



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



**Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica**

**FABIO ROMANO LOFRANO DOTTO**

**TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO REBOLO  
DURANTE O PROCESSO DE DRESSAGEM BASEADA EM IMAGENS ACÚSTICAS  
OBTIDAS POR DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO**

**Bauru  
2019**

**FABIO ROMANO LOFRANO DOTTO**

**TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO REBOLO  
DURANTE O PROCESSO DE DRESSAGEM BASEADA EM IMAGENS ACÚSTI-  
CAS OBTIDAS POR DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru/ FEB da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / UNESP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Área de concentração: Automação**

**Linha de pesquisa: Mecatrônica**

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

**Bauru  
2019**

Dotto, Fabio Romano Lofrano.

Técnica de Diagnóstico da Integridade Superficial do Rebolo Durante o Processo de Dressagem Baseada em Imagens Acústicas Obtidas por Diafragma Piezelétrico / Fabio Romano Lofrano Dotto, 2019

110 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Mapa Acústico. 2. Dressagem. 3. Monitoramento. 4. Indústria 4.0. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE FABIO ROMANO LOFRANO DOTTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 24 dias do mês de maio do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Engenharia Mecânica / USP - São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de FABIO ROMANO LOFRANO DOTTO, intitulada **TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO REBOLO DURANTE O PROCESSO DE DRESSAGEM BASEADA EM IMAGENS ACÚSTICAS OBTIDAS POR DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO**. 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. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON

Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA

Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI

Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

**Dedico este trabalho a minha esposa e filha que reconheceram meu esforço muito antes deste trabalho ser concluído. Dedico também a minha mãe e meu pai (*in memoriam*) por todo o esforço que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me guiar pelos caminhos da vida e sempre oferecer novas alternativas em momentos difíceis.

Agradeço a minha mãe Lucinda pelos ensinamentos passados ao longo da vida e pelo incentivo aos estudos.

Agradeço ao meu pai Angelo (*in memoriam*), que faleceu antes mesmo que este trabalho pudesse ser concluído, mas que foi o responsável pela formação do meu caráter, permitindo que pudesse alcançar meus objetivos com honestidade.

Agradeço a minha amada esposa, Karla, pela paciência, carinho e solidariedade em momentos difíceis. Você sempre esteve ao meu lado, me apoiando e acreditando que tudo daria certo.

Agradeço a minha tão amada filha, Júlia, que aceitou que me afastasse por muitas horas de sua infância e pudesse me dedicar a este trabalho. Você foi um anjo que surgiu na minha vida, repleto de doçura. Você é, mesmo sem ainda perceber, o motivo de todo meu esforço para galgar maiores degraus.

Ao meu amigo e orientador Professor Paulo Roberto de Aguiar, gostaria de agradecer profundamente pela confiança ao longo de todos esses anos, pois sem você certamente não teria alcançado os meus objetivos. Agradeço por ter feito parte da minha vida desde os meus 25 anos de idade, quando completei o meu mestrado até hoje, com 42 anos, quando concluo o meu doutorado. Posso considerá-lo certamente como meu melhor amigo, pelos ensinamentos que vão muito além dos conhecimentos técnicos adquiridos.

Ao Professor Eduardo Carlos Bianchi, por ceder o laboratório onde foram feitos os ensaios, além das orientações recebidas ao longo da pesquisa.

Ao meu amigo Felipe, por compartilhar comigo esta etapa da minha vida. Obrigado por todo auxílio que me deu para que este trabalho efetivamente acontecesse. Sem seu apoio o resultado certamente não seria o mesmo.

Ao meu amigo Wenderson, por me ajudar na realização dos ensaios no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA). A sua história de vida e simplicidade faz com que as pessoas vejam a vida de uma forma diferente.

Ao Hélio, por toda ajuda dispensada e ao Cláudio, pelo apoio junto ao laboratório de usinagem.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB por todo ensino e atendimento prestado durante esse tempo.

Ao grande amigo Pedro Oliveira, pelas dicas e orientações recebidas durante a elaboração deste trabalho. Foram muitos os momentos que sua ajuda foi fundamental.

Ao amigo Júlio Caladrin, estagiário da empresa FAROL Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria, pelo auxílio na elaboração das imagens em 3D deste trabalho.

Ao amigo Thiago Rodrigues, vizinho do local onde trabalho, por ter sempre me motivado a seguir adiante, mesmo quando eu não estava seguro por qual caminho seguir.

Aos meus amigos de laboratório Fábio Isaac, Martin Auléstia, Leonardo Simões, Rogério Thomazella e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho chegasse ao fim. Peço desculpas, pois certamente vou acabar me esquecendo de alguém, mesmo tentando me lembrar de todos. Portanto, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e apoiaram essa etapa.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

(Albert Einstein)

## RESUMO

O processo de retificação é um processo amplamente utilizado para produzir formas complexas e tolerâncias precisas em peças que são necessárias especialmente para a fabricação de componentes de engenharia. A retificação é um processo de manufatura situado na parte final da cadeia de usinagem, consistindo em uma operação de remoção de material da superfície da peça usinada e utiliza como ferramenta de corte o rebolo. No decorrer do processo de retificação a ferramenta de corte sofre desgaste e com isso, torna-se necessária a realização do processo de dressagem, cuja finalidade é restaurar a eficiência de corte do rebolo. A grande dificuldade no processo de retificação consiste em identificar o momento correto para a realização da dressagem e, para isso torna-se necessária a realização do monitoramento da ferramenta de corte (rebolo). Neste contexto, no presente trabalho desenvolveu-se uma técnica inovadora de diagnóstico da integridade superficial do rebolo, durante o processo de dressagem, baseada em imagens acústicas obtidas por meio de diafragma piezelétrico. Para isso, foram realizadas marcas (falhas) em um rebolo e, posteriormente, realizados ensaios com várias profundidades de dressagem, coletando sinais por meio de um sensor de emissão acústica e de um diafragma piezelétrico. Com base nesses sinais, foram avaliadas bandas de frequência para a obtenção de imagens acústicas que representassem com maior fidelidade e nitidez as marcas impressas no rebolo. Por fim, ambos os sensores (emissão acústica e diafragma piezelétrico) foram comparados e estabelecida uma análise de resultados frente às condições de dressagem estudadas. Os resultados demonstraram que o uso do diafragma piezelétrico é eficiente para a obtenção de mapas acústicos da superfície do rebolo quando comparado com o sensor de emissão acústica e em algumas condições de usinagem obteve resultados superiores aos observados no monitoramento da ferramenta com o sensor de emissão acústica.

**Palavras chave:** Retificação, Monitoramento, Dressagem, Mapa acústico, Diafragma piezelétrico, Indústria 4.0, Internet das coisas.

## ABSTRACT

The abrasive machining process is a widely used process for producing complex shapes in work pieces and for providing precise tolerances that are especially required for the production of engineering components. Grinding is a manufacturing process placed at the end of the machining chain, consisting of an operation to remove material from the surface of the machined part and uses grinding wheels as a cutting tool. During the grinding process the cutting tool suffers wear and tear, and thus, it is necessary to perform the dressing process, whose purpose is to restore the cutting efficiency of the grinding wheel. The great difficulty in the grinding process is to identify the correct moment to perform the dressing, and for that reason, it is necessary to perform the monitoring of the cutting tool (grinding wheel). In this context, the present work made possible the development of an innovative technique to diagnose the surface integrity of the grinding wheel, during the dressing process, based on acoustic maps obtained through the piezoelectric diaphragm. Therefore, some patterns (marks) on a grinding wheel were performed and, later, tests were carried out with several dressing depths, acquiring signals from a commercial acoustic emission sensor and a piezoelectric diaphragm. Based on these signals, frequency bands were evaluated to obtain acoustic maps that represented with more fidelity and sharpness the marks inserted in the grinding wheel. Finally, both sensors (acoustic emission and piezoelectric diaphragm) were compared and a result analysis was established given the studied dressing conditions. The results showed that the use of the piezoelectric diaphragm was efficient to obtain acoustic maps of the grinding wheel surface when compared with commercial acoustic emission sensors and in some machining conditions even better results were obtained.

**Keywords:** Grinding, Monitoring, Dressing, Acoustic map, Piezoelectric diaphragm, Industry 4.0, Internet of things.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	1
1.2    OBJETIVO.....	2
1.3    PUBLICAÇÕES OBTIDAS E SUBMETIDAS.....	3
<b>Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
2.1    PROCESSO DE RETIFICAÇÃO .....	5
2.1.1 <i>Rebolo</i> .....	7
2.1.1.1    Desgaste do Rebolo.....	9
2.1.2 <i>Dressagem</i> .....	10
2.1.2.1    Passo de Dressagem.....	11
2.1.2.2    Grau de Recobrimento da Dressagem.....	12
2.1.2.3    Agressividade do Rebolo .....	12
2.2    SENSORES PIEZELÉTRICOS .....	13
2.2.1 <i>Sensor de Emissão Acústica</i> .....	14
2.2.2 <i>Diafragma Piezométrico Aplicado Ao Processo De Manufatura</i> .....	16
2.3    MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DA FERRAMENTA.....	20
2.4    PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS APLICADO A MANUFATURA.....	23
2.4.1 <i>Estatística RMS</i> .....	24
2.4.2 <i>Índice de Correlação Bidimensional</i> .....	25
2.4.3 <i>Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Rápida de Fourier (FFT)</i> ...	26
2.5    MAPA ACÚSTICO NO MONITORAMENTO DA FERRAMENTA DE CORTE.....	27
<b>Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1    BANCADA DE ENSAIOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	32
3.2    PROCESSAMENTO DE SINAIS .....	35
3.2.1 <i>Algoritmos de Processamento de Sinais</i> .....	37
3.2.1.1    Algoritmo Para Seleção de Passadas .....	40
3.2.1.2    Algoritmo para Segmentação do Sinal de Emissão Acústica .....	41

3.2.1.3	Algoritmo para Determinação Automática das Bandas de Frequência do Filtro .....	45
3.2.1.4	Algoritmo para Equalização de Mapas Acústicos .....	52
3.2.1.5	Algoritmo para Geração de Mapas Acústicos Utilizando a Estatística RMS .....	55
3.2.1.6	Algoritmo para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional .....	58
<b>Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>		<b>61</b>
4.1	PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE MAPAS ACÚSTICOS .....	61
4.2	PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO ÍNDICE DE CORRELAÇÃO BIDIMENSIONAL .....	64
4.2.1	<i>Determinação da Imagem Padrão para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional</i> .....	64
4.2.2	<i>Localização da Marca por Meio do Índice de Correlação Bidimensional</i> .....	66
4.3	IDENTIFICAÇÃO DAS MARCAS DO REBOLO UTILIZANDO A ANÁLISE ESPECTRAL .....	67
4.4	DETERMINAÇÃO DAS BANDAS DE FREQUÊNCIA PARA A OBTENÇÃO DE MAPAS ACÚSTICOS .....	70
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA E DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO .....	76
<b>Capítulo 5 – CONCLUSÕES .....</b>		<b>82</b>
5.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>Referências .....</b>		<b>84</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Elementos da retificação plana .....	6
Figura 2.2 - Cavaco no processo de retificação.....	9
Figura 2.3 - Esquema do Processo de Dressagem.....	11
Figura 2.4 - Agressividade do Rebolo em Função do Grau de Recobrimento.....	13
Figura 2.5 - Representação Esquemática do Fenômeno das Emissões Acústicas.....	14
Figura 2.6 - Sensores Comerciais de Emissão Acústica.....	15
Figura 2.7 - Sensor de Emissão Acústica com Elemento Piezelétrico .....	16
Figura 2.8 - Diafragma Piezelétrico .....	17
Figura 2.9 - Sensores Piezelétricos Comerciais.....	17
Figura 2.10 - Bancada de Ensaio .....	28
Figura 2.11 - Saída do Sistema de Mapeamento Acústico .....	29
Figura 3.1 - Bancada de Ensaio para a Realização dos Testes .....	33
Figura 3.2 - Imagem das Marcas Inseridas no Rebolo .....	34
Figura 3.3 - Dressador de Ponta Única.....	34
Figura 3.4 - Representação da Relação do Mapa Acústico com a Superfície do Rebolo .....	36
Figura 3.5 - Algoritmos de Processamento de Sinais.....	38
Figura 3.6 - Sinais de (a) Emissão Acústica e (b) Sincronismo sem Processamento...39	39
Figura 3.7 - Sinal de Emissão Acústica sem Nível DC e Amplitude Normalizada .....	39
Figura 3.8 - Fluxograma do Algoritmo de Seleção de Passada de Dressagem .....	40
Figura 3.9 - Sinal de Emissão Acústica RMS .....	41
Figura 3.10 - Sinal de Sincronismo .....	42
Figura 3.11 - Sinal de Sincronismo Ajustado.....	42
Figura 3.12 - Trecho Válido no Sinal de Sincronismo .....	43
Figura 3.13 - Algoritmo para Segmentação do Sinal de Emissão Acústica .....	44
Figura 3.14 - Processo de Filtragem Com Janela Deslizante .....	46
Figura 3.15 - Algoritmo de Filtragem com Janela Deslizante.....	47
Figura 3.16 - Resultado da Aplicação do Filtro Passa Banda de 3 kHz a 90 kHz.....	48
Figura 3.17 - Algoritmo de Busca de Banda de Frequências .....	49
Figura 3.18 – Subrotina de Cálculo da Correlação Bidimensional para o Filtro Passa Baixas .....	50
Figura 3.19 - Busca Automática de Frequências para Filtragem Passa Banda .....	52

Figura 3.20 - Distribuição Normal .....	53
Figura 3.21 - Algoritmo Para Equalização de Mapas Acústicos.....	54
Figura 3.22 - Mapa Acústico (a) sem Equalização e (b) com Equalização.....	55
Figura 3.23 - Algoritmo para Geração de Mapa Acústico Baseado na Estatística RMS .....	57
Figura 3.24 - Exemplo de Mapa Acústico Filtrado com 256 Tons de Cinza com Marcas .....	58
Figura 3.25 - Algoritmo para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional .....	59
Figura 4.1 - Composição da Imagem do Mapa Acústico .....	62
Figura 4.2 - Marcas Idealizadas para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional, (a) marca “+” e (b) marca “T” .....	65
Figura 4.3 - Marcas Utilizadas para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional , (a) marca “+” e (b) marca “T” .....	65
Figura 4.4 - Gráfico Resultante do Cálculo do Índice de Correlação Bidimensional ..	66
Figura 4.5 - Comparativo entre Bandas de Frequência com Dano e sem Dano para o Sensor de Emissão Acústica .....	68
Figura 4.6 - Mapa Acústico Obtido pela Seleção Manual de Banda de Frequência para o Sensor de Emissão Acústica com $a_d=20\mu\text{m}$ , (a) Mapa Acústico completo, (b) Detlhes da Marca “+” e (c) Detalhes da Marca (“T”) .....	69
Figura 4.7 - Comparativo entre Bandas de Frequência com Dano e sem Dano para o Diafragma Piezelétrico .....	69
Figura 4.8 - Mapa Acústico Obtido pela Seleção Manual de Banda de Frequência para o Diafragma Piezelétrico com $a_d=20\mu\text{m}$ , (a) Mapa Acústico Completo, (b) Detalhes da marca “+” e (c) Detalhes da marca “T” .....	70
Figura 4.9 - Bandas de Frequência Filtradas e Correlação para o Sensor de Emissão Acústica .....	71
Figura 4.10 - Resultado do Algoritmo de Busca de Bandas de Frequência para o Sensor de Emissão Acústica.....	72
Figura 4.11 - Análise das 60 Melhores Bandas de Frequência para o Sensor de Emissão Acústica .....	72
Figura 4.12 - Bandas de Frequência Filtradas e Correlação para o Sensor Diafragma Piezelétrico .....	73
Figura 4.13 - Resultado do Algoritmo de Busca de Bandas de Frequência para o Diafragma Piezelétrico .....	74

Figura 4.14 - Análise das 60 Melhores Bandas de Frequência para o Diafragma Piezelétrico .....	75
Figura 4.15 - Mapa Acústico Obtido pela Seleção Automática de Banda de Frequência para o Diafragma Piezelétrico com $a_d=20\mu\text{m}$ , (a) Mapa acústico completo, (b) Detalhes da marca “+” e (c) Detalhes da marca “T” .....	76
Figura 4.16 - Mapas Acústicos com a Marca "+" e Profundidade de Dressagem de $5\mu\text{m}$ .....	77
Figura 4.17 - Mapas Acústicos com a Marca "T" e Profundidade de Dressagem de $5\mu\text{m}$ .....	77
Figura 4.18 - Mapas Acústicos com a Marca "+" e Profundidade de Dressagem de $10\mu\text{m}$ .....	77
Figura 4.19 - Mapas Acústicos com a Marca "T" e Profundidade de Dressagem de $10\mu\text{m}$ .....	77
Figura 4.20 - Mapas Acústicos com a Marca "+" e Profundidade de Dressagem de $20\mu\text{m}$ .....	78
Figura 4.21 - Mapas Acústicos com a Marca "T" e Profundidade de Dressagem de $20\mu\text{m}$ .....	78
Figura 4.22 - Mapas Acústicos com a Marca "+" e Profundidade de Dressagem de $40\mu\text{m}$ .....	78
Figura 4.23 - Mapas Acústicos com a Marca "T" e Profundidade de Dressagem de $40\mu\text{m}$ .....	78
Figura 4.24 - Média e Desvio Padrão do Índice de Correlação entre Todas as Amostras .....	81

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 - Condições de Usinagem .....	35
Tabela 4.1 - Número de Pontos para o Cálculo da Estatística RMS .....	63
Tabela 4.2 - Resoluções Obtidas no Mapa Acústico .....	63
Tabela 4.3 - Resumo dos Resultados Obtidos com os Sensores .....	81

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBN	Nitreto de Boro Cúbico ( <i>Cubic Boron Nitride</i> )
CCDM	Métrica do desvio do coeficiente de correlação ( <i>Correlation coefficient deviation metric</i> )
DFT	Transformada Discreta de Fourier ( <i>Discret Fourier Transform</i> )
EMI	Impedância Eletromecânica ( <i>Electromechanical Impedance</i> )
IDFT	Inverso da Transformada Discreta de Fourier ( <i>Inverse Discret Fourier Transform</i> )
FFT	Transformada Rápida de Fourier ( <i>Fast Fourier Transform</i> )
EA	Sensor de emissão acústica ( <i>Acoustic Emission</i> )
MDC	Classificador de Distância Mínima ( <i>Minimal Distance Classifier</i> )
PLB	Teste da Quebra do Grafite ( <i>Pencil Lead Break</i> )
PSD	Densidade Espectral de Potência ( <i>Power Spectral Density</i> )
PZT	Diafragma piezelétrico ( <i>lead zirconate titanate</i> )
RGB	Matriz de cores vermelho-verde-azul ( <i>red-green-blue</i> )
RMS	Valor médio quadrático ( <i>Root Mean Square</i> )
RMSD	Desvio da raiz média quadrática ( <i>Root mean square deviation</i> ).
RNA	Redes Neurais Artificiais ( <i>Artificial Neural Networks</i> )
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos ( <i>Society of Automotive Engineers – EUA</i> )
STFT	Transformada de Fourier de Curto Termo ( <i>Short Time Fourier Transform</i> )
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural ( <i>Structural Health Monitoring</i> )
SVM	Máquina de Vetores de Suporte ( <i>Support Vector Machine</i> )
$a_d$	Profundidade de dressagem ( $\mu\text{m}$ )
$b_d$	Largura de atuação do dressador (mm)
$C_R$	Comprimento do Perímetro do Rebolo (mm)
$d_s$	Diâmetro Externo do Rebolo (mm)
$L_R$	Largura do Rebolo (mm)
$n_s$	Rotação do Rebolo (rpm)
$S_d$	Passo de dressagem (mm)
$t_d$	Tempo de dressagem (s)

$U_d$	Grau de recobrimento
$v_s$	Velocidade de corte do rebolo (mm/s)
$V_d$	Velocidade de avanço (mm/s)
$v_d$	Velocidade do dressador (mm/s)
$W_t$	Ondulação Teórica (mm)
$\Delta_x$	Resolução no Comprimento do Mapa Acústico (mm)
$\Delta_y$	Resolução na Largura do Mapa Acústico (mm)

## CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

---

### 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As empresas de manufatura enfrentam as demandas crescentes de melhora da qualidade de produto, maior variabilidade de processos, ciclos de vida mais curtos, custo reduzido e concorrência global. A escassez de operadores de equipamentos de fabricação durante a última década acirrou a pressão que essas demandas estão impondo às indústrias de manufatura atuais. Os fabricantes estão buscando cada vez mais a automação como um meio eficaz para atender a essas demandas enquanto mantêm ou aumentam sua competitividade global e reduzem sua dependência de operadores especializados. Dada a importância da usinagem para a maioria das indústrias, as máquinas e ferramentas abriram muitas vezes o caminho no desenvolvimento da tecnologia de automação (LIANG; HECKER; LANDERS, 2004).

O uso de abrasivos para moldar remonta a mais de 2.000 anos. Pedras abrasivas foram usadas para afiar facas, ferramentas e armas antigas. Desde os tempos antigos, abrasivos foram usados para cortar e moldar rochas e pedras para a construção de edifícios, como as pirâmides. Os abrasivos continuam a ser usados em aplicações cada vez mais diversificadas, e grande parte da tecnologia moderna depende da indústria de abrasivos por sua existência. Mesmo nos primeiros dias, a retificação era um processo de acabamento aplicado a produtos que abordavam a etapa mais valiosa de sua produção (ROWE, 2013).

A usinagem com abrasivos é um processo amplamente utilizado para produzir formas complexas em componentes e para fornecer tolerâncias precisas que são necessárias especialmente para a fabricação de componentes de engenharia (JACKSON; DAVIM, 2011).

A retificação é um processo de manufatura situado na parte final da cadeia de usinagem, consistindo em uma operação de remoção de material da superfície da peça usinada, por meio da utilização de uma ferramenta de corte denominada rebolo (ALEXANDRE et al., 2018). Esse processo possui muitos desafios devido a sua operação complexa e suas características únicas. Os problemas mais comuns são: danos térmicos na peça, acabamento com superfícies rugosas, vibrações na máquina, desgaste rápido da ferramenta (rebolo), entre outros (MARINESCU et al., 2007).

Os danos causados nas peças durante o processo de retificação acarretam alto custo e prejuízo a manufatura devido ao valor agregado que as peças possuem. Os danos mais comuns no processo de retificação são a queima, trincas e tensões residuais (RIBEIRO et al., 2015). Tais danos são, em sua grande maioria, relacionados a problemas com a ferramenta de corte

(rebolo). Durante o processo de retificação, o rebolo perde suas características de afiação e topografia da sua superfície de corte devido ao desgaste da camada abrasiva, sendo necessário a realização de uma operação de dressagem. A dressagem é uma operação de afiação concebida para gerar uma topografia na superfície de corte do rebolo (ALEXANDRE et al., 2018; JACKSON et al., 2007; LOPES et al., 2017; MOIA et al., 2015).

Uma das formas de garantir a qualidade das peças é a realização do monitoramento da ferramenta de corte (rebolo). Vários trabalhos foram desenvolvidos visando monitorar a ferramenta de corte e obter o momento ótimo de realização da operação de dressagem (ALEXANDRE et al., 2018; MOIA et al., 2015; WARREN LIAO, 2010; YANG; YU, 2012).

Os sensores de emissão acústica vêm sendo utilizados no monitoramento do processo de retificação e da ferramenta de corte há mais de 10 anos. Por outro lado, o uso de diafragmas piezelétricos no monitoramento do processo de retificação ainda é muito recente. Poucos trabalhos na literatura são encontrados relacionados a utilização destes sensores na área de retificação (BATISTA DA SILVA et al., 2018; MARCHI et al., 2015; RIBEIRO et al., 2017; SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016).

O uso de mapa acústico a partir de sensores de emissão acústica comerciais aplicado ao monitoramento do processo de retificação foi inicialmente idealizado por Oliveira & Dornfeld (2001). Outros trabalhos utilizaram a mesma técnica proposta para visualizar mapas acústicos em diversos sistemas de monitoramento no processo de retificação (DA SILVA et al., 2016; DENKENA et al., 2016; HASHIMOTO et al., 2012; WARREN LIAO, 2010; YANG; YU, 2012).

O presente trabalho contribui para a obtenção de mapas acústicos no monitoramento da ferramenta de corte (rebolo) utilizando como sensor, o diafragma piezelétrico. Este estudo contribui de forma inédita apresentando uma alternativa aos sensores de emissão acústica comerciais, os quais os custos envolvidos são maiores. Além disso, foi realizado um estudo comparativo entre os sensores e condições de dressagem, estabelecendo bandas de frequências que melhores representassem a caracterização de falhas na visualização da imagem do mapa acústico.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo principal deste trabalho foi propor a construção de mapas acústicos baseada na utilização de diafragma piezelétrico no monitoramento da operação de dressagem. Durante as operações de dressagem, por meio da coleta de sinais obtidos pelo sensor de emissão acústica

e diafragma piezelétrico foi possível estudar mapas acústicos na identificação de falhas superficiais do rebolo. Foram avaliadas bandas de frequências de forma manual e automática utilizando a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) e filtros digitais de sinais com o objetivo de obter mapas acústicos com maior nitidez, qualidade de imagem e compará-los entre si.

### 1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS E SUBMETIDAS

A seguir são apresentados os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) da UNESP – Bauru, em que houve participação do autor desta tese durante seu período de Doutorado.

- ❖ **DOTTO, FÁBIO ROMANO LOFRANO**; AGUIAR, PAULO ROBERTO; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; WENDERSON NASCIMENTO; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. In-Dressing Acoustic Map by Low-cost Piezoelectric Transducer. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2019 (ARTIGO SUBMETIDO).
- ❖ **DOTTO, FÁBIO ROMANO LOFRANO**; AGUIAR, PAULO ROBERTO; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; SIMÕES, LEONARDO; LOPES, WENDERSON NASCIMENTO; D’ADDONA, DORIANA M.; BIANCHI, EDUARDO CARLOS Acoustic image-based damage identification of oxide aluminum grinding wheel during the dressing operation. PROCEEDIA CIRP (Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering), v.79, p. 298-302, 2019.
- ❖ ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; LOPES, WENDERSON NASCIMENTO; **LOFRANO DOTTO, FÁBIO ROMANO**; FERREIRA, FÁBIO ISAAC ; AGUIAR, PAULO ROBERTO ; BIANCHI, EDUARDO CARLOS ; LOPES, JOSÉ CLÁUDIO. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, v. 1, p. 1-13, 2018.
- ❖ ALEXANDRE, FELIPE; LOPES, WENDERSON; FERREIRA, FÁBIO; **LOFRANO DOTTO, FÁBIO ROMANO**; AGUIAR, PAULO; BIANCHI, EDUARDO. Chatter

vibration monitoring in the surface grinding process through digital signal processing of acceleration signal. IN: 4TH INTERNATIONAL ELECTRONIC CONFERENCE ON SENSORS AND APPLICATIONS, 2017, Sciforum.net. Proceedings of 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications. Basel: MDPI, 2017. p. 4927.

- ❖ THOMAZELLA, ROGÉRIO; LOPES, WENDERSON; ALEXANDRE, FELIPE; **LOFRANO DOTTO, FÁBIO ROMANO**; RODRIGUES, RODRIGO; AGUIAR, PAULO ROBERTO; PONTES JÚNIOR, BENTO RODRIGUES; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; VIERIA, MARTIN ANTONIO. Detecção do fenômeno de chatter no processo de retificação por meio de análise tempo-frequência. IN: X CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2018.

## CAPITULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

---

Este capítulo aborda a revisão da literatura referente aos temas envolvidos no trabalho. O processo de dressagem, suas variáveis e principais características são apresentados. O processamento de sinais e sua aplicação na indústria de manufatura é discutido bem como as técnicas de processamento digital de sinais. Os tópicos relativos aos sinais de emissão acústica e seu monitoramento são apresentados e a evolução das ferramentas no diagnóstico de falhas. Por fim, trabalhos de pesquisa com o foco na obtenção de mapas acústicos foram apresentados.

### 2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

As demandas atuais em indústrias de alta tecnologia, como semicondutores, ótica, entre outros, faz surgir a necessidade de processos de manufatura que possam fabricar componentes cada vez menores, de forma confiável, com tolerâncias adequadas. (LEE et al., 2006). Operações de manufatura envolvem retificação, furação, fresamento, torneamento, prensagem, moldagem e assim por diante. Entre essas operações, a retificação é o processo mais preciso e complicado (LIU; LI, 2018) .

A retificação é considerada como um dos processos mais importantes usados para produzir a qualidade final da superfície das peças usinadas. O monitoramento do processo de retificação é desafiador devido às inúmeras arestas de corte e as diferentes geometrias dessas arestas (ARUN et al., 2018).

Alguns autores descrevem que a retificação é aplicada a peças com alto valor agregado e, portanto, quando não realizada adequadamente, pode comprometer todo o processo de fabricação (CONCEICAO JUNIOR et al., 2016; MALKIN, S.; GUO, 2008; NAKAI et al., 2015; PATNAIK DURGUMAHANTI; SINGH; VENKATESWARA RAO, 2010).

No processo de retificação as aplicações são bem abrangentes, no entanto destaca-se sua utilização em diversos setores tais como aeroespacial, marinha, nuclear, dispositivos médicos, óticos, eletrônicos e setores de semicondutores (TIAN et al., 2017), onde se necessita de peças com qualidade superficial superior, baixas tolerâncias e formas geométricas bem definidas (PATIL; BHALERAO, 2017).

Segundo (WANG et al., 2016), o processo da retificação envolve forças e velocidades de corte muito maiores que em outros processos de usinagem. Isto transforma grandes quantidades de energia, sendo sua maior parte energia térmica.

A ferramenta de corte utilizada no processo de retificação é o rebolo que é composto por abrasivos unidos por um ligante, (MARINESCU et al., 2007). A remoção de material no processo de retificação é considerada complexa devido ao fato de envolver inúmeros fatores que podem afetar a eficiência e a qualidade do processo, tais como, a velocidade e o avanço da ferramenta de corte, as forças da retificação, as características do rebolo e da peça a ser usinada (QI et al., 2016).

Na indústria de retificação, as máquinas utilizadas são chamadas de retificadoras e possuem basicamente 3 tipos: planas tangenciais e frontal, cilíndricas universais e cilíndricas sem centro (*centerless*) (MARINESCU et al., 2007).

Na Figura 2.1 representa-se a operação da retificação tangencial plana envolvendo seis elementos distintos: a máquina de retificação, o rebolo, a peça, o fluido de refrigeração ou fluido de corte, a atmosfera e os cavacos. À medida que os abrasivos do rebolo retiram o material da peça, o rebolo vai sofrendo desgaste. O material retirado da peça denominado cavaco, desprende-se da superfície de corte e são considerados os resíduos do processo (MARINESCU et al., 2007).

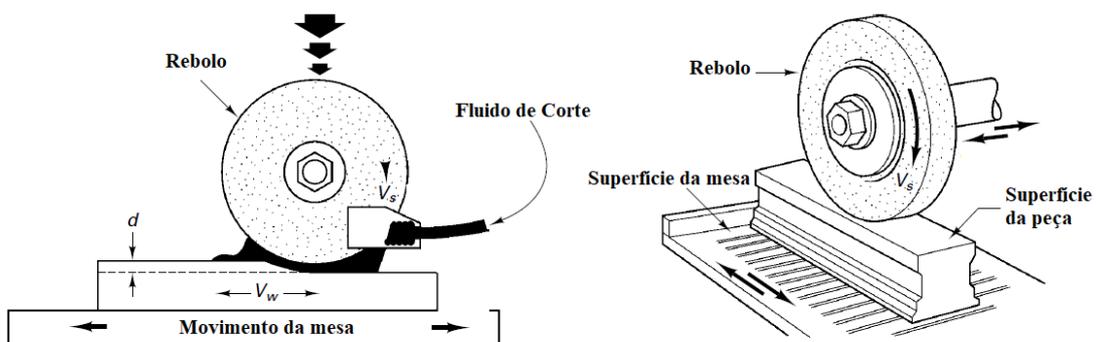


Figura 2.1 - Elementos da retificação plana, adaptado de (BLACK; KOHSER, 2008)

A qualidade do processo de retificação depende das ferramentas utilizadas durante o processo, ou seja, os rebolos (KUNDRÁK et al., 2016). A topografia é constituída de abrasivos distribuídos de forma aleatória e tem motivado inúmeros estudos focados em modelos empíricos da força na retificação (LI et al., 2017).

De acordo com Marinescu et al. (2007), dentre os elementos envolvidos no processo de retificação, o fluido de corte é um dos mais importantes, portanto, sua escolha deve considerar a constituição do óleo, concentração, vazão e pressão bem como a eficiência da refrigeração,

sem possibilitar a corrosão da peça de trabalho em contato com o fluido. Alguns trabalhos relacionam a importância do uso de fluidos de corte (MADANCHI; WINTER; HERRMANN, 2015)

O resíduo é o resultado da mistura de pequenas partículas de cavaco, fluido de corte e resíduos presentes na retificação (CHANG et al., 2006; MANOJKUMAR; GHOSH, 2016). A busca por menores custos e melhor qualidade no acabamento de peças vem sendo amplamente estudado, os quais a partir de parâmetros predeterminados obtém-se uma análise da qualidade das peças produzidas. Neste sentido, o monitoramento do processo torna-se necessário (AXINTE et al., 2004; MALKIN, S.; GUO, 2008; PEREIRA; DINIZ; HASSUI, 2009).

### **2.1.1 Rebolo**

A escolha correta do rebolo determina o sucesso da operação de retificação. As propriedades do rebolo influenciam na produtividade e na qualidade superficial da peça, por meio da interação com os parâmetros do processo e o material da peça (DENKENA et al., 2016; KLOCKE et al., 2016).

A condição da superfície do rebolo desempenha um papel importante no processo da retificação e a identificação dos fenômenos de carga do rebolo durante esse processo é crítica (LIU; LI, 2018).

O rebolo é composto por grãos abrasivos responsáveis pela remoção de material, espaços entre os abrasivos para o fluxo de fluido refrigerante e armazenamento de material removido e por fim o ligante que é utilizado para retenção e união dos grãos abrasivos (KANNAN; ARUNACHALAM, 2018).

Os rebolos podem ser classificados como convencionais e superabrasivos. Os convencionais utilizam como abrasivo o óxido de alumínio ou carboneto de silício com ligantes vitrificados enquanto os superabrasivos são constituídos de nitreto de boro cúbico (conhecidos com CBN) com ligantes vitrificados ou resinoides metálicos (MALKIN, S.; GUO, 2008). Com relação aos custos, rebolos superabrasivos podem ter custo até 100 vezes maior que um rebolo convencional, haja vista que a vida útil e eficiência é maior nestes casos (MARINESCU et al., 2007).

O desempenho da usinagem depende das condições de afiação e topografia da superfície de corte do rebolo (AGARWAL, 2016). Há uma relação direta entre o tipo de abrasivo, ligante e porosidade do rebolo que representa a qualidade de precisão das peças usinadas (MALKIN, S.; GUO, 2008; SUYAMA; DINIZ; PEDERIVA, 2017).

O rebolo deve ser escolhido em função da especificação de acabamento requerido bem como do material a ser utilizado. Os abrasivos do rebolo não possuem geometria definida e possui a função de desgastar a superfície da peça com a retirada de material. O aglomerante mantém os grãos presos fornecendo uma porosidade adequada para armazenar o cavaco removido da peça (MARINESCU et al., 2007).

Parâmetros como granulometria do rebolo, dureza, porosidade, tipo de ligante, fluido de corte, parâmetros do processo de retificação, entre outros também devem ser considerados na escolha do rebolo (CAI; ROWE, 2004; DENKENA et al., 2016; MALKIN, S.; GUO, 2008; WEBSTER; TRICARD, 2004).

O empastamento do rebolo pode ocorrer durante o processo de retificação e deve ser evitado, pois essa característica aumenta as forças envolvidas no processo de retificação e pode provocar danos na superfície da peça, incluindo aumento da rugosidade e queima (DOTTO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2012). A redução do empastamento produz a redução do calor na área de contato entre o rebolo e a peça bem como a diminuição da aderência do cavaco. Para isso deve-se usar um fluido de corte apropriado ao processo de retificação (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010; DI ILIO; PAOLETTI, 2000).

Outro fator primordial a ser considerado é o tamanho do abrasivo cuja medição é dada em *mesh/polegada*. Este valor pode variar de 8 a 1.200, sendo o menor valor considerado como muito grosso e o maior valor como muito fino. Quanto mais grosso, maior a quantidade de material a ser removido podendo ser utilizado para peças maiores e materiais menos resistentes ou de menor dureza. Por outro lado, quanto mais fino, melhor o acabamento superficial da peça com elevada qualidade de rugosidade, podendo ser usados em materiais mais duros e com pouca área de contato superficial (MALKIN, S.; GUO, 2008).

A afiação do rebolo é obrigatória, pois permite remover material sem danos a superfície da peça, com rugosidade aceitável e pouca tensão residual. (SINOT; CHEVRIER; PADILLA, 2006). Rebolos abrasivos, em condições de corte específicas, podem sofrer auto afiação que consiste na capacidade do rebolo em reestabelecer sua agressividade de corte no decorrer do processo. Esse fenômeno ocorre devido à fratura dos abrasivos ou perda de grãos desgastados, contribuindo para o rebolo voltar a possuir uma condição de corte, podendo permanecer mais tempo em contato com a peça de trabalho (MARINESCU et al., 2007).

A visão ampliada da ocorrência de cavacos na superfície do rebolo é exibida na Figura 2.2.

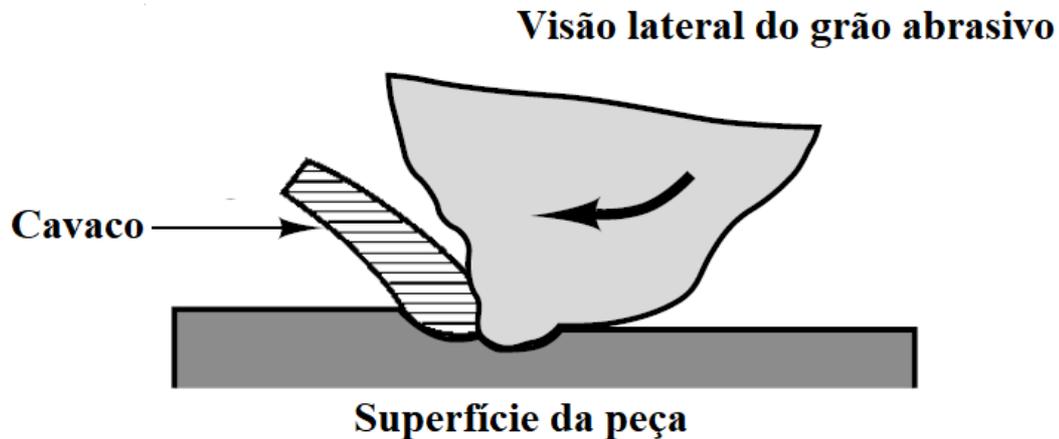


Figura 2.2- Cavaco no processo de retificação (BLACK; KOHSER, 2008)

Rebolos de óxido de alumínio são mais baratos, mas conseguem dissipar menos calor gerado quando comparado com rebolos CBN (nitreto cúbico de boro), que possui grande condutibilidade térmica. Ambos os rebolos podem ser utilizados em diversas aplicações da indústria, sendo os rebolos CBN indicados para ferro fundido e superligas de níquel e cobalto enquanto o rebolo convencional é indicado para retificação de aço carbono, ferro fundido maleável, aço rápido, etc. (BIANCHI et al., 2011; CATAI, 2004).

#### 2.1.1.1 Desgaste do Rebolo

O rebolo abrasivo pode sofrer desgastes durante o uso e são classificados em quatro tipos: degradação do abrasivo, fratura do material aglomerante, fratura do grão por impacto ou temperatura e fratura na região de corte entre o aglomerante e o abrasivo (JACKSON; MILLS, 2004).

A compreensão do processo de deterioração do rebolo no processo de retificação é complexo de ser analisado, resultando em muitos fatores envolvidos, com por exemplo, o desgaste do abrasivo deve-se ao ataque químico por elementos do fluido refrigerante, danos térmicos do próprio processo ou desgaste mecânico (atrito ou fricção), tendo como consequência a fragmentação do aglomerante, a própria trinca/desgaste ou ruptura do abrasivo. Por outro lado, apesar de pouco relevante, os impactos causados por atrito são responsáveis pela deterioração nas arestas de corte causando uma redução na agressividade do rebolo (FATHIMA et al., 2003; TAWAKOLI; WESTKAEMPER; RABIEY, 2007).

O controle do processo de retificação pode ser prejudicado quando envolve um rebolo degradado. Entre as possíveis falhas pode-se elencar a determinação de passo da profundidade de corte incorreto ajustado para o rebolo, rugosidade fora das especificações, aumento da força

de corte com aumento da temperatura superficial da peça levando a queima, danos na superfície do rebolo, necessidade de passo de dressagem maior, que diminui a vida útil do rebolo e dressador, entre outros (CAI; ROWE, 2004; WEINGAERTNER; BOARON, 2011). Desta forma, fica evidente a importância em avaliar a integridade superficial do rebolo e sua condição de corte, durante o processo de dressagem.

### 2.1.2 Dressagem

A afiação da superfície de corte do rebolo deveria ocorrer naturalmente, tendo em vista que as partículas abrasivas sofrem desprendimento ou fratura durante o processo de retificação, porém, isso não ocorre necessitando de uma operação chamada dressagem. Alguns autores definem dressagem como uma operação de afiamento concebida para gerar uma topografia na superfície de corte do rebolo (JACKSON et al., 2007).

Segundo Agarwal (2016), a dressagem é uma operação que gera transformações topográficas na superfície de corte do rebolo, as quais são essenciais para garantir que o rebolo esteja adequado para ser utilizado na retificação. A obtenção de um processo ótimo de retificação depende necessariamente da dressagem que representa um fator crítico do processo. A dressagem tem por objetivo restaurar a eficiência de corte do rebolo (MARINESCU et al., 2007).

Obter bons resultados no acabamento final das peças retificadas depende necessariamente de uma ferramenta de corte afiada e, neste sentido, os parâmetros de dressagem devem ser conhecidos e devidamente ajustados (WEGENER et al., 2011). O grande problema consiste em conhecer o momento certo para interromper o processo de retificação e realizar uma operação de dressagem. A grande quantidade de operações de dressagem desnecessárias diminui a vida útil da ferramenta e aumenta o tempo de fabricação das peças. Por outro lado, a não realização da dressagem implica em danos na peça e, conseqüentemente aumento do custo na produção (HASSUI et al., 1998; MOIA et al., 2015).

Segundo Rowe (2014), a dressagem possibilita a regularização da superfície do rebolo, aumento da sua agressividade e distribuição uniforme das arestas de corte, condicionamento da superfície do rebolo por meio da recuperação dos grãos abrasivos e limpeza dos poros por meio da remoção de cavacos.

Para a realização do processo de dressagem deve-se utilizar um dressador. O dressador mais comum é o de ponta única, porém, outras tecnologias podem ser encontradas na literatura com os dressadores rotativos, a dressagem eletrolítica em processo contínuo (ELID - *Electrolytic in-process dressing*) e dressagem a laser (PALMER et al., 2018).

O dressador de ponta única é composto por um único diamante e forma um ângulo de ataque em relação ao rebolo deixando o processo eficiente. Normalmente o dressador de ponta única é instalado entre a ferramenta e o rebolo com ângulo entre  $10^\circ$  e  $15^\circ$  (MALKIN, S.; GUO, 2008).

A operação de dressagem de ponta única produz o macro efeito e micro efeito na superfície do rebolo. O macro efeito é gerado a partir do formato do dressador e do passo de dressagem, proporcionando novas arestas dos abrasivos na superfície do rebolo. O micro efeito é gerado pela remoção de grão gastos e pela fratura de grãos que não se desgastaram totalmente (MALKIN, S.; GUO, 2008).

Durante a operação de dressagem, o dressador passa transversalmente ao rebolo em movimento de rotação e, geralmente, pode ser constituído de um único diamante ou múltiplos diamantes formando um conglomerado de uma ou mais camadas (BIANCHI et al., 1997; MALKIN, S.; GUO, 2008). Na Figura 2.3 ilustra-se o movimento do dressador de ponta única ao longo do rebolo, sendo removida uma profundidade de dressagem  $a_d$  do raio do rebolo. Os principais parâmetros apresentados na Figura 2.3 são: passo de dressagem ( $S_d$ ), profundidade de dressagem ( $a_d$ ), largura de dressagem ( $b_d$ ), espessura/largura do rebolo ( $L_R$ ), ondulação teórica ( $w_t$ ) e velocidade de avanço ( $v_d$ ).

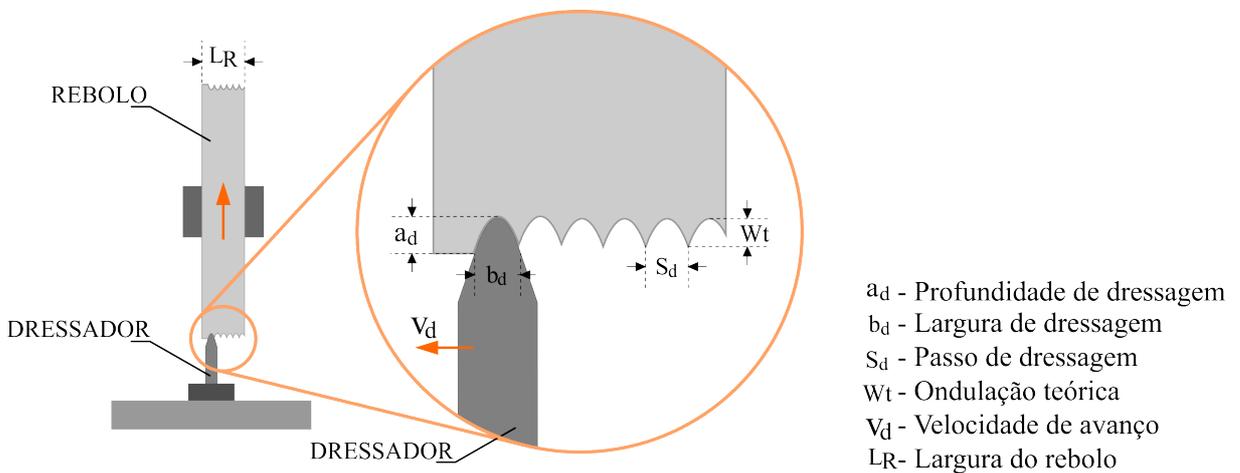


Figura 2.3 - Esquema do Processo de Dressagem, adaptado de (DE OLIVEIRA et al., 1992)

### 2.1.2.1 Passo de Dressagem

O avanço do dressador é chamado de passo de dressagem ou direção de dressagem ( $S_d$ ), e é dado e pela Equação 2.1 (MALKIN, S.; GUO, 2008).

$$S_d = \frac{\pi \cdot d_s \cdot v_d}{v_s} [mm] \quad (2.1)$$

sendo  $d_s$  o diâmetro externo do rebolo em [mm];  $v_d$  a velocidade de dressagem em [mm/s] e  $v_s$  a velocidade de corte do rebolo em [mm/s]

### 2.1.2.2 Grau de Recobrimento da Dressagem

Um parâmetro de extrema importância é o grau de recobrimento (MOIA et al., 2015) que tem por objetivo relacionar os parâmetros da dressagem e a topografia do rebolo gerada nessa operação. Neste processo, a ponta de diamante avança e retira uma pequena camada superficial, da ordem de centésimos ou décimos de milímetro, enquanto o rebolo está em rotação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010).

Considerando o dressador de ponta única, o grau de recobrimento ( $U_d$ ) pode ser definido pela Equação 2.2 (MOIA et al., 2015).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (2.2)$$

sendo  $b_d$  a largura de atuação do dressador em [mm] e  $S_d$  o passo de dressagem em [mm];

Outro parâmetro relevante ao processo de dressagem é tempo de contato do rebolo com o dressador, ou tempo de dressagem ( $t_d$ ), cuja equação é definida na Equação 2.3.

$$t_d = \frac{L_R \cdot U_d \cdot 60}{n_s \cdot b_d} [s] \quad (2.3)$$

sendo  $L_R$  a largura do rebolo em [mm],  $U_d$  o grau de recobrimento,  $b_d$  a largura útil do dressador em [mm] e  $n_s$  a rotação do rebolo em [rpm];

### 2.1.2.3 Agressividade do Rebolo

Segundo Moia et al. (2015) e Rowe (2013), o rebolo deve ser preparado para uma agressividade específica. Um alto valor de grau de recobrimento implica em uma superfície do rebolo menos agressiva enquanto um baixo grau de recobrimento implica em uma superfície de corte mais agressiva. Um rebolo agressivo possui uma superfície formada por arestas maiores (macro efeito) e por abrasivos mais afiados.

Considerando-se  $U_d$  igual a 1, o valor de  $b_d$  é igual ao de  $S_d$  (Equação 2.2), possibilitando que as arestas do dressador acompanhe a superfície do rebolo possuindo uma alta agressividade precedida por uma rugosidade maior. Quanto maior o valor de  $U_d$ , menor será a agressividade do rebolo, com arestas menos afiadas e rugosidade menor. Na Figura 2.4, ilustra-se a agressividade do rebolo em função do grau de recobrimento.

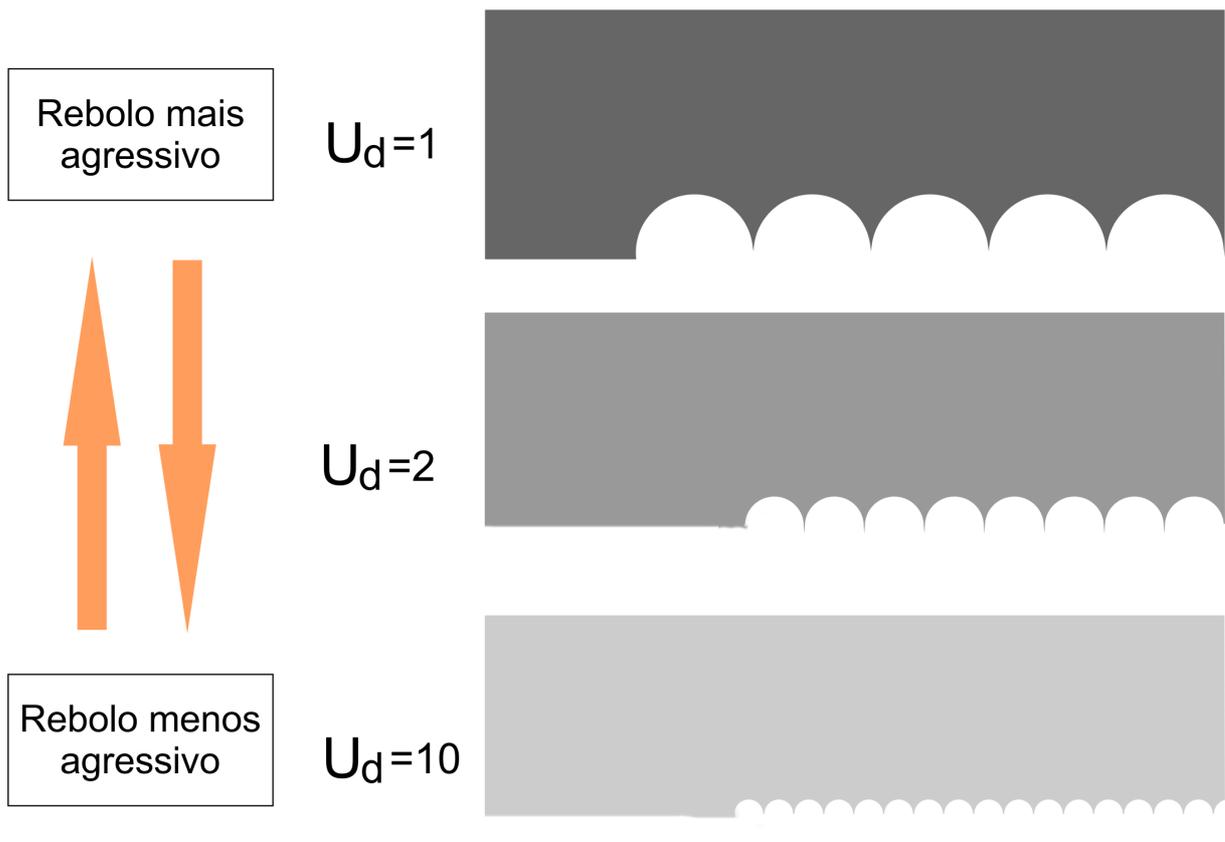


Figura 2.4 - Agressividade do Rebolo em Função do Grau de Recobrimento, adaptado de (FIOCCHI et al., 2011).

## 2.2 SENSORES PIEZELÉTRICOS

Sensores piezelétricos são os tipos de sensores mais comumente usados no monitoramento de sinais de emissão acústica. Elementos piezelétricos convertem vibrações mecânicas em sinais elétricos e vice-versa (GROSSE; OHTSU, 2008; JUNIOR et al., 2019). Neste tópico é apresentado o estado da arte dos sensores de emissão acústica utilizados na indústria bem como o diafragma piezelétrico.

### 2.2.1 Sensor de Emissão Acústica

Ondas de emissão acústica (EA) são ondas elásticas que surgem da liberação rápida de energia de fontes localizadas dentro de um material. A técnica de EA envolve o registro das ondas produzidas em uma estrutura por meio de sensores colocados na superfície e analisando esses sinais para extrair as informações sobre a natureza da fonte. Uma representação esquemática do fenômeno das emissões acústicas pode ser observada na Figura 2.5, onde sob a aplicação da tensão a estrutura sofre uma formação de trinca e a fissura atua como uma fonte de ondas de EA que se propagam em todas as direções. Um sensor conectado na superfície converte as ondas em pulsos elétricos e esses sinais são recebidos pelo sistema de aquisição para análise posterior. Note-se aqui que apenas as trincas ativas ou em propagação dão origem a ondas de tensão e, em caso de estabilidade, as rachaduras estarão presentes, mas nenhum sinal de EA será detectado (KAPHLE, 2012).

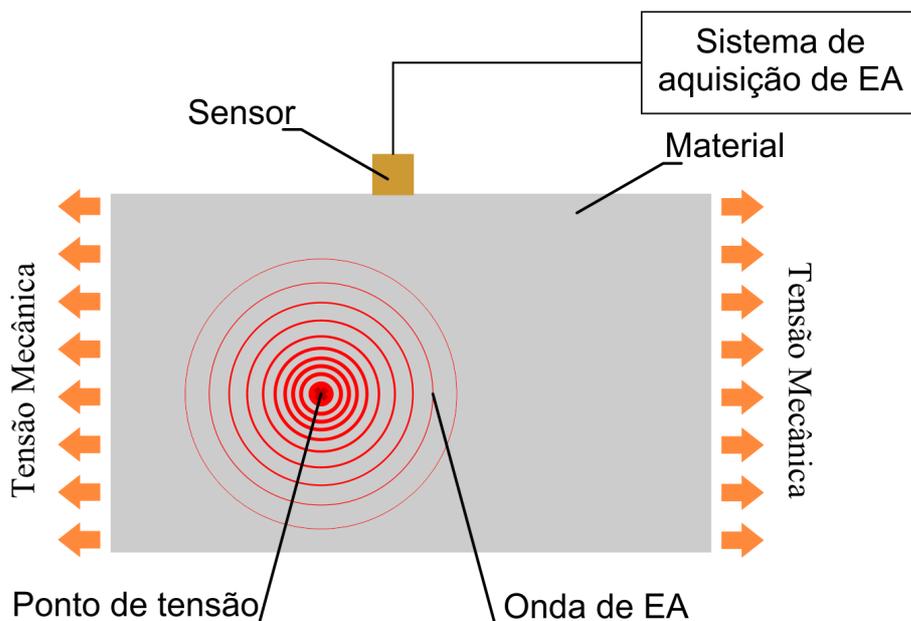


Figura 2.5 - Representação Esquemática do Fenômeno das Emissões Acústicas  
(KAPHLE, 2012).

Uma interessante analogia pode ser feita ao fenômeno das emissões acústicas, comparando-o com os terremotos, que podem ser considerados como as maiores fontes naturais de emissão. Os terremotos liberam ondas sísmicas que são ondas elásticas que se propagam através da Terra e são detectadas por meio de uma rede de sismômetros localizados ao redor do mundo (DIODATI; MARCHESONI; PIAZZA, 1991).

Os sensores de emissão acústica são colocados na superfície de uma estrutura para coletar sinais provenientes destas estruturas. Os sensores estão disponíveis no mercado em uma ampla variedade de formas e tamanhos, conforme pode ser observado na Figura 2.6 (SYSTEME, 2016)



Figura 2.6 - Sensores Comerciais de Emissão Acústica (SYSTEME, 2016)

Um bom acoplamento dos sensores ao corpo de prova é necessário para a transmissão efetiva dos sinais de EA. Os sensores são fixados nas superfícies usando suportes magnéticos, colas ou mesmo tiras de borracha e fitas. Uma camada de acoplamento, como graxa e óleo, é aplicada entre as duas superfícies. A faixa de frequências de operação é importante durante a seleção do sensor, sendo a mais comum para testes de emissão acústicas em estruturas civis, por exemplo, de 100kHz-300 kHz (FU, 2005).

Um sensor de emissão acústica típico PZT (*Lead zirconate titanate* ou Titanato zirconato de chumbo, material piezelétrico comumente usado) transforma o deslocamento elástico de 1 pm ( $10^{-12}$  m) em sinais elétricos de 1  $\mu$ V (GROSSE; OHTSU, 2008). Um disco de contato é montado na superfície e o elemento piezelétrico fica dentro de uma caixa de proteção. Um esquema simples do sensor de emissão acústica pode ser observado na Figura 2.7.

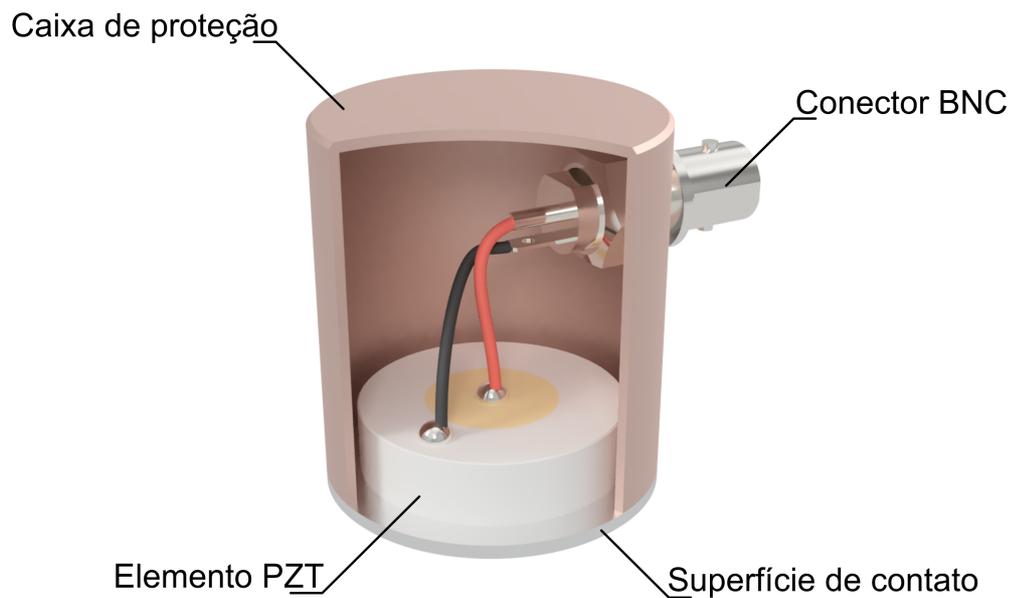


Figura 2.7 - Sensor de Emissão Acústica com Elemento Piezoeletrico, adaptado de (GROSSE; OHTSU, 2008)

Como demonstrado por Dornfeld, Lee e Chang (2003), a emissão acústica (EA) representa um alto grau de confiança na caracterização de vários fenômenos relacionados à remoção de material no processo de retificação, particularmente na microescala, dando credibilidade ao seu uso no monitoramento de processo de fabricação de precisão.

### 2.2.2 Diafragma Piezoeletrico Aplicado Ao Processo De Manufatura

Os diafragmas piezoeletricos, que são comumente conhecidos como *buzzers*, são componentes acústicos simples que são amplamente usados em uma variedade de dispositivos eletrônicos para produzir som, como um alarme, bipe ou toque. (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016). Para serem usados como sensores, esses transdutores possuem uma boa sensibilidade e uma faixa de frequência apropriada deve ser escolhida de acordo com a estrutura e o tipo de dano a ser detectado (ALMEIDA et al., 2014).

Na Figura 2.8 apresenta-se a estrutura de um diafragma piezoeletrico e na Figura 2.9 apresenta-se os modelos comerciais da fabricante *Murata Electronics* encontrados.

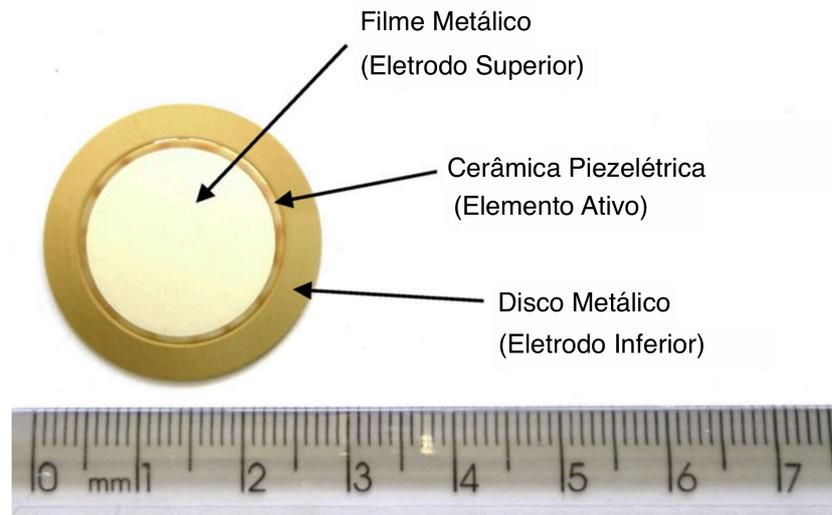


Figura 2.8 - Diafragma Piezoelectrico (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016)

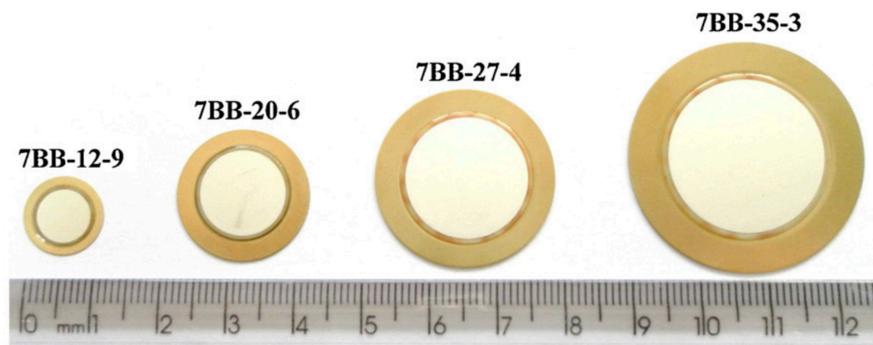


Figura 2.9 - Sensores Piezoelectricos Comerciais (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016)

Em função da fácil implementação desses pequenos transdutores piezoelectricos de baixo custo, denominados PZT, a técnica de impedância eletromecânica (EMI - *Electromechanical Impedance*) tem sido empregada na detecção de falhas estruturais em estruturas civis e mecânicas devido à sua propriedade não destrutiva e, o que leva à redução de custos bem como menor dependência de métodos de inspeção manual. Nesta técnica, a cápsula é excitada aplicando-se uma tensão senoidal para gerar ondas para se propagar por toda a estrutura. A partir da assinatura de impedância da estrutura sem qualquer dano, qualquer alteração estrutural pode ser detectada pela medição da impedância elétrica do sensor piezoelectrico (BATISTA DA SILVA et al., 2018).

O teste da quebra do grafite (PLB - *pencil lead break*) é um método bem conhecido para caracterizar sensores de emissão acústica. Em Almeida, Baptista e Aguiar (2015) foi analisada a eficácia desse método na caracterização de transdutores piezelétricos para sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) baseados na técnica de impedância eletromecânica (EMI - *Electromechanical Impedance*). Testes foram realizados em peças de alumínio de diferentes tamanhos e os resultados experimentais indicam uma clara relação entre a variação na assinatura da impedância elétrica do transdutor e a densidade espectral de potência obtida com o método PLB. Portanto, o PLB pode ser um método simples e eficaz para avaliar a sensibilidade de transdutores para detecção de dano em sistemas SHM baseados na técnica de EMI (DA CONCEIÇÃO JUNIOR et al., 2018).

Em Baptista et al. (2014) avaliou-se experimentalmente o efeito da temperatura na impedância elétrica dos sensores piezelétricos utilizados na técnica de EMI, demonstrando que os efeitos da temperatura foram fortemente dependentes da frequência, o que pode motivar futuras pesquisas no campo de SHM. Outros trabalhos relacionados a danos estruturais também podem ser encontrados na literatura, onde o uso do PZT tem se tornado frequente (ARJUN et al., 2015; LI; PENG; MENG, 2014).

No processo de retificação poucos trabalhos têm sido feitos com o uso do diafragma piezelétrico (PZT). Ribeiro et al., (2017), avaliaram um grande número de técnicas de monitoramento para controlar a condição superficial das peças retificadas. Diafragmas piezelétricos de PZT são usados em muitos campos, mas esses sensores não são comuns no monitoramento dos processos de usinagem. Esse artigo propôs um método para monitorar a condição da superfície da peça (retificação e queima normal) usando um diafragma piezelétrico e técnicas de processamento digital de sinais. Uma comparação foi feita com um sensor de emissão acústica convencional, que é um sensor tradicional no monitoramento dos processos de usinagem. Os testes de retificação foram realizados em uma retificadora tangencial plana com rebolo de nitrato de boro cúbico (CBN), onde os sinais foram coletados a taxas de 2 MHz. As peças foram cuidadosamente analisadas por meio de inspeção visual, medidas de rugosidade, dureza da superfície e análises metalográficas. O estudo do conteúdo de frequência de ambos os sinais foi realizado para selecionar bandas intimamente relacionadas à condição da superfície da peça. Filtros digitais foram aplicados aos sinais brutos e os recursos foram extraídos e analisados. Os valores de raiz quadrada média filtrados nas bandas selecionadas para ambos os sensores apresentaram um melhor ajuste à regressão linear, o que é altamente desejável para definir um limiar para detectar queima e implementar em um sistema de monitoramento. Além disso, os resulta-

dos dos índices de dano (*Root-mean-square deviation* - RMSD) mostram um excelente comportamento para o monitoramento de queima no processo de retificação para ambos os sensores. O método foi verificado usando um rebolo diferente, sendo o rebolo de óxido de alumínio, o que mostra claramente sua eficácia e demonstra o uso potencial do diafragma piezelétrico de baixo custo para o processo de retificação e monitoramento de queima.

Em Marchi et al. (2015), foi utilizado o método de impedância eletromecânica (EMI) para monitorar a operação de retificação superficial plana em tempo real, particularmente a integridade da superfície da peça de trabalho. Para avaliar a viabilidade da aplicação do método EMI ao processo de retificação, foram realizados ensaios experimentais em uma retificadora plana utilizando um rebolo de CBN e uma peça de aço SAE 1020, com transdutores PZT montados na peça e em seu suporte. Durante o processo de retificação, a impedância elétrica dos transdutores foi medida e os índices de dano convencionalmente utilizados no método EMI foram calculados e comparados com o desgaste da peça, indicando a condição da superfície da peça. Os resultados experimentais indicaram que o método EMI pode ser uma alternativa eficiente e econômica para monitorar peças de precisão durante o processo de retificação tangencial plana.

Em Batista da Silva et al. (2018), empregou-se a técnica EMI como a primeira alternativa para monitorar danos na superfície da peça após a operação de retificação com um rebolo abrasivo convencional. As medições de EMI foram realizadas usando um transdutor de PZT de baixo custo e sob condições ambientais controladas. A microdureza e rugosidade superficial das superfícies usinadas, bem como a eficiência da retificação, também foram medidos para detectar qualquer dano na superfície usinada e estabelecer relação com a técnica de EMI. A partir dos índices de dano raiz do desvio quadrático médio (RMSD) e do desvio do coeficiente de correlação métrico (*Correlation coefficient deviation metric* - CCDM), as alterações superficiais nas superfícies da peça foram inferidas pelo método EMI. Observou-se também uma boa correlação entre a técnica EMI e os demais parâmetros de saída que foram investigados, como a rugosidade superficial e potência de retificação, colocando-se assim como uma técnica não destrutiva, de baixo custo e viável para monitorar a peça de trabalho e danos superficiais na operação de retificação.

Vale ressaltar que o diafragma piezelétrico não foi aplicado até o momento na obtenção de mapas acústicos no processo de retificação, sendo este o primeiro trabalho relacionado ao tema. Assim, a sua utilização como sensor para compor uma imagem acústica ainda era desconhecido.

### 2.3 MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DA FERRAMENTA

A operação de dressagem é necessária para restabelecer as condições da superfície do rebolo, quando seus grãos abrasivos perdem as arestas de corte devido ao desgaste. A dressagem deve ser feita para evitar rejeições de peças causadas principalmente pelo aumento da rugosidade. A determinação do momento exato para realizar o processo de dressagem ainda é um problema sem uma solução precisa. Neste contexto, torna-se necessário estudar técnicas de monitoramento das condições do rebolo, visando aumentar a vida útil do rebolo e produzir peças mais precisas e com menor custo (HASSUI et al., 1998).

Para monitorar o rebolo, Brinksmeier & Werner (1992), desenvolveu um sensor óptico para monitorar a capacidade de corte dos rebolos. Este sensor é baseado no princípio da triangulação. Para a investigação da topografia do rebolo, mesmo durante o processo de retificação, o sensor foi montado no lado oposto da área de trabalho de uma retificadora. Os sinais de saída do sensor foram processados por um sistema digital de aquisição de dados que controla a posição do sensor e calcula diferentes parâmetros para descrever o estado do desgaste do rebolo. Esses parâmetros levam em consideração vários aspectos do desgaste macroscópico e microscópico do rebolo.

O trabalho de Hassui et al. (1998), utilizou peças de aço que foram retificadas até que sua rugosidade superficial atingisse valores considerados intoleráveis para o processo de retificação. Ao mesmo tempo, os sensores de vibração e emissão acústica fixados em dois pontos da máquina retificadora monitoravam o processo, a fim de estabelecer indiretamente a condição do rebolo e o momento de dressá-lo. Além disso, os sinais desses sensores também foram utilizados para determinar a duração da fase de *spark out* (tempo de centelhamento) e da deformação elástica do ciclo de retificação. O sensor de vibração provou ser o melhor para estabelecer o fim da vida útil do rebolo. O sensor de emissão acústica foi o mais adequado para determinar o tempo gasto na deformação elástica e ambos os sensores foram capazes de detectar o fim da fase de *spark out*.

Redes neurais e lógica *fuzzy* também foram usadas para monitorar a condição do rebolo. O trabalho de Lezanski (2001), utilizou uma rede neural e a lógica *fuzzy* para classificar a condição de corte do rebolo no processo de retificação cilíndrica. Para cada sinal de medição, algumas análises estatísticas e espectrais foram feitas e usadas como entrada para a seleção de dados e procedimentos de classificação. Em seguida, um sistema de decisão baseado em redes neurais e lógica *fuzzy* foi utilizado para integração dos sensores e monitoramento de condições do rebolo.

O trabalho de Varghese et al. (2000) desenvolveu um rebolo contendo um sensor inteligente para monitorar as condições do rebolo e o processo de retificação na usinagem de cerâmicas. O rebolo denominado "inteligente" era feito de um corpo de alumínio com sensores piezocerâmicos embarcados e equipado com segmentos de grãos abrasivos de diamante em sua superfície. Utilizando circuitos de processamento digital de sinais (*digital signal processing - DSP*) a força normal e a força instantânea foram aferidas, bem como, suas variações a cada revolução do rebolo. Os dados foram enviados por um sistema de telemetria também inserido no rebolo. Os resultados apresentados demonstraram a capacidade do rebolo "inteligente" de monitorar as condições do rebolo e do processo de retificação.

A transformada de Fourier de tempo curto (STFT, do inglês *short-term Fourier transform* ou *short-time Fourier transform*) foi utilizada para o monitoramento de rebolos. O trabalho de Chen & Limchimchol (2006) utilizou a STFT para identificar as características das condições do rebolo. A metodologia *Support Vector Machine* (SVM) foi apresentada como uma ferramenta poderosa para a classificação de diferentes situações de desgaste de rebolos. Após o treinamento com dados de sinal disponíveis, o SVM foi capaz de identificar o estado de um processo de retificação. O requisito e a estratégia para usar o SVM no monitoramento do processo de retificação foram discutidos no trabalho e, como resultado, foi possível determinar a vida útil do rebolo.

A aplicação de transformadas *wavelet* foi utilizada por Warren Liao et al. (2007) para monitorar a condição da superfície do rebolo no processo de retificação baseados em sinais de emissão acústica (EA). Testes foram realizados no processo de retificação do tipo *creep feed* (retificação plana tangencial no qual a velocidade de avanço é extremamente pequena e a profundidade de corte é grande) durante a retificação de peças de alumina com um rebolo de diamante e ligante resinoide usando duas condições diferentes. Durante os experimentos, os sinais EA foram coletados quando o rebolo estava "afiado" e quando o rebolo estava "sem corte". As características discriminantes foram então extraídas de cada segmento de sinal de EA bruto usando o procedimento discreto de decomposição *wavelet*. Um algoritmo de agrupamento genético adaptativo foi finalmente aplicado às características extraídas para distinguir diferentes estados de condição de rebolos. Os resultados dos testes indicavam que a metodologia proposta pode alcançar 97 % de precisão para a condição de alta taxa de remoção de material, 86,7 % para a condição de baixa taxa de remoção de material e 76,7 % para as condições combinadas de retificação.

Os rebolos vão perdendo o corte à medida que o material da superfície das peças é removido. O trabalho desenvolvido por Liao et al. (2008) apresenta uma metodologia para detecção on-line da perda de corte de rebolos baseada em sinais de emissão acústica (EA). A metodologia tem três etapas principais: pré-processamento, análise de sinais com extração de características e construção de classificadores usando o classificador de distância mínima (*minimal distance classifier* - MDC). Os resultados demonstraram a eficácia da técnica MDC e permitiu a detecção da condição do rebole no processo de retificação.

Extração e seleção de características são duas questões importantes no monitoramento de condições baseadas em sensores de qualquer sistema de engenharia (JUNIOR; D'ADDONA; AGUIAR, 2018). O trabalho desenvolvido por Warren Liao (2010), utilizou sinais de emissão acústica que foram processados por modelagem auto regressiva e decomposição *wavelet* discreta para extração de características, possibilitando o diagnóstico da ferramenta de corte no processo de retificação.

Um novo sistema de monitoramento de desgaste de rebolos baseado na decomposição discreta da transformada *wavelets* e na técnica SVM foi proposto por (YANG; YU, 2012). Os sinais de retificação foram coletados por um sensor de EA. Um método de pré-processamento foi apresentado para identificar o período de retificação obtidos dos sinais de EA puros. O RMS e a variância de cada nível de decomposição foram designados como o vetor de característica usando a decomposição *wavelet* discreta. Vários experimentos de retificação foram realizados em uma retificadora tangencial plana para validar o sistema de classificação proposto. Os resultados indicaram que o sistema de monitoramento proposto poderia alcançar uma precisão de classificação de 99,39 % com uma profundidade de corte de 10  $\mu\text{m}$  e 100 % com uma profundidade de corte de 20  $\mu\text{m}$ . Finalmente, vários fatores que podem afetar os resultados da classificação também foram discutidos.

Moia et al. (2015) monitoraram a operação de dressagem utilizando o sinal de emissão acústica e estatísticas derivadas deste sinal, classificando o rebole como afiado ou sem afiação por meio de redes neurais artificiais. Um rebole de óxido de alumínio instalado em uma retificadora plana, um sistema de aquisição de sinal e um dressador de ponta única foram usados nos experimentos. Testes foram realizados variando-se  $U_d$  e  $a_d$ . Os valores de raiz quadrada média (*Root mean square* - RMS) e duas estatísticas adicionais foram calculadas com base nos dados EA brutos. Uma rede neural *Perceptron* multicamadas foi utilizada com o algoritmo de aprendizagem *Levenberg-Marquardt*, cujas entradas foram as estatísticas acima mencionadas. Os resultados indicam que este método obteve sucesso na classificação das condições do rebole no processo de dressagem, identificando a ferramenta como “afiada” (com capacidade de corte)

ou “sem corte” (com perda de capacidade de corte), reduzindo o tempo e custo da operação e minimizando a remoção excessiva de abrasivos do rebolo.

Sistemas de monitoramento que utilizam EA foram estudados por LOPES et al. (2017) para correlacionar os sinais com diversas condições da ferramenta. Esse estudo permitiu identificar o momento correto para parar a dressagem, o que é essencial em um sistema de controle automático. A partir dos sinais EA coletados durante a dressagem utilizando rebolo de óxido de alumínio e dressador de ponta única, foi realizada análise espectral através da densidade espectral de potência, selecionando as bandas de frequências que melhor caracterizaram o processo. O parâmetro estatístico “*counts*” foi aplicado ao sinal bruto não filtrado e filtrado nas bandas selecionadas, a fim de identificar a condição da ferramenta e, por sua vez, para a implementação de um sistema de monitoramento. Os resultados mostraram uma relação expressiva entre as condições de corte da ferramenta e os sinais processados nas bandas selecionadas. Houve uma grande disparidade dos sinais filtrados nas bandas selecionadas e sinais não filtrados, refletindo que os sinais filtrados nas bandas selecionadas foram mais eficientes no diagnóstico das condições do rebolo.

A dressagem é uma operação de recondicionamento da superfície do rebolo visando restaurar a condição original e sua eficiência. O trabalho desenvolvido por Alexandre et al. (2018) avaliou a regularidade da superfície e a condição de dressagem do rebolo no processo de retificação por meio de processamento digital de sinais de emissão acústica e modelos *fuzzy*. Os testes foram realizados com o uso de dressadores de diamante sintético em uma retificadora plana equipada com um rebolo de óxido de alumínio. O sensor de emissão acústica foi conectado ao suporte do dressador. A análise no domínio da frequência foi realizada para escolher as bandas que melhor caracterizaram o processo. Uma faixa de frequências de 25 kHz–40 kHz foi usada para calcular a razão de potência (ROP - *Ratio of Power*), e os valores de média e desvio padrão da ROP foram introduzidos no sistema *fuzzy*. Os resultados indicaram que o modelo *fuzzy* foi altamente efetivo no diagnóstico das condições de superfície do rebolo.

## 2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS APLICADO A MANUFATURA

A teoria do processamento de sinal desempenha um papel cada vez mais central no desenvolvimento de sistemas modernos de processamento de informação e telecomunicações, e possui uma ampla gama de aplicações em tecnologia multimídia, processamento de sinais audiovisuais, comunicação móvel celular, gerenciamento adaptativo de redes, sistemas de ra-

dar, análise de padrões, processamento de sinais médicos, previsão de dados financeiros, sistemas de tomada de decisão, etc. A teoria e a aplicação do processamento de sinais estão relacionadas à identificação, modelagem e utilização de padrões e estruturas em um processo de análise de dados. Os sinais a serem observados são frequentemente distorcidos, incompletos e ruidosos. Assim, a redução de ruído e a remoção da distorção do sinal é uma parte importante de um sistema de processamento de sinal (SAEED V. VASEGHI, 2000).

A tarefa mais importante do gerenciamento do sistema de manufatura é manter o funcionamento mesmo quando ocorrem eventos indesejados. Normalmente, é muito difícil ou até impossível evitar consequências de falhas nos equipamentos, o que resulta em curto-circuito, quedas de tensão ou perda de energia. Geralmente, como solução para este problema estão o conjunto de técnicas de processamento de sinais cuja finalidade é fornecer ferramentas com sensibilidade a falhas e mau funcionamento do processo e também evitar que alarmes indevidos ocorram durante condições normais de operação (GERMÁN-SALLÓ; STRNAD, 2018).

Considerando o monitoramento da ferramenta no processo de retificação, muitos pesquisadores têm utilizado inúmeras técnicas de análise, algoritmos e processamento de sinais com o objetivo de relacionar os sinais com os eventos ocorridos durante o processo (AGUIAR et al., 2007; DOTTO et al., 2007). Entre as técnicas mais comuns se encontram RMS no domínio do tempo e a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer*. - FFT) no domínio da frequência. Diferentemente das técnicas citadas anteriormente, o índice de correlação bidimensional possibilita a obtenção de uma análise comparativa entre imagens distintas, ainda pouco difundida no monitoramento de processos de retificação.

#### **2.4.1 Estatística RMS**

A relativa facilidade de processamento da estatística RMS (*root mean square*) do sinal de emissão acústica levou a abordagens nas quais esse tipo de estatística é empregado. No entanto, a operação “média” inerente envolvida na determinação do RMS do sinal de emissão acústica torna, até certo ponto, insensível a eventos impulsivos, como propagação de trincas e queimas de materiais, embora esse tipo de parâmetro contenha muitas informações úteis (BENNETT, 1994). Por outro lado, o cálculo do RMS vem sendo utilizado em conjunto com outras técnicas de processamento de sinal para identificar falhas no processo de retificação bem como as condições da ferramenta (AGUIAR; BIANCHI; OLIVEIRA, 2002; AGUIAR et al., 2004; ARUN et al., 2018; LOPES et al., 2017; MARTINS et al., 2014; WEBSTER; MARINESCU; BENNETT, 1994; WEINGAERTNER; BOARON, 2011).

Para um dado tempo  $t$ , o valor RMS de um sinal  $x(t)$ , pode ser expressado pela Equação 2.4.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t)^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)^2} \quad (2.4)$$

sendo que  $T$  é o tempo de integração e  $N$  é o número de amostras de  $x(t)$  no intervalo de tempo  $T$ .

### 2.4.2 Índice de Correlação Bidimensional

A correlação entre dois sinais (correlação cruzada) é uma abordagem padrão para detecção de características, bem como uma componente de técnicas mais sofisticadas. A literatura descreve o teorema da convolução e a possibilidade de computação de correlação no domínio da frequência usando a FFT. Infelizmente, a forma normalizada de correlação (coeficiente de correlação) preferida na correspondência de modelos não possui uma expressão de domínio de frequência correspondentemente simples e eficiente (PAN et al., 2009).

Na obtenção de correlação de uma imagem digital, para obter os deslocamentos de cada ponto de interesse, um critério de correlação deve ser predefinido para avaliar a similaridade entre o subconjunto de referência e o subconjunto de destino. O critério de correlação é de fundamental importância e muitos foram projetados e utilizados na literatura, porém grande parte sem aplicação prática eficiente (PAN; XIE; WANG, 2010).

Na manufatura, técnicas de correlação entre imagens já foram aplicadas para o conhecimento das cargas que ocorrem durante um processo de fabricação (por exemplo, retificação) e das modificações no material usando o conceito de assinaturas de processo para otimizar o processo de fabricação e compará-lo com outros (por exemplo, processamento a *laser*). No trabalho publicado por Tausendfreund et al. (2018), uma medida de deslocamento global da superfície do material é calculada digitalizando uma pequena janela do material para avaliação do campo de interesse e calculando a correlação cruzada entre duas imagens consecutivas em cada ponto.

Também na última década, várias versões de técnicas de análise de tensão residual em microescala foram desenvolvidas avaliando a superfície da amostra. Para a determinação do alívio de tensão resultante utiliza-se uma correlação de imagem digital (LUNT; KORSUNSKY, 2015).

A correlação cruzada normalizada tem sido usada extensivamente para muitas aplicações de processamento de sinais, mas a operação tradicional de correlação normalizada não atende aos requisitos de velocidade para aplicações de tempo crítico. A técnica proposta por Yoo & Han (2009), foi usada para o cálculo da correlação cruzada normalizada e aplicada ao longo do trabalho. A obtenção do índice de correlação bidimensional  $\gamma$  entre a imagem  $f$  e um padrão  $t$ , é descrito na Equação 2.5.

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \overline{f_{u,v}}] [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x,y) - \overline{f_{u,v}}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0.5}} \quad (2.5)$$

Sendo que  $f$  é a imagem,  $\bar{t}$  é a média do padrão e  $\overline{f_{u,v}}$  é a média de  $f(x, y)$  na região sobreposta ao padrão.

### 2.4.3 Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Rápida de Fourier (FFT)

O método mais comum de estimativa espectral é baseado na transformada rápida de Fourier (FFT). Para muitas aplicações, os métodos baseados em FFT produzem resultados suficientemente bons (SAEED V. VASEGHI, 2000).

Para um sinal de tempo discreto de duração limitada  $x(m)$  de  $N$  amostras de comprimento, a transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transformer* - DFT) é definida como  $N$  amostras espectrais uniformemente espaçadas (Equação 2.6).

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)mk}, k = 0, \dots, N-1 \quad (2.6)$$

O inverso da transformada discreta de Fourier (*Inverse Discrete Fourier Transformer* - IDFT) é dado pela seguinte Equação 2.7.

$$x(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)mk}, m = 0, \dots, N-1 \quad (2.7)$$

Pela Equação 2.7, o cálculo direto da transformada de Fourier requer  $N(N-1)$  multiplicações e um similar número de adições.

A transformada rápida de Fourier possui um algoritmo que reduz a complexidade computacional da transformada discreta de Fourier, pois o método para o cálculo da FFT utiliza as propriedades periódicas e simétricas de  $e^{-\frac{j2\pi}{N}}$  para evitar cálculos redundantes (SAEED V. VASEGHI, 2000).

O uso da transformada de Fourier foi fundamental neste trabalho na determinação das bandas de frequência e análise de suas características visando identificar as falhas pelo método manual.

## 2.5 MAPA ACÚSTICO NO MONITORAMENTO DA FERRAMENTA DE CORTE

O trabalho precursor para mapeamento acústico foi realizado por Oliveira & Dornfeld (1994), onde se propôs uma abordagem para medir as características geométricas do rebolo utilizando a ferramenta de dressagem como sonda de toque e o nível de emissão acústica gerado no contato como um gatilho para a medição dimensional. A interação entre a ferramenta de dressagem e o rebolo é estudada experimentalmente. Três níveis de interação são observados: turbulência, elástica e friável. No contato elástico, a superfície do rebolo não é danificada pela ferramenta de dressagem. Essa condição é investigada com base nas características topográficas das superfícies que interagem entre si. A análise mostra que é possível medir as características do rebolo usando este sistema.

Há diversos trabalhos com aplicações de mapas acústicos, porém, o principal trabalho que se tornou a referência para área de retificação foi proposto por (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001). Esse trabalho utiliza o monitoramento baseado em análise de sinal de emissão acústica RMS com intervalo de integração rápida. Neste sentido, propõe a construção de mapas acústicos coletando sinais de emissão acústica RMS na faixa de 60 kHz a 500 kHz. A coleta de dados de emissão acústica é iniciada toda vez que um sensor magnético é acionado por um pino devidamente instalado no rebolo que se movimenta a cada revolução e produz um pulso. Uma taxa de amostragem de 2 kHz foi usada neste caso particular para mapear cada rotação do rebolo, que corresponde a uma resolução de cerca de 0,5 mm/amostra. Antes do processamento do mapa, é aplicado um filtro passa alta de 100 kHz visando eliminar sinais de baixa frequência, haja vista que a constante de tempo utilizada era muito pequena. Um mapeamento gráfico do sinal de emissão acústica com uma escala de intensidade de cor é então criado. Durante a operação de dressagem, o mapeamento é construído em tempo real adicionando colunas na matriz à medida que a dressagem vai sendo realizada, de forma a compor a imagem do rebolo utilizando profundidades de corte da ordem de 1  $\mu\text{m}$ .

O sistema proposto por Oliveira & Dornfeld (2001) pôde ser usado para diferentes procedimentos de avaliação, incluindo:

- (a) Avaliação da dressagem, onde durante a operação de dressagem, a interação entre o dressador e o rebolo pode ser mapeada acusticamente;
- (b) Mapeamento topográfico, onde o mapa é semelhante ao obtido para a operação de dressagem, mas usando a profundidade de corte quase zero ou com um valor próximo da espessura do cavaco;
- (c) Avaliação da retificação, onde durante uma operação de retificação de mergulho, a interação entre o rebolo e a peça de trabalho pode ser avaliada;

O trabalho conclui que o uso de emissão acústica como uma ferramenta de monitoramento e caracterização de processos *in loco* pode servir como um meio de unir as etapas de fabricação e controle de qualidade e, com desenvolvimento adicional futuro, em um ambiente de fabricação totalmente automatizado, possibilitando que o estágio de controle de qualidade possa ser totalmente eliminado. Na Figura 2.10 ilustra-se a bancada de ensaios e na Figura 2.11 ilustra-se o mapa acústico obtido por Oliveira & Dornfeld (2001) onde foi possível visualizar uma marca “L”.

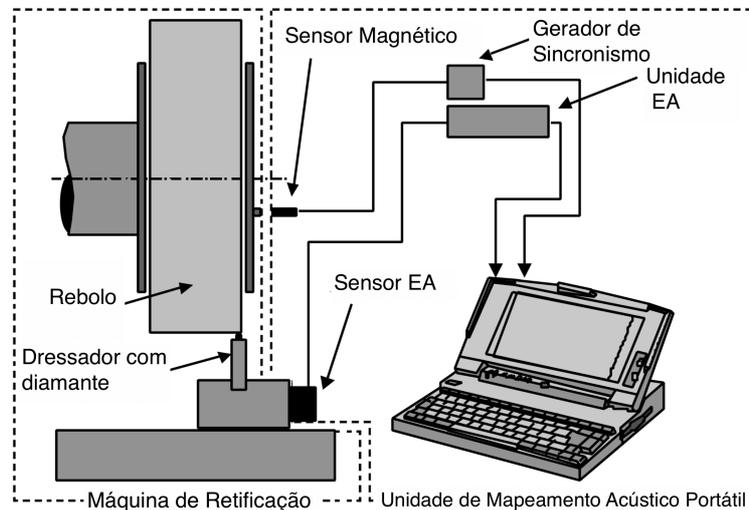


Figura 2.10 – Bancada de Ensaio (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001)

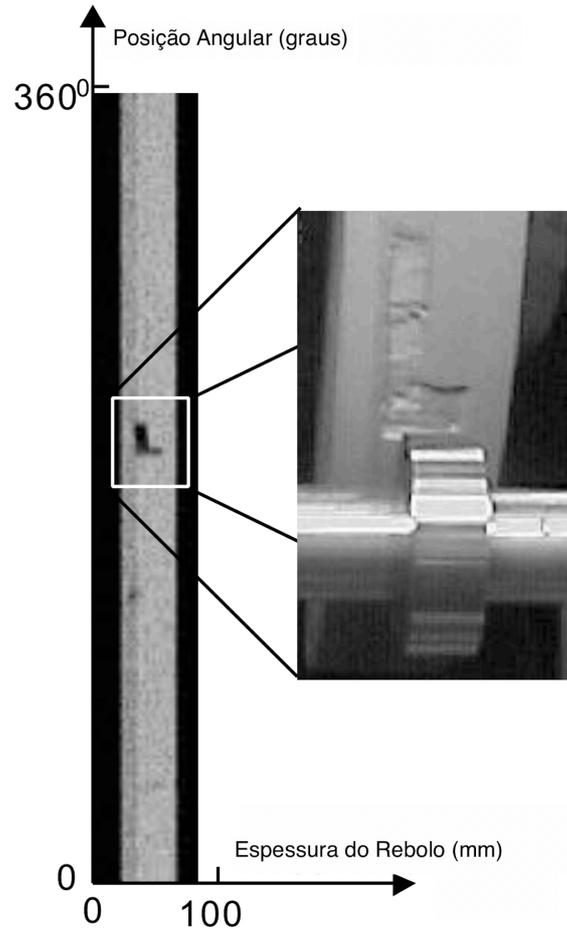


Figura 2.11 - Saída do Sistema de Mapeamento Acústico (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001)

Durante o processo de torneamento, Dornfeld et al., (2003) realizaram uma abordagem inovadora com mapeamento acústico utilizando sinal de Emissão Acústica RMS, sendo capaz de representar graficamente várias características da interação entre a ferramenta e a peça, relacionada à distribuição instantânea da profundidade de corte, limites de grãos e orientação dos grãos.

Baseado na técnica proposta por Oliveira & Dornfeld (2001), LEE et al. (2006) desenvolveu um trabalho que utilizou a técnica de mapa acústico para monitorar processos em manufatura de precisão tais como fresamento, planarização químico-mecânica utilizada na fabricação de semicondutores e monitoramento de gravação de ultraprecisão.

O trabalho proposto por Oliveira et. al (2008) estudou as interações dinâmicas do rebolo/peça de trabalho na retificação de alta velocidade usando o rebolo CBN vitrificado e os materiais de trabalho do tipo DTG (de difícil retificação). Esse problema é típico na retificação das cabeças das válvulas do motor. A influência da força tangencial por grão abrasivo foi in-

vestigada como uma importante variável de controle para a determinação da relação G. Experimentos foram realizados para observar a influência das vibrações no desgaste do rebolo. As medidas de emissão acústica (EA) e sinais de vibração com a obtenção de mapas acústicos ajudaram a identificar a correlação entre as interações dinâmicas (produzidas pela excitação aleatória forçada) e o desgaste do rebolo.

Um método de teste rápido para a determinação das características topográficas de um rebolo de CBN com base na tecnologia de emissão acústica foi proposto por (WEINGAERTNER; BOARON, 2011). Para implementar a estratégia, um sistema de monitoramento de emissão acústica foi integrado em uma retificadora CNC de 3 eixos. Um computador com software específico permitia a aquisição de sinais e visualização dos sinais EA RMS, que são originados através da interface entre o rebolo e a ferramenta de dressagem em uma faixa de alguns micrômetros. Os sinais EA RMS adquiridos a partir dessas interfaces foram usados para estabelecer um mapa on-line a partir da superfície do rebolo, indicando as arestas de corte ativas durante o contato entre o rebolo e a ferramenta de dressagem.

Outro trabalho relevante foi desenvolvido por Denkena et al. (2015), onde o mapeamento acústico foi utilizado para monitoramento e controle do processo. O mapa representa a distribuição da emissão acústica (EA) ao redor do rebolo ao longo do eixo temporal, de acordo com o método proposto por Oliveira & Dornfeld (1994) e Oliveira & Dornfeld (2001). A técnica permite o monitoramento do contato entre o rebolo e a ferramenta de padronização durante um processo de padronização do rebolo em tempo real. O arranjo padrão na topografia do rebolo pode ser derivado dos sinais emissão acústica e do método proposto por (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001)

Os mapas acústicos também foram aplicados em retificadoras *centerless* (sem centro). O trabalho desenvolvido por Hashimoto et al. (2012) resume a evolução da teoria da retificação *centerless*, incluindo modelagem avançada e simulação. Em seguida, discute o projeto dos principais elementos de uma retificadora *centerless*, como fusos, estrutura, guias e sistema de posicionamento, e fornece diretrizes de projeto para futuras máquinas. O artigo apresenta as tecnologias modernas de retificação *centerless*: máquinas avançadas, monitoramento avançado de processos com a construção de mapas acústicos propostos por Oliveira & Dornfeld (2001).

Padrões de dressagem sobre rebolos é um processo crítico em termos de velocidade, uma vez que interações muito rápidas devem ser realizadas. A cinemática de retificação também influencia a geometria obtida. O trabalho desenvolvido por Da Silva et al. (2016) estabelece o desenvolvimento de um processo de retificação capaz de produzir padrões de peça de trabalho

perfilados. A visualização destes padrões e a análise de resultados se baseiam na construção de mapas acústicos propostos por Oliveira & Dornfeld (2001).

Em Silva et al. (2017) apresenta-se as possibilidades e limitações da estruturação de superfícies usando rebolos especiais. Dois métodos foram avaliados. As peças foram estruturadas usando um rebolo padronizado, especialmente afiado durante a operação de dressagem. O segundo método usa um rebolo com padrão de granulação definido para produzir superfícies estruturadas com micro características. Para verificar a consistência da impressão do padrão na superfície do rebolo, utilizou-se o mapeamento da emissão acústica da superfície proposta por Oliveira & Dornfeld (2001).

Estudos preliminares em bandas de frequência para sensores de emissão acústica somente foram publicados recentemente como resultados deste trabalho de pesquisa. Segundo Dotto et al. (2019), a seleção de bandas de frequência em sinais de emissão acústica provenientes de sensores comerciais pode melhorar a qualidade visual dos mapas acústicos.

Com base nos trabalhos relacionados, fica evidente que a construção de mapas acústicos no processo de retificação se baseava nos estudos realizados por Oliveira & Dornfeld (2001). Desta forma, o presente trabalho contribui com a evolução da técnica, pois incorpora um novo sensor baseado em diafragmas piezelétricos, inédito no mundo, haja vista que trabalhos similares não foram encontrados. Além disso, contribui com um estudo de bandas de frequência e avalia os resultados alcançados em profundidades de dressagem comumente encontrada no dia-a-dia das empresas. Outro diferencial do trabalho é que o mesmo foi validado em uma retificadora tangencial plana, cujo processo possui características distintas dos trabalhos realizados anteriormente.

## Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS

---

Neste tópico são abordadas todas as técnicas e algoritmos desenvolvidos ao longo do trabalho bem como os procedimentos experimentais e banco de ensaios utilizados para obtenção dos mapas acústicos. Essas ferramentas determinaram uma metodologia eficiente para a extração de características dos sinais de emissão acústica obtidos por sensor de emissão acústica comercial e pelo diafragma piezelétrico de baixo custo e, assim, compor uma correlação entre um padrão considerado como ideal e os respectivos mapas acústicos gerados por meio dos sinais obtidos destes sensores.

### 3.1 BANCADA DE ENSAIOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os testes foram realizados usando uma retificadora superficial plana, modelo RAPH 1055, da fabricante Sulmecânica. Um rebolo de óxido de alumínio fabricado pela Norton, modelo 38A150-LVH, com dimensões de 355,6 mm x 25,4 mm x 127,0 mm, foi utilizado para os ensaios.

Para monitorar os sinais de emissão acústica, foi utilizado um sensor de Emissão Acústica do fabricante SENSIS modelo DM42 com faixa de frequência de até 500 kHz, bem como, um sensor do tipo diafragma piezelétrico de baixo custo da empresa *Murata*, modelo 7BB-27-4, ambos fixados no suporte do dressador. O sensor de Emissão Acústica (EA) da fabricante SENSIS já possui sistema de condicionamento de sinais, porém, para o diafragma piezelétrico (PZT) foi construído um circuito condicionador de sinais do tipo amplificador de instrumentação com ganho variável entre 25-50 e filtro *Butterworth* passa-baixas de segunda ordem com frequência de corte de 350 kHz, o qual também atua como filtro *anti-aliasing* no processo de aquisição. Para padronização dos termos no texto, será usada a nomenclatura EA para referenciar o sistema de emissão acústica comercial bem como a nomenclatura PZT para referenciar o sistema com o diafragma piezelétrico.

Um *encoder* foi montado no eixo do rebolo para coletar o sinal de sincronismo a ser usado na construção do mapa acústico. Este sensor gera um pulso positivo toda vez que o rebolo passa na mesma posição (uma revolução completa em torno do próprio eixo).

Os sensores utilizados para captar sinais de emissão acústica (EA e PZT) e o *encoder* foram conectados a um osciloscópio, modelo DL850, da marca Yokogawa. Esse equipamento

foi configurado para coletar sinais puros na taxa de amostragem de 5 MS/s. Na Figura 3.1 mostra-se uma representação da bancada de ensaios, que foi preparada para o processo de dressagem e aquisição de dados.

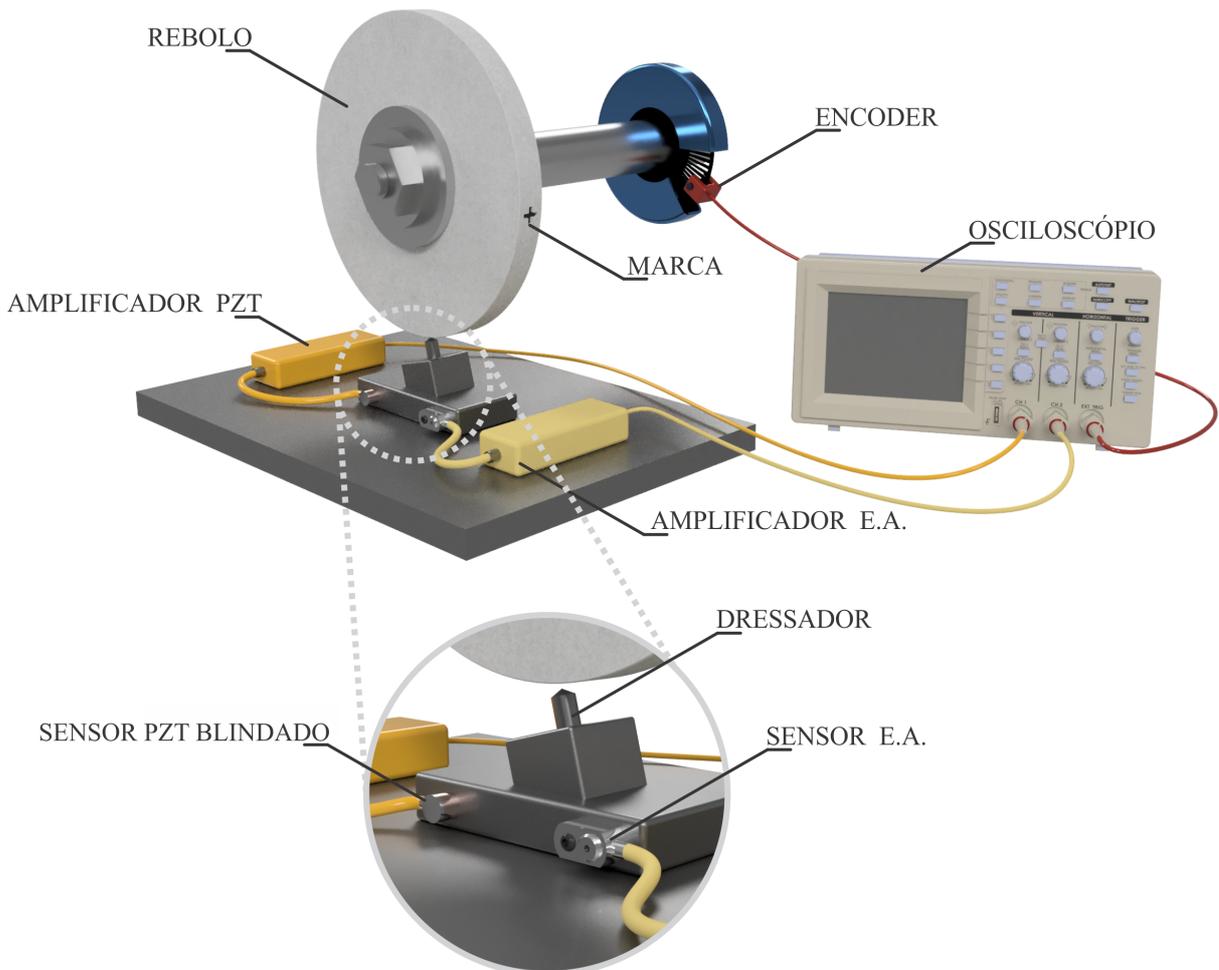


Figura 3.1 - Bancada de Ensaio para a Realização dos Testes

Inicialmente o rebolo foi balanceado, instalado na máquina de retificação e dressado para uniformizar sua superfície e largura. Posteriormente, com o objetivo de simular danos na superfície do rebolo e obter imagens acústicas dos sinais de EA e PZT a serem coletados durante testes de dressagem, uma marca positivo (+) e uma marca (T) foram usinadas na superfície do rebolo, como mostrada na Figura 3.2. Esses símbolos têm comprimentos horizontais e verticais de 15 mm e profundidade de 2,5 mm.



Figura 3.2 - Imagem das Marcas Inseridas no Rebolo

O dressador utilizado é do tipo ponta única (diamante), conforme apresentado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Dressador de Ponta Única

Foram realizados três ensaios de dressagem para quatro profundidades de dressagem ( $a_d$ ) diferentes: 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ , totalizando 12 ensaios para o sinal de EA e 12 ensaios para o sinal do PZT.

Como parâmetros de dressagem, utilizou-se rotação do rebolo de 1.800 rpm ( $n$ ) e grau de recobrimento ( $U_d$ ) igual a 1.

Para manter o  $U_d$  sempre constante, de forma que a cada revolução do rebolo o passo de dressagem ( $S_d$ ) e a largura de atuação do dressador ( $b_d$ ) fossem iguais, foi necessário modificar a largura de atuação do dressador ( $b_d$ ) para cada profundidade de dressagem ( $a_d$ ). O tempo de dressagem ( $t_d$ ) pode ser calculado usando estes parâmetros, de acordo com a Equação 2.3.

Na Tabela 3.1 ilustra-se as profundidades de dressagem ( $a_d$ ), largura de atuação do dressador ( $b_d$ ) e tempo de dressagem ( $t_d$ ).

Tabela 3.1 - Condições de Usinagem

<i>Profundidade de Dressagem (<math>a_d</math>)</i>	<i>Largura de Atuação do Dressador (<math>b_d</math>)</i>	<i>Tempo de Dressagem (<math>t_d</math>)</i>
5 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	8,51 s
10 $\mu\text{m}$	160 $\mu\text{m}$	5,32 s
20 $\mu\text{m}$	240 $\mu\text{m}$	3,55 s
40 $\mu\text{m}$	330 $\mu\text{m}$	2,58 s

O tempo de dressagem foi estabelecido controlando o movimento transversal da mesa da máquina de retificação, na qual o dressador estava instalado. Esses parâmetros foram mantidos constantes durante todos os passos para uma mesma profundidade de dressagem, conforme a Tabela 3.1.

Vale ressaltar que o interesse, neste caso, não foi obter a topografia da superfície do rebolo, o que poderia ser conseguido com dressagem de profundidade próximo de zero, como em Oliveira & Dornfeld, 2001. Em vez disso, o objetivo foi obter a condição da superfície do rebolo durante uma operação usual de dressagem, que por meio de técnicas de processamento de sinais, possibilitasse uma visualização fiel do mapa acústico, utilizando sensores de baixíssimo custo, como é o caso do diafragma piezelétrico. E, por fim, comparar os mapas acústicos obtidos pelo sensor de emissão acústica industrial da marca SENSIS (como base de referência) com aqueles obtidos por diafragma piezelétrico.

### 3.2 PROCESSAMENTO DE SINAIS

Os dados coletados do osciloscópio foram analisados e processados no software MATLAB. Para isso, os sinais foram normalizados e o nível médio foi eliminado.

Em seguida, foi realizado um estudo do espectro de frequências tanto no sinal de emissão acústica obtido com o sensor comercial da SENSIS quanto com o sinal obtido do diafragma piezelétrico (PZT) para investigar as frequências que apresentavam melhor relação com os danos superficiais do rebolo. Desta forma, foram escolhidos trechos do sinal onde haveria o dano na superfície do rebolo e onde não haveria dano para análise e comparação do espectro de frequências.

Para determinação do espectro de frequências tornou-se necessário o desenvolvimento de algoritmos para ajustes e escolhas das bandas de frequência, haja vista que apenas com a visualização dos mapas seria impossível discernir sobre a qualidade dos mesmos e compará-los entre si. Neste contexto, foram implementados dois algoritmos visando identificar a faixa de

frequências que melhor representaria as características do mapa acústico e, com isso, foi possível determinar o melhor intervalo de banda para a filtragem dos sinais. O índice de correlação bidimensional foi aplicado pelo algoritmo para comparar um padrão de imagem das marcas previamente gerado (base de referência) com aquele construído após a filtragem e, assim a avaliar iterativamente o desempenho da banda de frequências.

As técnicas utilizadas para a seleção automática das bandas de frequência são apresentadas na Seção 3.2.1.3.

O sinal de sincronismo foi utilizado para possibilitar a segmentação do sinal de emissão acústica (EA e PZT) de forma a convertê-los posteriormente em imagem. Para cada revolução do rebolo foi extraída uma linha do mapa, ou seja, os sinais foram dispostos em formato matricial (linha x coluna). O algoritmo para a extração dos trechos e composição da matriz no processo de dressagem serão detalhados na Seção 3.2.1.3. Na Figura 3.4 ilustra-se a representação da obtenção do mapa acústico e sua relação com a superfície do rebolo, considerando uma marca “+” inserida na superfície.

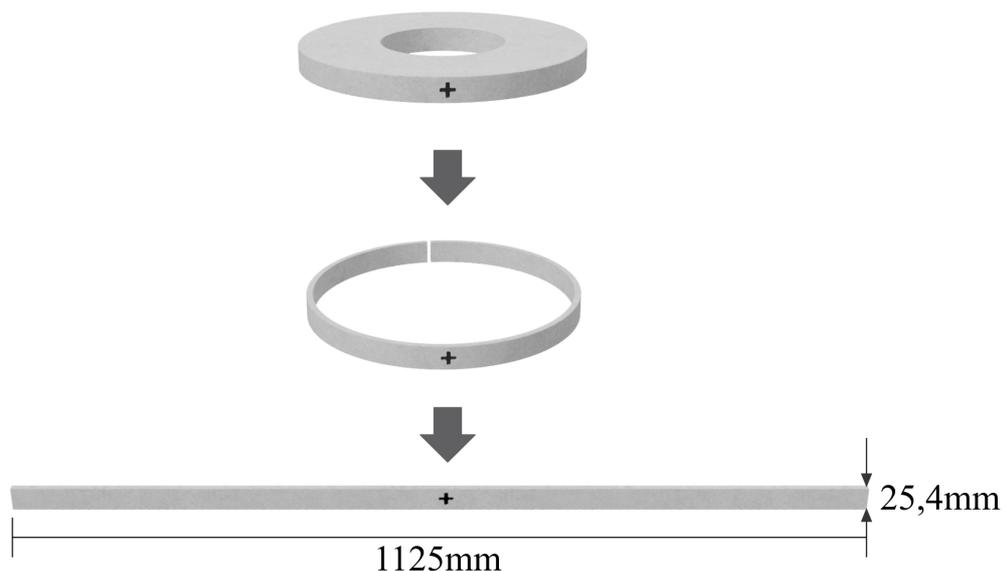


Figura 3.4 – Representação da Relação do Mapa Acústico com a Superfície do Rebolo

É possível notar na Figura 3.4 que a superfície do rebolo é representada por um retângulo que corresponde ao comprimento do rebolo em milímetros (1.125 mm) e pela espessura do rebolo (25,4 mm) em milímetros, portanto, o mapa acústico será uma imagem retangular com essa relação.

Após a seleção da banda que apresenta melhor correlação com o padrão de imagem de referência, foi usado um filtro digital passa-faixa *Butterworth* de quinta ordem sintonizado na faixa de frequência estabelecida para filtrar o sinal de emissão acústica obtido pelos sensores EA e PZT. Em seguida, calculou-se a estatística RMS para cada linha da matriz da imagem de forma que o número de pontos para o cálculo do RMS mantenha a relação largura *versus* espessura do rebolo e, assim, não distorça a imagem a ser construída pelo mapa acústico. A construção das imagens acústicas foram realizadas para os sinais de EA e PZT sem filtragem e para os sinais EA e PZT com filtragem. As discussões sobre o número de pontos utilizados no cálculo da estatística RMS são apresentadas na Seção 4.1.

A Seção 3.2.1.4 apresenta a técnica de equalização do sinal de emissão acústica RMS para remoção de valores indesejados antes da geração do mapa acústico e a Seção 3.2.1.5 detalha o algoritmo utilizado para a construção dos mapas acústicos.

De forma similar ao trabalho desenvolvido por Oliveira & Dornfeld (2001) foi possível visualizar as imagens acústicas e observar as irregularidades na superfície do rebolo (marcas), obtendo-se índices de correlação bidimensional com e sem o uso do filtro nas bandas de frequência selecionadas para os sinais de EA e PZT. Esses valores de correlação puderam ser utilizados para uma comparação efetiva dos sensores na obtenção da imagem acústica para cada ensaio realizado com profundidades de dressagem variadas (Tabela 3.1).

### **3.2.1 Algoritmos de Processamento de Sinais**

A obtenção de um mapa acústico que represente uma imagem fiel das condições superficiais do rebolo é o principal objetivo deste trabalho. Neste sentido, este tópico aborda as técnicas utilizadas para a extração das características dos sinais de emissão acústica visando a obtenção de um mapa que represente com maior fidelidade as características superficiais do rebolo, durante a operação de dressagem no processo de retificação tangencial plana.

Por meio da Figura 3.5 pode-se observar as etapas envolvidas na obtenção dos mapas acústicos bem como os algoritmos que compõe a metodologia para a geração de imagens e comparação visual das mesmas.

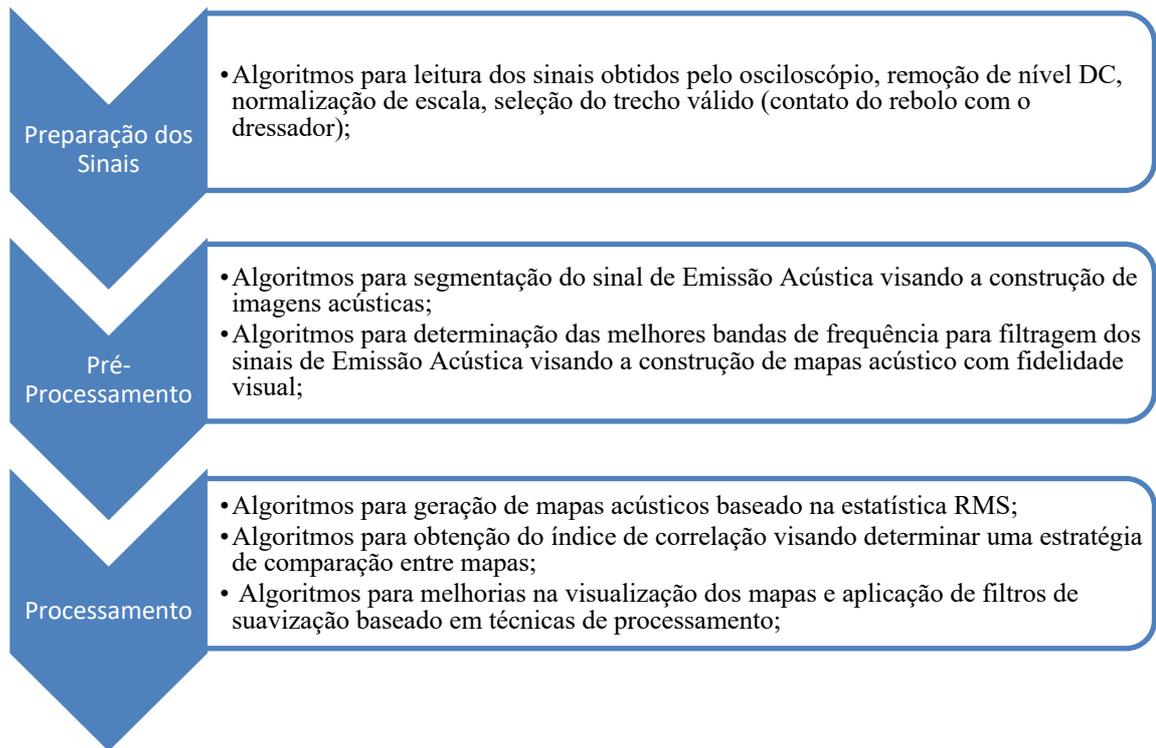


Figura 3.5 – Algoritmos de Processamento de Sinais

O primeiro passo no processo de obtenção dos mapas se refere a preparação dos sinais a serem utilizados pelos algoritmos. Nessa fase, os arquivos binários que contém os sinais de Emissão Acústica e Sincronismo adquiridos por meio de um osciloscópio são abertos e preparados para serem utilizados pelos algoritmos de pré-processamento e processamento. As principais funcionalidades dessa fase são a remoção do nível DC, normalização das amplitudes e seleção de trechos válidos do sinal que contempla o período de contato entre o dressador e o rebolo. Na Figura 3.6 apresenta-se as formas de onda originais de um sinal de emissão acústica (a) obtido por um diafragma piezelétrico (PZT) e um sinal de sincronismo (b) obtido do *encoder* conectado ao eixo do rebolo da máquina. Pode-se notar na Figura 3.7 o sinal de emissão acústica já preparado para a etapa de pré-processamento, o qual somente contempla o trecho válido do sinal, sem a presença de nível DC e com amplitude normalizada.

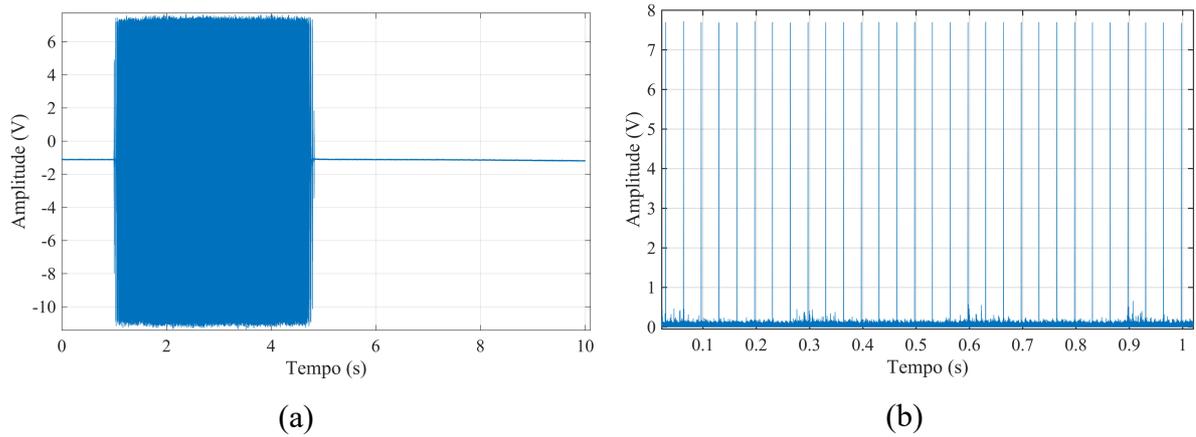


Figura 3.6 - Sinais de (a) Emissão Acústica e (b) Sincronismo sem Processamento

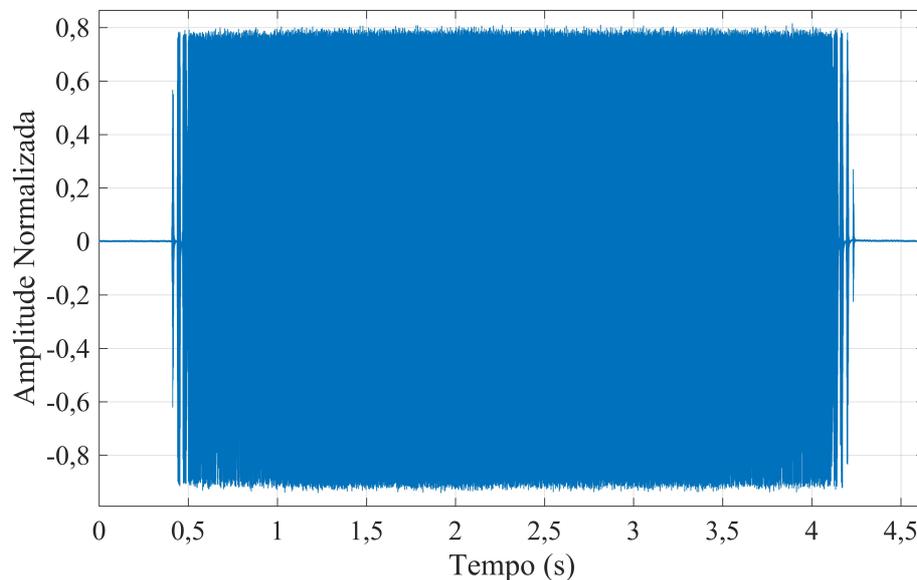


Figura 3.7 - Sinal de Emissão Acústica sem Nível DC e Amplitude Normalizada

A segunda etapa para a obtenção do mapa acústico consiste na elaboração de algoritmos que possibilitem segmentar o sinal de emissão acústica em função do sinal de sincronismo a fim de compor um mapa onde cada revolução do rebolo represente uma linha da figura, ou seja, obter-se uma imagem que represente uma composição de linhas e colunas equivalente as dimensões da superfície do rebolo a ser visualizada.

Por outro lado, não bastaria a segmentação do sinal com a aplicação posterior de uma estatística RMS a fim de compor a imagem do rebolo, pois a banda de frequências presente no sinal seria muito grande e certamente não representaria a melhor solução para a construção do mapa. Neste caso, necessita-se de um algoritmo que avalie de forma automática e eficiente a melhor banda de frequências que represente as características visuais da superfície do rebolo,

utilizando-se, para isso, de uma ferramenta de correlação bidimensional entre um padrão desejado e aquele obtido por meio da banda escolhida.

Após a determinação da melhor banda de frequências a ser utilizada pode-se alcançar a última fase nomeada na Figura 3.5 como processamento. Nessa fase, os mapas acústicos são gerados a partir da estatística RMS, onde cada *pixel* da imagem é calculado e, por fim, uma imagem da superfície do rebolo construída. A utilização de técnicas para a composição dos *pixels* da imagem do rebolo juntamente com técnicas de equalização por processamento de sinais foram implementadas para melhorar a definição e representação visual da superfície do rebolo.

Com a geração dos mapas acústicos, foi possível por meio da técnica do índice de correlação bidimensional, a comparação entre as imagens geradas com o sinal de emissão acústica obtido pelo sensor comercial da empresa *SENSIS* e pelo diafragma piezelétrico de baixo custo da empresa *Murata*, resultando em uma avaliação do desempenho de ambos os sensores e descritas no Capítulo 4.

### 3.2.1.1 Algoritmo Para Seleção de Passadas

A primeira implementação necessária ao processamento dos sinais consistiu na identificação de uma passada de dressagem válida, pois para aplicação das ferramentas deve-se considerar apenas o intervalo entre o início do ponto de contato do dressador com o rebolo até o momento em que o dressador deixa o rebolo.

Na Figura 3.8 ilustra-se o algoritmo usado para a seleção de passadas na dressagem.

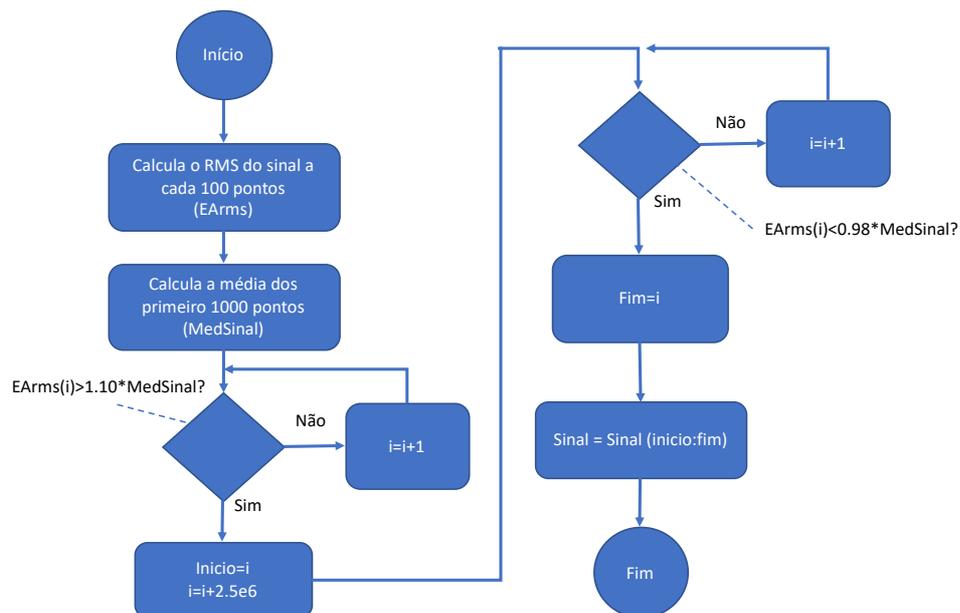


Figura 3.8 - Fluxograma do Algoritmo de Seleção de Passada de Dressagem

Inicialmente, efetuou-se o cálculo RMS a cada 100 pontos no sinal de emissão acústica de forma a se obter uma transição positiva quando um trecho válido é identificado e finalizado quando o sinal retorna ao nível baixo. Como referência de sinal para considerar a transição, utiliza-se a média dos 1.000 primeiros pontos iniciais do sinal de emissão acústica, pois nestes pontos apenas o ruído original está presente e a passada ainda não foi iniciada. Utilizou-se um limiar de 10 % acima do nível médio para se considerar o início da passada e 2 % abaixo do nível médio para se considerar término de uma passada válida. É possível notar também que após determinado o início da passada foi adicionado a variável  $i$  o valor de  $2,5 \cdot 10^6$  que representa metade da taxa de amostragem ( $5 \cdot 10^6$ ), ou seja, 0,5 s para evitar uma transição inferior a este tempo.

Na Figura 3.9 apresenta-se o sinal de RMS calculado onde pode-se notar o início do trecho válido (passada) a partir de 0,45 s e término em 4,3s.

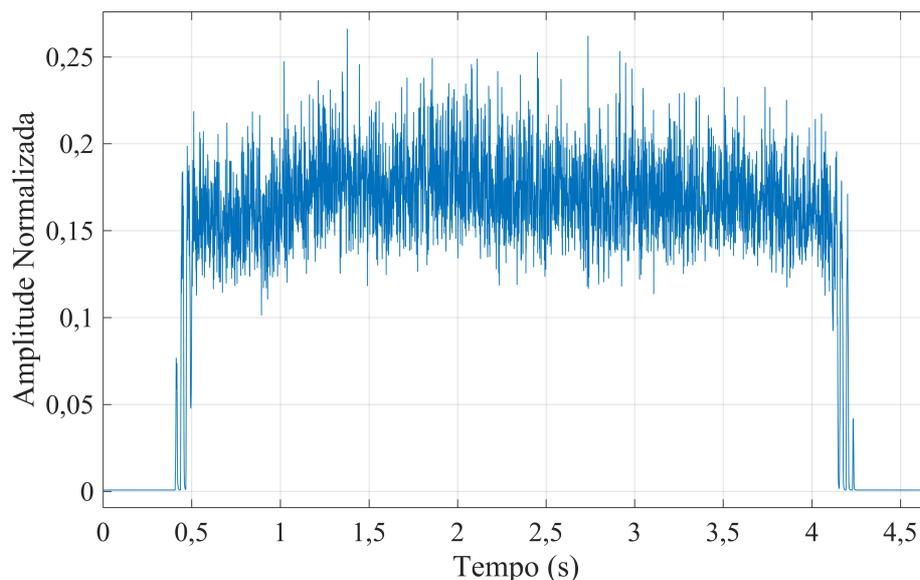


Figura 3.9 - Sinal de Emissão Acústica RMS

### 3.2.1.2 Algoritmo para Segmentação do Sinal de Emissão Acústica

Para a geração de um mapa acústico, o sinal de emissão acústica necessita ser convertido em uma matriz onde as linhas representam o comprimento do rebolo e o número de colunas representam a espessura do rebolo. Para realizar este procedimento, torna-se necessário analisar o sinal de sincronismo para determinar o intervalo a ser utilizado para a extração de cada linha do sinal de Emissão Acústica. Na Figura 3.10 ilustra-se o sinal de sincronismo do *encoder* coletado pelo osciloscópio.

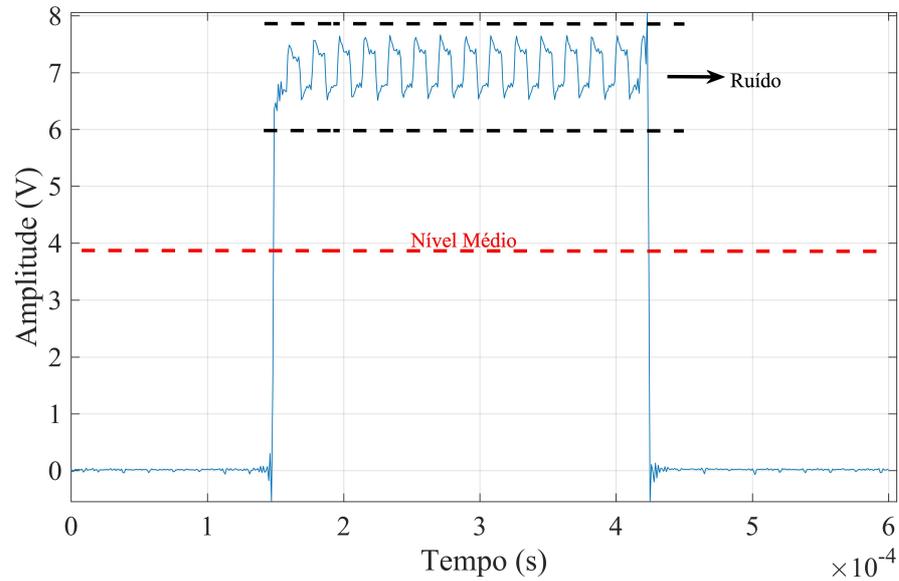


Figura 3.10 - Sinal de Sincronismo

É possível notar na Figura 3.10 que o sinal de sincronismo não é uma onda quadrada perfeita, possuindo um ruído presente nos pulsos de sincronização. Para sanar este problema, o algoritmo inicialmente estabelece o nível médio do sinal e reconstrói o sinal considerando nível alto quando o sinal está acima do nível médio e nível baixo quando o sinal está abaixo do nível médio, deixando o sinal uma onda quadrada perfeita. Na Figura 3.11 ilustra-se o pulso de sincronismo ajustado para uma onda quadrada.

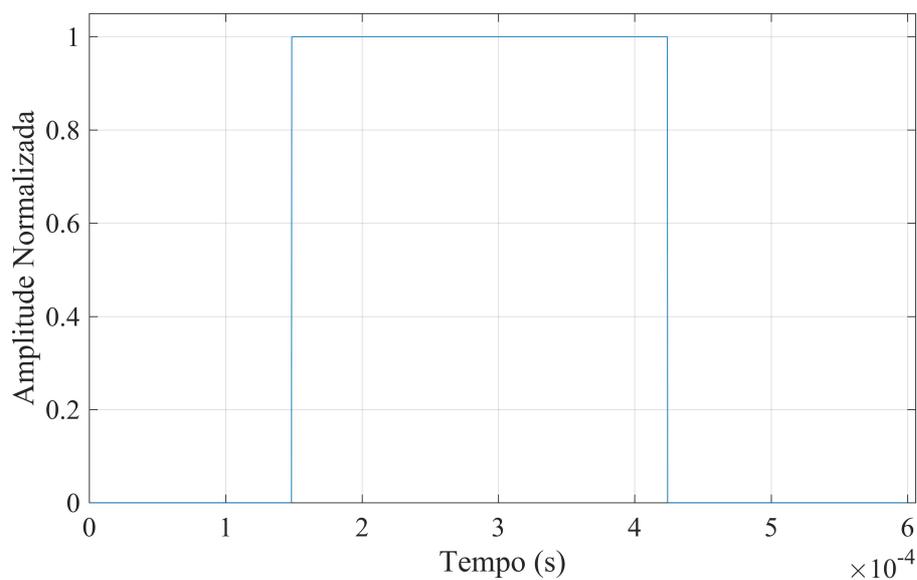


Figura 3.11 - Sinal de Sincronismo Ajustado

Na Figura 3.12 pode-se observar o intervalo entre dois pulsos de sincronismo, o que representaria uma revolução completa do rebolo em torno do próprio eixo. Esse intervalo compreende o tempo inicial e final de uma volta do rebolo (duração aproximada de 33,3 ms ou 1.800 rpm).

A extração das linhas do sinal de emissão acústica para compor o mapa acústico se baseia nesse intervalo, ou seja, um trecho válido do sinal de emissão acústica que representaria uma linha será exatamente o trecho compreendido entre dois pulsos de sincronismo.

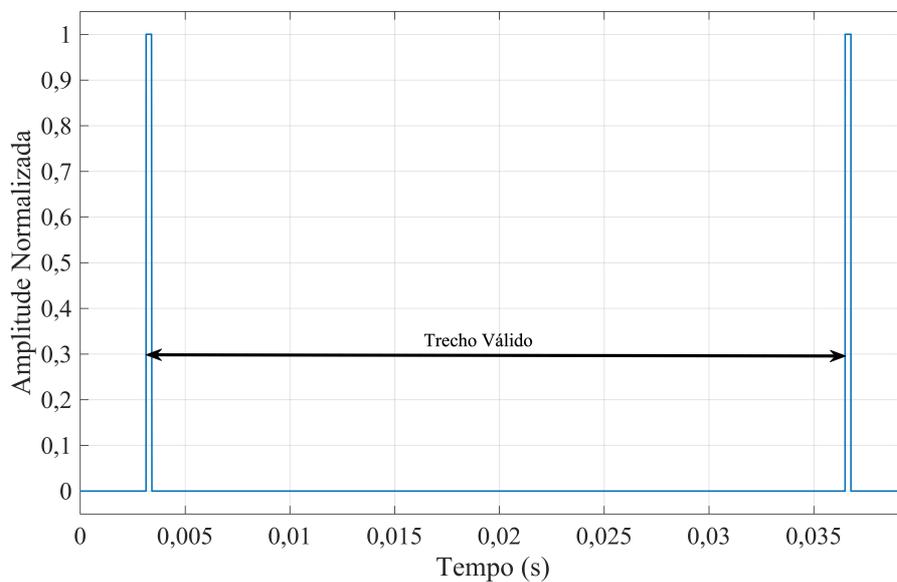


Figura 3.12 - Trecho Válido no Sinal de Sincronismo

O algoritmo para a segmentação do sinal de emissão acústica é apresentado na Figura 3.13. A identificação dos trechos para compor as linhas do mapa acústico estão armazenados no vetor intitulado “trecho\_valido”. Esse vetor possui duas propriedades descritas no algoritmo como “inicio” e “final”, portanto, `trecho_valido(num).inicio` e `trecho_valido(num).final` identificam as posições do vetor sincronismo que determinam o início e o final de um trecho válido, onde  $1 \leq num \leq \text{número de trechos encontrados}$ .

Para a obtenção das linhas do mapa, a partir do sinal de emissão acústica, bastaria recortar os trechos do vetor emissão acústica nas posições definidas por `trecho_valido`.

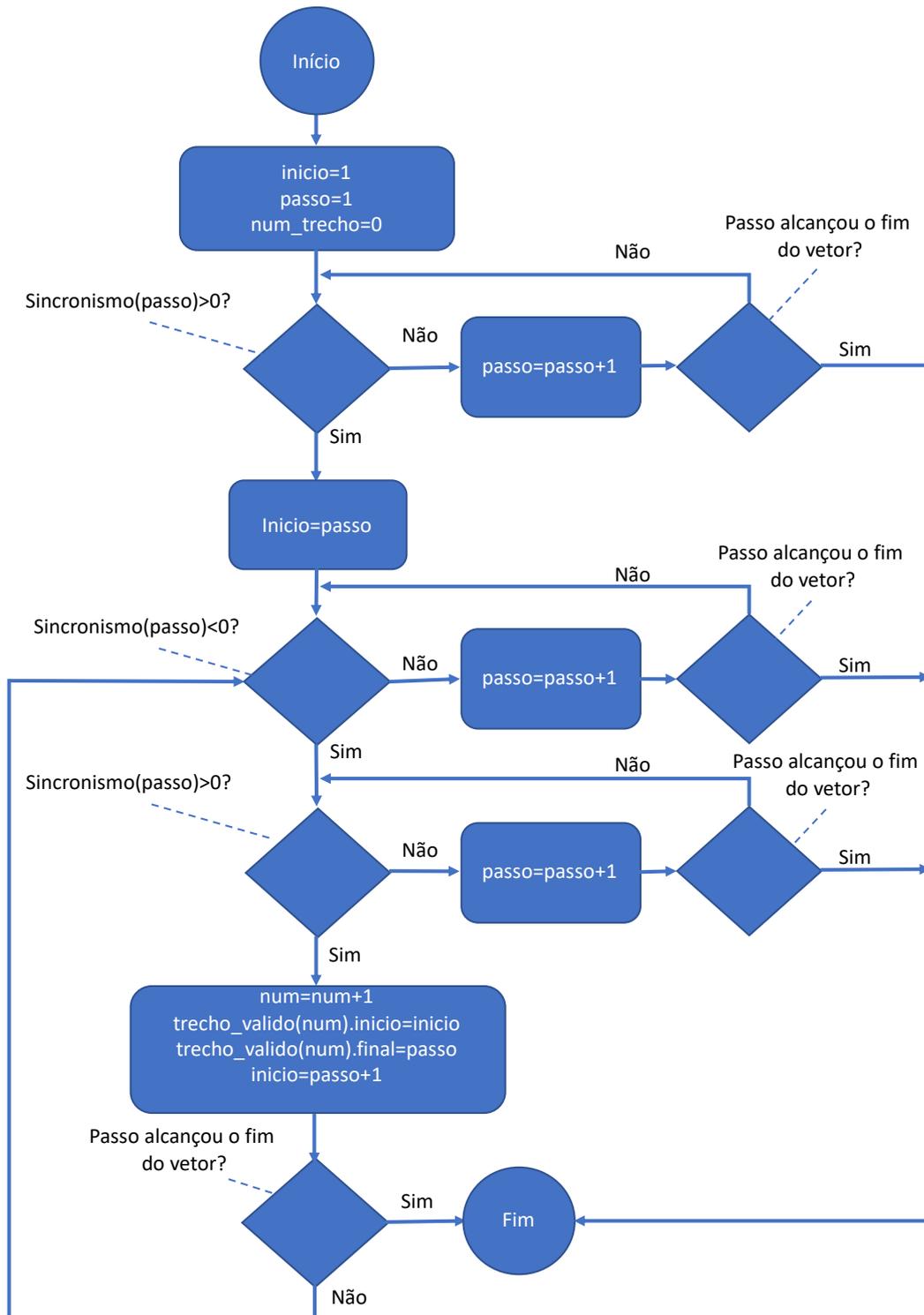


Figura 3.13 - Algoritmo para Segmentação do Sinal de Emissão Acústica

### 3.2.1.3 Algoritmo para Determinação Automática das Bandas de Frequência do Filtro

A determinação de uma banda de frequências para filtragem dos sinais de emissão acústica provenientes do sensor de emissão acústica do fabricante SENSIS e do diafragma piezolétrico não é uma tarefa fácil. De uma forma geral, estabelecer um espectro de frequências capaz de identificar danos em processos de usinagem já foi estudado em outros trabalhos (AGUIAR; BIANCHI; OLIVEIRA, 2002; ALEXANDRE et al., 2018; MOIA et al., 2015; NASCIMENTO LOPES et al., 2017).

O processo consiste, basicamente, de uma análise comparativa de uma banda com a presença de um sinal sem dano e com a presença de sinal com dano. A sobreposição de ambas as bandas de frequência (com e sem danos) possibilitaria uma inspeção visual e, conseqüentemente, seria possível delimitar um trecho que poderia sinalizar a falha. Por meio de estatísticas específicas, pode-se determinar a condição de falha e não falha com certa precisão.

A condição encontrada neste trabalho difere significativamente de outros trabalhos, pois não há como avaliar qual a melhor banda simplesmente comparando-a. Isso deve-se ao fato de que uma banda específica não necessariamente reflete as condições visuais de uma imagem e, portanto, dificilmente seria possível manualmente determinar se uma banda possui características para compor imagens melhores ou piores que outras, somente pela diferença entre elas, visualizando o espectro.

Neste contexto, foi necessário estabelecer um algoritmo capaz de avaliar a melhor banda para filtrar os sinais de emissão acústica visando compor a imagem que melhor estivesse relacionada a um padrão atribuído com ideal. A própria determinação de um padrão de imagem para comparação não é uma tarefa simples e é detalhada na Seção 4.2.

O algoritmo desenvolvido e implementado se baseia na comparação do mapa acústico com um padrão de imagem considerado como referência para determinar o quanto a banda escolhida está correlacionado com a qualidade final da imagem. A estatística utilizada para esta comparação é definida como índice de correlação bidimensional (Seção 2.4.2).

O procedimento estabelecido para encontrar a melhor banda de frequências se baseou em duas vertentes: (a) Realizar uma análise comparativa contemplando todas as combinações de bandas possíveis múltiplas de um passo de frequência para um determinado espectro e, assim, obter um mapa tridimensional de frequências (limite inferior da banda *versus* limite superior da banda *versus* correlação obtida), possibilitando a visualização de uma superfície que represente o comportamento dos espectros com a correlação obtida para cada combinação de frequências de corte gerada; (b) Realizar uma busca no espectro para encontrar a banda que resultaria em uma melhor qualidade de imagem no mapa.

O filtro utilizado na análise foi do tipo *Butterworth* passa-faixa de quinta ordem, sendo que as frequências de corte inicial e final (delimitando uma banda) foram obtidas dinamicamente pelo algoritmo.

Para a vertente (a) descrita anteriormente, o esforço computacional é grande, haja vista que todas as combinações de frequências são testadas. Como exemplo, para um espectro de 20 kHz a 500 kHz com passo de 2 kHz obteve-se 28.920 combinações de espectro, ou seja, são realizados 28.920 combinações de bandas para filtragem com a geração de mapa acústico e cálculo da correlação bidimensional para cada uma delas. O tempo gasto computacionalmente em uma máquina com processador i7 é de aproximadamente 90 horas.

Na Figura 3.14 ilustra-se o comportamento do processo de filtragem, onde a seta em vermelho sinaliza a passagem de uma banda de largura definida ao longo do espectro com determinado passo de frequência, se comportando como uma janela deslizante.

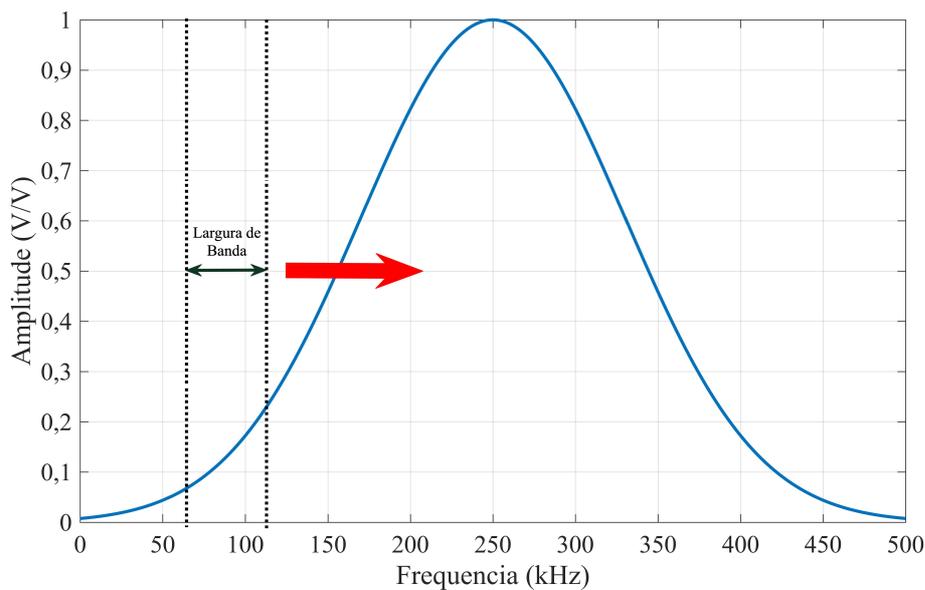


Figura 3.14 - Processo de Filtragem Com Janela Deslizante

O algoritmo da filtragem com a janela deslizante e largura de banda variável é apresentado na Figura 3.15. Nota-se nesse algoritmo que o sinal de entrada para a geração do mapa é o sinal RMS filtrado, portanto, deve-se: (a) Aplicar o processo de segmentação (Figura 3.13); (b) Realizar a filtragem do sinal com o filtro passa banda e frequências de corte  $f_1$  e  $f_2$ ; (c) Calcular a estatística RMS do sinal; (d) Gerar o mapa acústico com a construção da imagem do rebolo; (d) Calcular o coeficiente da correlação bidimensional  $C(f_1, f_2)$ ;

Um exemplo do gráfico resultante do processo de filtragem obtido por meio deste algoritmo pode ser visualizado na Figura 3.16. Os pontos escuros no gráfico representam um maior índice de correlação enquanto os pontos mais claros representam menor índice de correlação.

No gráfico da Figura 3.16 pode-se observar que o eixo  $x$  representa a frequência inicial do filtro enquanto o eixo  $y$  representa a frequência final do filtro. O gráfico apresenta-se espelhado na diagonal principal, pois o resultado para um filtro com frequências de corte  $f_1$  e  $f_2$  é o mesmo que um filtro para frequências de corte  $f_2$  e  $f_1$ . Nota-se também por meio da análise do gráfico que a melhor banda para este exemplo se encontra na faixa de 50 kHz a 60 kHz.

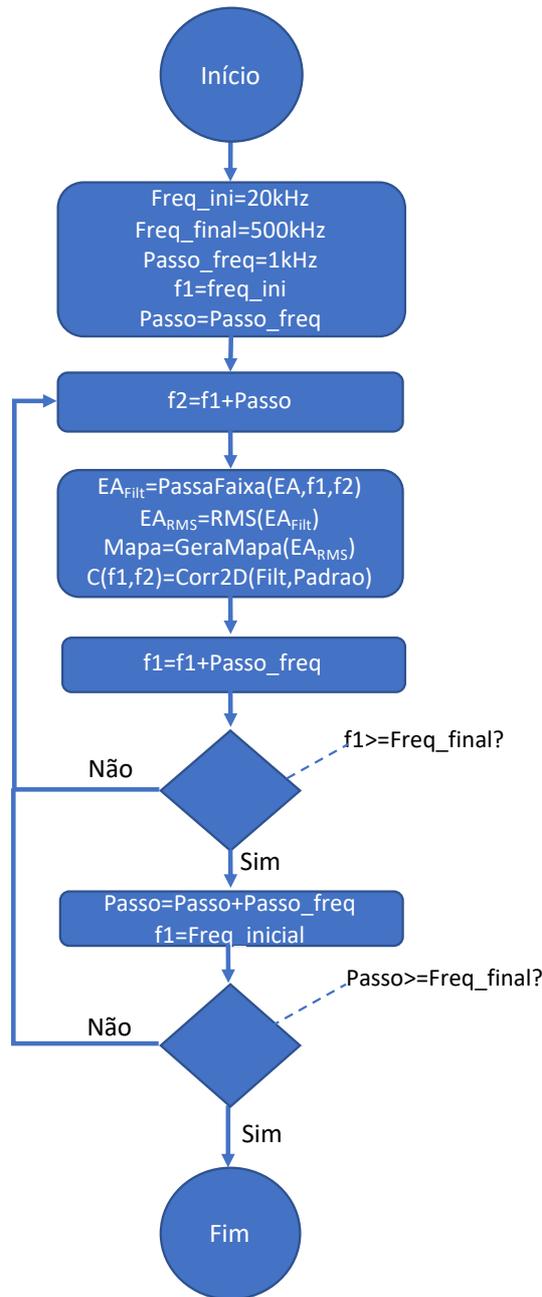


Figura 3.15 - Algoritmo de Filtragem com Janela Deslizante

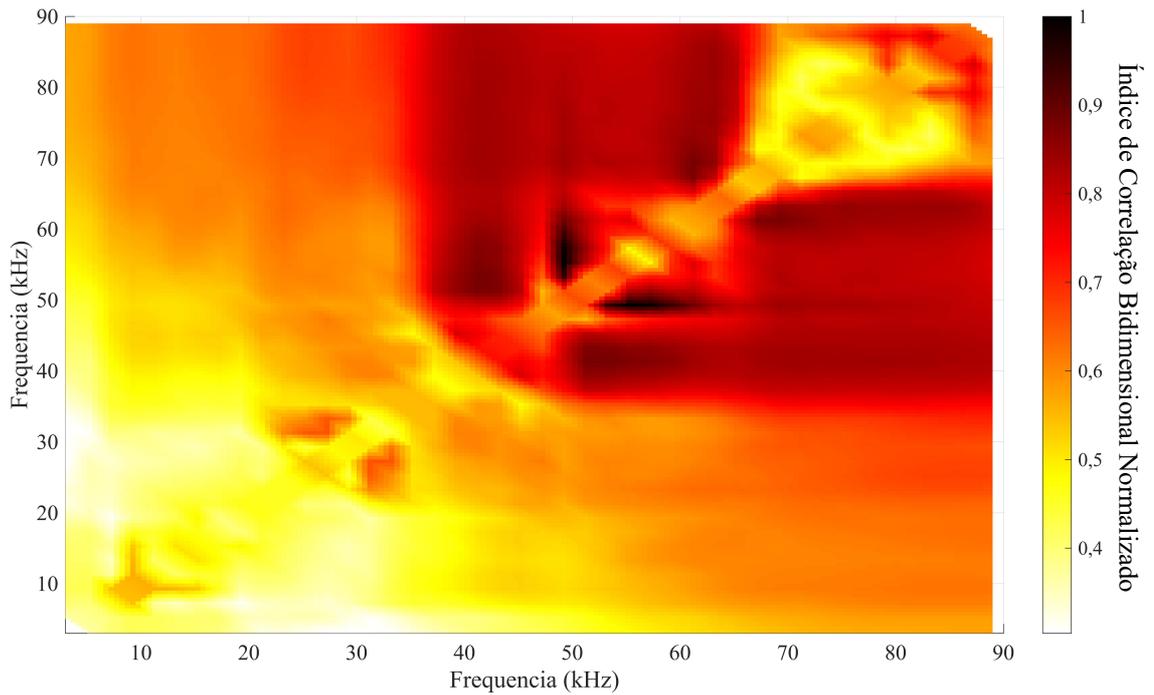


Figura 3.16 - Resultado da Aplicação do Filtro Passa Banda de 3 kHz a 90 kHz

A vertente que possibilita uma busca no espectro para encontrar a banda que resultaria em uma melhor qualidade de imagem no mapa, não demanda grande tempo computacional, pois o filtro vai sofrendo ajustes conforme o índice de correlação aumenta. O algoritmo que descreve esta funcionalidade está apresentado na Figura 3.17.

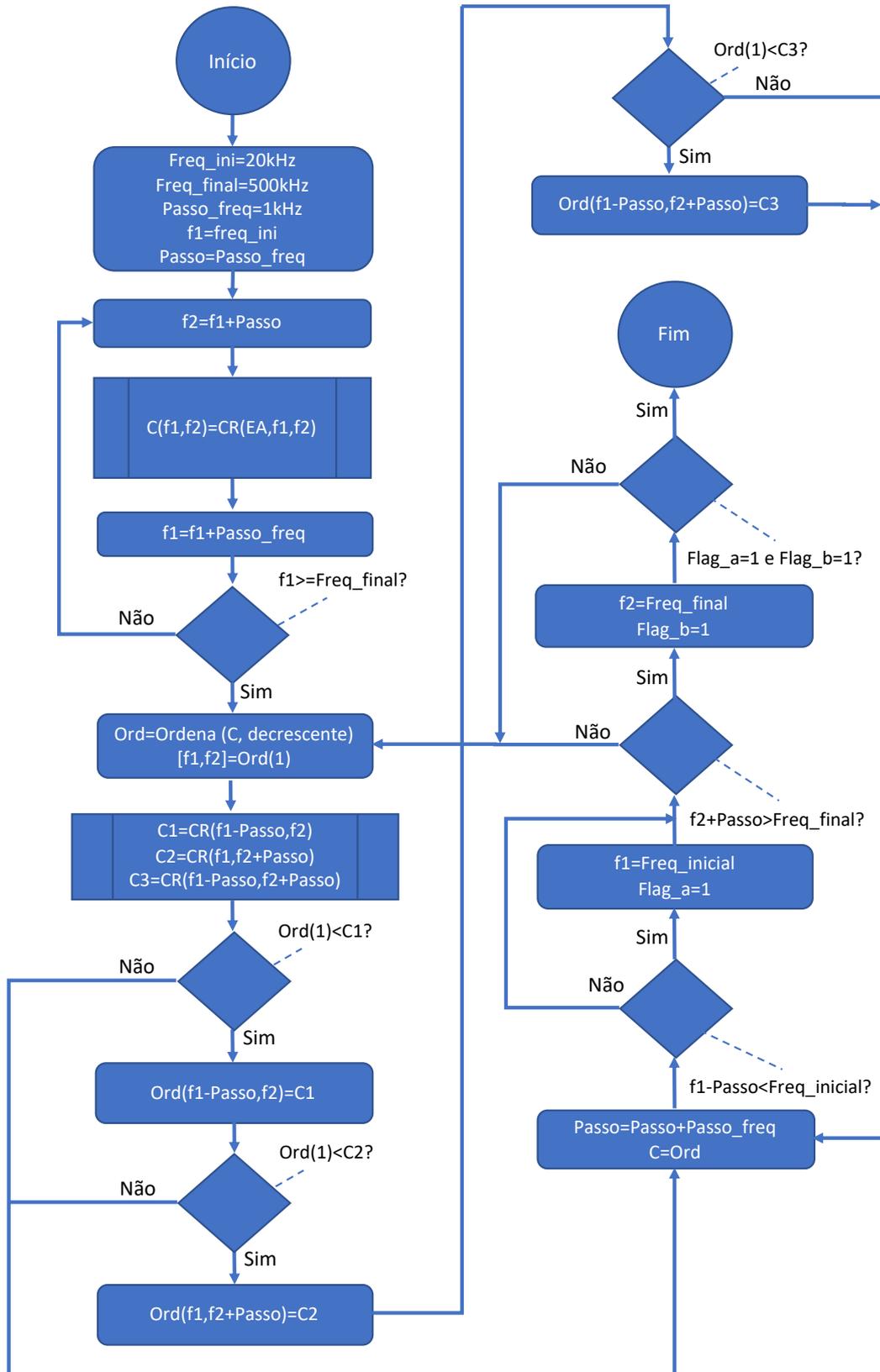


Figura 3.17 - Algoritmo de Busca de Banda de Frequências

O algoritmo da Figura 3.17 utiliza uma subrotina denominada *CR* (correlação). Essa subrotina calcula o índice de correlação bidimensional em função do sinal de emissão acústica, frequência de corte inicial ( $f_1$ ) e frequência de corte final ( $f_2$ ). Na Figura 3.18 apresenta-se o fluxograma da subrotina do cálculo do índice da correlação bidimensional para o filtro passa bandas sintonizado entre  $f_1$  e  $f_2$ .

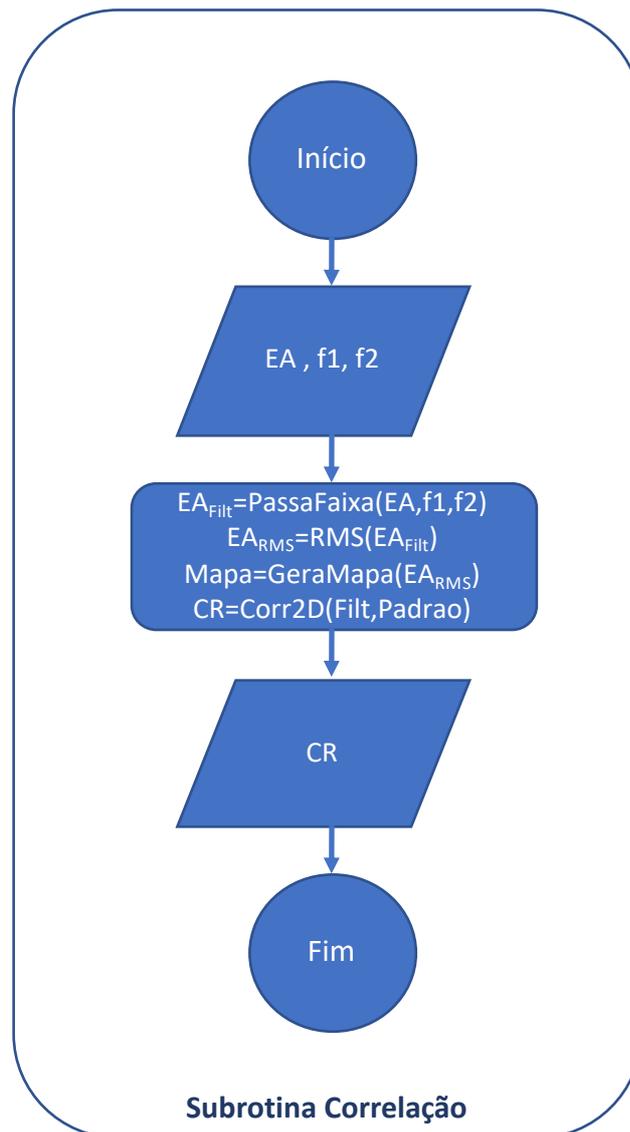


Figura 3.18 – Subrotina de Cálculo da Correlação Bidimensional para o Filtro Passa Baixas

O algoritmo de busca da banda de frequências que ajusta o filtro para a melhor qualidade de imagem do mapa acústico inicia-se calculando a correlação para o menor passo de frequência possível. Considerando os valores iniciais do algoritmo, o menor passo de frequências seria

1kHz, portanto, tem-se o índice de correlação inicialmente calculado com os valores de frequência de 20 kHz a 500 kHz com passo de 1 kHz, ou seja,  $f_1=20$  kHz e  $f_2=21$  kHz,  $f_1=22$  kHz e  $f_2=23$  kHz,  $f_1=23$  kHz e  $f_2=24$  kHz, e assim, sucessivamente até  $f_1=499$  kHz e  $f_2=500$  kHz.

Em seguida, é criado um vetor ordenado no formato decrescente onde os maiores índices de correlação são elencados primeiro. Investiga-se, em seguida, as frequências próximas aos valores de  $f_1$  e  $f_2$  que obtiveram maior correlação, calculando novos filtros para as condições:  $f_1$ -passo e  $f_2$ ;  $f_1$  e  $f_2$ +passo;  $f_1$ -passo e  $f_2$ +passo. Para cada uma dessas condições obtêm-se as correlações  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$ . Caso uma dessas três correlações apresentem resultados superiores ao primeiro item do vetor ordenado, estes são adicionados a lista de filtros com os respectivos valores de  $f_1$ ,  $f_2$  e índice de correlação. A partir deste ponto, um novo passo é calculado tornando-se  $passo=passo+passo\_freq$ , ou seja, o passo passará a ser 2 kHz.

Esse processo será repetido para cada incremento de passo até que seja alcançado o passo igual ao limite da banda, que neste caso seria (500 kHz-20 kHz=480 kHz). É possível notar que diferentemente da técnica anterior, neste caso apenas as frequências próximas do maior índice de correlação são testadas e, assim, o sistema passa a convergir mais rapidamente para a melhor solução de filtragem.

Por outro lado, o vetor ordenado resultante do processamento contemplará apenas os valores de filtro que sejam sequencialmente maiores aos que foram testados anteriormente e, portanto, condições fora do ponto de convergência serão desconsideradas.

Na Figura 3.19 demonstra-se o comportamento do algoritmo para um espectro entre 9kHz e 60 kHz. No eixo  $x$ , a linha azul no gráfico representa a frequência inicial e a linha vermelha a frequência final do filtro. O eixo  $y$  indica o índice de correlação bidimensional para cada uma das bandas (distância entre a linha azul e vermelha).

Vale ressaltar que o gráfico possui um comportamento crescente no eixo  $y$ , pois a próxima banda somente será considerada se o índice de correlação for maior que a anterior. Desta forma, o gráfico demonstra a convergência do filtro para a melhor banda, que no exemplo da Figura 3.19 será aproximadamente  $f_1= 48$  kHz e  $f_2=55$  kHz (correlação máxima normalizada = 1).

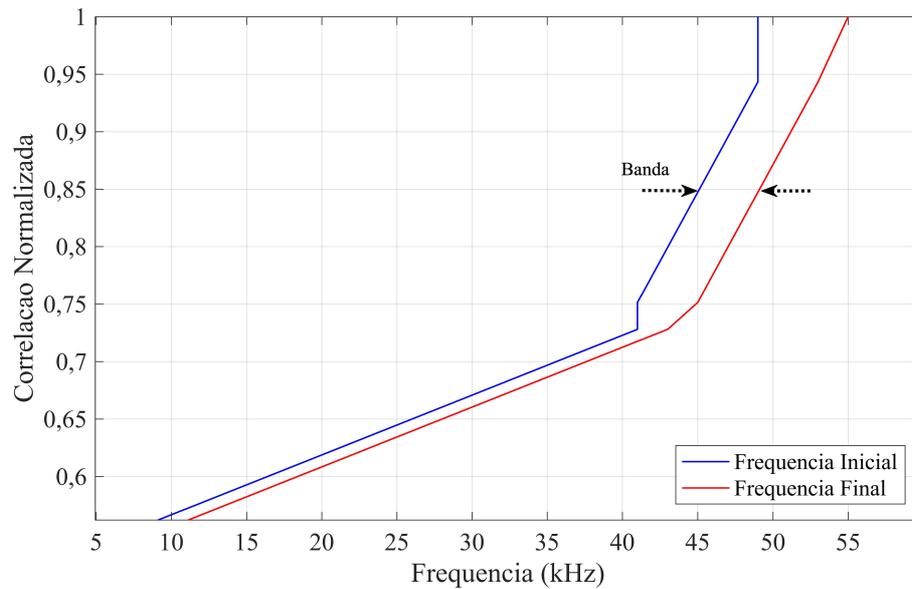


Figura 3.19 - Busca Automática de Frequências para Filtragem Passa Banda

#### 3.2.1.4 Algoritmo para Equalização de Mapas Acústicos

As imagens obtidas por mapas acústicos ao longo do trabalho foram elaboradas a partir de sinais de emissão acústica puro. Por este motivo, muitos fatores podem influenciar na conversão do sinal analógico em um *pixel* de uma imagem.

Como mencionado na próxima Seção 3.2.1.5, a conversão da amplitude de um sinal de emissão acústica RMS para um *pixel* consiste, basicamente, de uma conversão de escala, onde os valores RMS devem estar descompostos em três matrizes de cores: vermelho, verde e azul (RGB). Essa conversão é o ponto de partida para se transformar um sinal em imagem, porém, é necessário avaliar a composição do sinal para que a conversão não seja prejudicada. Por esse motivo, há necessidade de aplicar sobre os sinais RMS gerados uma curva de distribuição normal de forma a avaliar a região da curva que compõe a maioria da informação da imagem. Este ponto é importante, pois valores de pico extremos de sinal podem prejudicar a conversão do sinal em um mapa acústico.

Por exemplo, se for considerada a conversão de um sinal de emissão acústica RMS onde houve esporadicamente a ocorrência de apenas uma amostra de sinal com pico 10 vezes maior que a média, a conversão em 256 tons de cinza do mapa acústico para representar essa amostra de pico, deixará aproximadamente 1/10 de tons de cinza (cerca de 25 níveis) para representar todo o resto do mapa. Portanto, detalhes que poderiam ser visualizados sem a presença desse pico de sinal, deixarão de aparecer no mapa. Desta forma, torna-se necessário remover do sinal picos que não tem representatividade na imagem, para que esses picos não comprometam a

composição do nível de tonalidades do mapa. Assim, essa equalização deve ser aplicada antes da geração do mapa acústico.

A solução encontrada para evitar os picos de sinal e manter as tonalidades com representatividade deve-se a uma curva normal de distribuição, onde se considera valores entre  $-3\sigma$  e  $+3\sigma$ , o que representaria 99,7 % do sinal. Portanto, o que estiver fora destes limiares seria aproximado pelo limiar mais próximo (extremo da faixa) de forma a não interferir nas tonalidades do mapa. Na Figura 3.20 apresenta-se uma distribuição normal típica com a seleção da faixa entre  $-3\sigma$  e  $+3\sigma$ .

O fluxograma do algoritmo é apresentado na Figura 3.21. É possível notar que o algoritmo percorre o vetor  $EA_{RMS}$  e compara cada valor com a média  $-3\sigma$  e média  $+3\sigma$ . Se o valor do vetor estiver fora dessa faixa, o mesmo é substituído pelo limiar máximo permitido de forma que valores de pico são descartados.

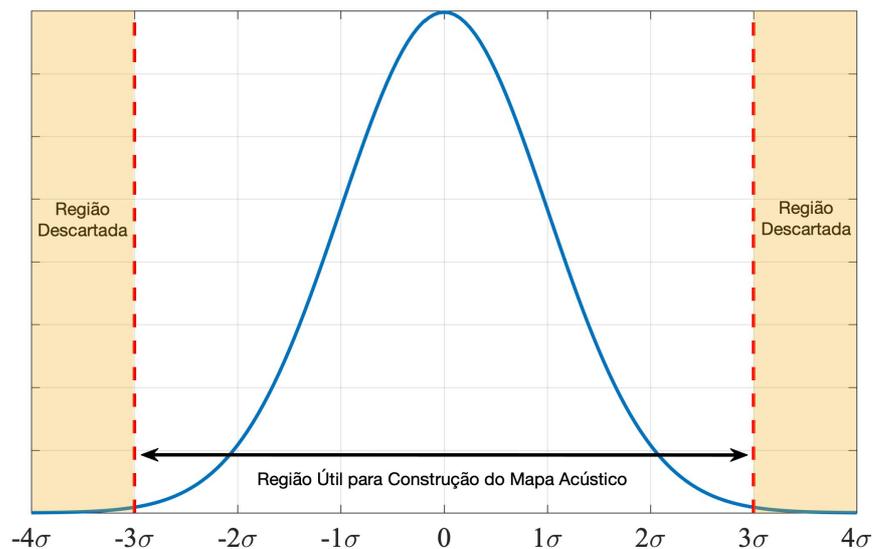


Figura 3.20 - Distribuição Normal

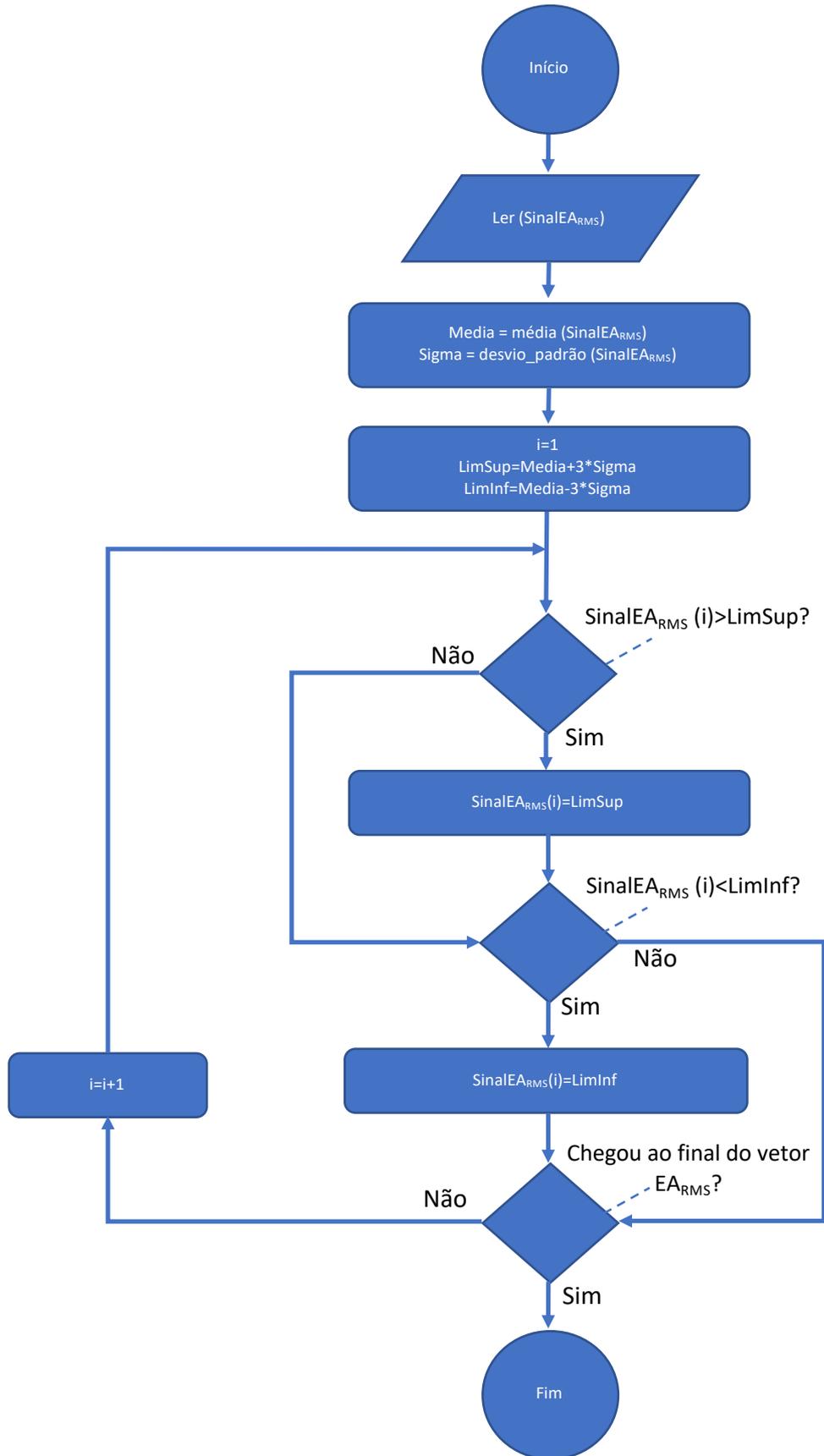


Figura 3.21 - Algoritmo Para Equalização de Mapas Acústicos

A efetividade desse algoritmo pode ser visualizada pelo exemplo da Figura 3.22, onde é possível perceber a imagem do mapa sem o uso da técnica de equalização (a) e com o uso da técnica de equalização (b). Percebe-se que há um aumento de detalhes no mapa que não eram visíveis antes do processamento.

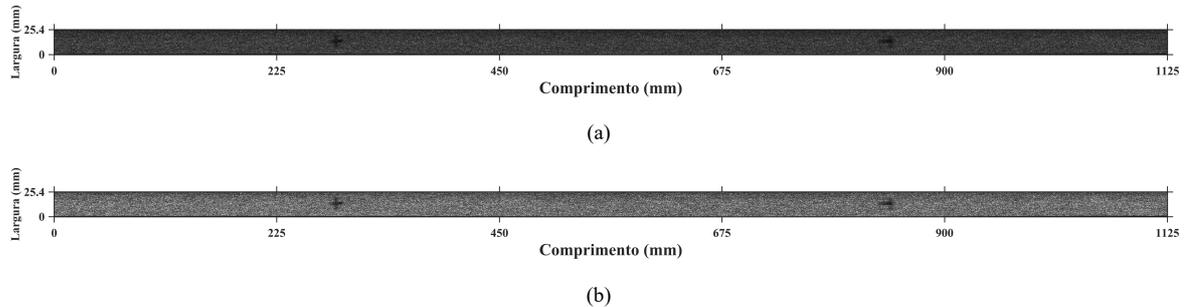


Figura 3.22 - Mapa Acústico (a) sem Equalização e (b) com Equalização.

### 3.2.1.5 Algoritmo para Geração de Mapas Acústicos Utilizando a Estatística RMS

O uso da estatística RMS para a composição dos pontos e assim formar a imagem se deve ao fato de que essa estatística já está consolidada internacionalmente no processamento de sinais de emissão acústica bem como em outros trabalhos científicos (AGUIAR et al., 2004; DORNFELD et al., 2003; KWAK; HA, 2004; WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996; YANG; YU, 2013). Na obtenção de mapas acústicos provenientes de sensores comerciais de emissão acústica, Oliveira & Dornfeld (2001) utilizaram o sinal RMS para compor mapas acústicos visando a análise da superfície do rebolo, porém, com profundidade de dressagem pequena, dificilmente aplicada ao processo de dressagem no ambiente industrial.

Neste trabalho, diferentemente de outros já desenvolvidos, se estabelece profundidades de dressagem maiores para a obtenção de mapas acústicos, típicas de um processo de dressagem convencional, além de estudar bandas de frequências específicas para aplicação de sensores de baixo custo, como é o caso dos diafragmas piezelétricos (PZT). Tais características são inéditas e possibilitam uma expansão em termos de aplicação, seja pelo uso de sensores muito baratos ou mesmo pela possibilidade de incorporação da técnica ao processo de dressagem convencional.

Diante deste cenário, no intuito de se obter uma imagem acústica com fidelidade e sem distorções, deve-se calcular o RMS para um número de amostras de forma a manter a relação comprimento do perímetro/espessura do rebolo idênticas na imagem. A determinação do número de pontos para processamento RMS foi apresentada na Equação 2.4 da Seção 2.4.1

Na Figura 3.23 ilustra-se o algoritmo para a criação de mapas acústicos baseado no processamento dos sinais de Emissão Acústica e Sincronismo.

Como primeira etapa, os sinais de emissão acústica e sincronismo são lidos pelo *software*. Em seguida, remove-se o nível DC e normaliza-se o sinal de emissão acústica para iniciar os processamentos. Aplica-se em seguida a técnica descrita na Seção 3.2.1.1 para selecionar uma passada válida bem como a técnica descrita em 3.2.1.2 para segmentar o sinal de emissão acústica e deixá-lo no formato matricial.

Nesse ponto, deve-se decidir pela aplicação de um processo de filtragem no sinal de emissão acústica, considerando as bandas selecionadas pelo algoritmo de busca de banda de frequências, Seção 3.2.1.3, ou não executar a filtragem. O uso do filtro permitirá uma melhoria da imagem deixando sua visualização com maior nitidez. Após este processo, aplica-se a estatística RMS para  $n_{\text{pontos}}$ , conforme estabelecido na Seção 4.1.

Antes de gerar o mapa acústico deve-se efetuar uma equalização do sinal de emissão acústica para remover os picos que podem influenciar no padrão de cores do mapa, conforme estabelecido na Seção 3.2.1.4. E, por fim, o mapa é gerado pela função *GeraMapa*.

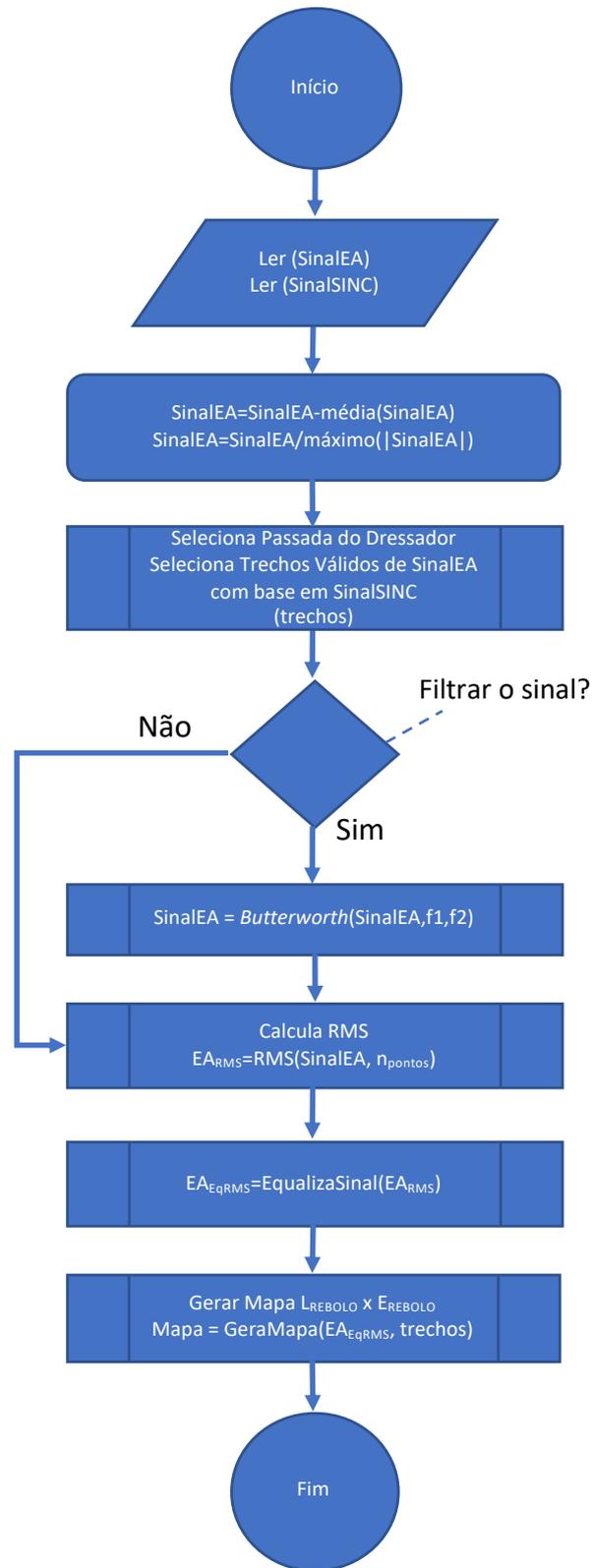


Figura 3.23 - Algoritmo para Geração de Mapa Acústico Baseado na Estatística RMS

A função  $GeraMapa(EA_{RMS}, trechos)$ , se baseia nos pontos de recorte dos trechos obtidos pelo processamento do sinal de sincronismo e pela matriz gerada com o sinal  $EA_{RMS}$  para

produzir uma imagem que seja compatível com as marcas inseridas no rebolo. Esta conversão basicamente engloba uma conversão de escala, onde para cada ponto processado do mapa deve existir um *pixel* e uma cor correspondente.

Utiliza-se, portanto, um padrão RGB (*red – green - blue*) para compor a cor dos *pixels*, ou seja, estabelece-se uma escala onde as três cores primárias (RGB) são combinadas para refletir os pontos da imagem. Como exemplo, se a escala desejada estiver em tons de cinza com profundidade de cor de 8 bits (0-255), as matrizes R, G e B terão valores iguais variando entre 0-255 (um byte). Assim para uma tonalidade média de cinza,  $R=G=B=128$  (metade da escala).

Um exemplo do mapa acústico filtrado e composto por 256 tons de cinza pode ser visualizado na Figura 3.24.



Figura 3.24 - Exemplo de Mapa Acústico Filtrado com 256 Tons de Cinza com Marcas

### 3.2.1.6 Algoritmo para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional

A geração de mapas acústicos possibilita a visualização de falhas no processo de retificação e traz grande contribuição à ciência, pois fornece uma abordagem diferente daquelas comumente usadas no diagnóstico de falhas, onde se utiliza uma estatística para sinalizar a ocorrência ou não de um problema. Ao invés disso, os mapas acústicos possibilitam uma visualização ampla do processo e evidenciam em uma imagem a ocorrência das falhas, permitindo, por exemplo, que decisões erradas não sejam tomadas.

Nesse contexto, conhecer a eficiência desses mapas frente as imagens que estão sendo geradas por eles são de extrema importância. Por outro lado, não é uma tarefa fácil decidir sobre a qualidade de uma imagem, haja vista que cada pessoa tem uma forma diferente de avaliar uma resposta visual. Assim sendo, tornou-se necessário estabelecer um critério de comparação entre mapas para avaliar o quanto eles representariam uma condição de falha.

Como os mapas acústicos têm em sua essência aspectos visuais, foi necessário adotar uma técnica de processamento de sinais para avaliar o quanto determinado mapa reflete um padrão esperado. Assim, o índice de correlação bidimensional foi o mais indicado para servir como base nas análises de comparação.

O índice de correlação bidimensional realiza a comparação de duas imagens como descrito na Seção 2.4.2. Uma imagem menor ou igual denominada padrão é deslocada em duas dimensões  $(x,y)$  ao longo de uma imagem maior a ser comparada e, para cada posição de deslocamento  $(x,y)$ , é calculado um índice de correlação que varia de 0 a 1, onde 1 representa que foi encontrado a máxima correlação da imagem padrão na imagem em análise e 0 representa que não há qualquer relação da imagem original com o padrão. Como a imagem padrão é comparada a cada deslocamento sobre a imagem em análise, o resultado gerado é uma matriz tridimensional, onde os eixos  $x$  e  $y$  representam as posições que ocorreram as comparações e o eixo  $z$  representa o índice de correlação encontrado naquela posição.

Na Figura 3.25 apresenta-se o algoritmo que realiza a obtenção do índice de correlação bidimensional.

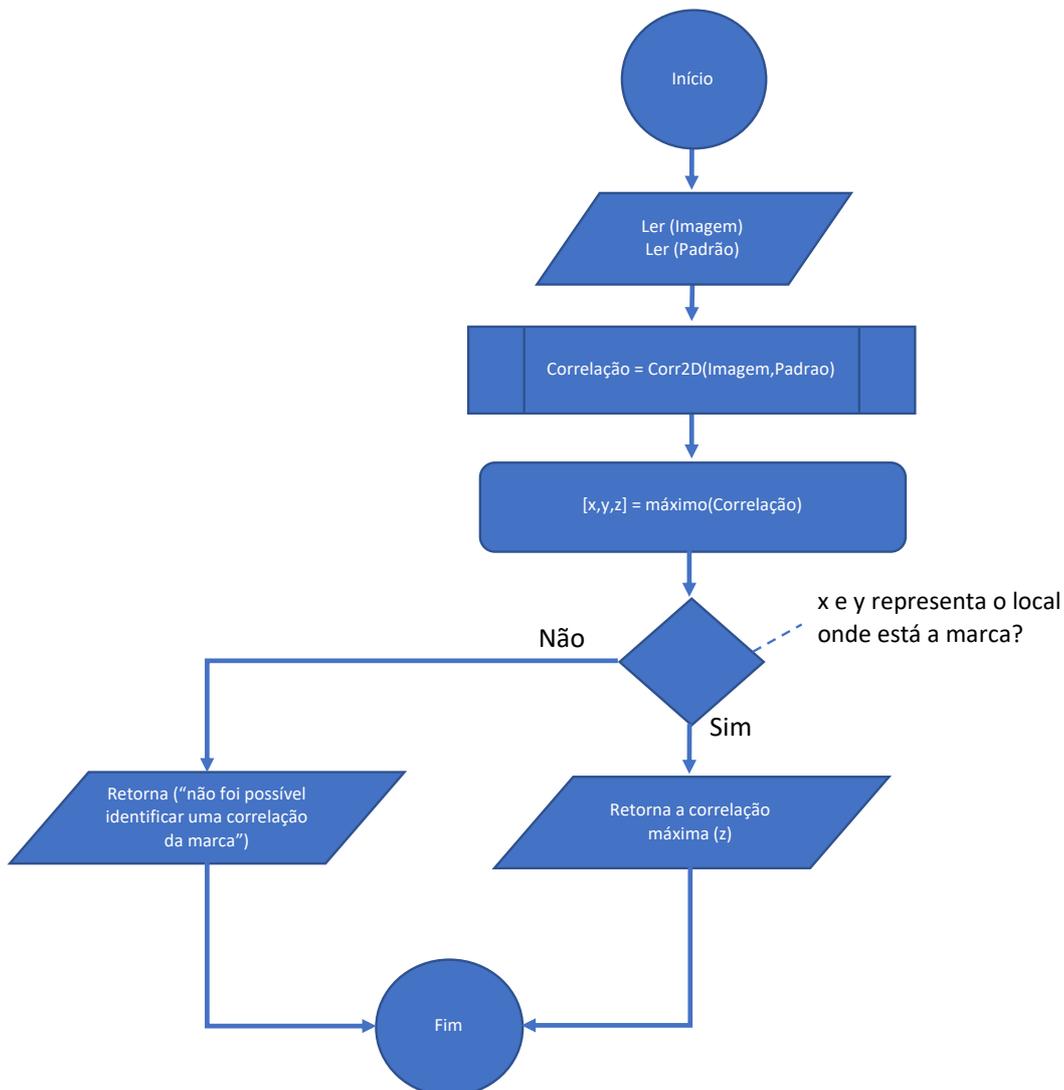


Figura 3.25 - Algoritmo para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional

O algoritmo para a obtenção do índice de correlação bidimensional inicia obtendo a leitura da imagem contendo o mapa acústico e do padrão de imagem que será comparado (o sinal positivo ou o sinal “T”). Posteriormente, realiza-se o cálculo da correlação bidimensional em todas as posições  $(x,y)$  do mapa buscando o padrão de referência (marca). Em seguida, é identificada a posição  $(x,y)$  onde obteve-se a correlação máxima ( $z$ ). Com base nestas informações, o algoritmo se certifica que a posição  $(x,y)$  com a máxima correlação se refere à posição onde deveriam estar as marcas no mapa. Caso positivo, retorna essa correlação máxima e, caso negativo, informa que não foi possível encontrar uma correlação válida para a marca testada.

## CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais, validando as técnicas implementadas. Em um primeiro momento são discutidos aspectos relacionados aos parâmetros estabelecidos na confecção do mapa acústico bem como a utilização do índice de correlação bidimensional, tais como determinação da imagem padrão, influências no processo e os resultados alcançados. Posteriormente, são abordadas as análises com a aplicação da FFT na identificação de bandas de frequência que poderiam ter correlação com a identificação das marcas. A determinação das bandas de filtragem obtidas pela técnica de busca automática de bandas será apresentada em seguida e, por fim, são apresentados os resultados dos ensaios durante a dressagem do rebolo para quatro profundidades de dressagem diferentes, considerando tanto os sinais provenientes do sensor de emissão acústica comercial como também aqueles obtidos pelo diafragma piezelétrico. Uma tabela comparativa será apresentada demonstrando o desempenho de ambos os sensores com ou sem filtragem dos sinais.

### 4.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE MAPAS ACÚSTICOS

A obtenção de mapas acústicos utilizando sinais de emissão acústica obtidos por meio de sensor comercial e diafragma piezelétrico depende de alguns parâmetros a serem considerados.

Admitindo que o mapa acústico possua comprimento proporcional ao comprimento do perímetro do rebolo ( $C_R$ ) e largura proporcional a largura/espessura do rebolo ( $L_R$ ), torna-se possível determinar a quantidade de pontos RMS a serem utilizados na construção do mapa acústico.

Considerando ainda que  $n_s$  é a rotação do rebolo em [rpm],  $t_d$  é o tempo de dressagem em [s] e  $f_{amostragem}$  é a frequência de amostragem em [Hz] do sistema de aquisição de dados, tem-se as seguintes equações para o cálculo do número de pontos da estatística RMS, de forma a manter a proporção entre as dimensões físicas do rebolo e a imagem gerada.

$$N_{amostras_{volta}} = \frac{f_{amostragem} \cdot 60}{n_s} \quad (4.1)$$

$$N_{voltas_{rebolo}} = t_d \frac{n_s}{60} \quad (4.2)$$

$$Proporcao_{rebolo} = \frac{C_R}{L_R} \quad (4.3)$$

$$n_{pontosRMS} = \frac{N_{amostrasvolta}}{N_{voltasrebolo} \cdot Proporcao_{rebolo}} \quad (4.4)$$

Na Figura 4.1 ilustra-se o mapa acústico e sua relação com o comprimento e largura do rebolo. É possível notar que cada *pixel* da imagem é calculado baseado na estatística RMS, portanto, o número de pontos no eixo  $x$  ( $X_{pontos}$ ) e no eixo  $y$  ( $Y_{pontos}$ ) que compõe a imagem depende de vários fatores, tais como comprimento do perímetro do rebolo, largura do rebolo, taxa de amostragem, tempo de dressagem e velocidade de rotação do rebolo.

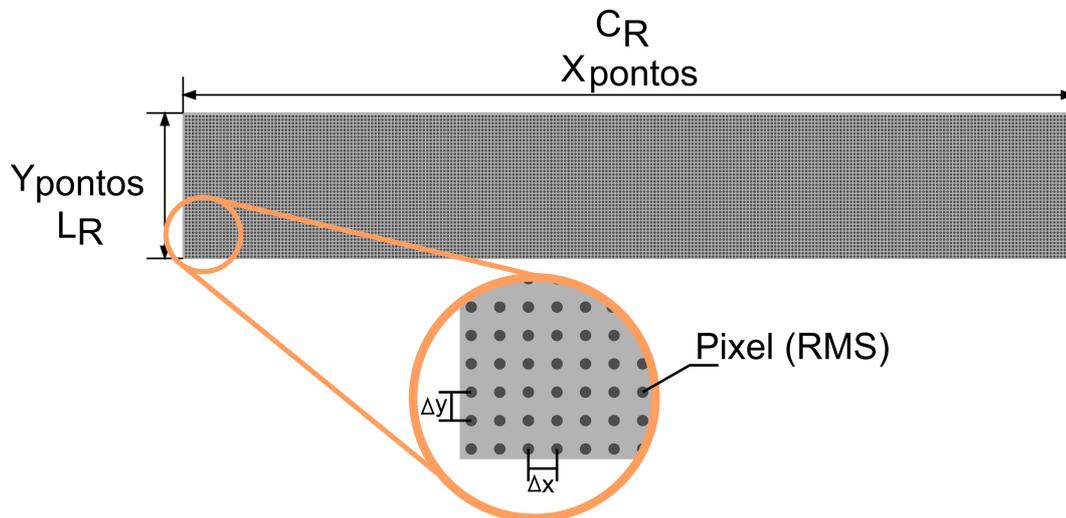


Figura 4.1 - Composição da Imagem do Mapa Acústico

Na Tabela 4.1 ilustra-se a composição da imagem do mapa acústico baseada no número de pontos RMS calculado para os ensaios realizados com diferentes profundidades de dressagem.

É importante salientar que foi utilizado grau de recobrimento ( $U_d$ ) igual a 1 nos ensaios que é considerado o pior caso na composição do mapa acústico, haja vista que a largura de atuação do dressador é igual ao passo de dressagem. Assim, a ponta de diamante do dressador passa sobre a superfície do rebolo sem sobreposição de pontos, permitindo que a imagem seja gerada com a quantidade mínima de pontos disponíveis na superfície do rebolo. Se fosse utilizado  $U_d$  maior que um, o número de linhas do mapa aumentaria ( $t_d$  também aumentaria) podendo apresentar uma melhor caracterização das marcas.

Tabela 4.1 - Número de Pontos para o Cálculo da Estatística RMS

Profundidade de Dressagem ( $a_d$ )	Tempo de Dressagem ( $t_d$ )	Número de Pontos (RMS)
5 $\mu\text{m}$	8,51 s	15
10 $\mu\text{m}$	5,32 s	24
20 $\mu\text{m}$	3,55 s	35
40 $\mu\text{m}$	2,58 s	49

As resoluções do mapa acústico  $\Delta x$  e  $\Delta y$  podem ser observadas na Figura 4.1. Para o cálculo destes parâmetros têm-se as seguintes equações:

$$\Delta x_p = \frac{f_{amostragem} \cdot 60}{n_s \cdot n_{pontosRMS}} \quad (4.5)$$

$$\Delta x = \frac{C_R}{\Delta x_p} \quad (4.6)$$

$$\Delta y = \frac{L_R}{N_{voltas_{rebolo}}} \quad (4.7)$$

Sendo que  $\Delta x$  é a distância entre dois pontos do mapa acústico no eixo  $x$  em [mm] e  $\Delta y$  é a distância entre dois pontos do mapa acústico no eixo  $y$  em [mm].

Na Tabela 4.2 ilustra-se as resoluções do mapa acústico obtidas para as profundidades de dressagem realizadas neste trabalho. Nota-se que foram mantidas as proporções da imagem e, assim,  $\Delta x \cong \Delta y \cong b_d$ , com  $U_d=1$ .

Tabela 4.2 - Resoluções Obtidas no Mapa Acústico

Profundidade de Dressagem ( $a_d$ )	Resolução em $x$ ( $\Delta x$ )	Resolução em $y$ ( $\Delta y$ )
5 $\mu\text{m}$	0,10 mm	0,10 mm
10 $\mu\text{m}$	0,16 mm	0,16 mm
20 $\mu\text{m}$	0,24 mm	0,24 mm
40 $\mu\text{m}$	0,33 mm	0,33 mm

## 4.2 PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO ÍNDICE DE CORRELAÇÃO BIDI-MENSIONAL

A obtenção do índice de correlação bidimensional foi fundamental no desenvolvimento deste trabalho, pois a partir da mesma foi possível estabelecer uma correlação do mapa acústico com um padrão de imagem (marca) esperado. Essa ferramenta foi muito importante, pois o ajuste das bandas de frequência dos filtros, comparação entre mapas, entre outros se basearam na implantação dessa técnica.

Neste sentido, por se tratar de uma comparação de imagens (*pixels*), alguns aspectos relevantes devem ser considerados:

- a. Deve existir um padrão de imagem para comparação que seja adequado e confiável para ser utilizado como referência;
- b. A imagem do padrão de referência deve possuir proporção, resolução e características que possam influenciar apenas na identificação da falha, seja qual for a imagem a ser avaliada;
- c. Os *pixels* que compõem o fundo da imagem padrão não podem interferir significativamente no índice de correlação.

Considerando-se os critérios elencados acima, fica evidente que a preocupação com a imagem padrão (referência) é de extrema importância.

### 4.2.1 Determinação da Imagem Padrão para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional

Considerando que o índice de correlação bidimensional necessita de um padrão de boa qualidade, as marcas positivo (+) e “T” usinadas no rebolo para simular uma falha precisavam ser geradas em formato de imagem, pois essas seriam usadas como padrão de referência na aplicação da técnica de correlação bidimensional. As marcas inicialmente idealizadas seriam identificadas por duas cores: preto que serviria para sinalizar o dano no rebolo e branco para sinalizar o fundo da imagem, haja vista que o fundo não deveria influenciar no cálculo do índice de correlação. Na Figura 4.2 apresenta-se as imagens das marcas idealizadas para serem utilizadas como padrão: (a) Marca positivo e (b) Marca “T”.

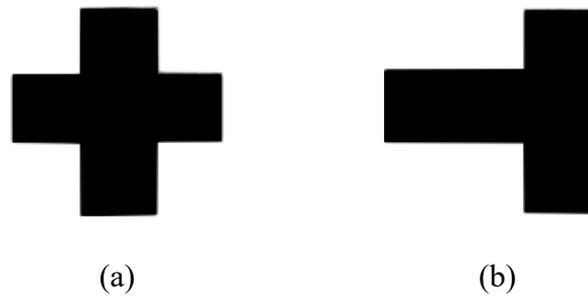


Figura 4.2 – Marcas Idealizadas para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional, (a) marca “+” e (b) marca “T”

As primeiras análises demonstraram que as marcas idealizadas não apresentavam boa representatividade com as falhas, sendo que em várias simulações a cor de fundo branca se sobressaia sobre os danos no rebolo. Isso se deve ao fato que na cor do fundo há um número de *pixels* significativo quando comparado com a marca e, portanto, se um filtro fosse ajustado, as imagens do mapa destacavam as cores claras obtendo maior correlação com o padrão que a marca com tonalidade escura e isso refletia em um filtro que deixava o mapa com qualidade inferior ao mapa acústico obtido sem a filtragem de bandas de frequência.

Para resolver esse problema, foram modeladas imagens de marcas baseadas no padrão de fundo obtido por meio de um mapa processado utilizando a estatística RMS, de forma que a intensidade média dos *pixels* do fundo da imagem padrão ficasse ajustada para o valor médio da intensidade de cor de fundo do mapa acústico processado. Com isso, a imagem do padrão passou a sofrer mínima influência das cores presentes no fundo da imagem e a estatística de correlação bidimensional passou a apresentar resultados satisfatórios. Na Figura 4.3 apresenta-se as marcas utilizadas como padrão de referência para o cálculo correto do índice de correlação bidimensional: (a) Marca positivo e (b) Marca “T”.

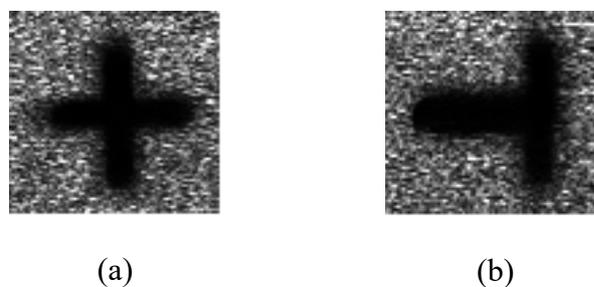


Figura 4.3 - Marcas Utilizadas para a Obtenção do Índice de Correlação Bidimensional , (a) marca “+” e (b) marca “T”

Além do ajuste nas marcas, para que o algoritmo funcionasse adequadamente, foi necessário obter um padrão com tamanho diferente para cada profundidade de dressagem, haja vista que quanto maior a profundidade de dressagem, o tempo de dressagem diminui. Com isso, o tempo de contato do rebolo com o dressador também diminui bem como o número de revoluções do rebolo. Assim, a altura da imagem do mapa acústico varia em função da profundidade de dressagem, necessitando de padrões de referência com mesmas proporções para que o cálculo da correlação seja efetivo.

#### 4.2.2 Localização da Marca por Meio do Índice de Correlação Bidimensional

A utilização de uma imagem que represente as marcas do rebolo não é o único critério relevante no cálculo do índice de correlação bidimensional. Além deste fator, torna-se necessário identificar se o índice de correlação obtido realmente se refere aos locais onde foram inseridas as marcas no rebolo.

Neste sentido, se a marca identificada pelo índice de correlação estiver próxima às posições consideradas como válidas, estas serão consideradas no processamento. O critério utilizado para a obtenção do índice de correlação bidimensional é o valor máximo da correlação obtido considerando toda a matriz tridimensional resultante das comparações entre a imagem padrão e o mapa acústico em análise, onde os eixos x e y representam a posição da imagem padrão (marcas) em relação ao mapa acústico e o eixo z representa o índice de correlação nesta posição.

Na Figura 4.4 apresenta-se um gráfico 3D da correlação bidimensional dos padrões com o mapa acústico do rebolo.

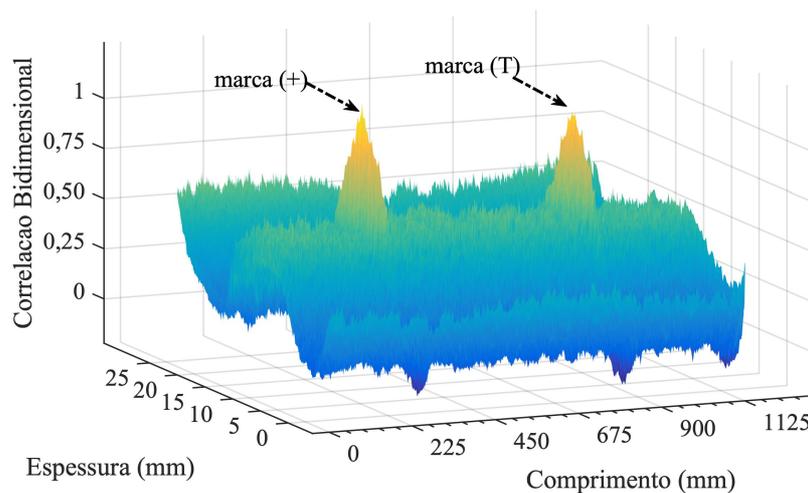


Figura 4.4 - Gráfico Resultante do Cálculo do Índice de Correlação Bidimensional

É possível observar no gráfico da Figura 4.4 que as marcas foram identificadas, estando a marca (+) com índice de correlação de 0,82 e a marca (T) com índice de correlação de 0,74. O eixo  $x$  representa o comprimento do rebolo (1.125 mm) e o eixo  $y$  a espessura do rebolo (25,4 mm), portanto, ambas as marcas estão no centro do eixo  $y$  e no eixo  $x$  estão nas posições 279 mm e 844 mm respectivamente. Essas posições estão corretas, pois as marcas foram inseridas em posições opostas do rebolo, espaçadas uniformemente (distância entre as marcas calculada é 565 mm e a distância real é 562 mm - metade do comprimento do rebolo).

### 4.3 IDENTIFICAÇÃO DAS MARCAS DO REBOLO UTILIZANDO A ANÁLISE ESPECTRAL

Uma característica que deve ser considerada nas análises de sinais é o comportamento do espectro de frequências. O espectro de frequências permite comparar trechos dos sinais de forma a avaliar possíveis diferenças que por ventura existam entre um sinal com a presença de uma falha e outro sem falhas. Essa técnica é comumente usada na determinação de estatísticas que identifiquem condições específicas no processo de retificação, tais como queima nas peças, detecção de *chatter*, condições de dressagem, condições da ferramenta de corte, entre outros (DOTTO et al., 2006; LEE et al., 2006; MOIA et al., 2015; NASCIMENTO LOPES et al., 2017; OLIVEIRA; FRANÇA; WANG, 2008). Desta forma, no presente trabalho também foram realizadas análises no espectro de frequências por meio da técnica da FFT, onde primeiramente se obteve um espectro com parte do sinal sem a presença de dano (marca) e outro espectro com parte do sinal onde há a presença do dano (marca).

Por meio de uma comparação manual, foi possível observar bandas de frequência que possuíam comportamentos diferentes para as duas situações e, assim, analisar se essas bandas poderiam ter relação com a imagem a ser construída do mapa acústico. Essas análises foram feitas para os sinais obtidos do sensor de emissão acústica comercial da SENSIS e para os sinais obtidos pelo diafragma piezelétrico.

Na Figura 4.5 ilustra-se o trecho da banda de frequências do sinal obtido pelo sensor de emissão acústica que apresentava diferenças de amplitude e que foram investigados neste trabalho. Nota-se que entre as frequências de 160 kHz e 220 kHz houve a maior diferenciação no espectro e que esta faixa poderia representar as falhas provocadas pelas marcas inseridas no rebolo. Vale ressaltar que em outros pontos do espectro de amplitudes não houve diferenças significativas que justificasse um estudo mais aprofundado, portanto, houve a filtragem do sinal

de emissão acústica nesta banda e foi gerado o mapa acústico apresentado na Figura 4.6 para a profundidade de dressagem de 20  $\mu\text{m}$ .

É possível observar na Figura 4.6 o (a) mapa acústico completo resultante do processamento, (b) a ampliação da marca “+” e a (c) ampliação da marca “T” de forma que os detalhes possam ser observados.

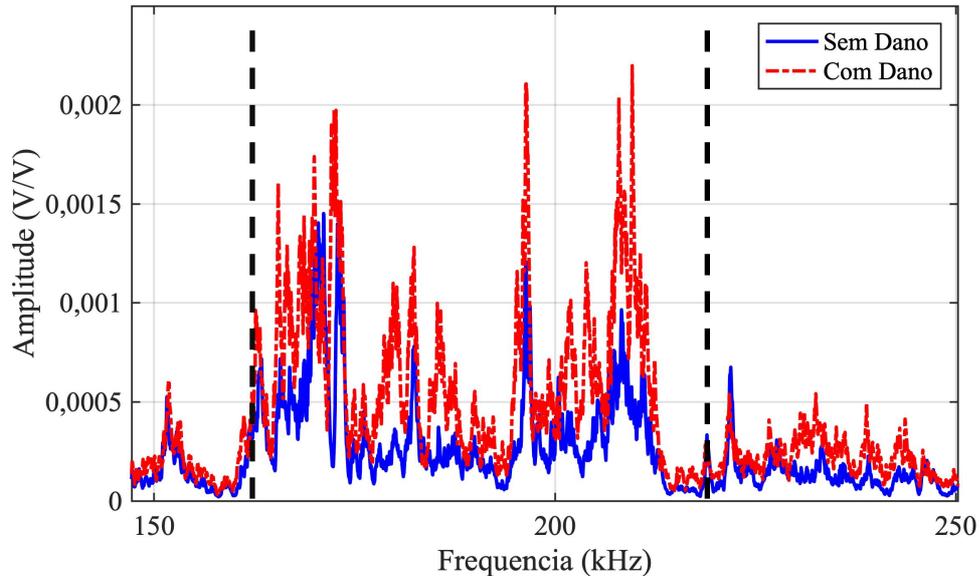


Figura 4.5 - Comparativo entre Bandas de Frequência com Dano e sem Dano para o Sensor de Emissão Acústica

A Figura 4.7 ilustra o trecho da banda de frequências do sinal obtido pelo diafragma piezométrico que apresentava diferenças de amplitude e que foram investigados neste trabalho. Nota-se que entre as frequências de 150 kHz e 160 kHz houve a maior diferenciação no espectro e que esta faixa poderia representar as falhas provocadas pelas marcas inseridas no rebolo. Assim como para o sensor de emissão acústica, em outros pontos do espectro de amplitudes não houve diferenças significativas que justificasse um estudo mais aprofundado, portanto, houve a filtragem do sinal de emissão acústica obtidos pelo diafragma piezométrico nesta banda e foi gerado o mapa acústico apresentado na Figura 4.8 para a profundidade de dressagem de 20  $\mu\text{m}$ .

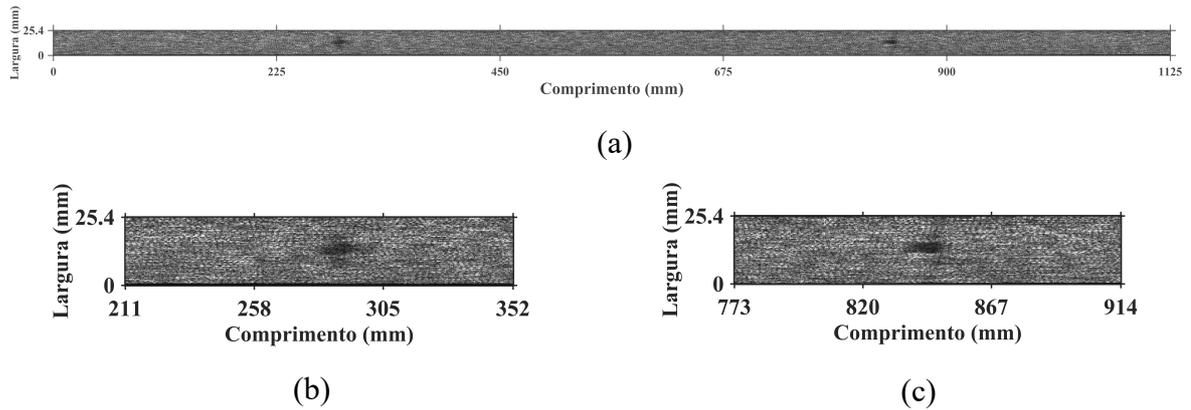


Figura 4.6 - Mapa Acústico Obtido pela Seleção Manual de Banda de Frequência para o Sensor de Emissão Acústica com  $a_d=20\mu\text{m}$ , (a) Mapa Acústico completo, (b) Detlhes da Marca “+” e (c) Detalhes da Marca (“T”)

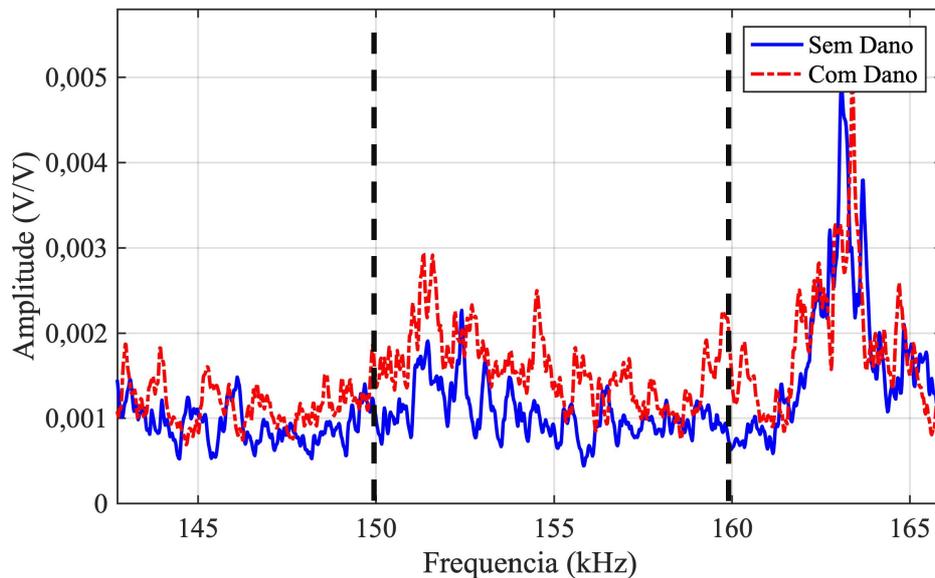


Figura 4.7 - Comparativo entre Bandas de Frequência com Dano e sem Dano para o Diafragma Piezelétrico

É possível observar na Figura 4.8 o (a) mapa acústico completo resultante do processamento, (b) a ampliação da marca “+” e a (c) ampliação da marca “T” de forma que os detalhes possam ser observados.

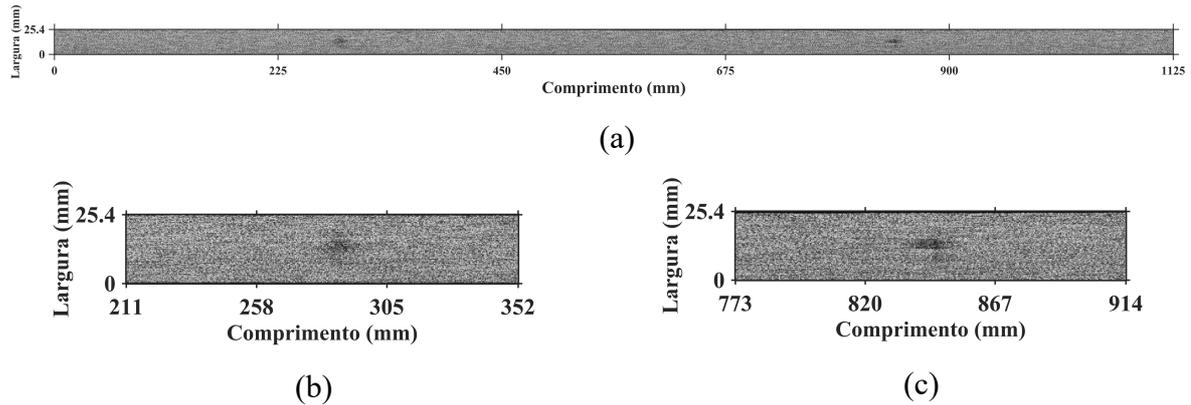


Figura 4.8 - Mapa Acústico Obtido pela Seleção Manual de Banda de Frequência para o Diafragma Piezelétrico com  $a_d=20\mu\text{m}$ , (a) Mapa Acústico Completo, (b) Detalhes da marca “+” e (c) Detalhes da marca “T”

Nota-se tanto no mapa obtido pelo sensor de emissão acústica como no mapa obtido pelo diafragma piezelétrico que a qualidade das marcas não é nítidas. Foram testadas outras profundidades de dressagem, mas a qualidade da imagem permaneceu com baixa nitidez, o que justificou o desenvolvimento da técnica da busca automática de bandas de frequência para redução da subjetividade na escolha das bandas e melhor qualidade de imagem do mapa.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DAS BANDAS DE FREQUÊNCIA PARA A OBTENÇÃO DE MAPAS ACÚSTICOS

Conforme descrito na Seção 3.2.1.3, foi desenvolvido um algoritmo para a busca automática de bandas frequência e que foi utilizado para se determinar qual a melhor faixa de frequências para filtragem dos sinais de forma a se obter a melhor qualidade visual do mapa acústico, tanto para o sensor de emissão acústica comercial quanto para o sensor composto pelo diafragma piezelétrico.

Neste sentido, o algoritmo foi aplicado para ambos os sinais visando a determinação das melhores bandas de frequência. Para o sinal obtido do sensor de emissão acústica foram testadas bandas de frequência entre 20 kHz a 500 kHz com passos múltiplos de 2 kHz, totalizando 28.920 combinações de filtros possíveis.

Na Figura 4.9 ilustra-se em um gráfico o resultado de todas as análises realizadas baseada no índice de correlação encontrado para o sensor de emissão acústica. O eixo  $x$  e  $y$  representam as frequências iniciais e finais do filtro e as cores do mapa sinalizam o grau de correlação

obtido entre o mapa acústico obtido após a filtragem e o padrão da marca usada como referência. Ambas as marcas foram avaliadas bem como todas as profundidades de dressagem e o resultado foi similar.

Observa-se no gráfico da Figura 4.9 que as melhores bandas de frequência para o sensor de emissão acústica estão entre 280 kHz a 350 kHz para frequência de corte inicial do filtro e entre 300 kHz e 500 kHz para a frequência de corte final do filtro. Pode-se notar também, em função de uma região muito bem definida na Figura 4.9, que há um filtro integrado ao sistema de emissão acústica comercial, o que limita o seu uso na construção de mapas acústicos para bandas de frequências menores que 250kHz.

Por meio do algoritmo de busca de bandas de frequências, obteve-se como melhor banda de frequências para filtragem e construção do mapa as frequências de corte inicial e final entre 302 kHz e 402 kHz para o sensor de emissão acústica, conforme pode ser observado na Figura 4.10.

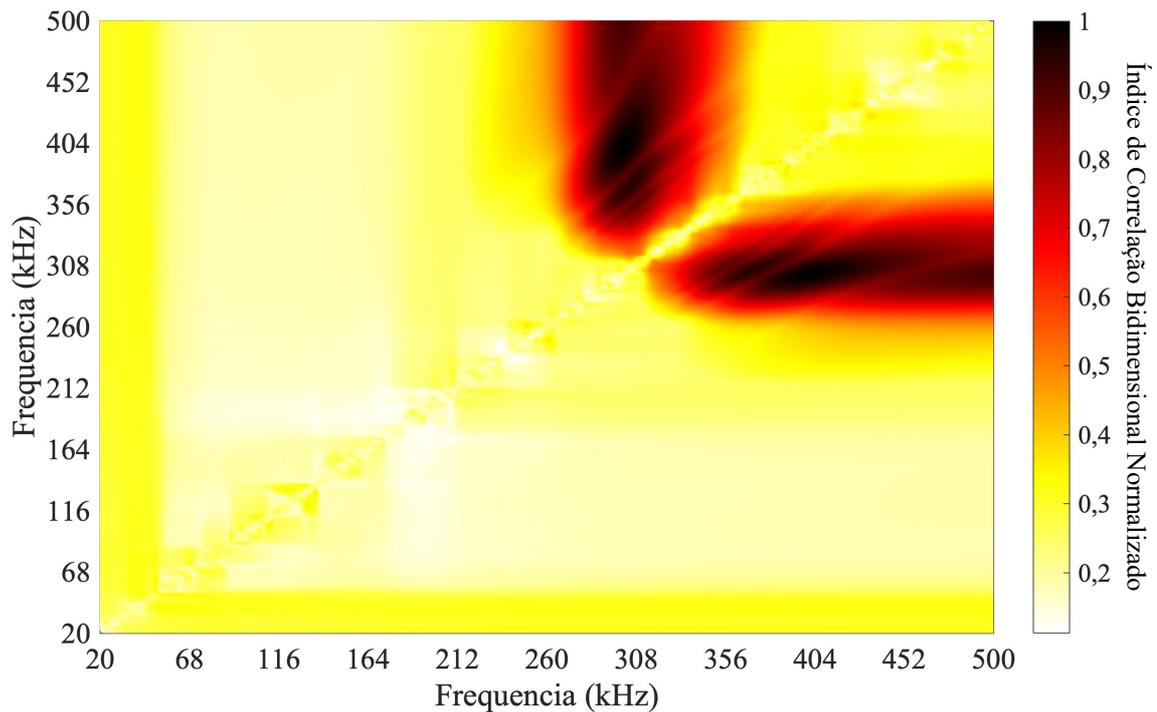


Figura 4.9 - Bandas de Frequência Filtradas e Correlação para o Sensor de Emissão Acústica

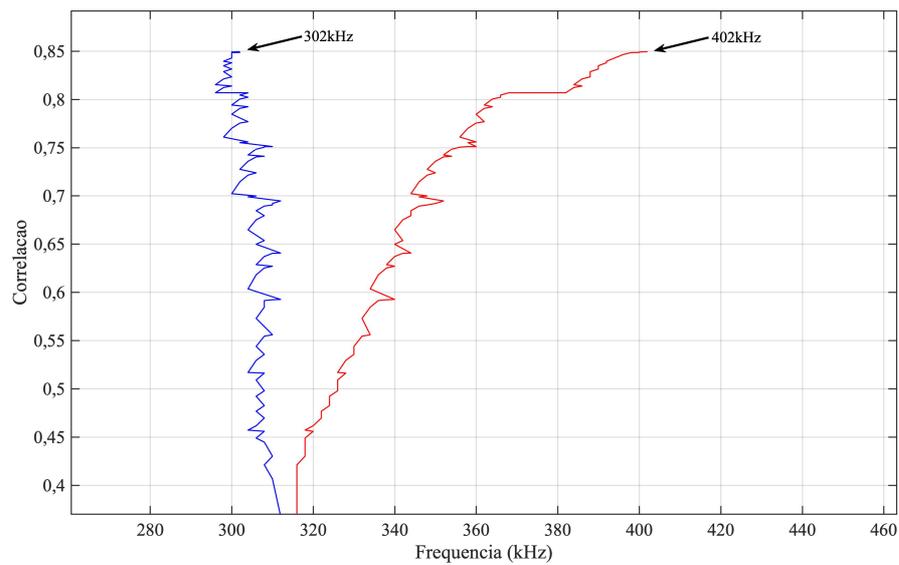


Figura 4.10 - Resultado do Algoritmo de Busca de Bandas de Frequência para o Sensor de Emissão Acústica

Um último teste foi realizado elencando em ordem decrescente os 60 melhores filtros para o sensor de emissão acústica e obteve-se uma sobreposição de bandas, demonstrando que não há fora da faixa estabelecida entre 302 kHz e 402 kHz outra banda que tenha resposta com amplitude significativa a ser considerada. Na Figura 4.11 ilustra-se por meio de um gráfico de barras esta condição. Neste gráfico, o eixo  $x$  representa a largura da barra, onde o tamanho reflete a largura de banda (frequência de corte inicial igual a 302 kHz e frequência de corte final 402 kHz) e a amplitude o índice de correlação bidimensional. Nenhuma outra barra fora deste espectro é apresentada, considerando os 60 melhores filtros encontrados pelo algoritmo.

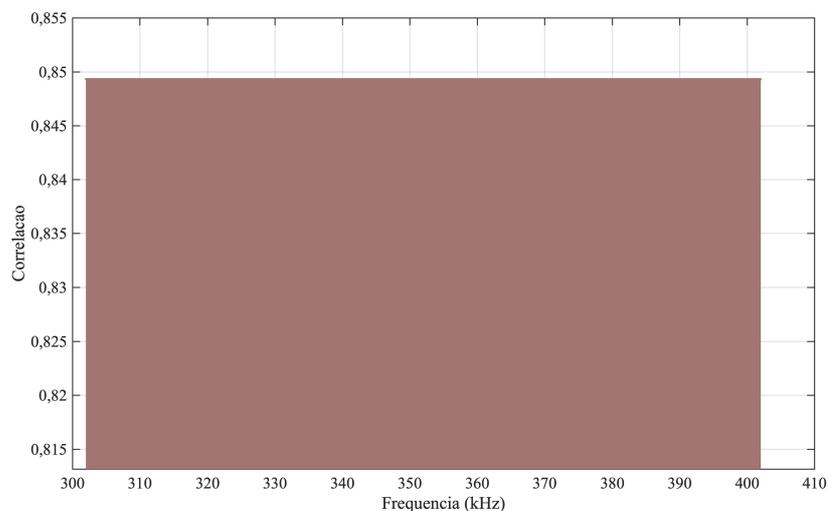


Figura 4.11 - Análise das 60 Melhores Bandas de Frequência para o Sensor de Emissão Acústica

Para o sinal obtido do sensor diafragma piezelétrico foram testadas bandas de frequência entre 20 kHz a 300 kHz com passos múltiplos de 1 kHz, totalizando 39.340 combinações de filtros possíveis. O passo menor se justifica por se tratar de um sensor com menor sensibilidade que um sensor de emissão acústica comercial. O limite do espectro de frequências foi limitado a 300 kHz, haja vista que trabalhos científicos recentes demonstram que a resposta do sensor diafragma piezelétrico comumente encontrada é inferior a 250 kHz (BATISTA DA SILVA et al., 2018; RIBEIRO et al., 2017; SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016).

Na Figura 4.12 ilustra-se em um gráfico o resultado de todas as análises realizadas baseada no índice de correlação encontrado para o sensor diafragma piezelétrico. Assim como para o sensor de emissão acústica comercial, ambas as marcas foram avaliadas bem como todas as profundidades de dressagem e o resultado foi similar.

Observa-se no gráfico da Figura 4.12 que as melhores bandas de frequência para o sensor diafragma piezelétrico estão entre 40 kHz a 60 kHz para frequência de corte inicial do filtro e entre 45kHz e 70kHz para a frequência de corte final do filtro.

Por meio do algoritmo de busca de bandas de frequências, obteve-se como melhor banda de frequências para filtragem e construção do mapa as frequências de corte inicial e final entre 49 kHz e 56 kHz para o sensor diafragma piezelétrico, conforme pode ser observado na Figura 4.13.

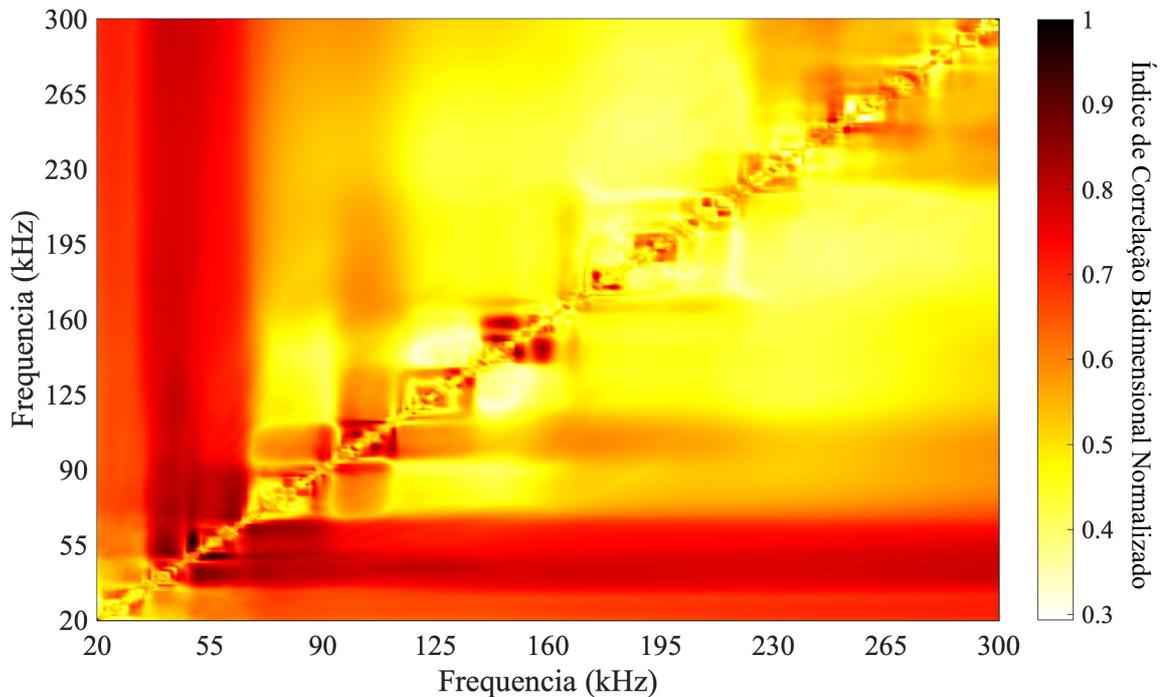


Figura 4.12 - Bandas de Frequência Filtradas e Correlação para o Sensor Diafragma Piezelétrico

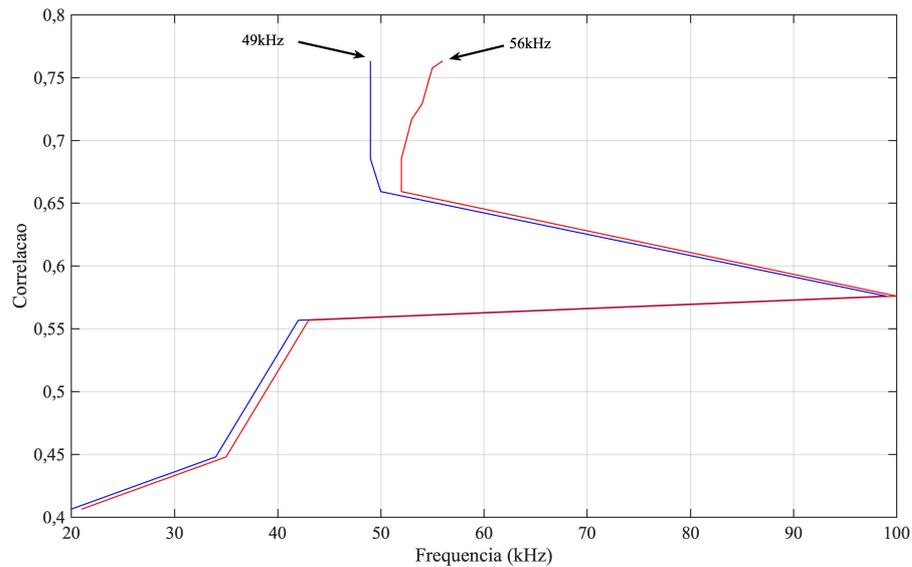


Figura 4.13 - Resultado do Algoritmo de Busca de Bandas de Frequência para o Diafragma Piezoeletrico

Visando determinar outras bandas de frequência que poderiam influenciar na qualidade do mapa acústico, foi elencado em ordem decrescente os 60 melhores filtros, removendo aqueles que abrangiam praticamente a mesma faixa de frequências e deixando aqueles que possuíam alguma representatividade em outras faixas. Na Figura 4.14 apresenta-se um gráfico de barras que representa o comportamento dos 60 melhores filtros. O eixo  $x$  representa a largura da barra, que reflete a largura de banda e a amplitude representa o índice de correlação bidimensional.

É possível perceber na Figura 4.14 que além da banda compreendida 49 kHz e 56 kHz há outras bandas menos relevantes que poderiam contribuir com a qualidade do mapa acústico, como as faixas de frequências entre 100 kHz – 115 kHz e entre 143 kHz – 153 kHz. Por outro lado, as amplitudes nestes intervalos são significativamente menores e, portanto, a melhor faixa para a aplicação do filtro com a melhor qualidade de imagem do mapa acústico está entre 49 kHz e 56 kHz. Vale ressaltar que mesmo possuindo amplitudes menores, foi efetuado uma comparação visual entre os mapas com a aplicação de filtro nas outras bandas e o melhor resultado permaneceu entre 49 kHz e 56 kHz, conforme determinado pelo algoritmo de busca.

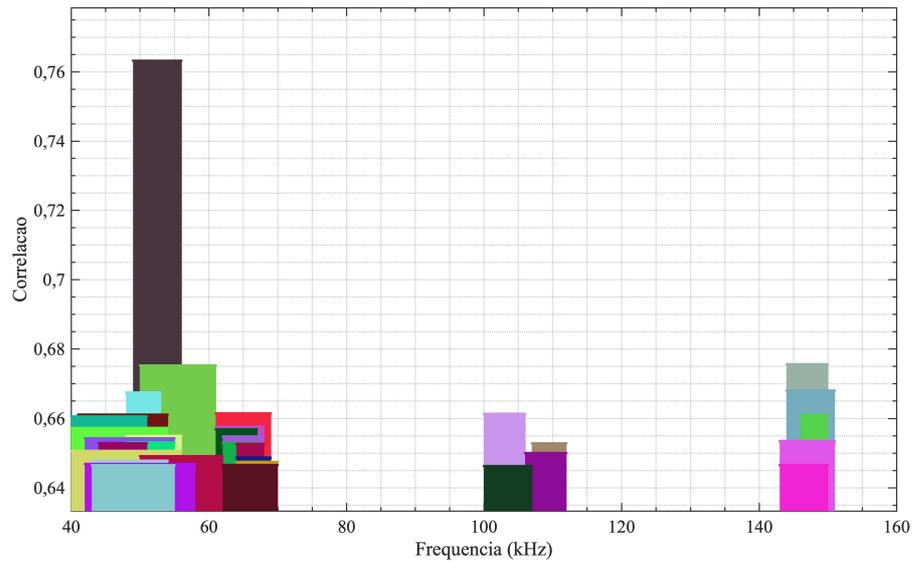


Figura 4.14 - Análise das 60 Melhores Bandas de Frequência para o Diafragma Piezelétrico

Diante das análises de bandas de frequências realizadas para o sensor de emissão acústica e para o diafragma piezelétrico, definiu-se para os ensaios experimentais que a faixa para filtragem dos sinais que melhor refletia a qualidade do mapa acústica ficaria entre 302 kHz-402 kHz para o sensor de emissão acústica e entre 49 kHz-56 kHz para o sensor diafragma piezelétrico. Assim, o filtro passa-banda *Butterwoth* de quinta ordem foi ajustado com estes parâmetros.

Outro ponto importante se refere aos valores obtidos pela aplicação da FFT na Seção 4.3, onde foi possível verificar trechos de frequências que não tem qualquer relação com as frequências obtidas pelo algoritmo de busca de frequências, portanto, ficou evidente que para a construção de mapas acústicos, a mera comparação visual entre bandas de frequência não poderia ser realizada, evidenciando a importância do método proposto.

Na Figura 4.15 ilustra-se a imagem de um mapa acústico obtido pelo diafragma piezelétrico para a profundidade de dressagem de 20  $\mu\text{m}$  e banda de frequências do filtro ajustada para 49 kHz-56 kHz. É possível perceber claramente a melhoria da imagem do mapa acústico quando comparado com a Figura 4.8.

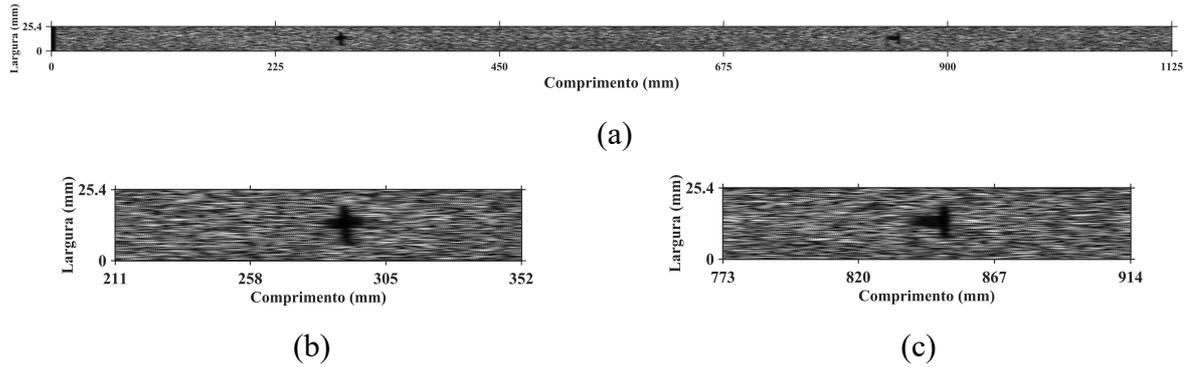


Figura 4.15 - Mapa Acústico Obtido pela Seleção Automática de Banda de Frequência para o Diafragma Piezelétrico com  $a_d=20\mu\text{m}$ , (a) Mapa acústico completo, (b) Detalhes da marca “+” e (c) Detalhes da marca “T”

#### 4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA E DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO

Estabelecida as bandas de filtragem e parâmetros para o cálculo do índice de correlação bidimensional, tornou-se possível a realização do processamento dos ensaios experimentais para análise de ambos os sensores.

A partir das condições de usinagem estabelecidas na Tabela 3.1, realizou-se 3 ensaios para 4 profundidades de dressagem com e sem filtragem, resultando em 48 mapas acústicos: 12 para o sensor de emissão acústica sem filtragem, 12 para o sensor de emissão acústica com filtragem, 12 para o sensor diafragma piezelétrico sem filtragem e 12 para o sensor diafragma piezelétrico com filtragem.

Para efeito de comparação serão apresentadas as marcas encontradas nos mapas acústicos em uma amostra para as 4 profundidades de dressagem diferentes.

As Figura 4.16 a Figura 4.23 apresentam as comparações das marcas “+” e “T” para as profundidades de dressagem de  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  e  $40\mu\text{m}$ . Nestas figuras é possível observar as regiões das marcas com e sem filtragem para o sensor de emissão acústica (itens ‘a’ e ‘b’) e diafragma piezelétrico (itens ‘c’ e ‘d’).

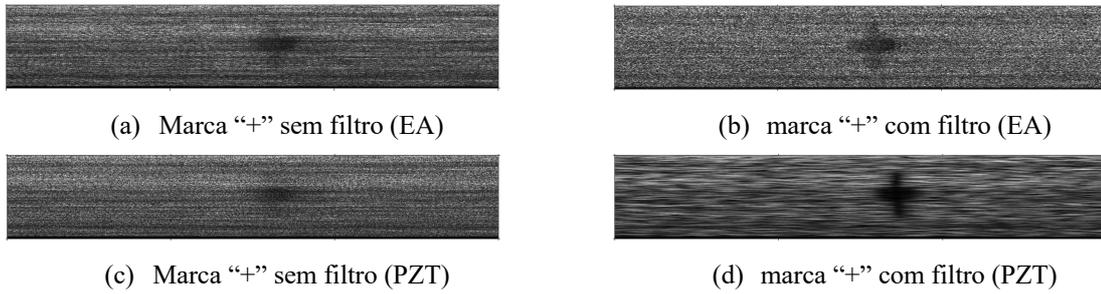


Figura 4.16 - Mapas Acústicos com a Marca “+” e Profundidade de Dressagem de 5µm

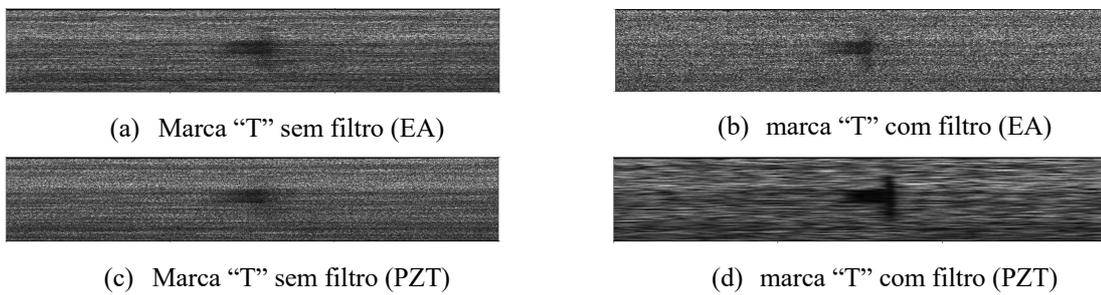


Figura 4.17 - Mapas Acústicos com a Marca “T” e Profundidade de Dressagem de 5µm

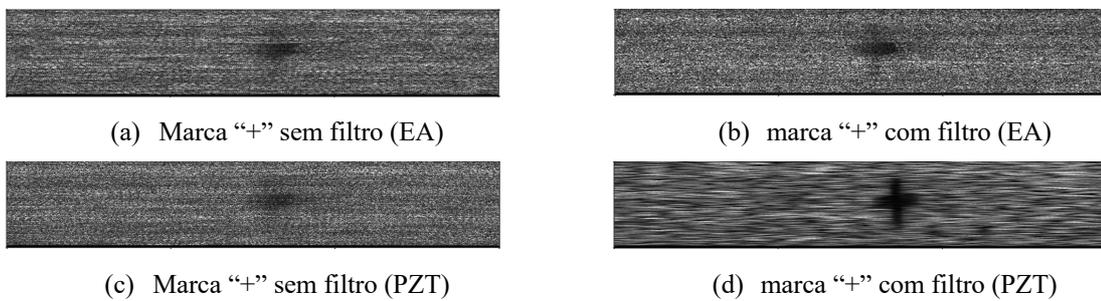


Figura 4.18 - Mapas Acústicos com a Marca “+” e Profundidade de Dressagem de 10µm

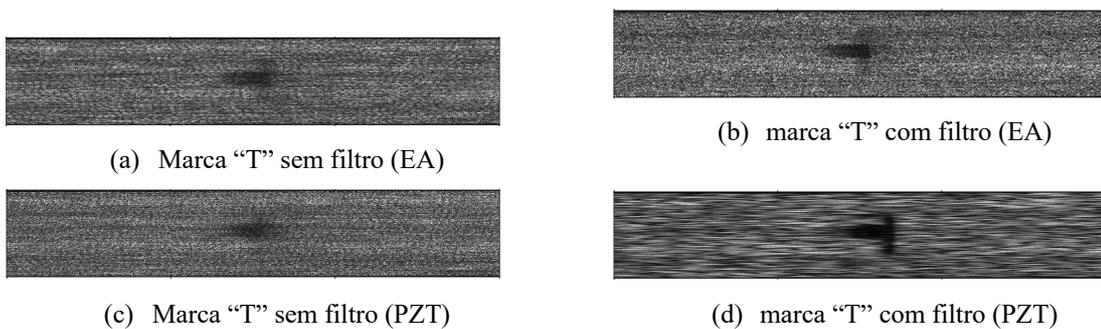


Figura 4.19 - Mapas Acústicos com a Marca “T” e Profundidade de Dressagem de 10µm

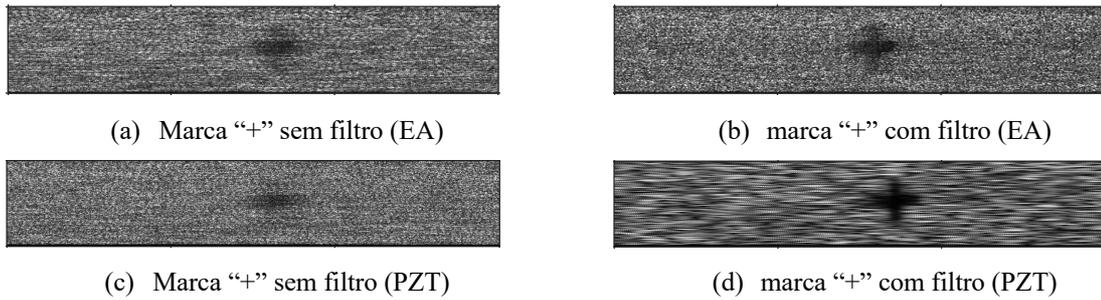


Figura 4.20 - Mapas Acústicos com a Marca “+” e Profundidade de Dressagem de 20µm

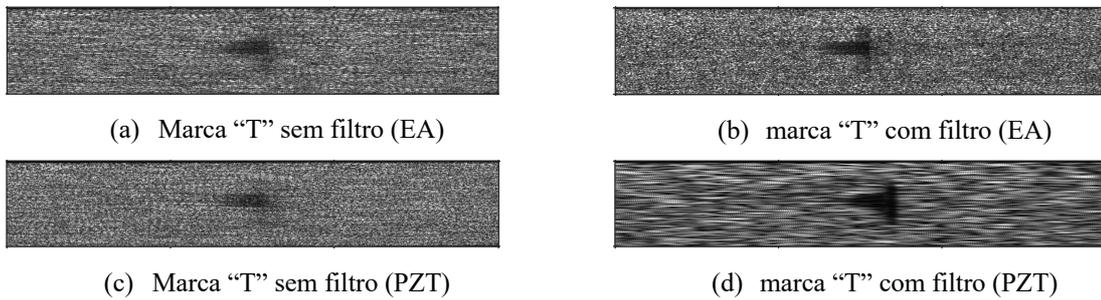


Figura 4.21 - Mapas Acústicos com a Marca “T” e Profundidade de Dressagem de 20µm

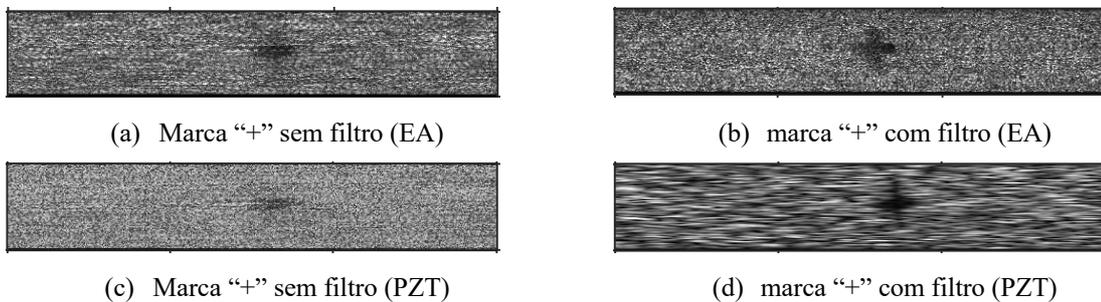


Figura 4.22 - Mapas Acústicos com a Marca “+” e Profundidade de Dressagem de 40µm

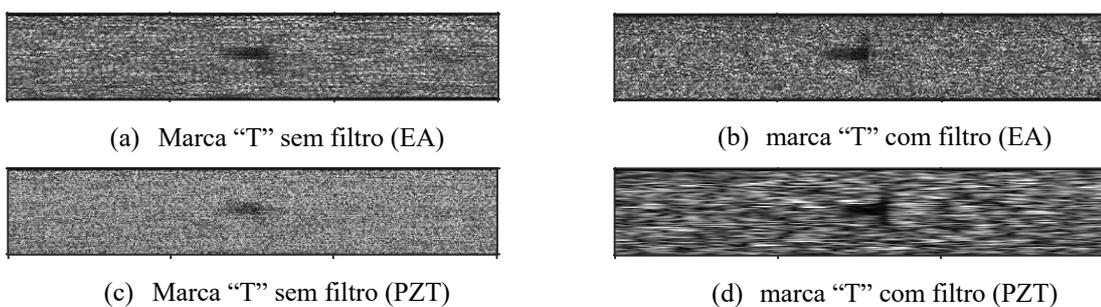


Figura 4.23 - Mapas Acústicos com a Marca “T” e Profundidade de Dressagem de 40µm

É possível perceber nos gráficos apresentados que há uma melhoria em todos eles quando o filtro passa faixas é aplicado. Se consideramos apenas o sinal proveniente do diafragma piezelétrico, fica evidente que em boa parte das amostras não é possível ter uma nitidez razoável sem a utilização de um processo de filtragem.

Por outro lado, o nível de ruído na imagem de fundo aumenta significativamente com o diafragma piezelétrico, o que limitaria o nível de detalhes que poderia ser visualizado pelo mapa, ou seja, se a marca fosse muito pequena, a mesma poderia ser confundida com o fundo da imagem.

Um fator importante é a proporção largura *versus* altura das marcas. Em quase todas as amostras, a proporção conseguiu se manter próxima as condições reais, com baixa distorção. A localização das marcas quando comparadas a posição real no rebolo apresentou variação entre 3 mm e 5 mm, o que pode ser justificado pelo atraso inserido pelo processo de filtragem, cálculo da estatística RMS, erro do algoritmo de extração de passadas e pela própria não linearidade do processo em questão.

Na Figura 4.24 apresenta-se o resultado final de todo o processamento, considerando as 3 passadas com 4 profundidades de dressagem, com e sem filtragem para o sensor de emissão acústica e diafragma piezelétrico. O eixo *x* relaciona as repostas dos sensores para cada uma das profundidades de dressagem, com e sem filtragem de banda enquanto o eixo *y* apresenta o índice de correlação médio das 3 amostras (considerando as duas marcas) bem como o desvio padrão (linha sobreposta as barras).

É possível observar na Figura 4.24 que sem a aplicação de um processo de filtragem, o sensor de emissão acústica apresenta o melhor resultado. Porém, se considerarmos o diafragma piezelétrico com a filtragem de banda, a resposta deste sensor passa a ser melhor que a obtida com o sensor de emissão acústica para as profundidades de dressagem de 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ . Porém, a medida que a profundidade de dressagem aumenta, o sensor de emissão acústica passa a responder melhor, alcançando os mesmos níveis do diafragma piezelétrico e em algumas amostras até oferecendo resultados superiores.

Por outro lado, o desvio padrão das amostras obtidas com o sensor de emissão acústica é maior que o obtido com o diafragma piezelétrico, o que pode ser ocasionado pela falta de sensibilidade do equipamento comercial para capturar detalhes no sinal. No caso do diafragma piezelétrico, por possuir um amplificador de instrumentação desenhado para responder melhor em condições de alto índice de ruído (boa rejeição de modo comum), pode ter contribuído para que o desvio padrão fosse minimizado.

Com relação aos patamares de correlação, vale ressaltar que o valor máximo alcançado foi em torno de 0,79 (considerando o valor médio das duas marcas). Para valores inferiores a 0,50, o mapa acústico apresenta baixa qualidade e demanda um cuidado maior para ser utilizado, pois o mesmo pode não representar com fidelidade a falha. A experiência do profissional para avaliar os mapas é muito importante antes da tomada de decisão.

Um ponto negativo relativo ao uso do índice de correlação é o parâmetro de forma da imagem. Como a comparação é feita pelo algoritmo *pixel a pixel*, o formato da marca não necessariamente precisa ser o mesmo para que a correlação seja significativa, pois o índice é uma relação média entre os *pixels*. Isso justifica as diferenças observadas na forma da imagem do mapa, onde apesar de visualmente não apresentar um formato exatamente igual ao da marca, possui um índice de correlação maior que outra marca com maior nitidez. Como exemplo, pode-se comparar a imagem da marca obtida pelo diafragma piezelétrico em duas profundidades de dressagem: 5  $\mu\text{m}$  (Figura 4.16) e 20  $\mu\text{m}$  (Figura 4.20). Ambas não apresentaram diferenças em sua forma tão relevantes com observado em seu índice de correlação (Figura 4.24)

Durante o processo de dressagem, os valores mais usuais de profundidade de dressagem estão acima de 5  $\mu\text{m}$ , assim, ambos os sensores poderiam ser utilizados para a coleta de dados. Caso a opção seja a elaboração de mapas acústicos sem o processo de filtragem, recomenda-se que seja utilizado o sensor de emissão acústica comercial, que é o único que apresentaria um desempenho aceitável para profundidades de dressagem acima de 10  $\mu\text{m}$ .

Na Tabela 4.3 apresenta-se um resumo dos resultados alcançados, onde destaca-se na tabela qual a melhor aplicação dos sensores para cada uma das profundidades de dressagem. O sombreado dos campos da tabela indica a melhor solução para o uso do sensor em função da profundidade de dressagem.

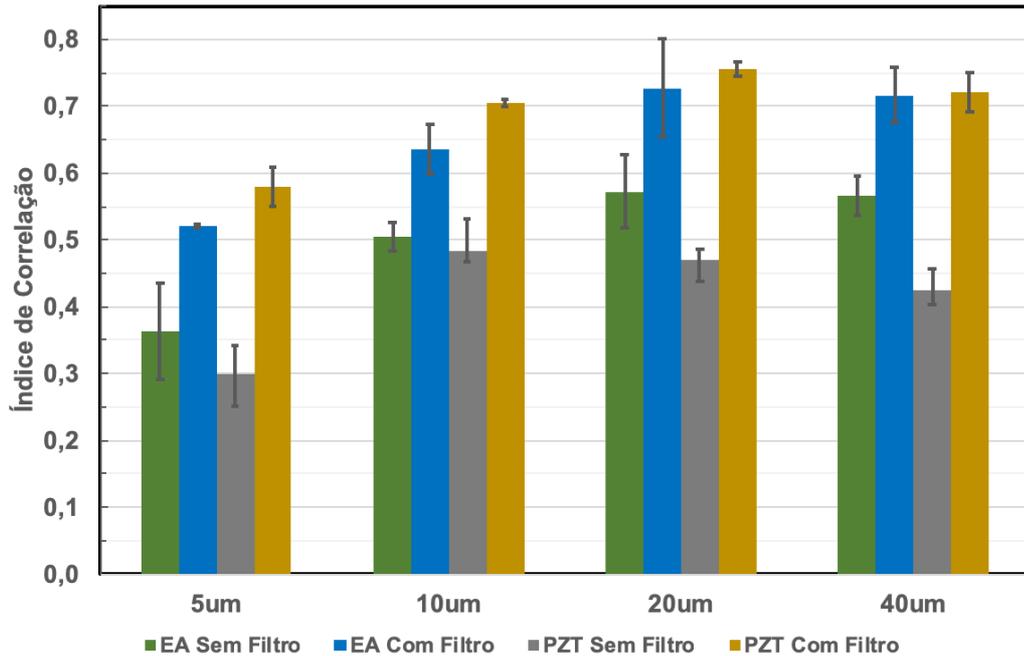


Figura 4.24 - Média e Desvio Padrão do Índice de Correlação entre Todas as Amostras

Tabela 4.3 - Resumo dos Resultados Obtidos com os Sensores

Resumo dos Resultados					
Sensor	Condição	Profundidade de Dressagem			
		5 $\mu$ m	10 $\mu$ m	20 $\mu$ m	40 $\mu$ m
Emissão Acústica	Sem Filtragem				
	Com filtragem			*	*
Diafragma Piezométrico	Sem Filtragem				
	Com filtragem			*	*

\* Ambos os sensores apresentam bons resultados para esta profundidade de dressagem

Em termos de comparação, os resultados são muito satisfatórios, haja vista que o diafragma piezométrico (que custa alguns centavos de dólares) juntamente com o circuito condicionador de sinais não passaria de 50 dólares, enquanto o equipamento de emissão acústica comercial poderia alcançar facilmente valores superiores a 2 mil dólares.

Acredita-se, portanto, que com melhorias futuras no processamento de sinais e circuitos condicionadores para coleta de dados usando diafragma piezométrico poderia ser possível melhorar a definição do mapa acústico sendo possível explorar outros tipos de falhas, tais como desbalanceamento, folgas, irregularidades da ferramenta, entre outros.

## Capítulo 5 – CONCLUSÕES

---

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo inédito para elaboração de mapas acústicos utilizando como sensor um diafragma piezelétrico de baixo custo, durante operações de dressagem, bem como a determinação de bandas de frequência para filtragem dos sinais de emissão acústica que resultem em mapas acústicos com melhor nitidez e qualidade de imagem da falha.

Por meio de duas marcas (sinal “+” e “T”) usinadas na superfície do rebolo foi possível realizar operações de dressagem com dressador de ponta única e profundidades de 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ , coletando dados por meio de um sensor de emissão acústica comercial e por um diafragma piezelétrico. Também foi utilizado um *encoder* para captar o sinal da posição angular do rebolo, o que possibilitou obter o sincronismo do sinal de emissão acústica a cada revolução do rebolo.

Baseado em uma análise espectral utilizando Transformada Rápida de Fourier foi possível avaliar o comportamento dos espectros de frequência com e sem dano (marcas) de forma manual e verificou-se que não é o possível obter melhorias na qualidade da imagem do mapa acústico por meio de uma comparação manual (aplicando a FFT e analisando os espectros).

A partir de uma técnica de busca de bandas de frequência, especialmente desenvolvida neste trabalho, os parâmetros dos filtros passa-banda *Butterworth* de quinta ordem foram ajustados automaticamente, onde obteve-se a melhor banda de frequência para o sensor de emissão acústica comercial entre 302 kHz e 402 kHz e para o diafragma piezelétrico entre 49 kHz e 56 kHz. Foi possível identificar também que o sistema de emissão acústica comercial possuía um filtro integrado que acabou refletindo em uma seleção de banda frequências maiores.

Mapas acústicos contendo as marcas foram gerados para 4 profundidades de dressagem e 3 repetições cada, tanto para os sinais obtidos pelo sensor de emissão acústica quanto para o diafragma piezelétrico. Essas condições foram também avaliadas com e sem a presença de filtragem nas bandas selecionadas, totalizando 48 mapas.

A partir dos mapas acústicos foi possível calcular um índice de correlação bidimensional para cada um deles, considerando um padrão de referência das marcas previamente ajustado. Este índice de correlação possibilitou uma comparação entre os sensores utilizados, bandas de frequência e profundidades de dressagem.

Os resultados apontam que se não for utilizado nenhum processo de filtragem adicional na elaboração do mapa acústico, o sensor de emissão acústica comercial é o mais indicado, pois apresentou melhores resultados para todas as profundidades de dressagem avaliadas. Por outro

lado, a partir da utilização filtros nas bandas selecionadas, foi possível avaliar que o diafragma piezelétrico apresentou melhores resultados para as profundidades de dressagem de 5  $\mu\text{m}$  e 10  $\mu\text{m}$ .

Para as profundidades de dressagem de 20  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ , tanto o sensor comercial quanto o diafragma piezelétrico apresentaram bons resultados, sendo que para 20  $\mu\text{m}$  o diafragma piezelétrico apresentou uma média maior quando comparado ao sensor de emissão acústica comercial. Por outro lado, o desvio padrão do índice de correlação bidimensional obtido com o sensor de emissão acústica foi maior, o que significa que em uma das passadas de dressagem houve resultados melhores do que os obtidos pelo diafragma piezelétrico para 20  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ .

Finalmente, esse estudo demonstrou a viabilidade do uso do diafragma piezelétrico para a elaboração de mapas acústicos durante o processo de dressagem, sendo esses sensores menos dispendiosos quando comparado com os sensores de emissão acústica comerciais, demonstrando a viabilidade técnica de seu uso no ambiente industrial. Além disso, por se tratar de um sensor de baixo custo, a solução apresentada pode ser aplicada em processos industriais mais simples, permitindo a visualização de mapas acústicos em setores onde o custo final dos equipamentos de monitoramento poderia se tornar impeditivo.

## 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- ❖ Incorporar outras técnicas de processamento de sinais para melhorar a qualidade do mapa acústico;
- ❖ Explorar a composição de mais de uma banda de frequência para melhorar a resolução dos mapas;
- ❖ Estudar outras falhas por meio do mapa acústico provenientes da ferramenta de corte (rebolo) tais como folgas excessivas, desbalanceamento, vibrações não desejadas, *chatter*, quebra do dressador, dressagem incorreta, danos no rebolo, etc.
- ❖ Aplicação do sensor composto pelo diafragma piezelétrico para monitorar o processo de retificação usando mapas acústicos;

## REFERÊNCIAS

AGARWAL, S. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics. **Ceramics International**, v. 42, n. 5, p. 6244–6262, abr. 2016.

AGUIAR, P. R. et al. **Neural network approach for surface roughness prediction in surface grinding**. The IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA 2007). **Anais...2007**

AGUIAR, P. R. P.; BIANCHI, E. C. E.; OLIVEIRA, J. J. F. G. A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power. **CIRP Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 3, p. 253–257, 2002.

AGUIAR, P. R. R. et al. In-process grinding monitoring by acoustic emission. **2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 5, p. 1–4, 2004.

ALEXANDRE, F. A. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 1, p. 1–13, jan. 2018.

ALMEIDA, V. A. D. DE; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R. DE. Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 2, p. 693–702, 2015.

ALMEIDA, V. et al. Experimental Analysis of Piezoelectric Transducers for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Proceedings of International Electronic Conference on Sensors and Applications**, p. f004, 2014.

ARJUN, V. et al. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 226, p. 69–75, 2015.

ARUN, A. et al. Tool Condition Monitoring Of Cylindrical Grinding Process Using Acoustic Emission Sensor. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 5, p. 11888–11899, 2018.

AXINTE, D. A. et al. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 10, p. 1091–1108, ago. 2004.

BAPTISTA, F. G. et al. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. **Sensors (Switzerland)**, v. 14, n. 1, p. 1208–1227, 2014.

BATISTA DA SILVA, R. et al. Electromechanical impedance (EMI) technique as

alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 9–12, p. 2429–2438, 2018.

BENNETT, R. T. **Acoustic Emission in Grinding**. [s.l.] University of Connecticut, 1994.

BIANCHI, E. C. et al. Behavior Analysis of Conventional Grinding Wheel in Brittle and Ductile Steels Machining. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, v. XIX, n. 3, p. 410–425, 1997.

BIANCHI, E. C. et al. The evaluation of the bond resin and vitrified and abrasive grain CBN and alumina influence in the grinding wheel topography characteristics, by the study of the grinding wheel sharpness. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 431–437, dez. 2011.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 10. ed. River Street, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2008.

BRINKSMEIER, E.; WERNER, F. Monitoring of Grinding Wheel Wear. **CIRP Annals**, v. 41, n. 1, p. 373–376, 1992.

CAI, R.; ROWE, W. B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 12–13, p. 1391–1402, out. 2004.

CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 126–130, jan. 2010.

CATAI, R. E. **Optimization of the coolant/lubrication conditions in the cylindrical plunge grinding process**Bauru, 2004.

CHANG, J. I. et al. Recycling oil and steel from grinding swarf. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 49, n. 2, p. 191–201, dez. 2006.

CHEN, X.; LIMCHIMCHOL, T. Monitoring grinding wheel redress-life using support vector machines. **International Journal of Automation and Computing**, v. 3, n. 1, p. 56–62, jan. 2006.

CONCEICAO JUNIOR, P. O. et al. The Correlation of Vibration Signal Features in Grinding of Advanced Ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 9, p. 4006–4012, set. 2016.

DA CONCEIÇÃO JUNIOR, P. O. et al. Time-domain Analysis Based on the Electromechanical Impedance Method for Monitoring of the Dressing Operation. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 319–324, 2018.

DA SILVA, E. J. et al. Grinding process for profiled texturing. **CIRP Annals -**

**Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 337–340, 2016.

DE OLIVEIRA, J. F. G. et al. Grinding Process Dominance by Means of the Dressing Operation. In: **Proceedings of the Twenty-Ninth International Matador Conference**. London: Macmillan Education UK, 1992. p. 547–550.

DE OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D. A. Application of AE contact sensing in reliable grinding monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 217–220, 2001.

DENKENA, B. et al. Enhanced grinding performance by means of patterned grinding wheels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 9–12, p. 1935–1941, 2015.

DENKENA, B. et al. Design of bronze-bonded grinding wheel properties. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 333–336, 2016.

DI ILIO, A.; PAOLETTI, A. A comparison between conventional abrasives and superabrasives in grinding of SiC-aluminium composites. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 173–184, jan. 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7. ed. São Paulo, SP: Artiliber Editora Ltda, 2010.

DIODATI, P.; MARCHESONI, F.; PIAZZA, S. Acoustic emission from volcanic rocks: An example of self-organized criticality. **Physical Review Letters**, v. 67, n. 17, p. 2239–2243, out. 1991.

DORNFELD, D. A. et al. Analysis of tool and workpiece interaction in diamond turning using graphical analysis of acoustic emission. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52, n. 1, p. 479–482, 2003.

DORNFELD, D. A.; LEE, Y.; CHANG, A. Monitoring of Ultraprecision Machining Processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 21, n. 8, p. 571–578, 1 jun. 2003.

DOTTO, F. R. L. et al. Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 2, p. 153–160, 2006.

DOTTO, F. R. L. et al. Methodology for automatic selection of passes in surface grinding. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 29, n. 1, p. 7–13, mar. 2007.

DOTTO, F. R. L. et al. Acoustic image-based damage identification of oxide aluminum grinding wheel during the dressing operation. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 298–302, 2019.

FATHIMA, K. et al. A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding. **Wear**, v. 254, n. 12, p. 1247–1255, nov. 2003.

FIOCCHI, A. A. et al. Investigation on Surface Finishing of Components Ground with Lapping Kinematics: Lapgrinding Process. **Advanced Materials Research**, v. 223, p. 879–887, abr. 2011.

FU, G. **Inspection and monitoring techniques for bridges and civil structures**. 1. ed. Boca Raton: [s.n.].

GERMÁN-SALLÓ, Z.; STRNAD, G. Signal processing methods in fault detection in manufacturing systems. **Procedia Manufacturing**, v. 22, p. 613–620, 2018.

GROSSE, C.; OHTSU, M. **Acoustic Emission Testing**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

HASHIMOTO, F. et al. Advances in centerless grinding technology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 2, p. 747–770, 2012.

HASSUI, A. et al. Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. **Wear**, v. 217, n. 1, p. 7–14, 1998.

JACKSON, M. J. et al. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1–3, p. 17–23, abr. 2007.

JACKSON, M. J.; DAVIM, P. J. **Machining with Abrasives**. Boston, MA: Springer US, 2011.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Microscale wear of vitrified abrasive materials. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 6, p. 2131–2143, mar. 2004.

JUNIOR, P.; D'ADDONA, D. M.; AGUIAR, P. R. Dressing Tool Condition Monitoring through Impedance-Based Sensors: Part 1—PZT Diaphragm Transducer Response and EMI Sensing Technique. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 4455, 16 dez. 2018.

JUNIOR, P. O. C. et al. Feature extraction using frequency spectrum and time domain analysis of vibration signals to monitoring advanced ceramic in grinding process. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 1, p. 1–8, 1 jan. 2019.

KANNAN, K.; ARUNACHALAM, N. Grinding wheel redress life estimation using force and surface texture analysis. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 1439–1444, 2018.

KAPHLE, M. **Analysis of acoustic emission data for accurate damage assessment for structural health monitoring applications**. [s.l.] Queensland University of Technology, 2012.

KLOCKE, F. et al. Modelling of the Grinding Wheel Structure Depending on the Volumetric Composition. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 276–280, 2016.

KUNDRÁK, J. et al. Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method. **Journal of Advanced Research**, v. 7, n. 6, p. 1057–1064, nov. 2016.

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

LEE, D. E. et al. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 176–188, fev. 2006.

LEZANSKI, P. An intelligent system for grinding wheel condition monitoring. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 3, p. 258–263, fev. 2001.

LI, F.; PENG, H.; MENG, G. Quantitative damage image construction in plate structures using a circular PZT array and lamb waves. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 214, p. 66–73, 2014.

LI, H. N. et al. Detailed modeling of cutting forces in grinding process considering variable stages of grain-workpiece micro interactions. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 126, p. 319–339, jun. 2017.

LIANG, S. Y.; HECKER, R. L.; LANDERS, R. G. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 126, n. 2, p. 297, 2004.

LIAO, T. W. et al. Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 22, n. 1, p. 217–232, 2008.

LIU, C.-S.; LI, Y.-A. Evaluation of grinding wheel loading phenomena by using acoustic emission signals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, n. 5–8, p. 1109–1117, 16 nov. 2018.

LOPES, W. N. et al. Digital Signal Processing of Acoustic Emission Signals Using Power Spectral Density and Counts Statistic Applied to Single-Point Dressing Operation. **IET Science, Measurement & Technology**, p. 15, 2017.

LUNT, A. J. G.; KORSUNSKY, A. M. A review of micro-scale focused ion beam milling and digital image correlation analysis for residual stress evaluation and error estimation. **Surface and Coatings Technology**, v. 283, p. 373–388, 2015.

MADANCHI, N.; WINTER, M.; HERRMANN, C. Cutting Fluid Drag-out and Exhaust Air in Grinding Processes: Influence on the Eco-efficiency. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 329–334, 2015.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Thecnology:Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2<sup>a</sup> ed. New York: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

MANOJKUMAR, K.; GHOSH, A. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 237, p. 55–64, nov. 2016.

MARCHI, M. et al. Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements. **Measurement Science and Technology**, v. 26, n. 4, p. 45601, 2015.

MARINESCU, I. I. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007.

MARTINS, C. H. R. et al. Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 3, p. 667–679, mar. 2014.

MOIA, D. F. G. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 2, p. 627–640, mar. 2015.

NAKAI, M. E. et al. Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 20, p. 7026–7035, 2015.

NASCIMENTO LOPES, W. et al. Digital signal processing of acoustic emission signals using power spectral density and counts statistic applied to single-point dressing operation. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 11, n. 5, p. 631–636, 1 ago. 2017.

OLIVEIRA, D. DE J. et al. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 12, p. 2559–2568, dez. 2012.

OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D. A. Dimensional characterization of grinding wheel through acoustic emission. **CIRP, 43 Cirp Annals – Manufacturing Technology**, v. 43, n. 2, p. 291–294., 1994.

OLIVEIRA, J. F. G.; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 217–220, 2001.

OLIVEIRA, J. F. G.; FRANÇA, T. V.; WANG, J. P. Experimental analysis of wheel/workpiece dynamic interactions in grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 329–332, 2008.

PALMER, J. et al. An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing. **Journal of Manufacturing Processes**,

v. 31, p. 348–355, jan. 2018.

PAN, B. et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 6, 2009.

PAN, B.; XIE, H.; WANG, Z. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching. **Applied Optics**, v. 49, n. 28, p. 5501, 2010.

PATIL, S. S.; BHALERAO, Y. J. **Ranking of vitrified grinding wheel parameters by using analytical hierarchical process (AHP) for surface roughness of work piece in grinding operation**. 2017 International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems (AMIAMS). **Anais...IEEE**, fev. 2017

PATNAIK DURGUMAHANTI, U. S.; SINGH, V.; VENKATESWARA RAO, P. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 3, p. 231–240, mar. 2010.

PEREIRA, W. X.; DINIZ, A. E.; HASSUI, A. Comparing different plunge cylindrical grinding cycles based on workpiece roughness and process vibration. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 31, n. 2, jun. 2009.

QI, J. et al. **Research on the adaptive adjustment of the parameters in grinding process**. 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). **Anais...IEEE**, ago. 2016

RIBEIRO, D. M. S. et al. Low-Cost Piezoelectric Transducer Applied To Workpiece Surface Monitoring in Grinding Process. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM**, v. 23, n. 1–10, 2015.

RIBEIRO, D. M. S. et al. Spectra Measurements Using Piezoelectric Diaphragms to Detect Burn in Grinding Process. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 11, p. 3052–3063, nov. 2017.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 2. ed. Burlington: William Andrew, 2013.

ROWE, W. B. Grinding Wheel Dressing. In: **Principles of Modern Grinding Technology**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 63–82.

SAEED V. VASEGHI. **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Inc, 2000.

SILVA DE FREITAS, E.; GUIMARÃES BAPTISTA, F. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 238, p. 220–228, 2016.

SILVA, E. J. et al. Manufacturing of structured surfaces via grinding. **Journal of**

**Materials Processing Technology**, v. 243, p. 170–183, maio 2017.

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 170–175, fev. 2006.

SUYAMA, D. I.; DINIZ, A. E.; PEDERIVA, R. Tool vibration in internal turning of hardened steel using cBN tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 9–12, p. 2485–2495, 2 fev. 2017.

SYSTEME, V. **Acoustic Emission Sensors**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.atgndt.com/wp-content/uploads/2016/01/vallen-ae-sensors.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

TAUSENDFREUND, A. et al. Investigations on Material Loads during Grinding by Speckle Photography. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 2, n. 4, p. 71, 2018.

TAWAKOLI, T.; WESTKAEMPER, E.; RABIEY, M. Dry grinding by special conditioning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 3–4, p. 419–424, 31 jul. 2007.

TIAN, Y. B. et al. Development of portable power monitoring system and grinding analytical tool. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 188–197, jun. 2017.

VARGHESE, B. et al. Development of a Sensor-Integrated “Intelligent” Grinding Wheel for In-Process Monitoring. **CIRP Annals**, v. 49, n. 1, p. 231–234, 2000.

WANG, Y. et al. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel / workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids. **Tribology International**, v. 99, p. 198–210, 2016.

WARREN LIAO, T. et al. A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 3–4, p. 580–592, mar. 2007.

WARREN LIAO, T. Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, n. 1, p. 74–84, 2010.

WEBSTER, J.; DONG, W. P.; LINDSAY, R. Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNETT, R. Acoustic emission for processes control and monitoring of surface integrity during grinding. **CIRP Annals - Manufacturing**

**Technology**, v. 43, n. 1, p. 299–304, 1994.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 597–617, 2004.

WEGENER, K. et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011.

WEINGAERTNER, W. L.; BOARON, A. A Quick-Test Method to Determine the Grinding Wheel Topography Based on Acoustic Emission. **Advanced Materials Research**, v. 325, p. 282–286, 2011.

YANG, Z.; YU, Z. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1–4, p. 107–121, set. 2012.

YANG, Z.; YU, Z. Experimental study of burn classification and prediction using indirect method in surface grinding of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9–12, p. 2439–2449, 2013.

YOO, J.-C.; HAN, T. H. Fast Normalized Cross-Correlation. **Circuits, Systems and Signal Processing**, v. 28, n. 6, p. 819–843, 22 dez. 2009.