Sua função é que, através dessa matriz de pontos, pode-se representar qualquer número, letra ou caractere personalizado.

A Figura 38 apresenta o diagrama esquemático simplificado do sistema.

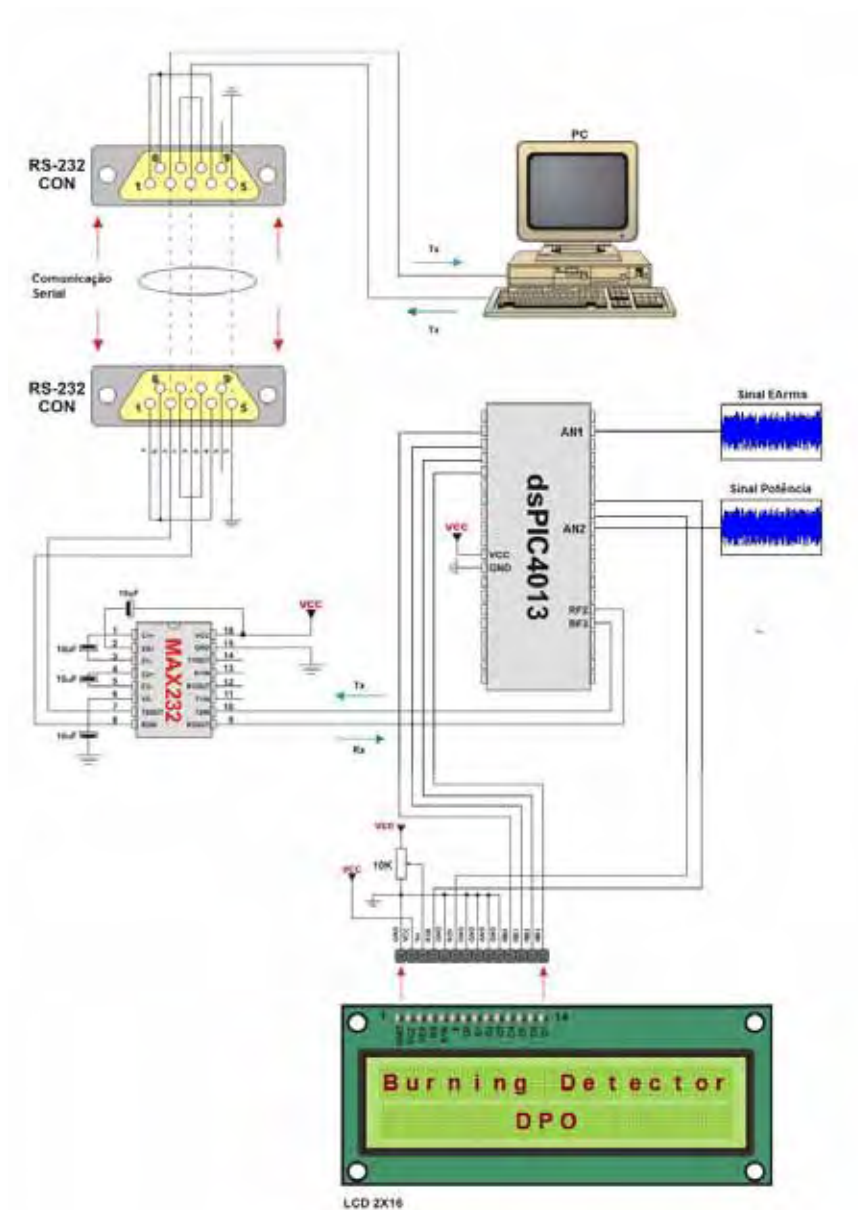


Figura 38 - Imagem do diagrama esquemático simplificado

Internamente à MCU, foi amplamente utilizado sua memória EEPROM, de 4Kbytes, para salvar as constantes do programa. Para operação normal do software, a MCU tem dois blocos de memória, a FLASH de 144Kbytes e SRAM de 8Kbytes.

O conversor analógico-digital do microcontrolador, de 10 bits de resolução, possui internamente um circuito de *Sample/Hold*, e lógica de conversão por aproximação sucessiva. Possui tensão de referência ajustável por software, mas foi usado o seu padrão de +5V. Os canais são configuráveis por software. Foi usado para ler os valores de tensão da emissão acústica e da potência, alternando-se os canais.

A Figura 39 apresenta a imagem do circuito montado junto ao gabinete plástico utilizado para acomodar todos os conectores e demais periféricos.

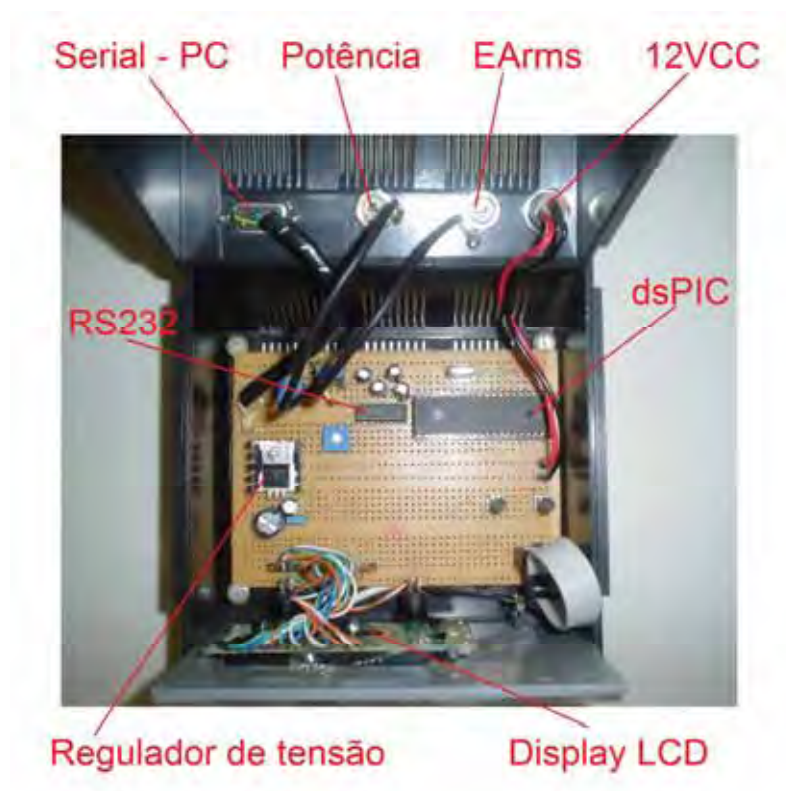


Figura 39 - Imagem do circuito

3.4.4. Firmware

O firmware foi desenvolvido com o auxílio do ambiente de desenvolvimento mikroPascal PRO da MickroElectronika®, como mostra a Figura 40.

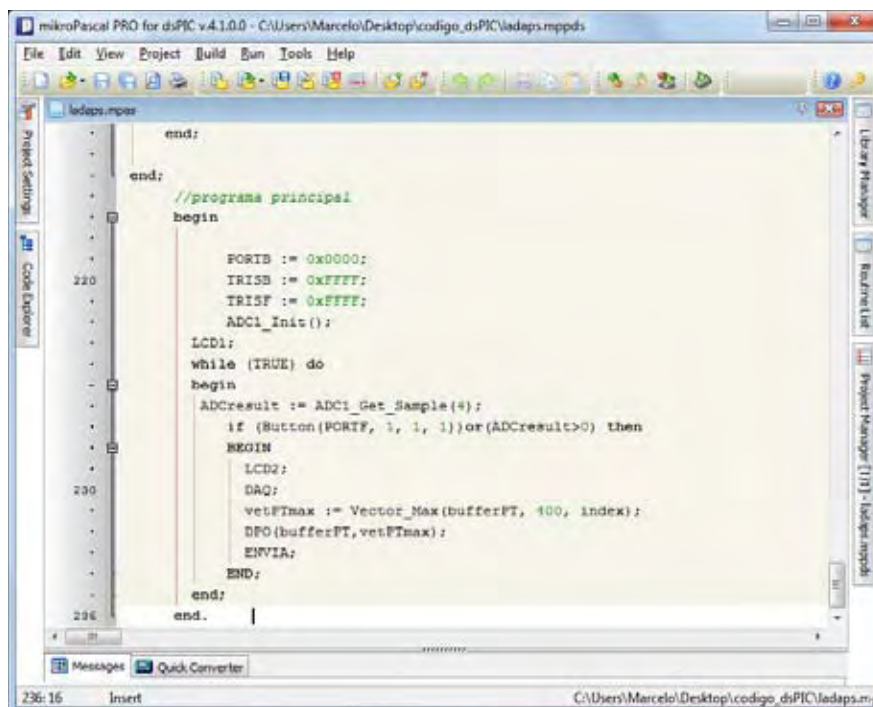


Figura 40 - Ambiente de desenvolvimento da MickroElectronika

A função principal *main*, como pode ser vista por meio do fluxograma da Figura 41, inicia com a configuração da PLL, fazendo com que a frequência de núcleo seja de 39,936 MHz, resultando na execução de 39.936.000 instruções por segundo. Na sequência da função são chamadas as funções de configuração dos periféricos, inicialização da memória e do display de LCD.

Realizados os procedimentos de inicialização, a função *main* é inicializada aguardando os eventos.

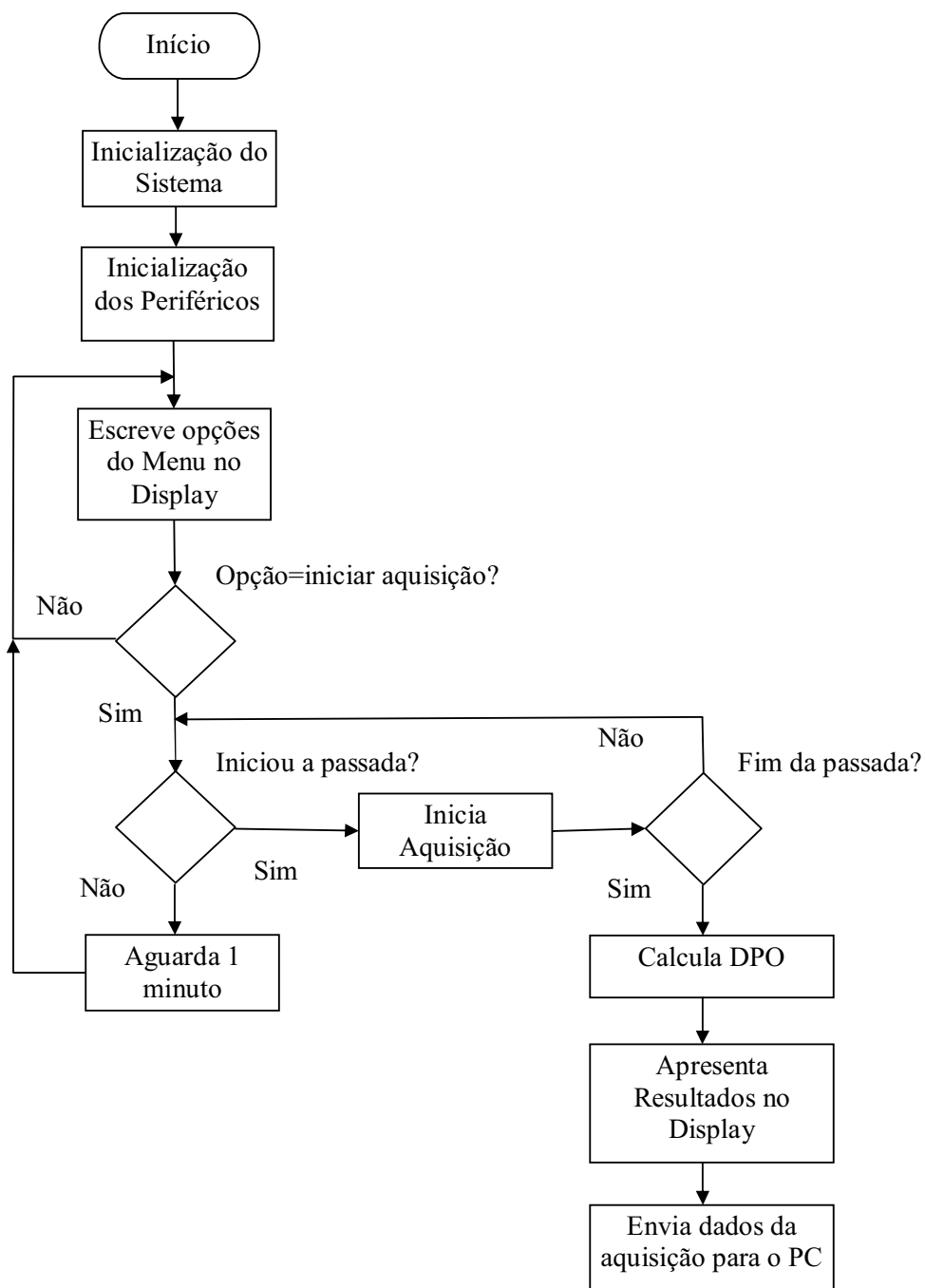


Figura 41 - Fluxograma da função principal *main*

O primeiro evento verificado é a leitura dos botões *start* e *stop*, de forma a identificar qual opção foi escolhida. A função segue verificando qual botão foi pressionado, e executa as instruções correspondentes. Quando a opção iniciar aquisição (*start*) é escolhida, a função para detecção de passada é executada; caso a função retorne verdadeiro, é iniciada a aquisição dos sinais de emissão acústica e potência do motor até o término da passada. Caso não ocorra a identificação da passada no período de um minuto, o display é atualizado, mostrando o menu inicial e volta-se a executar a função *main*.

Identificado o término da passada, é executada a função responsável por aplicar a estatística DPO e, posteriormente, apresentado o resultado no Display de LCD como é apresentado na Figura 42. Em seguida, os dados são enviados para um microcomputador, onde um software desenvolvido em Delphi plota os gráficos dos sinais de emissão acústica e potência do motor, e indica se houve ou não a queima.



Figura 42 - Imagem frontal do hardware detector de queima

3.5. Projeto e Desenvolvimento do Software

O objetivo do software desenvolvido é contribuir para o monitoramento da queima no processo de retificação tangencial plana, ou seja, uma ferramenta que, em associação com hardware '*Burning Detector*' de monitoramento, possa agregar novas funções ao controle do processo. Todo o software foi desenvolvido utilizando a plataforma de desenvolvimento Delphi 7 *Enterprise Edition* da Borland.

3.5.1. Desenvolvimento do Software

No início do desenvolvimento de um software é fundamental pensar no usuário final, a começar pelo nível de conhecimento que o mesmo possui de informática, e também em que condições o programa será utilizado. O programa em questão é uma aplicação para uso em chão de fábrica, portanto, os usuários serão da área industrial, sendo importante assumir que não são peritos em informática.

Para obter uma melhor interação entre o usuário e o software, o ideal é desenvolvê-lo juntamente com usuários (profissionais da área de usinagem). Durante o desenvolvimento do programa foi possível esta interação, pois em uma das unidades, o Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), localizado no campus da Universidade Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, conta com técnicos especializados, e ambiente apropriado.

A Figura 43 apresenta o diagrama de caso de uso do software desenvolvido.

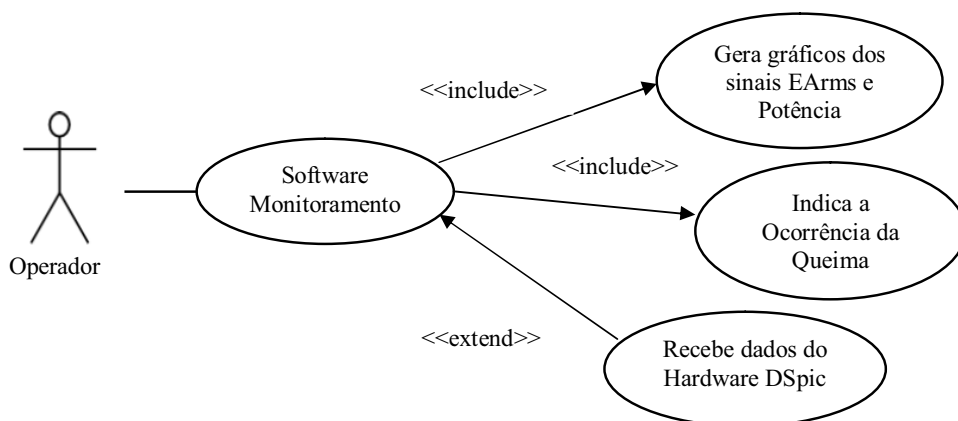


Figura 43 - Diagrama de caso de uso do software

O próximo passo para o desenvolvimento do programa foi a definição da ferramenta (linguagem) a ser utilizada, bem como da plataforma de trabalho. A escolha da linguagem seguiu alguns critérios, sendo o mais importante a facilidade de uso e implementação. Dentre algumas das linguagens possíveis

para o desenvolvimento, escolheu-se linguagem *Object Pascal*, pois é uma linguagem simples, e permite que qualquer programador com o mínimo de experiência consiga interpretar o código criado.

Durante o desenvolvimento do projeto, a ferramenta utilizada para implementar a interface gráfica foi o Delphi 7 da Borland. A maneira como os algoritmos foram implementados permite uma mudança rápida de ferramenta.

A Figura 44 apresenta o ambiente de desenvolvimento Delphi 7 da Borland.

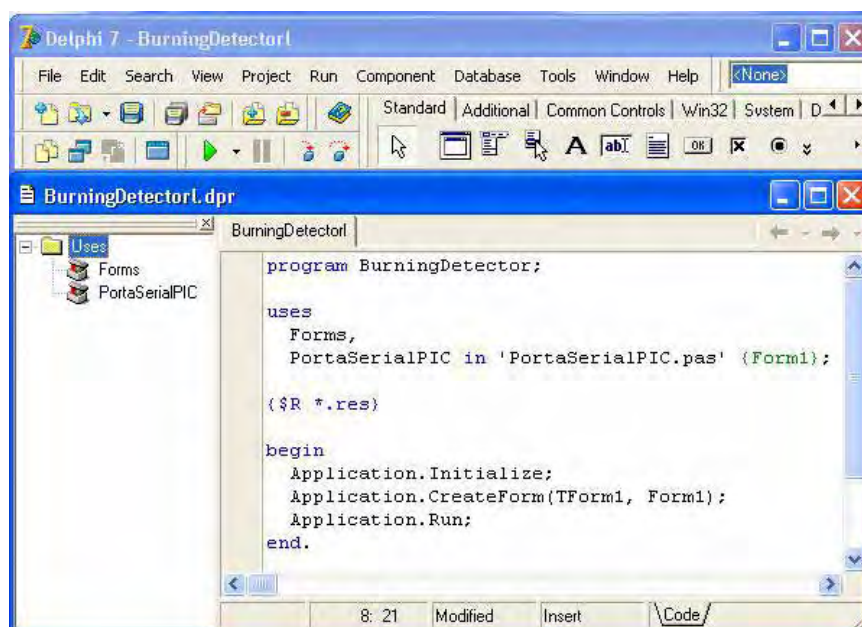


Figura 44 - Ambiente de desenvolvimento Delphi 7

A intenção é que o programa seja útil entre os sistemas Windows e Linux, o que remete a uma futura mudança na ferramenta de desenvolvimento.

O desenvolvimento do projeto foi para a plataforma Windows da Microsoft, pois se pensou em uma interação mais amigável possível entre os usuários do sistema, além da sua disponibilidade nos computadores do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA).

Durante as pesquisas realizadas para definição da metodologia, também foi utilizada a ferramenta MATLAB para implementação e testes dos algoritmos que, possivelmente, integrariam a solução.

3.5.2. Construção do Software

Para se construir um software em *Delphi* que permita a conexão com o hardware desenvolvido, foi necessária a utilização de um conjunto de bibliotecas ou componentes específicos para este fim.

A Figura 45 apresenta o diagrama em blocos do software desenvolvido com todas as suas funcionalidades.

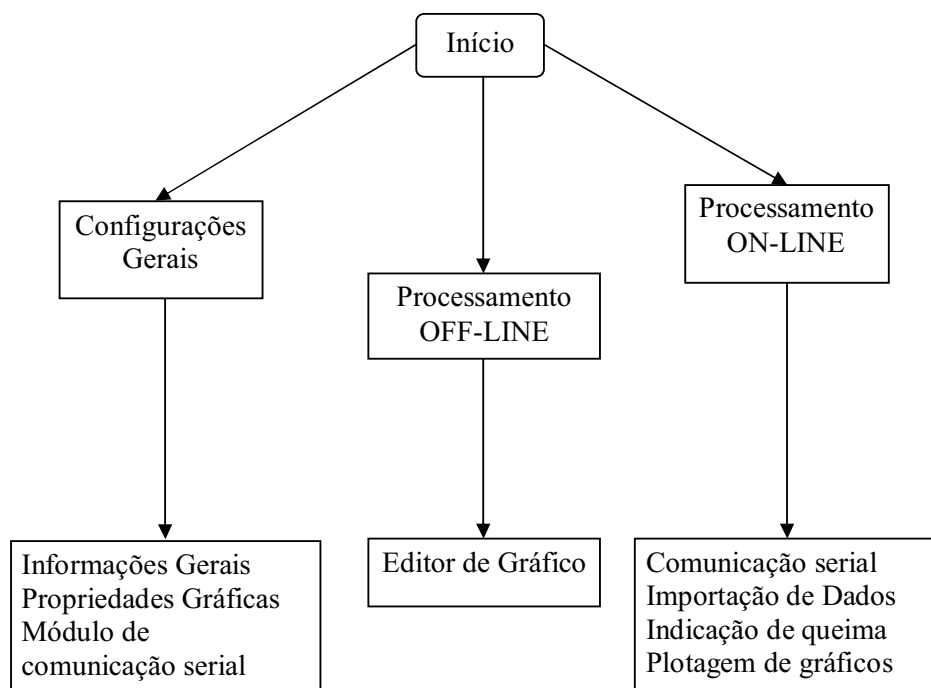


Figura 45 - Diagrama de blocos do software

No bloco “Configurações Gerais” foram implementadas todas as funções para configuração do software, ou seja, parâmetros necessários para que o mesmo possa ser executado. A definição do módulo de comunicação,

características dos gráficos que são apresentados, entre outros, fazem parte deste bloco.

O bloco “Processamento *off-line*” reúne todas as funções para análise e processamento de parâmetros *off-line*, como alteração das escalas dos gráficos, inserção do valor de referencia do DPO, e configuração da porta de comunicação serial.

O bloco “Processamento *on-line*” reúne todas as funções responsáveis por importar os dados do dsPIC, assim como apresentá-los em forma de gráficos na tela. Na Figura 46 são apresentados os gráficos referentes ao sinal de emissão acústica e potência elétrica respectivamente, cuja amplitude tem como referência a tensão de entrada do conversor A/D em mV do dsPIC. Nesta etapa, torna-se possível transmitir e receber dados de dispositivos externos. A ferramenta de comunicação serial de dados incorporada neste bloco tem a função de adquirir sinais oriundos do hardware de monitoramento.

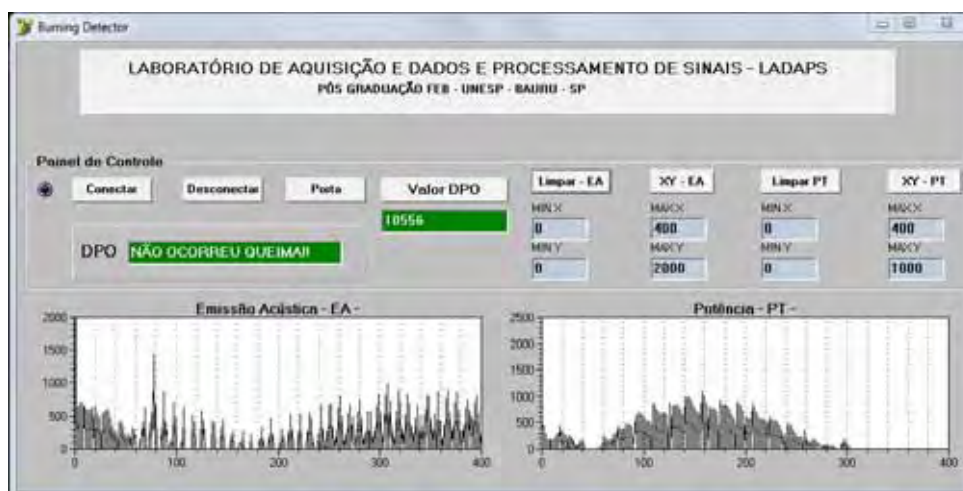


Figura 46 - Tela com gráficos de EArms e potência elétrica do motor

Para que o sistema possa detectar a ocorrência da queima na superfície da peça, é necessário antes que sejam fornecidos os limiares das estatísticas, ou seja, valores a partir dos quais será considerada queima da peça. Uma vez fornecidos os limiares e ativada a função de detecção, o sistema informa

ao operador, através da tela do software, a situação da peça a cada passada, sendo função do operador atuar na operação.

O software tenta unir da melhor maneira os quesitos simplicidade e eficiência na sua utilização. As suas funções são descritas a seguir.

O campo DPO “Ocorreu Queima!!”, mostra o resultado da comparação do valor do DPO recebido com o valor de referência do campo “Valor DPO”. Dessa forma, é possível realizar a comparação do valor de referência a cada novo conjunto de dados enviados pelo hardware.

O botão “Conectar” permite estabelecer a conexão com o hardware.

O botão “Desconectar” permite interromper a conexão com o hardware por meio da porta de comunicação serial utilizada.

O botão “Porta” apresenta a opção de selecionar a porta serial de comunicação que será utilizada para a comunicação com o hardware.

O botão “Valor DPO” fornece ao software o valor de referência de queima para a comparação com os dados recebidos do hardware.

Os botões “Limpar EA” e “Limpar PT” apagam os gráficos de emissão acústica e potência, respectivamente.

Os botões “XY-EA” e “XY-PT” alteram os valores dos eixos X e Y dos gráficos de emissão acústica e potência, de acordo com os valores inseridos nos campos minX, maxX, min Y, maxY de cada gráfico.

Capítulo 4. Resultados e Discussões

A partir do estudo do conteúdo harmônico dos sinais de emissão acústica, foi possível identificar bandas de frequência que melhor indicam o fenômeno da queima. Por meio do uso de filtros digitais associados a parâmetros estatísticos como o RMS e DPO, foi possível classificar os níveis de queima em média e severa, e, posteriormente, implementar um sistema dedicado a detecção da queima em tempo real durante o processo de retificação plana.

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos através dos estudos realizados com os aços ABNT1045 e VC131, retificados com rebolo de óxido de alumínio e CBN resinoide, bem como os resultados obtidos através do uso do hardware desenvolvido, denominado *Burning Detector*.

4.1. Estudo do Conteúdo Harmônico dos Sinais de Emissão Acústica

A partir do processamento digital dos sinais de EA realizado para os ensaios com os rebolos de oxido de alumínio e CBN, juntamente com os aços ABNT1045 e VC131, obteve-se os gráficos dos valores médios do sinal RMS para cada banda de frequência. A Figura 47 apresenta os valores de RMS para o aço ABNT 1045 com rebolo de CBN, em que se observa a evolução dos valores médios do sinal RMS para os níveis sem queima, queima média e queima severa. Na curva sem queima, os valores médios da amplitude do sinal EA RMS se mantêm em um nível relativamente baixo, ou seja, de 0,2 a 0,4 k*Volts (k sendo uma constante de escala) para a faixa de frequência de 30kHz a 800kHz, sendo que a partir deste último ponto os níveis decrescem significativamente. Este comportamento indica que a maior “energia” da emissão acústica para a peça sem queima se concentra nessa faixa, ou seja, a peça em contato com o rebolo produz amplitudes significativas. Na mesma figura, nota-se que a peça com queima média apresenta amplitudes significativas dos valores médios de EA RMS na mesma faixa de frequência, porém os níveis dessas amplitudes são maiores do que os de nível sem queima. Para o nível de queima severa houve uma mudança considerada na forma de onda da “energia” do sinal de EA comparada com a peça sem

queima. Essas mudanças nos valores RMS médios de EA podem ser explicadas pelo fato de que conforme ocorre a queima superficial, atividades acústicas são produzidas com diferentes frequências e amplitudes.

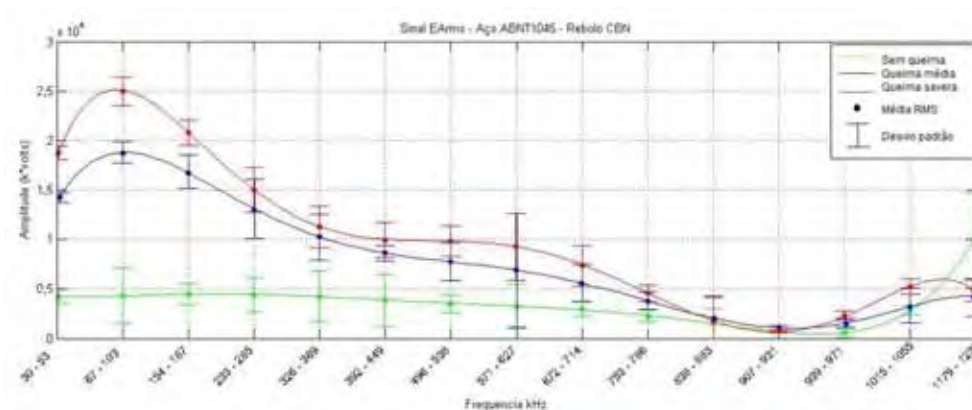


Figura 47 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço ABNT1045 com rebolo de CBN.

Após análise dos sinais RMS em função das bandas de frequência, foram gerados gráficos com valores RMS do sinal de EA puro e filtrado na banda de frequência que melhor indicou o fenômeno da queima.

A Figura 48 apresenta os valores RMS para o sinal puro de EA sem filtro e filtrado na banda de frequência de 60kHz a 100kHz para o rebolo de CBN com o aço ABNT1045.

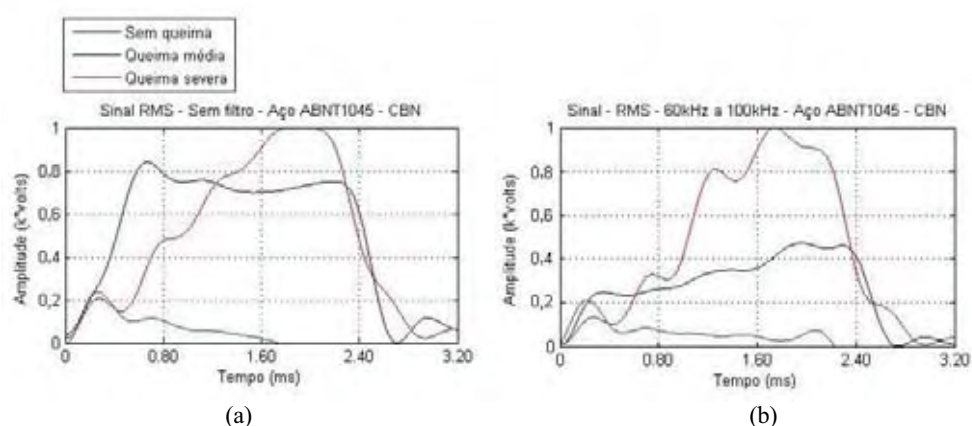


Figura 48 - RMS do sinal puro de EA sem filtro (a) e RMS do sinal de EA filtrado (b) com rebolo de CBN e aço ABNT1045.

A partir dos valores RMS da Figura 48a é possível notar que as amplitudes dos sinais de EA puro para os níveis de queima média e severa estão muito próximas, dificultando identificar o nível da queima.

Na Figura 48b são apresentados os valores RMS para os sinais de EA filtrados na faixa de 60kHz a 100kHz, sendo esta a banda de frequência que melhor indicou os níveis de queima. Por meio da análise do gráfico é possível notar uma diferença significativa quanto às amplitudes da curva de queima média e queima severa. Dessa forma é possível observar que o gráfico dos sinais filtrados, mostra um aumento da diferença entre as amplitudes para as condições de queima média e severa, permitindo que tais condições sejam mais facilmente identificadas por um sistema que utilize tais sinais e possibilitando à redução da taxa de amostragem necessária para a aquisição dos dados. Isso se explica com base no teorema da amostragem, ou seja, se a maior frequência for de 100kHz, a taxa de amostragem pode ser de 200kHz, bem abaixo da taxa utilizada nos ensaios experimentais, de 2,5MHz.

Posteriormente, o parâmetro estatístico DPO e a média RMS foram calculados para os sinais nos diferentes níveis de queima, permitindo avaliar a diferença quando não se emprega ou se emprega o filtro digital no sinal puro de EA na faixa de frequência considerada, como é apresentado na Figura 49.

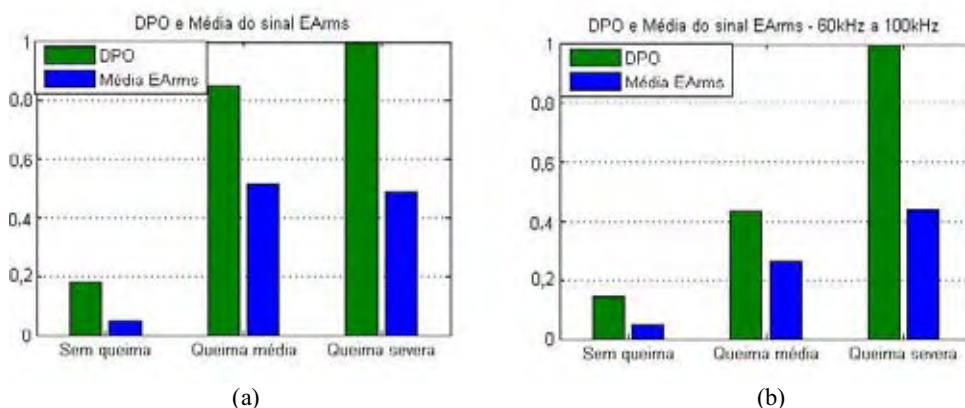


Figura 49 – (a) DPO e média RMS sem o emprego de filtro no sinal puro de EA (b) Com emprego de filtro no sinal puro de EA na faixa de 60kHz a 100kHz com rebolo de CBN e aço ABN1045.

É possível notar na Figura 49a que a média do sinal RMS de EA apresenta valores para queima média mais altos que os de queima severa, impedindo identificar de maneira correta os níveis de queima. Também são apresentados os valores obtidos através do parâmetro estatístico DPO, com resultados melhores, porém pouco precisos.

Na Figura 49b são apresentados os gráficos com os valores da média RMS do sinal de EA e do parâmetro estatístico DPO, porém com o sinal puro de EA filtrado na banda de frequência de 60kHz a 100KHz, onde se nota uma melhora significativa quanto à indicação dos níveis de queima. Assim, demonstra-se que o uso de determinados parâmetros estatísticos aliados ao uso de filtros permite identificar o fenômeno da queima com maior precisão.

Os resultados obtidos com os aços ABNT1045 e VC131 com rebolo de óxido de alumínio e rebolo CBN serão apresentados na íntegra a seguir.

4.2. Rebolo de Óxido de Alumínio para o Aço ABNT1045

4.2.1. Rugosidade Média Aritmética

Dos resultados obtidos a partir dos testes de rugosidade, onde o parâmetro lido foi a rugosidade aritmética, pode-se observar que as peças não queimadas apresentaram a menor rugosidade ao longo da peça, já na queima média e severa ocorre um aumento significativo. Assim, poder-se-ia inferir que, a rugosidade pode ser considerada um parâmetro para indicar a existência de queima média e severa, já que esta provoca uma transformação metalúrgica na peça, ocorrendo uma perda da qualidade superficial da mesma, com um possível amolecimento e repentino endurecimento do material em determinadas regiões, resultando consequentemente numa elevada rugosidade.

Conforme pode ser observado na Figura 50, para o aço 1045 e rebolo de óxido de alumínio, a rugosidade da peça 1, a qual não apresentou queima, ficou em torno de 0,3 μm , enquanto que para as outras peças que sofreram queima, a rugosidade média ficou acima deste valor, com exceção da peça 2 que sofreu queima leve, conforme análise visual, a rugosidade ficou muito próxima de 0,3 μm . Dessa forma, pode-se inferir que a rugosidade como

parâmetro indicativo da queima pode ser considerada ruim quando queimas leves ocorrem neste tipo de material e rebolo utilizados.

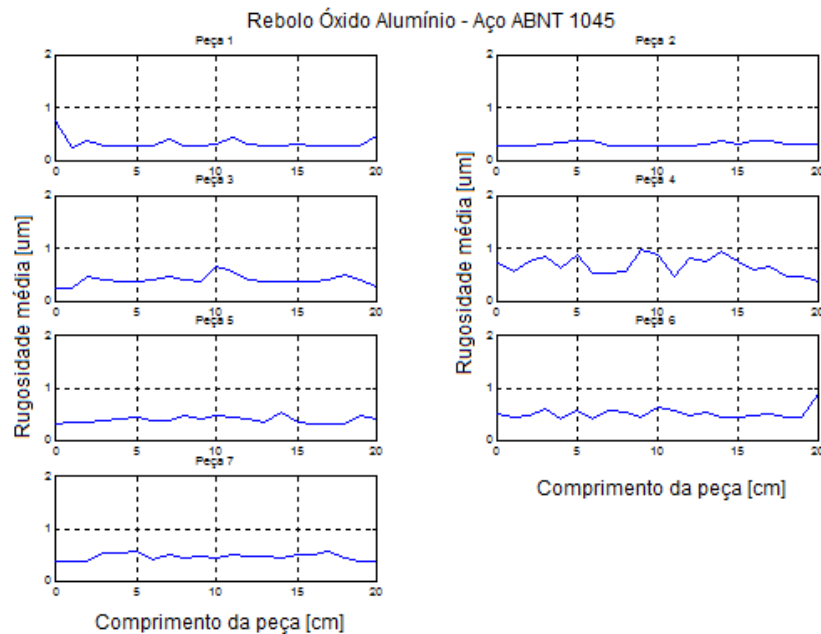


Figura 50 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de óxido de alumínio e aço ABNT 1045 para 20 medidas equidistantes de 5 mm ao longo da peça

4.2.2. Microdureza (Vickers)

Os testes de microdureza para o aço ABNT 1045 mostram o fenômeno de reendurecimento e amolecimento do material quando usinado ocorrendo ou não a queima superficial da peça. Pode ser observado na Figura 51 que a peça 1 não apresentou variações significativas da microdureza ao longo da peça, embora haja um pequeno decréscimo inicial no valor da microdureza, sendo esta uma peça sem queima. No entanto, algumas peças apresentaram valores de rugosidade consideravelmente decrescente, como a peça 2 por exemplo, que iniciou com um valor de microdureza em torno de 750 Vickers, caindo em torno de 400 Vickers no início da peça ($\sim 1,7$ cm) e assim permanecendo até o final da mesma. Já a peça 7, a qual apresentou queima no meio, teve um valor de microdureza inicial em torno de 300 Vickers, subindo para um valor de 750 Vickers no intervalo de 4,5 a 7,5 cm, e caindo finalmente para 400 Vickers no

final da peça. Isso demonstra um reendurecimento da peça no intervalo relatado devido a ocorrência da queima.

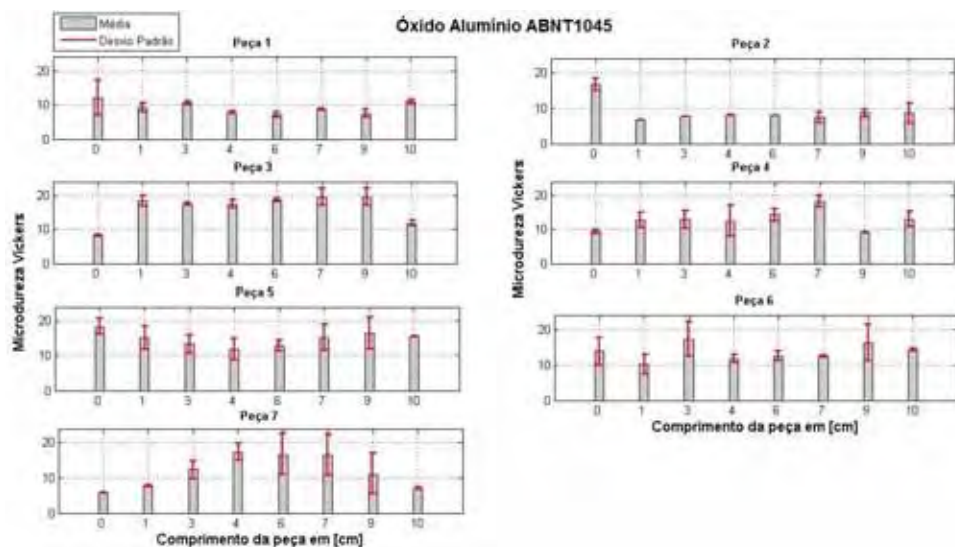


Figura 51 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de AlO e aço 1045 para 10 medidas eqüidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.

4.2.3. Médias RMS e DPO

A Figura 52 apresenta o as médias RMS dos sinais de emissão acústica do aço ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio. No gráfico a curva em vermelho representa a média RMS dos sinais de emissão acústica para o nível de queima severa, apresentando maior amplitude na faixa de frequência entre 14kHz a 451kHz (região no interior do quadro em vermelho), indicando maior energia que o sinal referente à curva de cor azul (queima média) e à de cor verde (sem queima). Dessa forma é possível notar que a faixa de 14kHz a 451kHz do espectro de frequência estudado para o aço ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio, foi a que melhor indicou o fenômeno da queima quanto ao nível de energia do sinal de emissão acústica em função das bandas de frequência, sendo que, a partir de 451kHz, nota-se que a curva referente à condição de queima média apresenta a maior amplitude, indicando que as demais bandas de frequência não apresentam bons resultado quanto à classificação da queima.

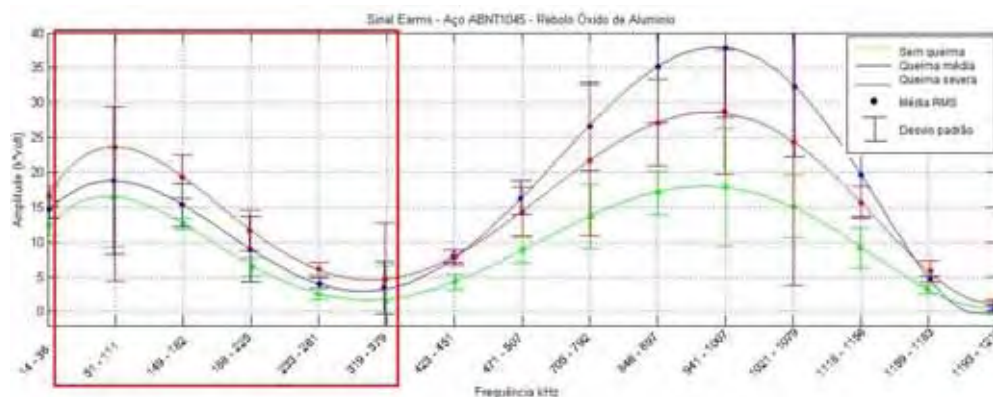


Figura 52 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço ABNT1045 com rebolo de óxido de alumínio.

Após análise dos sinais das médias RMS e definição das bandas de frequência que apresentaram melhor resultado quanto à classificação dos níveis de queima, foram realizados novos processamentos com o objetivo de identificar um método que permitisse a implementação por hardware de um sistema de detecção da queima em tempo real. Sendo assim, foram gerados gráficos com os valores RMS dos sinais puros de emissão acústica para os diferentes níveis de queima em três diferentes condições (Figura 53a, Figura 53b e Figura 53c). Na primeira, foram gerados os valores RMS dos sinais puros de emissão acústica; na segunda, os sinais foram filtrados na faixa de frequência entre 50kHz a 100kHz, sendo esta a melhor banda de frequência identificada, e, na terceira condição, os sinais foram filtrados na faixa de frequência entre 900kHz a 1000kHz, ou seja, na pior condição. Posteriormente foram calculadas as médias dos valores RMS e o parâmetro estatístico DPO para as três condições (sem filtro, filtrado na melhor banda e filtrado na pior banda), e gerado gráficos de barra, onde as barras de cor azul representam a média dos valores RMS dos sinais de emissão acústica para as condições sem queima, queima média e queima severa e barras de cor verde para os valores do DPO (ainda nas Figura 53a, Figura 53b e Figura 53c).

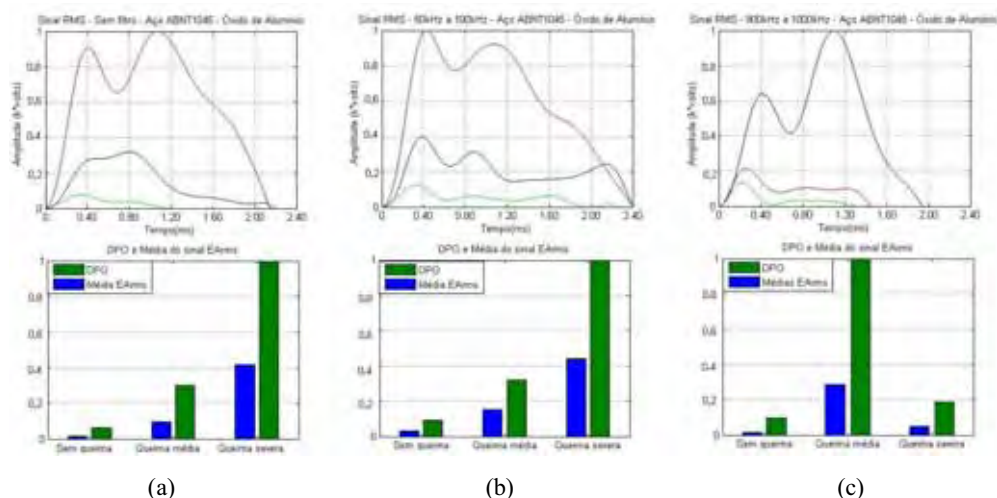


Figura 53 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 50kHz a 100kHz (b) e de 900kHz a 1000kHz (c) do aço ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio.

A partir dos resultados apresentados na Figura 53, é possível notar que a média dos valores RMS dos sinais de emissão acústica, bem como os valores de DPO para a banda de frequência de 50kHz a 100kHz, permitem identificar com mais clareza os diferentes níveis de queima, pois com o uso de filtros é possível eliminar componentes como ruídos e frequências que interfiram ou dificultam a análise dos sinais. Outro ponto importante é quanto à taxa de amostragem do sinal, pois considerando que a máxima frequência é de 100kHz para o aço ABNT com rebolo de óxido de alumínio, é possível reduzir a taxa de amostragem de 2,5Msps para de 200ksps.

4.3. Rebolo de Óxido de Alumínio para o Aço VC131

4.3.1. Rugosidade Média Aritmética

Para o aço VC131 usinado com o rebolo de óxido de alumínio, a rugosidade apresentou um valor por volta de 0,25 μm para as peças não queimadas, ou seja, as de número 1 e 5, conforme Figura 54, enquanto que para as peças queimadas, a rugosidade apresentou uma variação considerável, inclusive para a peça de número 2, onde a queima leve ocorreu. Assim, para este tipo de

material e rebolo, a rugosidade pode ser considerada um bom indicador de queima.

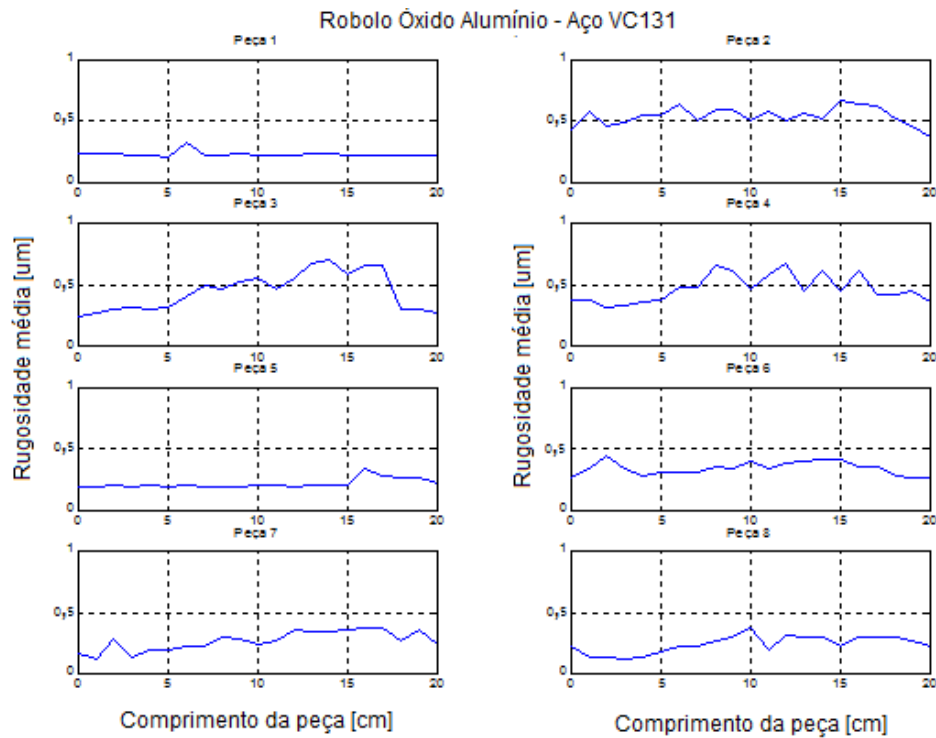


Figura 54 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de óxido de alumínio e aço VC131 para 20 medidas eqüidistantes de 5 mm ao longo da peça

4.3.2. Microdureza (Vickers)

Dos ensaios de microdureza, pode-se observar para o aço VC131, rebolo de óxido de alumínio, que os valores obtidos de microdureza para a peça 1 e 5, não queimadas, ficou entre 520 e 900 Vickers, o que pode ser caracterizado como uma peça sem transformação metalúrgica, aliado ao fato de que os valores iniciais de microdureza crescem logo no início da peça. Por outro lado, as outras peças apresentaram valores que variaram muito próximo ou abaixo de 500 ou ainda acima de 1000 Vickers, mostrando que transformações metalúrgicas ocorreram de forma a causar um reendurecimento (retêmpera) do material, como no caso das peças 2, 3 e 4 da Figura 55, ou um amolecimento da camada revenida, como na peça 7.

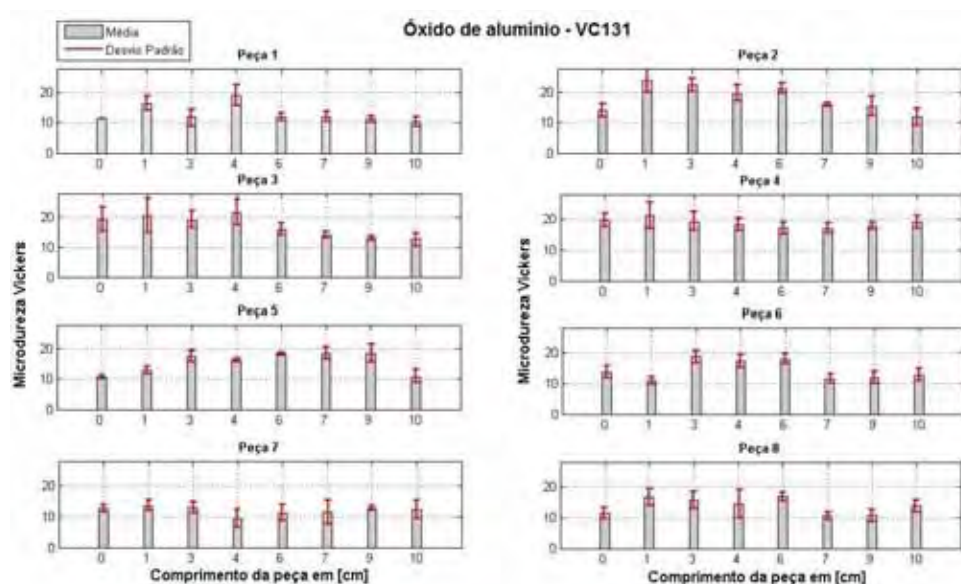


Figura 55 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de AIO e aço VC131 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.

4.3.3. Médias RMS e DPO

O mesmo processamento foi realizado para o aço VC131 com rebolo de óxido de alumínio. Na Figura 56 é apresentado o gráfico com os valores das médias RMS em função das bandas de frequência selecionadas para as condições sem queima (curva verde), queima média (curva azul) e queima severa (curva vermelha). Nota-se que para a condição de queima severa, a curva se mantém com maior amplitude ao longo de todo o espectro de frequência de 78kHz a 1222kHz, no entanto as curvas de queima média e sem queima apresentaram variação na amplitude ao longo do espectro, dificultando a definição de qual a melhor banda de frequência a ser considerada como a que melhor indica os níveis de queima.

É possível notar no gráfico da Figura 56 que o trecho entre 350kHz a 600kHz (região contornada em vermelho) é o que melhor indica os níveis de queima em função das amplitudes das médias RMS, sendo assim esta faixa foi selecionada para a análise dos parâmetros estatísticos.

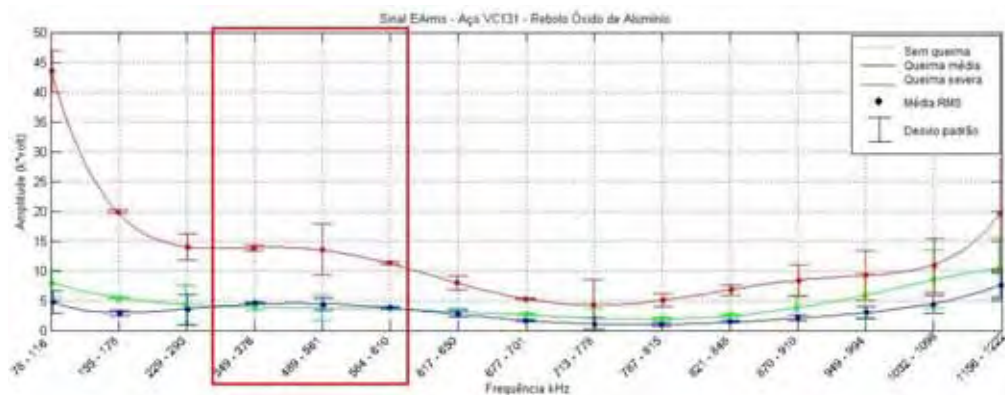
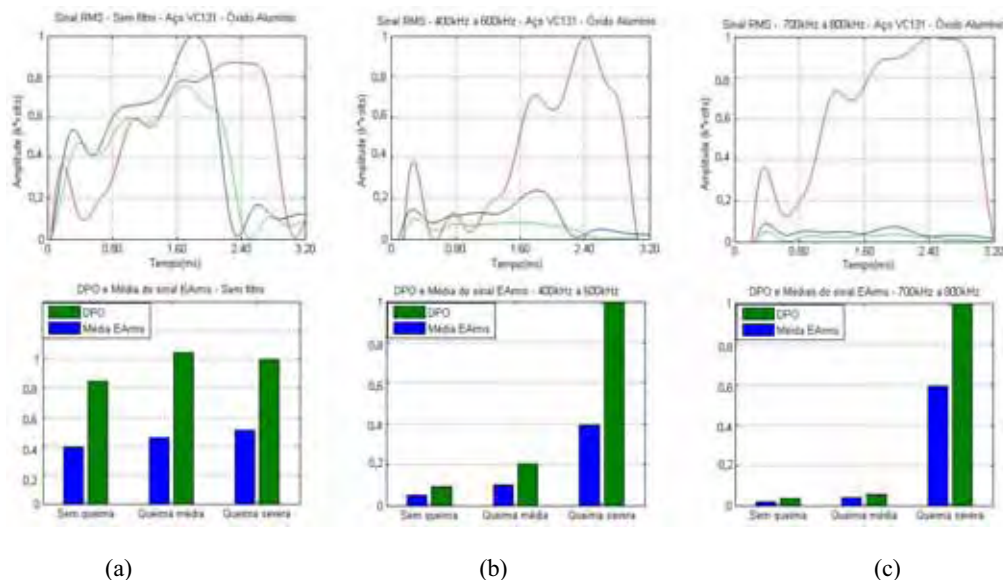


Figura 56 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço VC131 com rebolo de óxido de alumínio.

Na Figura 57 são apresentados os gráficos com os valores RMS do sinal de emissão acústica puro e filtrado de 400kHz a 600kHz, considerando esta faixa como a melhor banda de frequência e de 700kHz a 800Khz como sendo a faixa de frequência que apresentou o pior resultado, bem como a média dos valores RMS e do DPO. É possível notar no gráfico da Figura 57a, que as curvas dos valores RMS do sinal de emissão acústica não permitem identificar com clareza as condições de queima estudadas, pois tanto a curva de cor verde (sem queima), azul (queima média) e vermelha (queima severa), apresentam amplitudes muito próximas. Situação diferente pode ser observada no gráfico da Figura 57b, onde os valores RMS correspondem ao sinal de emissão acústica filtrados na faixa de frequência de 400kHz a 600Khz (melhor banda de frequência), sendo possível notar a diferença entre as amplitudes, onde a curva para queima severa apresenta maior amplitude, seguido da curva de queima média e sem queima.



(a) (b) (c)
Figura 57 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 400kHz a 600kHz (b) e de 700kHz a 800kHz (c) do aço VC131 com rebolo de óxido de alumínio.

Os resultados obtidos a partir das médias dos valores RMS bem como o DPO para o sinal EArms sem filtro, apresentado na Figura 57a, mostram valores que não permitem identificar o fenômeno da queima com precisão. Nas Figura 57b e Figura 57c, são apresentados os resultados dos sinais filtrados na melhor e pior banda de frequência, respectivamente. Nota-se que os sinais filtrados para as duas diferentes bandas de frequência permitem identificar os níveis de queima, porem o sinal filtrado na faixa de 400kHz a 600kHz (melhor banda de frequência), apresentou maior precisão.

4.4. Rebolo de CBN para o Aço ABNT1045

4.4.1. Rugosidade Média Aritmética

Os ensaios realizados com o aço ABNT 1045 e rebolo de CBN, as peças de número 1 e 2 foram inspecionadas e consideradas sem queima. No entanto, conforme a Figura 58, a rugosidade de tais peças diferem consideravelmente, levando a induzir que a peça 2 sofreu, de fato, queima, embora

não visível, devido ao seu alto valor de rugosidade apresentado, em torno de 1,7 μm . Todas as outras peças que sofreram queima visíveis apresentaram seus valores de rugosidade elevados comparados com a peça 1 não queimada, a qual apresentou rugosidade por volta de 0,9 μm . As peças 7, 8 e 9 desse ensaio não tiveram a rugosidades medida por limitações do aparelho utilizado.

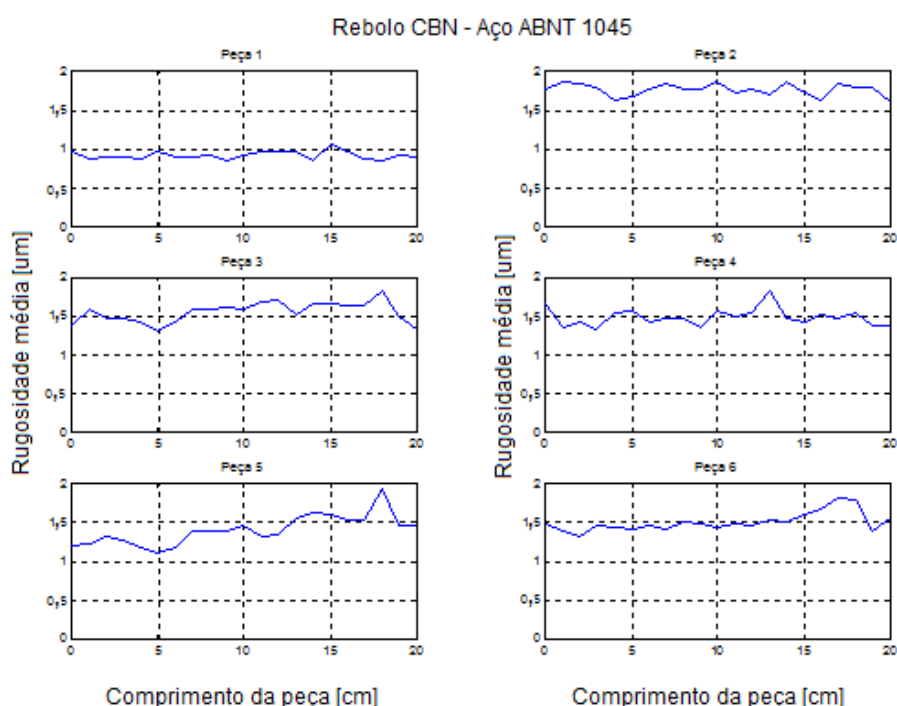


Figura 58 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de CBN e aço ABNT 1045 para 20 medidas equidistantes de 5 mm ao longo da peça

4.4.2. Microdureza (Vickers)

Os ensaios do ABNT 1045 com rebolo CBN apresentados na Figura 59, mostram que quando o valor da microdureza se mantém constante ou cresce do início da peça em diante, ficando na faixa de 500 a 1000 Vickers, esta não apresenta queima. Porém, quando o valor de microdureza cai no início e mantém uma oscilação ao longo da peça, a peça sofre queima. Assim, o ensaio de microdureza pode revelar se de fato ocorreu ou não a queima, mesmo quando essa não seja visível a olho nu.

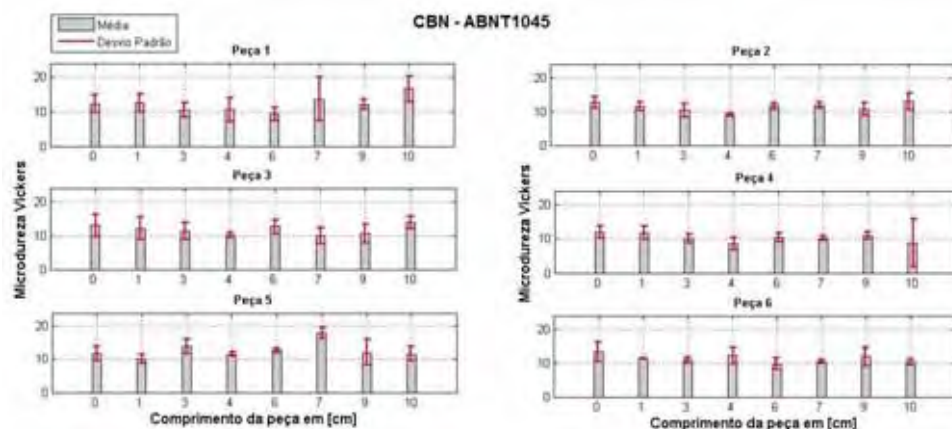


Figura 59 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de CBN e aço 1045 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.

4.4.3. Médias RMS e DPO

A Figura 60 apresenta o gráfico das médias RMS do sinal de emissão acústica para o rebolo de CBN com o aço ABNT1045, onde a faixa de frequência que apresentou melhores resultados quanto à indicação dos níveis de queima ficou entre 30kHz a 300kHz (região contornada em vermelho), sendo escolhida como a melhor banda de frequência a faixa entre 60kHz a 100kHz e para pior banda a faixa de 800kHz a 900Khz.

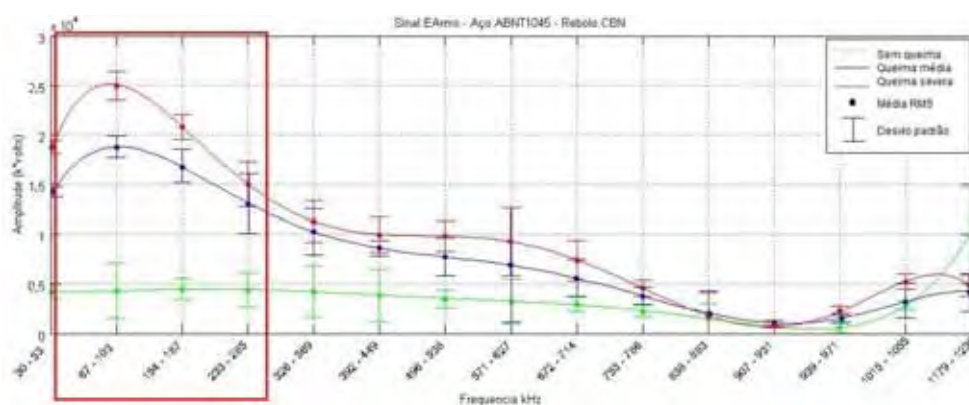


Figura 60 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço ABNT1045 com rebolo de CBN.

Os resultados obtidos através da média dos valores RMS e da estatística DPO para o aço ABNT1045 com rebolo de CBN, são apresentados na Figura 61. No gráfico do sinal EArms sem filtro da Figura 61a, nota-se pouca diferença nas amplitudes das curvas do sinal de queima severa e de queima média, impedindo identificar os níveis de queima com precisão. Na Figura 61b são apresentados os sinais de EArms filtrados na faixa de frequência entre 60kHz a 100Khz, considerada a melhor banda de frequência, onde as diferenças nas amplitudes dos sinais indicam com maior precisão os níveis de queima. Na Figura 61c são apresentados os sinais EArms filtrados de 800Khz a 900Khz, onde a curva da queima média apresenta maior amplitude, demonstrando que esta faixa de frequência não indica corretamente os níveis de queima.

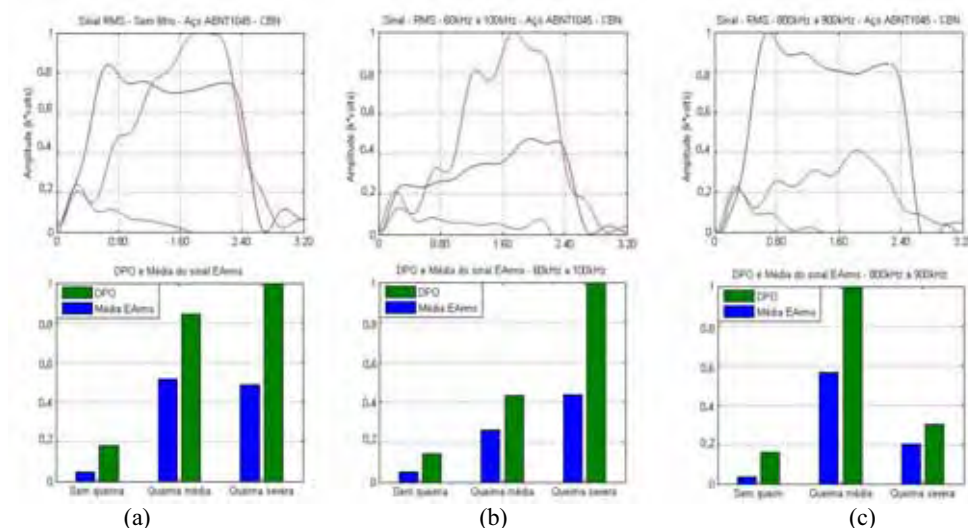


Figura 61 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 50kHz a 100kHz (b) e de 800kHz a 900kHz (c) do aço ABNT1045 com rebolo de óxido de CBN.

Os resultados das médias RMS bem como os do parâmetro estatístico DPO, também são apresentados na Figura 61a, Figura 61b e Figura 61c, onde se observa que a faixa de frequência entre 60kHz a 100KHz é a que apresentou maior precisão quanto à indicação dos níveis de queima.

4.5. Rebolo de CBN para o Aço VC131

4.5.1. Rugosidade Média Aritmética

Nos ensaios de retificação do aço VC131 com rebolo CBN, a peça 1 apresentou a menor rugosidade por não ter sofrido queima visível, conforme pode ser observado na Figura 62. Por outro lado, todas as outras peças que sofreram queima apresentaram um valor de rugosidade consideravelmente superior ao da peça 1, inclusive a peça 4, a qual sofreu queima branda visível. Neste caso, a rugosidade também pode ser considerada um parâmetro indicador de queima.

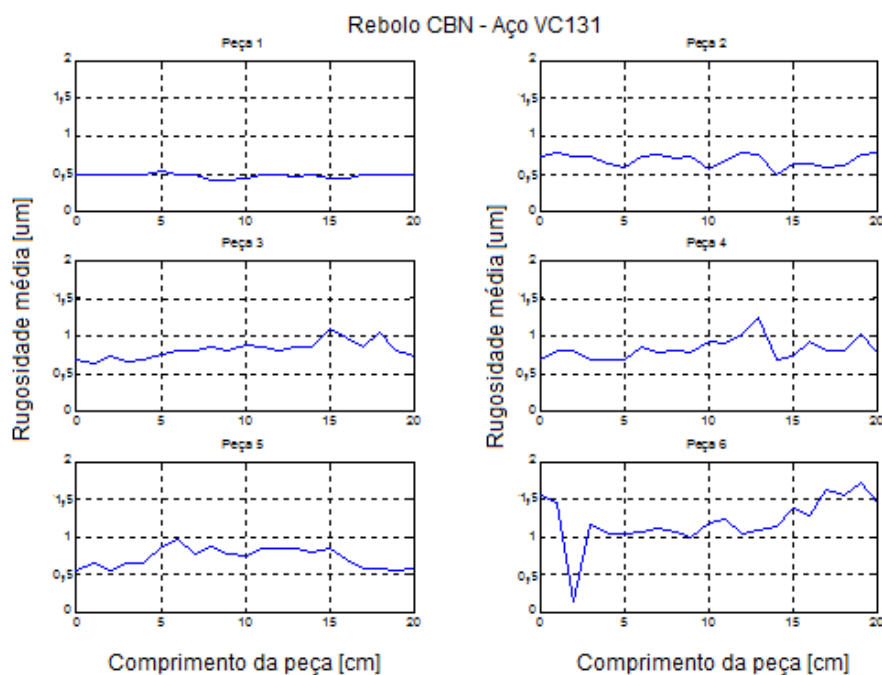


Figura 62 - Rugosidade (μm) para os testes com rebolo de CBN e aço VC131 para 20 medidas eqüidistantes de 5 mm ao longo da peça

4.5.2. Microdureza (Vickers)

Os ensaios com o aço VC131 com rebolo CBN mostram que quando o valor da microdureza se mantém constante ou cresce do início da peça, ficando na faixa de 500 a 1000 Vickers, a peça não apresenta queima. Porém,

quando o valor de microdureza cai no início e mantém uma oscilação ao longo da peça, a peça sofre queima. Isso pode ser verificado nas Figura 63, exceto para a peça 2, onde foi visualmente constatado a não ocorrência de queima. Assim, o ensaio de microdureza poderá revelar se de fato ocorreu ou não a queima, mesmo quando essa não seja visível a olho nu. Isto poderá ser melhor demonstrado se no processamento digital do sinal de emissão acústica ocorrer uma variação significativa no sinal para este caso. Também para a peça 4, onde houve uma pequena queda do valor da microdureza no início e manteve-se em torno de 500 Vickers ao longo da mesma deixa uma lacuna que poderá ser melhor elucidada no processamento do sinal de EA.

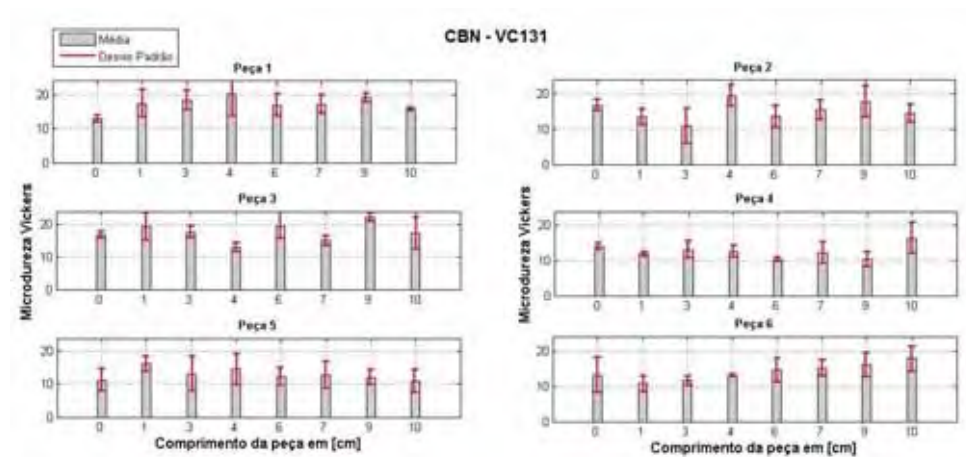


Figura 63 - Microdureza (Vickers) para os testes com rebolo de CBN e aço VC131 para 10 medidas equidistantes de 15 mm ao longo da peça, exceto para a última medida, com 10 mm.

4.5.3. Médias RMS e DPO

Para o aço VC131, a faixa de frequência observada e definida como a melhor banda, foi de 800kHz a 850Khz (região contornada em vermelho), como é apresentado na Figura 64.

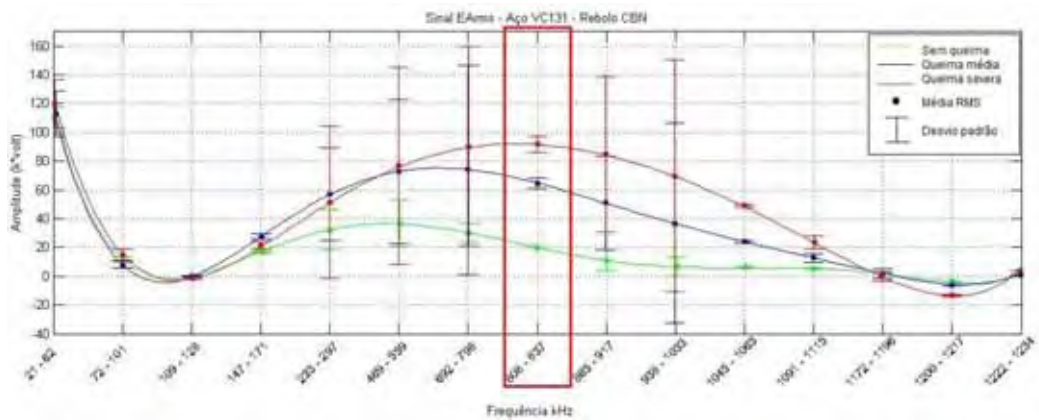


Figura 64 - Valores médios do sinal RMS em função das bandas de frequência para o aço VC131 com rebolo de CBN.

Nos gráficos da Figura 65, nota-se que o sinal EArms filtrado de 800kHz a 850kHz foi o único que indicou com precisão os níveis de queima, assim como os valores obtidos por meio das médias RMS e do parâmetro estatístico DPO.

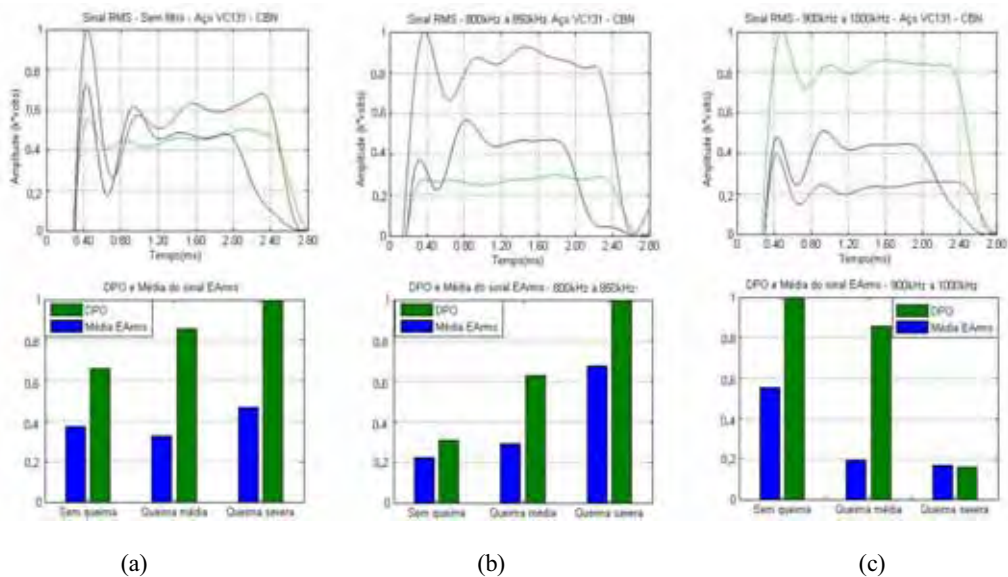


Figura 65 - Gráficos dos valores RMS, médias RMS e DPO do sinal de EA puro (a), dos sinais filtrados de 800kHz a 850kHz (b) e de 900kHz a 1000kHz (c) do aço VC131 com rebolo de CBN.

4.6. Resultados a partir do Hardware Desenvolvido

Com o objetivo de verificar o funcionamento em tempo real do hardware desenvolvido neste trabalho, escolheu-se a estatística DPO para ser

implementada no mesmo como ferramenta de detecção da queima. A escolha da estatística DPO foi devido a sua eficácia apresentada no trabalho de Aguiar *et al.*, (2002), pois a mesma reúne as características da variação do sinal de emissão acústica RMS e o comportamento mais previsível do sinal de potência de corte.

Para a implementação da estatística DPO no hardware, optou-se por simular o processo de retificação tangencial plana, ou seja, ao invés de ser utilizada a máquina retificadora e testado o sistema durante uma retificação real, foram gerados com o programa MATLAB os sinais de emissão acústica e potência elétrica com a utilização de uma placa de áudio de um microcomputador, a partir de arquivos contendo os sinais amostrados durante um processo de retificação. O sistema de simulação é apresentado na Figura 66.



Figura 66 - Sistema de simulação

O teste de simulação no hardware do processo de retificação com a ocorrência de queima da peça foi realizado para uma das condições dos ensaios realizados neste trabalho. Assim, o ensaio considerado para o referido teste foi o da peça número nove, retificada com aço ABNT1045 e rebolo de CBN, que sofreu queima severa.

Por meio do MATLAB foi realizado um condicionamento dos sinais, processando-se o sinal RMS de emissão acústica, e, posteriormente, aplicando um filtro passa baixa de 50Hz, o que permitiu que a aquisição do sistema proposto trabalhasse com taxa de aquisição mais baixa que a utilizada nos ensaios. A Figura 67 mostra os sinais de EA RMS e potência elétrica, para o ensaio com o aço ABNT1045 e rebolo de CBN de número nove.

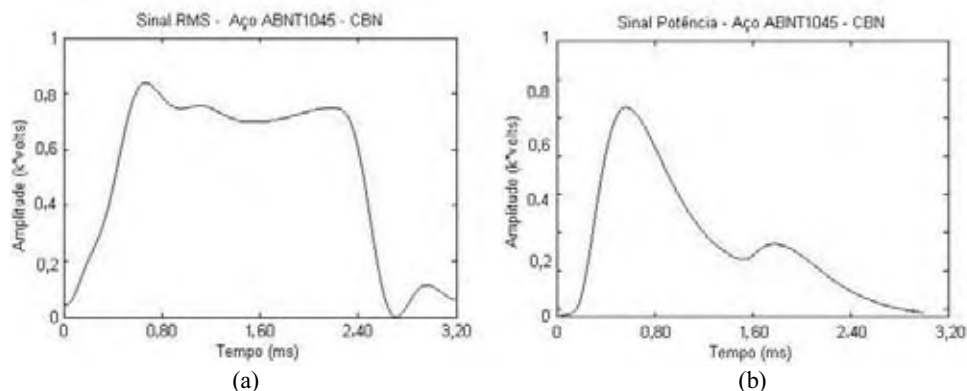


Figura 67 - Sinais a serem emulados (a) emissão acústica (b) potência elétrica

O arquivo utilizado era referente ao sinal puro de emissão acústica filtrado na faixa de frequência que, segundo os estudos, permitiram identificar com maior precisão o fenômeno da queima. Outro ajuste necessário foi igualar o tamanho do vetor de potência com o de emissão acústica, assim como normalizá-los para serem gerados através da placa de áudio do microcomputador. A função *soundsc*, disponível no MATLAB, foi utilizada para a geração dos sinais.

Como o sistema de monitoramento não possui recurso gráfico para exibir os sinais coletados, o display mostra apenas a informação de que o dispositivo está aquisitando e, em seguida, mostra o resultado do cálculo da estatística DPO. A Figura 68 apresenta o display com as imagens indicando o processo de aquisição e o resultado do cálculo do DPO.



Figura 68 - Imagem do display indicando processo de aquisição (a) imagem do display apresentando resultado do cálculo do DPO (b)

Após a realização da aquisição e do cálculo do DPO, o sistema envia os vetores com os sinais de emissão acústica e potência elétrica para o

microcomputador, onde os sinais são comparados com valores de referência, e exibidos na tela a ocorrência da queima.

A Figura 69 apresenta a tela do painel de controle do software de monitoramento com o resultado da análise da ocorrência da queima, apresentado em DPO, e o valor de referência abaixo do botão “Valor DPO”.

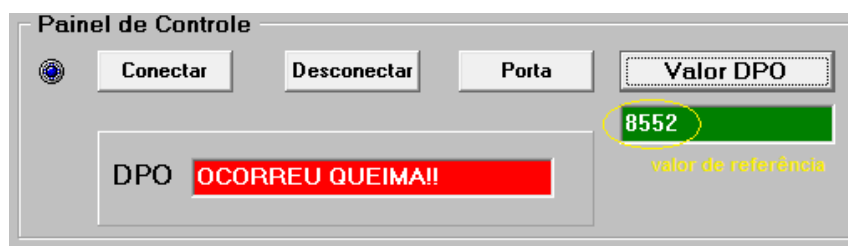


Figura 69 - Imagem do painel de controle do software de monitoramento

Cabe ressaltar que um diferente teste no hardware também foi realizado para a condição de peça sem queima, do ensaio com aço 1ABNT1045 e com rebolo de CBN de número um, de forma a se obter o valor de referência, como mostrado na Figura 69.

Como observado e descrito anteriormente, a aquisição dos sinais ocorreu sem erros, ou seja, de forma bem sucedida, assim como o armazenamento dos sinais, pois o valor de DPO apresentado no display é proveniente dos sinais processados no hardware.

Cabe também ressaltar que embora o processamento realizado pelo dsPIC tenha sido satisfatório, pôde-se verificar ao longo dos testes uma certa demora na comunicação, pois os dados são transferidos para o microcomputador através de comunicação serial toda vez que um processamento é executado. Mesmo assim, não houve problemas quanto ao processamento dos sinais na identificação da queima.

Quando a taxa de amostragem do hardware de aquisição de dados foi aumentada, observaram-se perdas de pontos na aquisição dos sinais, por isso, a máxima taxa de aquisição atingida sem perdas foi de 1000 amostras por segundo para os sinais RMS de EA e de potência elétrica.

Por fim, embora não tenha sido apresentado os resultados do hardware para uma peça com queima média, esses foram omitidos por não apresentarem resultados satisfatórios, e, portanto, foram descartados.

Capítulo 5. Conclusões

5.1. Conclusões Gerais

Da revisão bibliográfica realizada, observa-se que existem vários trabalhos que utilizam os sinais de emissão acústica e potência de corte para o monitoramento da queima, inclusive com abordagens de estudo espectral do sinal de EA. No entanto, não foram encontrados trabalhos científicos com abordagens de monitoramento para diferentes níveis de queima associados com faixas de frequência relacionadas com esses níveis.

Com os resultados obtidos através do estudo realizado, pôde-se observar que a análise espectral do sinal de emissão acústica puro traz informações importantes sobre a queima superficial da peça. Isto pôde ser observado nas variações significativas nas amplitudes dos sinais de emissão acústica para diferentes faixas de frequência, de acordo com o tipo de rebolo e material retificado. Desta forma, foi possível selecionar quinze bandas de frequência do sinal puro de EA para o estudo do comportamento das estatísticas RMS e DPO, já utilizadas em outros trabalhos para a detecção da queima.

A partir das curvas obtidas para a estatística RMS em função das bandas de frequência selecionadas, puderam-se verificar mais claramente as diferenças de comportamento e tendência dessas curvas em relação aos níveis de queima estudados. Com essa análise, foi possível se observar quais as frequências que melhores representam os níveis de queima, para cada aço e rebolo utilizados.

Com base na melhor faixa frequência observada para cada rebolo e aço utilizados, foi possível verificar que a aplicação de filtro digital nessa faixa de frequência proporcionou um sistema de detecção dos níveis de queima mais eficaz, comparado com a não utilização desses filtros. Pode-se concluir, portanto, que as estatísticas RMS e DPO quando obtidas com o uso de filtro apropriado apresentam melhores resultados na detecção dos níveis de queima.

O hardware e software desenvolvidos para a implementação do método estudado apresentaram bons resultados no monitoramento da queima. No

entanto, os sinais de emissão acústica e potência elétrica foram emulados a partir dos sinais reais de dois ensaios realizados no trabalho, os quais apresentaram peças com queima severa e sem queima. Os resultados do hardware para a condição de queima média foram insatisfatórios, e, portanto, o sistema desenvolvido deve passar por aprimoramentos em trabalhos futuros, de forma que responda bem a todos os níveis de queima estudados.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolvimento de um sistema de detecção de queima similar ao desenvolvido neste trabalho para o processo de retificação cilíndrica;
- Desenvolvimento de outros módulos de monitoramento agregados ao hardware, tal como o controle da dressagem e detecção de contato;
- Análise dos sinais com outras técnicas, tais como a decomposição do sinal de EA puro usando *wavelet*, e em seguida, realização do treinamento de uma rede neural artificial para que a partir das características no tempo e em frequência do sinal de EA seja possível a classificação do padrão de queima.
- Desenvolvimento de um módulo acoplado ao hardware que permita atuar no controle da mesa retificadora, de maneira que possa interromper o processo ou alterá-lo, visando um controle automático do processo.

Referencias Bibliográficas

AGUIAR P. R., WILLETT P., WEBSTER J., **Acoustic Emission Applied to Detect Workpiece Burn During Grinding**, International Symposium on Acoustic Emission: Standards and Technology Update, S. Vahaviolos, Ed., Fort Lauderdale, FL, 1999.

AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, Eduardo Carlos ; OLIVEIRA, J. F. G., **A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power signals**. Cirp Journal Of Manufacturing Systems, Paris, v. 31, n.3, p. 253-257, 2002.

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

AKBARI, J.; SAITOB, Y.; HANAOKAB, T., **Effect of Grinding Parameters on Acoustic Emission Signals while Grinding Ceramics**, Materials Processing Technology, Tehran/Iran, 1996.

ALI, Y. M. & ZHANG, L. C. **A fuzzy Model for Predicting Burns in Surface Grinding of Steel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 44, p. 563-571, 2004.

ARAUJO, J. B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, USP São Carlos, 2010.

BELL, A.; JIN, T.; STEPHENSON, D. J. **Burn threshold prediction for High Efficiency Deep Grinding**, Bedford MK43 0AL, UK: International Journal of Machine Tools & Manufacture. , 2011.

BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA JR, C. E. & AGUIAR, P. R., **Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis**, Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 335-340, 1996a.

BRINKSMEIER, E., TONSHOFF, H. K. CZENKURCH, C. & HEINZEL, C., **Modeling and optimisation of grinding process**, Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 9, pp. 303–314, 1998.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.A.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KÖNIG, W.; TETI, R., **Tool condition monitoring (TCM) - the status of research and industrial application**. Annals of the CIRP, Vol.44/1, 1995.

CHEN, X., ROWE, B., MILLS, B. & ALLANSON, D. R., **Analysis and simulation of the grinding process. part III: comparison with experiment**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 8, pp. 897–906, 1996.

CHUGANI, MAHESH; SAMANT & CERNA., **LabView Signal Processing**. New York, USA: Prentice Hall PTR, 1998. 1a Ed. 634p. ISBN: 0-13-972449-4.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; LEMOS, N.C., **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 6.ed. São Paulo: Editora Artiber Editora Ltda., 2008. 262p.

DURGUMAHANTI, U. S. P.; SINGH, P.V.; RAO, V. **A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Is 50, p 231–24, 2010.

FATHALLAH, B. B.; FREDJ, N.B.; SIDHOM, H.; BRAHAM, C.; ICHIDA, Y., **Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity**. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application. Vol. 49, pp.261-272, 2009.

FERREIRA, M. C., **Apostila de Preparo de amostras para a realização do teste de microdureza**, UFSC. Florianópolis, 2004.

GRIFFITHS, B. Manufacturing surface technology: **Surface integrity & functional performance**, London: Penton Press, 237p, 2001.

HASSUI, A., **Estudo de Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de Mergulho**, Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas/SP, 2002.

HEKMAN, K. A.; LIANG, S. Y., **Compliance Feedback Control for Part Parallelism in Grinding**. Advanced Manufacturing Technology, Georgia Institute of Technology, Atlanta/USA, 1999.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B.; LEE, H.S. **Grinding and suppression.**, Annals of the CIRP, Vol.50/2, p.515-534, 2001.

KARPUSCHEWSKI, M. W. & INASAKI I., **Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors**, Proceedings of the 50th CIRP General Assembly Conference, pp. 235-240, 2000.

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

KONIG, W. & MEYEN, H. P., **AE in grinding and dressing: accuracy and process reliability**, Proc. of 4th Int. Grind. Conference, MR90-526, 1990.

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

LANDERS, R.G.; ULSOY, A.G.; FURNESS, **Analysis of mechanical systems**, CRC Press R.J, 1999.

LEE, Y., **Probabilistic Analysis of Ductile/Brittle Transition in Diamond Turning of Brittle Materials**, Research Reports, 1998.

LEZANSKI, P. **An intelligent system for grinding wheel condition monitoring**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 109, 2001, pp. 258-263, 2001.

LIANG, S.Y., HECKER, R.L., and LANDERS, R.G., **Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art**, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering”, Vol. 126, No. 2, pp. 297–310, 2004.

LIAO, T.W., HUA, G., QU, J., BLAU, P.J. **Grinding Wheel Conditions Monitoring with Hidden Markov Model-Based Clustering Methods**. Machining Science and Technology 10, 511-538, 2006.

LINDSAY, R. P. **Principles of grinding**. Metals handbook: machining. 9.ed. Nova York; ASM International, 1995.

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

LYNN, P. A., FUERST, W., **Introductory digital signal process with computer application**. ed. New York : John Wiley & Sons, 1993.

LYONS, RICHARD G., **Undestanding Digital Signal Processing**, USA: Pearson Education, Inc, 2001, 2a Ed. ISBN 0-13-108989-7.

MACHADO, R.M.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B., **Teoria da usinagem dos materiais**., Editora E.Blucher, São Paulo. Brasil, 371p. 2009.

MALKIN, S. **Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage**., In: MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MALKIN, S.; GUO, C. **Thermal Analysis of Grinding**. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 760-782, jan 2007.

MARINELLI, N., COELHO, R. T., OLIVEIRA, J. F. G., **Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina**., Revista Máquinas e Metais, Maio/1998, pp. 56 – 73.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I., **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. CRC Press. New York, 2007.

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

MARINESCU, I.D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I. **Handbook of Machining With Grinding Wheels**. Taylor & Francis CRC Press, 2006.

MARTINS, P. S. **Avaliação dos sistemas de fixação hidráulica e térmica de brocas de metal duro em furação do cabeçote do motor Fire**, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Tese de Mestrado, 2008.

MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; AGUIAR, P. R., **Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasives CBN grinding wheels**. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application. Vol. 46, pp.122-131, 2006.

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

NILSON, J. W. & RIEDEL, S. A. **Circuitos elétricos. 6ª edição**. Editora LTC. Rio de Janeiro – 2003.

OGATA, K., **Discrete-time control systems, 2nd edition**. Prentice-Hall International, Inc, New Jersey, 1995, 744p.

OLIVEIRA, J. F. G., DORNFELD, D. A. & WINTER, B., **Dimensional characterisation of grinding wheel surface through acoustic emission**, Annals of the CIRP, Vol. 43, No. 1, pp. 291–294, 1994.

OLIVEIRA, J.F.G., VALENTE, C.M.O, 2004. **Fast Grinding Process Control with AE Modulated Power Signals**. CIRP Annals: Manufacturing Technology. v. 53, Issue 1, 267-270.

OPPENHEIM, A. V., WILLSHY, A. S., 1998, **Signals & Systems, Second Edition**, Prentice Hall.

POLINI, W; TURCHETTA, S., **Force and specific energy in stone cutting by diamond mill**. In: International Journal of machine Tools and Manufacture v. 44, p. 1189-1196, 2004.

PROAKIS, J. G., MANOLAKIS, D. G., **Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications**. Third Edition, Prentice Hall, 1996.

SALMON, S.C., **Mordern grinding process technology**. 1 ed. New York; Mcgraw-Hill, 1992, 224p.

SANTOS, M.; CARVALHO, E. L. M.; MACHADO, M. F. PICCIININI, M. S. **A indústria Brasileira de máquinas-ferramenta**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 26, p. 81-100, 2007.

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

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

SEVERIANO, A. C., **Retificação de aços com rebolos de CBN ligado galvanicamente sobre corpo de alumínio**. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SHAW, M. C., **Principles of abrasives processing**. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996.

SMITH, S. W., **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Second Edition**, California Technical Publishing, San Diego, California, 1999.

STEVEN W. SMITH; **The scientist and engineer's Guide to digital signal processing**. Second Edition 1999, California Technical Publishing San Diego, California.

TAWAKOLI, T. **Minimum coolant lubrication in grinding**. Industrial Diamond Review, n° 1, p. 60-65, 2003.

TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G. DORNFELD, D. **Advanced monitoring of machining operations**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59, 717–739, 2010.

TONSHOFF, H.K., FRIEMUTH, T., BECKER, J.C. **Process Monitoring in Grinding**. Annals of the CIRP 51 (2), 551-571, 2002.

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

WEGENER, K.; HOFFMEISTER, H.-W.; KARPUSCHEWSKI, B.; KUSTER, F.; HAHMANN, W.-C.; RABIEY, M. **Conditioning and monitoring of grinding wheels**. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, 757–777, 2011.

WHITEHOUSE, D.J. Surface texture. In: **Handbook of surface metrology**. v.18. p. 184-190, 1994.

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

Trabalhos Publicados

Trabalhos Referentes à Dissertação

MARCHI, Marcelo.; LUIZA, Rafael Ferro.; Nakai, Mauricio Eiji.; AGUIAR, Paulo Roberto.; BIANCHI, Eduardo Carlos. **“Hardware dsPIC no Monitoramento e Detecção de Dano Térmico em Processo de Retificação ”**. In: X Congresso Ibero-americano em Engenharia Mecânica – CIBEM10, 2011, Porto, Portugal. 2011. p. CD-ROM.

MARCHI, Marcelo.; AGUIAR, Paulo Roberto.; BIANCHI, Eduardo Carlos. **“Estudo do Conteúdo Harmônico do Sinal de Emissão Acústica Relacionado a Queima e Vibração Auto-excitada na Retificação ”**. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2012, São Luiz, Maranhão. 2012. p. CD-ROM.

Trabalhos Desenvolvidos no Período

Nakai, Mauricio Eiji.; LUIZA, Rafael Ferro.; MARCHI, Marcelo.; AGUIAR, Paulo Roberto.; BIANCHI, Eduardo Carlos. **“Digital Signal Processor and Multi-sensor in Monitoring of Dressing Operation ”**. In: XXI Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Natal, Rio grande do Norte. 2011. p. CD-ROM.

Aguiar. Paulo R, Cesar H.R. Martins, Marcelo Marchi and Eduardo C. Bianchi (2012). **Digital Signal Processing for Acoustic Emission**, Data Acquisition Applications, Zdravko Karakehayov (Ed.), ISBN: 978-953-51-0713-2, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/data-acquisition-applications/digital-signal-processing-for-acoustic-emission>.

ANEXO I - Código fonte do Software

```
unit BurningDetector;
interface
{declaração das bibliotecas}
uses
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, CPortCtl, CPort, StdCtrls, SDL_rchart, ExtCtrls, jpeg;
{declaração das variáveis locais}
private
Hor, Ver, Hor2, Ver2 : real;
scale1x, scale1y, scalex0, scaley0, scale1x2, scale1y2, scalex02, scaley02: integer;
Str1 : string;
{declaração das variáveis globais}
public
a,b : integer;
semQ,comQ : real;
end;
var
Form1: TForm1;
vetEA : array[1..400]of real;
vetPT : array[1..400]of real;
{corpo do programa}
implementation
{$R *.dfm}
{procedimento de configuração da porta serial}
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin
    ComPort1.ShowSetupDialog;
end;
{procedimento para iniciar comunicação com hardware}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    ComPort1.Open;
end;
{procedimento para interromper a comunicação com hardware}
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
    ComPort1.Close;
end;

{procedimento de leitura da porta serial}
procedure TForm1.RX(Sender: TObject; Count: Integer);
begin
    escreveG1;
end;
```

```

{procedimento para limpar gráfico 1}
Procedure TForm1.clearchart1;
begin
RChart1.ClearGraf;
RChart1.ShowGraf;
Hor:=0;
Ver:=0;
a :=0;
Str1 := '0';
Edit1.Clear;
end;
{procedimento para limpar gráfico 2}
Procedure TForm1.clearchart2;
begin
RChart2.ClearGraf;
RChart2.ShowGraf;
Hor2:=0;
Ver2:=0;
b :=0;
Str1 := '0';
Edit1.Clear;
end;
{procedimento do botão de limpar gráficos}
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
clearchart1;
clearchart2;
Edit1.Clear;
Edit1.Color:=clWhite;
end;

{procedimento de calculo do DPO}
procedure TForm1.RecebeDPO;
var num:real;
begin
if a=0 then
begin
RChart1.DataColor:=clBlack;
RChart2.DataColor:=clBlack;
num:=StrToFloat(Str1);
if num>semQ then
begin
Edit1.Color:=clRed;
Edit1.Text:='OCORREU QUEIMA!!!';
end
else

```

```

        if num<=semQ then
            begin
                Edit1.Color:=clGreen;
                Edit1.Text:='NÃO OCORREU QUEIMA!!';
            end;
        end;
    end;
end;
{procedimento para configuração das escalas do gráfico 1}
procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
var textx, texty, textx0, texty0 : string;
begin
    textx := Edit3.Text; texty := Edit4.Text;
    textx0 := Edit6.Text; texty0 := Edit5.Text;
    scalex0 := StrToInt(textx0); scaley0 := StrToInt(texty0);
    scale1x := StrToInt(textx); scale1y := StrToInt(texty);
    RChart1.Scale1X.RangeLow := scalex0;
    RChart1.Scale1Y.RangeLow := scaley0;
    RChart1.Scale1X.RangeHigh := scale1x;
    RChart1.Scale1Y.RangeHigh := scale1y;
end;

{procedimento para configuração das escalas do gráfico 2}
procedure TForm1.Button7Click(Sender: TObject);
var textx, texty, textx0, texty0 : string;
begin
    textx := Edit9.Text; texty := Edit10.Text;
    textx0 := Edit7.Text; texty0 := Edit8.Text;
    scalex02 := StrToInt(textx0); scaley02 := StrToInt(texty0);
    scale1x2 := StrToInt(textx); scale1y2 := StrToInt(texty);
    RChart2.Scale1X.RangeLow := scalex02;
    RChart2.Scale1Y.RangeLow := scaley02;
    RChart2.Scale1X.RangeHigh := scale1x2;
    RChart2.Scale1Y.RangeHigh := scale1y2;
end;
{procedimento de plotagem dos gráficos}
procedure TForm1.escreveG1;
Var Str : string; x,y, x2, y2 : real; count : integer;
begin
    begin
        if a < 400 then
            begin
                ComPort1.ReadStr(Str, Count); Str1 := Str;
                RecebeDPO;
                y := StrToFloat(Str1); vetEA[a]:=y;
                x := a; inc(a);
                RChart1.Line(x,y,Hor,Ver);
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

    Hor := x; Ver := y;
    RChart1.ShowGraf;
End
else
if a = 400 then
begin
    ComPort1.ReadStr(Str, Count); Str1 := Str;
    y2 := StrToFloat(Str1); vetPT[b]:=y2;
    x2 := b; inc(b);
    RChart2.Line(x2,y2,Hor2,Ver2);
    Hor2 := x2; Ver2 := y2;
    RChart2.ShowGraf;
end;
if b = 400 then
    geragraficos;
end;
end;
END.

```

ANEXO II - Código fonte do firmware (dsPIC)

```
program Burning_Detector;
//declaração das variaveis globais
var ADCresult : word;
    txt : array[6] of char;
    bufferEA : array[400] of word;
    bufferPT : array[400] of word;
    x : integer;
    txt1, txt2, txt3, txt4,txt5 : array[19] of char;
    i : byte;
    ch : char;
    adc_rd,vetPTmax,index : word;
    tlong : longint;
    text : array[16] of char;
    DPOfim : word;
//definição dos pinos de conexão LCD
var LCD_RS : sbit at LATD0_bit;
var LCD_EN : sbit at LATD1_bit;
var LCD_D4 : sbit at LATB0_bit;
var LCD_D5 : sbit at LATB1_bit;
var LCD_D6 : sbit at LATB2_bit;
var LCD_D7 : sbit at LATB3_bit;
var LCD_RS_Direction : sbit at TRISD0_bit;
var LCD_EN_Direction : sbit at TRISD1_bit;
var LCD_D4_Direction : sbit at TRISB0_bit;
var LCD_D5_Direction : sbit at TRISB1_bit;
var LCD_D6_Direction : sbit at TRISB2_bit;
var LCD_D7_Direction : sbit at TRISB3_bit;
//procedimento da apresentação LCD
procedure LCD1;
begin
    ADPCFG := 0xFFFF;
    txt1 := 'LADAPS - dsPIC-';
    txt3 := '*-----DPO-----*';
    txt4 := '*-START  ';
    Lcd_Init();
    Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
    LCD_Out(1,1,txt1);  LCD_Out(2,1,txt3);
    DELAY_MS(3000);  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
    LCD_Out(2,1,txt4);
end;
```

```

//procedimento do LCD que indica aquisição em andamento
procedure LCD2;
begin
  ADPCFG := 0xFFFF;
  txt2 := ' --AQUISITANDO--';
  txt3 := '      STOP-*';
  Lcd_Init();
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
  Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
  LCD_Out(1,1,txt2);
  LCD_Out(2,2,txt3);
end;

//procedimento do LCD que indica o envio dos buffers para o PC
procedure LCD3;
begin
  ADPCFG := 0xFFFF;
  txt5 := '*-ENVIANDO->PC-*';
  txt3 := '      STOP-*';
  Lcd_Init();
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);
  LCD_Out(1,1,txt5); LCD_Out(2,2,txt3);
end;

//procedimento de aquisição dos buffers
procedure DAQ;
var count : integer;
label novoBuffer;
begin
  PORTB := 0x0000;
  TRISB := 0xFFFF;
  TRISF := 0xFFFF;
  ADC1_Init();
  ADCresult:=0;
  count := 0;
  // amostragem e buffer
repeat
  // leitura canal AD 4 Emissão Acústica
  ADCresult := ADC1_Get_Sample(4);
  if ADCresult<>0 then
  begin
    bufferEA[count] := ADCresult;
  end;
  // leitura canal AD 5 Potência motor
  ADCresult := ADC1_Get_Sample(5);
  if ADCresult<>0 then
  begin
    bufferPT[count] := ADCresult;
  end;
until count=100;
novoBuffer;
end;

```

```

end;
count := count + 1;
delay_ms(10); //define Fhz
until (count = 400)or(Button(PORTF, 0, 1, 1));
if (Button(PORTF, 0, 1, 1)) then
begin
LCD1;
count:=0;
repeat
bufferEA[count]:=0;
bufferPT[count]:=0;
count := count + 1;
until (count = 400);
end;
end;
//Envia buffers EA e PT para PC
procedure ENVIA;
var count : integer;
label novoBuffer;
begin
PORTB := 0x0000;
TRISB := 0xFFFF;
TRISF := 0xFFFF;
ADC1_Init();
UART1_Init(9600);
count := 0;
//envia buffer EA para PC
WordToStr(DPOfim,txt);
UART1_Write_Text(txt);
delay_ms(100);
repeat
ADCresult := bufferEA[count];
WordToStr(ADCresult, txt);
UART1_Write_Text(txt);
delay_ms(80); //define a Fhz
count := count + 1;
until (count = 400)or(Button(PORTF, 0, 1, 1));
count :=0;
//envia buffer PT para PC
repeat
ADCresult := bufferPT[count];
WordToStr(ADCresult, txt);
UART1_Write_Text(txt);
delay_ms(80); //define a Fhz
count := count + 1;
until (count = 400)or(Button(PORTF, 0, 1, 1));

```

```

if (count = 400)or(Button(PORTF, 0, 1, 1)) then
begin
count:=0;
repeat
bufferEA[count]:=0;
bufferPT[count]:=0;
count := count + 1;
until (count = 400);
LCD1;
count:=0;
end;
end;
//programa principal
begin
PORTB := 0x0000;
TRISB := 0xFFFF;
TRISF := 0xFFFF;
ADC1_Init();
LCD1;
while (TRUE) do
begin
ADCresult := ADC1_Get_Sample(4);
if (Button(PORTF, 1, 1, 1))or(ADCresult>0) then
BEGIN
LCD2;
DAQ;
vetPTmax := Vector_Max(bufferPT, 400, index);
DPO(bufferPT,vetPTmax);
ENVIA;
END;
end;
end.

```

ANEXO III - Rotinas criadas no MATLAB

```
%função para calcular o valor RMS, onde a é o arquivo e b o valor das
subdivisões
function rms=rms(a,b)
l=numel(a);
r=rem(l,b);
ea=a(1:l-r);
ofs=mean(ea);
ea=ea-ofs;
s=round(numel(ea)/b);
ea=reshape(ea,b,s);
rms=sqrt(mean(ea.^2));
end

%função para calculo da FFT, onde “a” é o vetor e “b” a posição do gráfico e “c”
o titulo do gráfico.
function FFT1(a,b,c)
ea=a(20e3:20e3+8191);
Fs = 2500000;
T = 1/Fs;
L = length(ea);
w=blackman(L);
ea=ea.*w;
NFFT = 2^nextpow2(L);
Y = fft(ea,NFFT)/L;
f = (Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1))/1000;
subplot(3,1,b)
semilogx(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title(c)
xlabel('Frequencia (KHz)')
ylabel('Amplitude')
xlim([0 f(1,length(f))]);
ylim([0 5]);
end

%função filtro passa faixa
%fin:sinal na entrada do filtro
%fc: frequência de corte fc=[b, a]
%    b= freq. inicial da faixa,
%    a= freq. final da faixa
%fs: frequência padrão
%fout: o sinal filtrado
%n = ordem do filtro
function fout = BPfiltro(fin,fc,fs,n)
if (nargin~=4)
    error('Numero incorreto de argumentos na entrada.')
else
```

```

wc = 2*fc./fs;
[z, p, k]= butter(n, wc);
[sos, g] = zp2sos(z, p, k);
h2=dfilt.df2sos(sos,g);
fout=filter(h2,fin);
end
%função para filtrar os sinais nas bandas frequência e gerar o vetor com as médias
rms de cada banda de frequência selecionada
function [vet_filter_RMS]=vet_filter_RMS(a, l, fs, bandas)
y=1;
for x=1:15
    fl=bandas(y);
    f2=bandas(y+1);
    sinalFiltrado=BPfiltro(a, [f1 f2], fs, 6);
    sinalRMS=rmss(sinalFiltrado, l);
    vet_filter_RMS(x)=mean(sinalRMS);
    y=y+2;
end
end
%script para calculo das médias e desvios e geração dos gráficos usando
polinômio
b = input('Entre com o vetor BANDAS: ');
[sq1_media_rms]=vet_filter_RMS(sq1,2048,2500000,b);
[sq2_media_rms]=vet_filter_RMS(sq2,2048,2500000,b);
[sq3_media_rms]=vet_filter_RMS(sq3,2048,2500000,b);
[sq4_media_rms]=vet_filter_RMS(sq4,2048,2500000,b);
matsq=[];
matsq=[sq1_media_rms' sq2_media_rms' sq3_media_rms' sq4_media_rms'];
for x=1:15
    sq_medias(x)=mean(matsq(x,:));
end
for x=1:15
    sq_desvios(x)=std(matsq(x,:));
end
[qm1_media_rms]=vet_filter_RMS(qm1,2048,2500000,b);
[qm2_media_rms]=vet_filter_RMS(qm2,2048,2500000,b);
[qm3_media_rms]=vet_filter_RMS(qm3,2048,2500000,b);
[qm4_media_rms]=vet_filter_RMS(qm4,2048,2500000,b);
matqm=[];
matqm=[qm1_media_rms' qm2_media_rms' qm3_media_rms' qm4_media_rms'];
for x=1:15
    qm_medias(x)=mean(matqm(x,:));
end
for x=1:15
    qm_desvios(x)=std(matqm(x,:));
end
end

```

```

[qs1_media_rms]=vet_filter_RMS(qs1,2048,2500000,b);
[qs2_media_rms]=vet_filter_RMS(qs2,2048,2500000,b);
[qs3_media_rms]=vet_filter_RMS(qs3,2048,2500000,b);
[qs4_media_rms]=vet_filter_RMS(qs4,2048,2500000,b);
matqs=[];
matqs=[qs1_media_rms' qs2_media_rms' qs3_media_rms' qs4_media_rms'];
for x=1:15
    qs_medias(x)=mean(matqs(x,:));
end
for x=1:15
    qs_desvios(x)=std(matqs(x,:));
end
figure('Name','GRAFICO MÉDIAS','NumberTitle','on')
hold on
[p,s]=polyfit([1:15],sq_medias,6);
y=polyval(p,[1:1:15],s);
plot([1:1:15],y,'g');
[p,s]=polyfit([1:15],qm_medias,6);
y=polyval(p,[1:1:15],s);
plot([1:1:15],y,'b');
[p,s]=polyfit([1:15],qs_medias,6);
y=polyval(p,[1:1:15],s);
plot([1:1:15],y,'r');
x=reshape(b,2,15);
set(gca,'XTickLabel',sprintf('%i - %i|',fix(x)));
%script para calculo do DPO e das médias rms normalizando os sinais
SQ=SQ.*(SQ>0);
QM=QM.*(QM>0);
QS=QS.*(QS>0);
desvSQ=std(SQ);
desvQM=std(QM);
desvQS=std(QS);
dpoSQ=desvSQ*maxSQ;
dpoQM=desvQM*maxQM;
dpoQS=desvQS*maxQS;
maxDPOqs=max(dpoQS);
dpoSQnorm = ((dpoSQ-0)./(maxDPOqs-0));
dpoQMnorm = ((dpoQM-0)./(maxDPOqs-0));
dpoQSnorm = ((dpoQS-0)./(maxDPOqs-0));
MDea=[mean(SQ),mean(QM),mean(QS)];
DPO=[dpoSQnorm,dpoQMnorm,dpoQSnorm];

```

ANEXO IV – Tabelas dos Resultados de Rugosidade

Tabela 5 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço 1045 – Rebolo AIO

1045 óxido peça 1	1045 óxido peça 2	1045 óxido peça 3	1045 óxido peça 4	1045 óxido peça 5	1045 óxido peça 6	1045 óxido peça 7
0,74	0,3	0,24	0,72	0,32	0,52	0,36
0,26	0,3	0,26	0,56	0,36	0,44	0,36
0,38	0,28	0,48	0,74	0,34	0,5	0,36
0,28	0,32	0,4	0,84	0,38	0,6	0,54
0,3	0,34	0,38	0,64	0,4	0,42	0,54
0,3	0,36	0,38	0,9	0,44	0,56	0,56
0,3	0,38	0,4	0,52	0,38	0,4	0,42
0,42	0,3	0,48	0,54	0,38	0,56	0,5
0,3	0,3	0,42	0,56	0,48	0,54	0,44
0,3	0,28	0,38	0,96	0,42	0,46	0,48
0,32	0,3	0,66	0,88	0,48	0,64	0,46
0,46	0,28	0,56	0,48	0,46	0,58	0,5
0,32	0,3	0,4	0,8	0,42	0,5	0,48
0,28	0,32	0,38	0,76	0,36	0,54	0,48
0,3	0,38	0,36	0,94	0,54	0,46	0,46
0,32	0,32	0,38	0,74	0,34	0,44	0,5
0,28	0,36	0,38	0,6	0,32	0,5	0,52
0,3	0,36	0,4	0,66	0,32	0,52	0,56
0,3	0,32	0,5	0,46	0,32	0,44	0,46
0,3	0,32	0,42	0,46	0,48	0,44	0,36
0,48	0,32	0,3	0,36	0,42	0,9	0,36

Tabela 6 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço VC131 – Rebolo AIO

vc óxido peça 1	vc óxido peça 2	vc óxido peça 3	vc óxido peça 4	vc óxido peça 5	vc óxido peça 6	vc óxido peça 7	vc óxido peça 8
0,24	0,42	0,24	0,38	0,18	0,26	0,16	0,22
0,24	0,58	0,28	0,38	0,18	0,34	0,12	0,14
0,24	0,46	0,30	0,32	0,20	0,44	0,28	0,14
0,22	0,48	0,32	0,34	0,18	0,34	0,14	0,12
0,22	0,54	0,30	0,36	0,20	0,28	0,20	0,14
0,20	0,54	0,32	0,38	0,18	0,32	0,20	0,18
0,32	0,64	0,40	0,48	0,20	0,32	0,22	0,22
0,22	0,50	0,50	0,48	0,18	0,32	0,22	0,22
0,22	0,60	0,46	0,66	0,18	0,36	0,30	0,26
0,24	0,60	0,52	0,62	0,18	0,34	0,28	0,30
0,22	0,50	0,56	0,46	0,20	0,40	0,24	0,38
0,22	0,58	0,46	0,58	0,20	0,34	0,26	0,20
0,22	0,50	0,56	0,68	0,18	0,38	0,36	0,32
0,24	0,56	0,68	0,44	0,20	0,40	0,34	0,30
0,24	0,52	0,70	0,62	0,20	0,42	0,34	0,30
0,22	0,66	0,58	0,44	0,20	0,42	0,36	0,22
0,22	0,64	0,66	0,62	0,34	0,36	0,38	0,30
0,22	0,62	0,66	0,42	0,28	0,36	0,38	0,30
0,22	0,52	0,30	0,42	0,26	0,28	0,26	0,30
0,22	0,46	0,30	0,44	0,26	0,26	0,36	0,26
0,22	0,36	0,28	0,36	0,22	0,26	0,24	0,22

Tabela 7 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço 1045 – Rebolo CBN

1045 CBN	1045 CBN	1045 CBN	1045 CBN	1045 CBN	1045 CBN
peça 1	peça 2	peça 3	peça 4	peça 5	peça 6
0,96	1,78	1,38	1,66	1,20	1,48
0,88	1,86	1,58	1,36	1,22	1,40
0,90	1,84	1,48	1,42	1,32	1,32
0,90	1,80	1,46	1,34	1,26	1,46
0,88	1,64	1,44	1,54	1,18	1,44
0,98	1,68	1,32	1,56	1,12	1,42
0,90	1,78	1,42	1,44	1,18	1,46
0,90	1,84	1,58	1,46	1,38	1,42
0,92	1,76	1,58	1,48	1,38	1,50
0,84	1,76	1,62	1,36	1,38	1,48
0,92	1,86	1,60	1,56	1,46	1,44
0,98	1,72	1,68	1,50	1,32	1,48
0,98	1,76	1,70	1,54	1,34	1,46
0,96	1,70	1,52	1,82	1,56	1,54
0,86	1,86	1,66	1,46	1,64	1,52
1,06	1,72	1,66	1,44	1,60	1,60
0,98	1,62	1,64	1,52	1,54	1,68
0,88	1,84	1,64	1,46	1,54	1,82
0,86	1,80	1,82	1,54	1,94	1,80
0,94	1,80	1,50	1,38	1,46	1,40
0,90	1,60	1,34	1,38	1,46	1,56

Tabela 8 - Resultados de Rugosidade (μm) para o Aço VC131 – Rebolo CBN

VC131 CBN	VC131 CBN	VC131 CBN	VC131 CBN	VC131 CBN	VC131 CBN
peça 1	peça 2	peça 3	peça 4	peça 5	peça 6
0,50	0,74	0,68	0,70	0,56	1,54
0,48	0,78	0,64	0,80	0,66	1,46
0,48	0,74	0,74	0,80	0,56	0,14
0,48	0,72	0,66	0,68	0,66	1,16
0,50	0,64	0,70	0,68	0,64	1,04
0,54	0,58	0,76	0,68	0,86	1,04
0,50	0,72	0,80	0,86	0,96	1,08
0,48	0,76	0,80	0,78	0,78	1,12
0,42	0,70	0,84	0,82	0,86	1,06
0,42	0,74	0,82	0,78	0,76	1,00
0,44	0,56	0,88	0,94	0,74	1,18
0,50	0,68	0,84	0,90	0,84	1,24
0,50	0,78	0,80	1,04	0,84	1,04
0,46	0,76	0,86	1,24	0,84	1,10
0,50	0,50	0,86	0,70	0,80	1,14
0,44	0,64	1,10	0,74	0,84	1,38
0,44	0,64	0,98	0,92	0,7	1,28
0,48	0,60	1,06	0,80	0,58	1,54
0,50	0,76	0,82	1,02	0,56	1,72
0,48	0,78	0,74	0,78	0,58	1,46

ANEXO IV – Tabelas dos Resultados de Microdureza

Tabela 9 - Resultados de Microdureza (Vickers) para o Aço VC131 – Rebolo AIO

	VC óxido							
	Peça 1	Peça2	Peça3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 7	Peça 8
0	572,00	708,80	964,80	987,40	539,50	683,17	630,20	568,00
1,5	815,60	1199,75	1028,00	1058,60	648,50	542,40	680,50	826,40
3	591,83	1129,50	957,60	956,00	882,60	932,00	640,20	778,00
4,5	950,40	994,00	1082,00	909,60	822,00	856,40	469,17	715,60
6	603,83	1072,25	797,80	859,40	923,25	891,60	555,33	840,80
7,5	606,40	798,25	701,00	847,40	928,25	568,40	570,40	522,80
9	563,17	773,40	647,80	886,80	930,00	586,20	634,25	538,60
10	528,00	595,67	633,67	953,40	543,50	632,00	611,00	686,40

Tabela 10 - Resultados de Microdureza (Vickers) para o Aço 1045 – Rebolo AIO

	1045 óxido						
	Peça 1	Peça2	Peça3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 7
0	612,75	828,00	411,00	474,00	918,00	689,67	288,50
1,5	458,67	327,50	916,00	635,00	759,00	502,33	380,00
3	522,50	381,50	870,00	646,25	664,00	858,33	621,00
4,5	387,00	399,50	865,50	621,75	588,25	581,00	864,00
6	357,00	397,00	926,50	719,50	641,50	619,33	833,50
7,5	437,50	363,00	973,00	907,00	764,67	620,00	828,75
9	369,00	433,50	972,67	450,50	822,33	805,50	551,25
10	551,00	432,00	586,50	648,67	777,00	711,00	351,00

Tabela 11 - Resultados de Microdureza (Vickers) para o Aço 1045 – Rebolo de CBN

	1045 CBN						
	Peça 1	Peça2	Peça3	Peça 4	Peça 5	Peça 6	Peça 9
0	609,00	635,20	650,40	592,00	583,75	662,25	582,00
1,5	625,60	567,50	601,67	576,25	504,33	562,00	544,00
3	520,50	520,83	561,75	501,75	697,67	541,00	622,75
4,5	534,75	449,00	504,75	424,75	571,33	610,50	854,20
6	469,50	580,75	633,50	510,25	635,33	484,00	709,75
7,5	683,50	589,50	497,50	507,00	902,00	516,33	802,60
9	605,50	534,00	529,50	544,25	595,25	594,00	529,40
10	826,50	649,20	698,75	441,77	579,00	519,33	549,75

Tabela 12 - Resultados de Microdureza (Vickers) para Aço VC131 – Rebolo de CBN

	CBN VC131					
	Peça 1	Peça 2	Peça3	Peça4	Peça 5	Peça 6
0	647,00	837,60	842,50	700,00	564,80	662,50
1,5	864,33	673,20	969,25	595,33	814,60	538,50
3	917,25	545,60	885,00	656,80	656,90	576,25
4,5	1007,50	982,60	645,33	622,50	729,00	649,50
6	842,40	689,17	981,50	515,00	609,20	729,40
7,5	856,00	776,50	750,50	611,20	642,80	754,40
9	955,00	892,33	1116,00	519,00	604,50	806,20
10	792,50	726,33	871,00	818,83	540,00	892,50