



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



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

*Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento Digital de Sinais
Laboratório de Usinagem por Abrasão*

WENDERSON NASCIMENTO LOPES

**MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS EM REBOLOS DE ÓXIDO
DE ALUMÍNIO POR MEIO DE DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO E
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS**

**Bauru
2020**

WENDERSON NASCIMENTO LOPES

**MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS EM REBOLOS DE ÓXIDO
DE ALUMÍNIO POR MEIO DE DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO E
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS**

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

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Titular Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Prof. Fábio Romano Lofrano Dotto

**Bauru
2020**

Lopes, Wenderson Nascimento.

Método de detecção de falhas em rebolos de óxido de alumínio por meio de diafragma piezelétrico e técnicas de processamento digital de / Wenderson Nascimento Lopes, 2020
129 f. il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar
Coorientador: Fábio Romano Lofrano Dotto

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Operação de dressagem. 2. Processamento digital de sinais. 3. Análise tempo-frequência. 4. Análise estatística. 5. Diafragma Piezelétrico. 6. Monitoramento. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE WENDERSON NASCIMENTO LOPES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 25 dias do mês de junho do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, 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. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Faculdade de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PAULO SERGIO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de WENDERSON NASCIMENTO LOPES, intitulada **MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS EM REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO POR MEIO DE DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO E TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS**. 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. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA

Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA

Prof. Dr. PAULO SERGIO DA SILVA

p/

p/

p/

p/



Dedico à minha família e amigos
que me apoiaram nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Aquele que é digno de toda Honra e Glória. Obrigado Senhor meu Deus por sempre ouvir minhas orações, por me guiar, por iluminar os meus caminhos, a minha vida e a vida de meus amigos e familiares. Obrigado Pai Amado, obrigado por cuidar dos mínimos detalhes da minha jornada, confio em Ti para me guiar por toda a eternidade.

Agradeço profundamente à minha amada mãe Nilva Batista do Nascimento que sempre me incentivou a lutar por meus objetivos a seguir em frente de cabeça erguida, ao meu pai Raimundo Lino Lopes e aos demais membros de minha família que me motivaram a seguir em frente com os meus estudos.

Agradeço ao meu avô José Batista do Nascimento que sempre zelou por minha educação, intervindo em um dos momentos cruciais da minha vida, o qual considero como ponto inicial de partida para a minha jornada de estudos e superações.

Agradeço à minha amada esposa "Kamila de Mello Lopes" pelo apoio, companheirismo, paciência, carinho e incentivo que têm me dedicado durante essa jornada. E ainda, à minha filha Kayla Yannis de Mello Lopes Arraes, agradeço a Deus por sua existência, a sua presença em minha vida me torna um ser humano melhor, a cada dia que passo ao seu lado percebo que o significado para a palavra amor é infinito.

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Roberto de Aguiar e coorientador Fábio Romano Lofrano Dotto, agradeço pela oportunidade de orientação concedida a mim e, principalmente, pela amizade que levarei para toda a vida.

Ao Professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi do Departamento de Engenharia Mecânica agradeço pela dedicação, disponibilidade, amizade e pela paciência que sempre teve para sanar as minhas dúvidas quanto aos processos mecânicos incorporados nesta pesquisa.

Ao meu bom amigo Danilo Marcus por toda a sua paciência, pelo precioso tempo e conhecimento que tem me concedido ao longo dos anos. Durante esse tempo, os momentos de aprendizado foram muitos, por isso, e principalmente pela amizade, eu deixo aqui registrado o meu agradecimento.

Agradeço ao Professor Breno Ortega Fernandez, um grande amigo que sempre me aconselhou. Os vossos conselhos e apoio ao longo dessa jornada, foi simplesmente fantástico.

Ao meu amigo Felipe Aparecido Alexandre (em memória) agradeço o apoio que sempre me deu e por ter sido um amigo

fiel para todas as horas e momentos. Você partiu deste mundo terreno, mas estará sempre em meu coração e no coração daqueles que sempre o apreciaram. Saudade Eterna!!!

Aos meus amigos Martin Aulestia Vieira, Pedro Oliveira Conceição Júnior e aos demais membros do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento Digital de Sinais, comandado pelo Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, agradeço por todo o apoio, parceria e amizade.

Ao amigo José Cláudio Lopes do Laboratório de Usinagem por Abrasão, agradeço imensamente pela ajuda e dedicação durante os ensaios experimentais.

Aos meus amigos do Laboratório de Qualidade de Energia Marco Aurélio, José Vital Ferraz Leão, Wallace Gabriel e ao Prof. Dr. André Luiz Andreoli, agradeço por todo o apoio e amizade.

Aos meus amigos do Laboratório de Transdutores e Aquisição de Dados Everaldo de Freitas, Danilo Budoya, Ricardo Zanne, Leandro Campeiro, Bruno Albuquerque e ao Prof. Dr. Fabrício Guimarães Batista, agradeço a parceria e amizade.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) por me conceder a oportunidade de dar continuidade e fechamento ao meu Doutorado.

"Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ONTEM e o outro se chama AMANHÃ, portanto, HOJE é o dia certo para AMAR, ACREDITAR, FAZER e, principalmente, VIVER"

- **Dalai Lama**

RESUMO

A dressagem é uma operação importante para o desempenho do processo de retificação. Em alguns casos, essa operação depende, exclusivamente, da experiência de um operador humano. Determinar o momento ótimo para a interromper a operação de dressagem, garantindo a correção de falhas na superfície de corte do rebolo, é o maior obstáculo enfrentado pelo operador. Por isso, o desenvolvimento de novos métodos que possibilitem a implementação de um sistema de monitoramento em tempo real se faz necessário para auxiliar o operador na tomada de decisão, garantir a qualidade, otimizar o processo e reduzir os custos de fabricação. Nesse contexto, foi proposto um novo método para quantificar a regularidade e prevenir falhas na superfície de corte de rebolos convencionais de óxido de alumínio no decorrer da operação de dressagem. O método foi baseado no diafragma piezelétrico de baixo custo, na análise tempo-frequência e em parâmetros estatísticos. Empregando um dressador de ponta única, ensaios de dressagem foram realizados em três rebolos de óxido de alumínio estruturalmente distintos. Os sinais gerados por uma emissão acústica (EA) e por um diafragma piezelétrico foram coletados e posteriormente processados aplicando o método proposto. Em diferentes condições de dressagem, os resultados mostraram a eficiência e a robustez do método proposto para quantificar a regularidade e prevenir falhas na superfície de corte de rebolos de óxido de alumínio estruturalmente distintos. Por fim, em todos os ensaios experimentais, os resultados obtidos para o diafragma piezelétrico indicaram uma forte correlação com os resultados obtidos para o sensor de EA, que já é consolidado para o monitoramento de processos de usinagem. Portanto, o diafragma piezelétrico pode ser considerado como uma alternativa de baixo custo para o monitoramento da superfície de corte de rebolos de óxido de alumínio durante a operação de dressagem usando o método proposto, contribuindo principalmente para a otimização do processo de retificação.

Palavras Chave: Operação de dressagem, processamento digital de sinais, análise tempo-frequência, análise estatística, diafragma piezelétrico, emissão acústica, monitoramento.

ABSTRACT

The dressing is an important operation for the grinding process performance. In some cases, this operation depends exclusively on the experience of a human operator. Determining the optimal time for the dressing operation stopping, ensuring fault correction on the cutting surface of the grinding wheel, is a great challenge faced by the operator. For this reason, the development of new methods that enable the implementation of a real-time monitoring system is necessary to assist the operator in the right decision making, guarantee the quality, optimize the process and reduce manufacturing costs. In this context, a new method was proposed in order to quantify the regularity and prevent flaws on the cutting surface of aluminum oxide grinding wheels during the dressing operation. The method was based on the low-cost piezoelectric diaphragm, time-frequency analysis, and statistical parameters. Dressings tests were carried out on three structurally distinct aluminum oxide grinding wheels using a single-point dresser. The signals generated by acoustic emission sensors and piezoelectric diaphragm were collected and later processed using the proposed method. In different dressing conditions, the results showed the efficiency and robustness of the proposed method to regularity quantify and prevent flaws in the cut surface of the structurally distinct grinding wheel of aluminum oxide. Finally, the obtained results for the piezoelectric diaphragm showed a strong correlation with the AE sensor results for every experimental test, which is a traditional sensor widely used in the monitoring of machining processes. Therefore, the piezoelectric diaphragm considered can be a low-cost alternative for monitoring the cutting surface of aluminum oxide grinding wheels during the dressing operation using the proposed method, mainly contributing to the optimization of the grinding process.

Keywords: Dressing operation, digital signal processing, time-frequency analysis, statistical analysis, piezoelectric diaphragm, acoustic emission, monitoring.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xiii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	xvii
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
Capítulo 2 – ESTADO DA ARTE	23
2.1. Processo de Retificação Tangencial Plana	23
2.1.1 <i>Especificação dos rebolos convencionais</i>	<i>26</i>
2.1.2 <i>Alteração na Superfície de corte do rebolo</i>	<i>28</i>
2.2. Operação de Dressagem de Rebolos Convencionais	29
2.2.1. <i>Passo de dressagem</i>	<i>32</i>
2.2.2. <i>Grau de recobrimento</i>	<i>32</i>
2.2.3. <i>Agressividade do Rebolo</i>	<i>33</i>
2.3. Trabalhos Relacionados ao Monitoramento do Rebolo	34
2.4. Sensores Aplicados ao Monitoramento Indireto	37
2.4.1. <i>Sensor de Emissão Acústica</i>	<i>38</i>
2.4.2. <i>Diafragma Piezelétrico de baixo custo</i>	<i>39</i>
2.5. Ferramentas para o Processamento Digital de Sinais	41
2.5.1. <i>Análise no Domínio da Frequência</i>	<i>42</i>
2.5.2. <i>Análise no Domínio Tempo-Frequência</i>	<i>43</i>
2.5.3. <i>Relação de Potência – ROP</i>	<i>44</i>
2.5.4. <i>Coeficiente de Correlação de Pearson e de Determinação</i>	<i>46</i>
Capítulo 3 – MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1. Material e Equipamentos: Ensaios preliminares	50
3.1.1 <i>Aferição da Agressividade</i>	<i>51</i>
3.2. Ensaios Definitivos: Empastamento e Dressagem dos Rebolos	52
3.2.1. <i>Volume de Material Removido do Rebolo</i>	<i>56</i>
3.3. Processamento Digital dos Sinais de EA e PZT	57
3.3.1 <i>Reamostragem dos Sinais de EA e PZT</i>	<i>57</i>
3.3.2. <i>Obtenção dos Espectrogramas da STFT</i>	<i>58</i>
3.3.3. <i>Relação de Potência de Tempo-Frequência</i>	<i>60</i>
3.3.4. <i>Relação de Potência de Tempo-Frequência Cumulativa Normalizada</i>	<i>65</i>
3.3.5. <i>Fator de Forma do Rebolo – WSF</i>	<i>67</i>
3.3.6. <i>Coeficiente de Correlação entre Curvas</i>	<i>70</i>

3.4. Ensaio de Verificação do Método	71
Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1. Resultados Obtidos para o Rebolo R100: 38A.100.LVH	73
4.1.1. Agressividade do Rebolo em Função do Volume de Material Removido.....	73
4.1.2. Análise do Conteúdo Harmônico dos Sinais Originais de EA e PZT.....	75
4.1.3. Sinais Originais de EA e PZT Reamostrados	77
4.1.4. Análise Tempo-Frequências dos Sinais de EA e PZT Reamostrados.....	79
4.1.5. ROP_{STFT} Normalizada/Cumulativa dos Sinais de EA e PZT Reamostrados.....	83
4.1.6. Fator de Forma do Rebolo - WSF	87
4.2. Resultados Obtidos para o Rebolo R150: 38A.150.LVH	88
4.2.1. Agressividade do Rebolo em Função do Volume de Material Removido.....	89
4.2.2. Análise do Conteúdo Harmônico dos Sinais Originais de EA e PZT.....	90
4.2.3. Sinais originais de EA e PZT Reamostrados	92
4.2.4. Análise Tempo-Frequências dos Sinais de EA e PZT Reamostrados.....	93
4.2.5. ROP_{STFT} Normalizada/Cumulativa dos Sinais de EA e PZT Reamostrados.....	96
4.2.6. Fator de Forma do Rebolo - WSF	99
4.3. Verificação do Método	101
Capítulo 5 - CONCLUSÃO.....	108
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	109
REFERÊNCIAS.....	110
APÊNDICES.....	127
Apêndice A	127
Produção Científica Relacionada com a Área de desenvolvimento da Tese.....	127

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Elementos de um sistema básico de retificação de superfície plana adaptado de (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014)	24
Figura 2.	Especificação de rebolos com abrasivos convencionais: adaptado de (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014)	27
Figura 3.	(a) principais parâmetros envolvidos da operação de dressagem adaptado e (b) macroefeito de dressagem adaptado de (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014)	30
Figura 4.	Medição de agressividade: (a) sistema para a medição de agressividade e (b) são as curvas usadas para cálculo de agressividade do rebolo (BIANCHI et al., 2011)	33
Figura 5.	Monitoramento via técnica de EA adaptado de (GROSSE; OHTSU, 2008)	39
Figura 6.	Diafragmas piezoelétricos da empresa Murata (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016)	41
Figura 7.	Fluxograma que descreve a síntese da metodologia empregada e dos resultados obtidos nesta pesquisa	49
Figura 8.	Esquemático do banco de ensaios.....	50
Figura 9.	Banco de ensaios usado para mensurar a agressividade dos rebolos: (a) sensor de deslocamento e (b) registrador eletrônico	51
Figura 10.	Aferição da largura de atuação do dressador.....	54
Figura 11.	Fluxograma simplificado do procedimento executado para obter o fator de forma do rebolo	57
Figura 12.	Algoritmo proposto para ajustar o comprimento da janela usada para computar a STFT	59
Figura 13.	Seleção automática da faixa de frequências n_1 (início da faixa) até n_2 (fim da faixa).....	63
Figura 14.	Obtenção dos vetores ROP_{STFT} a partir dos coeficientes da STFT	63
Figura 15.	Espectrograma dos ensaios preliminares de dressagem	64
Figura 16.	Vetores ROP_{STFT} obtidos para os espectrogramas da Figura 15	64
Figura 17.	Vetores ROP_{STFT} (a) e vetores ROP_{STFT} normalizados (b)	66
Figura 18.	Somatório cumulativo dos vetores ROP_{NC} mostrados na Figura 16 e do vetor DC de referência	67
Figura 19.	Parâmetro WSF: limites críticos.....	70

Figura 20.	Agressividade do rebolo para os conjuntos de ensaios: R100A, R100B e R100C	74
Figura 21.	Conteúdo harmônico dos sinais de EA e PZT para o rebolo R100	76
Figura 22.	Sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100	78
Figura 23.	Sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100	78
Figura 24.	Imagens da superfície de corte do rebolo R100 antes de iniciar o ensaio de dressagem e após finalização do ensaio de dressagem	80
Figura 25.	Espectrogramas dos sinais de EA para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C	81
Figura 26.	Espectrograma dos sinais PZT para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C	82
Figura 27.	ROP_{STFT} dos sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100	84
Figura 28.	ROP_{STFT} dos sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100	85
Figura 29.	Fator de forma do rebolo R100 para os sinais de EA e PZT dos conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C	87
Figura 30.	Agressividade do rebolo R150 para os conjuntos de ensaios: R150A, R150B e R150C	90
Figura 31.	Conteúdo harmônico dos sinais originais de EA e PZT para o rebolo R150	91
Figura 32.	Sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150	92
Figura 33.	Sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150	93
Figura 34.	Imagens da superfície de corte do rebolo R100 antes de iniciar o ensaio de dressagem e após a finalização do ensaio de dressagem	94
Figura 35.	Espectrograma dos sinais de EA para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C	95
Figura 36.	Espectrograma dos sinais PZT para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C	96
Figura 37.	ROP_{STFT} dos sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150	97
Figura 38.	ROP_{STFT} dos sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150	98
Figura 39.	Fator de forma do rebolo R150 para os sinais de EA e PZT dos conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C	100

Figura 40.	Conteúdo harmônico dos (a) sinais de EA e (b) PZT coletados no ensaio de dressagem do rebolo R100	102
Figura 41.	Sinais de EA e PZT após a reamostragem digital.	103
Figura 42.	Sinais de EA e PZT reamostrados e seus respectivos espectrogramas	104
Figura 43.	ROP_{STFT} dos sinais de EA e PZT coletados no ensaio de dressagem realizado rebolo R150.6	105
Figura 44.	Fator de forma do rebolo R150.6 calculado a partir dos sinais de EA e PZT	106
Figura 45.	Síntese da produção científica.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela I.	Parâmetros dos Ensaaios de Dressagem do Bloco A.....	53
Tabela II.	Parâmetros dos Ensaaios de Dressagem do Bloco B.....	53
Tabela III.	Parâmetros dos Ensaaios de Dressagem para a Verificação do Método	71

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

AA	Óxido de alumínio branco
ACO	Otimização de colônias de formigas
ANSI	<i>American National Standards Institution</i>
AR	Modelagem autorregressiva
B	Ligante resinoide
BF	Ligante resinoide reforçado
C	Carboneto de silício
DFT	Transformada Discreta de Fourier (<i>Discret Fourier Transform</i>)
DA	Óxido de alumínio cinza ou marrom
DR	Óxido de alumínio rosa
EA	Emissão acústica (<i>Acoustic Emission</i>)
EMI	Método da impedância eletromecânica
FEPA	<i>Federation of European Producers of Abrasives</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
NDT	Teste não destrutivo
P _d	Número de passes de dressagem
PSD	Densidade Espectral de Potência (<i>Power Spectral Density</i>)
PZT	Diafragma piezelétrico de baixo custo
r	Coeficiente de correlação de Pearson
r ²	Coeficiente de determinação
R	Ligante de borracha
RF	Ligante de borracha reforçada
RFC	Reta de referência
R100	Rebolo com granulometria 100 mesh e porosidade (estrutura) de número 0(zero) na escala de 0 a 16
R150	Rebolo com granulometria 150 mesh e porosidade (estrutura) de número 0(zero) na escala de 0 a 16
R150.6	Rebolo com granulometria 150 mesh e porosidade (estrutura) de número 6 na escala de 0 a 16
ROP	Relação de Potência (<i>Ratio of power</i>)
ROP _{STFT}	Relação de Potência de Tempo-Frequência

ROP _N	Relação de Potência de Tempo-Frequência Normalizada
ROP _{NC}	Relação de Potência de Tempo-Frequência Normalizada de Valores Cumulativos
RPM	Rotação por minuto
S	Ligante silicoso
SG	Óxido de alumínio cerâmico Seed Gel
STFT	Transformada de Fourier de Tempo Curto (<i>Short Time Fourier Transform</i>)
TCM	Monitoramento da condição da ferramenta
U _d	Grau de recobrimento de dressagem
V	Ligante vitrificado
VMR	Volume de material removido do rebolo ao longo da operação de dressagem
WSF	Fator de Forma do Rebolo
ZS	Óxido de alumínio zirconado

a _e	Penetração de trabalho de retificação [μm]
a _d	Profundidade de dressagem [μm]
b _d	Largura de atuação do dressador [mm]
d _s	Diâmetro externo do Rebolo [mm]
F _a	Força axil de retificação [N]
F _n	Força normal de retificação [N]
F _N	Força normal aplicada na balança de medição agressividade dos rebolos [N]
F _s	Frequência de Amostragem [Hz]
F _t	Força tangencial de retificação [N]
N _s	Rotação do eixo em que o rebolo está acoplado [RPM]
K	Agressividade do Rebolo [mm^3/Ns]
S _d	Passo de dressagem [mm]
t _d	Tempo de Dressagem [s]
v _d	Velocidade de dressagem [m/s]
v _s	Velocidade de corte do rebolo [m/s]
V _w	Velocidade da peça [m/min]
W _t	Ondulação Teórica (macroefeito de dressagem) [mm]

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O surgimento de novas tecnologias possibilita a otimização de processos de manufatura com maior confiabilidade, necessitando cada vez menos da interferência humana. Os componentes metalúrgicos e mecânicos manufaturados, geralmente, são submetidos a vários processos de usinagem, dentre eles: a furação, o torneamento, o fresamento, a retificação e outros. Nesse contexto, o monitoramento da condição da ferramenta (do inglês, *Tool Condition Monitoring* - TCM) é um aspecto muito importante para a otimização do processo de retificação, comumente utilizado no final da cadeia de usinagem (DURGUMAHANTI; VIJAYENDER; VENKATESWARA, 2010; MALKIN; GUO, 2008; NAKAI, M E et al., 2015). O propósito da retificação é garantir, no decorrer da usinagem, a melhor qualidade de superfície e tolerâncias geométricas e dimensionais rigorosas à peça (D'ADDONA et al., 2016, 2017; JIANG et al., 2013; NGUYEN; BUTLER, 2008; PUERTO et al., 2013; WEGENER et al., 2011). A preparação do rebolo é o fator mais importante para o desempenho do processo de retificação e influencia as forças de retificação, a taxa de remoção de material e a qualidade da superfície da peça. O principal método usado para preparar o rebolo é chamado de operação de dressagem.

Durante a vida útil do rebolo, isto é, antes de descartá-lo ou substituí-lo, várias operações de dressagem são realizadas para uniformizar a sua superfície de corte, remover cavacos (limpando os poros) e grãos abrasivos gastos e, ainda, restabelecer a sua agressividade (ROWE, W BRIAN, 2014). A operação de dressagem é essencial para a correção de falhas ocasionadas na superfície de corte do rebolo e para garantir a qualidade da superfície de peças submetidas ao processo de retificação (CHEN; LIMCHIMCHOL, 2006). Por isso, pesquisadores da área mantém o slogan: "retificação é dressagem" (DENG; XU, 2019; WEGENER et al., 2011). Durante o processo de retificação, as principais falhas ocasionadas no rebolo devido ao desgaste da sua camada abrasiva são: (i) a excentricidade, (ii) a conicidade e (iii) irregularidades na superfície de corte do rebolo, causada devido ao desgaste da camada abrasiva (grãos, poros e ligante). Essas falhas são corrigidas pela operação de dressagem, entretanto, existem outras falhas que não podem ser corrigidas apenas

dressando o rebolo, tais como: o desbalanceamento e empeno, mais comuns em rebolos convencionais.

O monitoramento da superfície de corte do rebolo durante a operação de dressagem é um tópico científico de grande interesse acadêmico e industrial. Pesquisas direcionadas ao monitoramento do rebolo visam tanto a otimização do processo de retificação quanto a redução de custos de fabricação. Nesse contexto, desde 1984 sensores de emissão acústica têm sido empregados para o monitoramento indireto de rebolos convencionais tanto durante o processo de retificação (para evitar que danos sejam ocasionados a peça) quanto ao longo da operação de dressagem, a fim de assegurar que o rebolo esteja adequado para o uso no processo de retificação (ALEXANDRE et al., 2018; BADGER; MURPHY; O'DONNELL, 2018; DE OLIVEIRA, J.F. GOMES; DORNFELD, 2001; DING et al., 2019; DORNFELD, D.; CAI, 1984; INASAKI; OKAMURA, 1985; LOPES et al., 2017; MIRANDA et al., 2015; MOIA et al., 2015). Além dos sensores de EA, outro sensor empregado para o monitoramento da operação de dressagem foi o diafragma piezelétrico de baixo custo. Esse sensor foi usado por Dotto et al. (2019) para obter imagens acústicas da superfície de corte de um rebolo convencional de óxido de alumínio. No entanto, sem a preocupação de observar de que modo as frequências dos sinais gerados pelo diafragma piezelétrico estão distribuídas no tempo, e ainda, qual a relação desse conteúdo espectral com algumas características do rebolo, tais como: a regularidade da sua superfície de corte e sua condição de afiação.

Diferente do trabalho de Dotto et al. (2019), o objetivo desta pesquisa é propor um método baseado em análise tempo-frequência e em parâmetros estatísticos para quantificar a regularidade e prevenir falhas na superfície de corte de rebolos convencionais de óxido de alumínio no decorrer da operação dressagem usando dressador de ponta única e diafragma piezelétrico de baixo custo. Até o presente momento, nenhuma menção foi relatada na literatura sobre o uso do diafragma piezelétrico para prevenir falhas em rebolos convencionais a partir do monitoramento da regularidade da sua superfície de corte no decorrer da operação de dressagem. Neste trabalho, as falhas investigadas referem-se à excentricidade, conicidade e irregularidade da superfície de corte do rebolo. Essas falhas são ocasionadas nos rebolos

tanto no seu processo de fabricação quanto no seu uso durante o processo de retificação.

Nesta pesquisa, o diafragma piezelétrico é usado na forma passiva para a detecção de ondas elásticas transitórias relacionadas às falhas dos rebolos de óxido de alumínio. Ensaios de dressagem foram realizados e os sinais gerados pelo sensor de EA e pelo diafragma piezelétrico foram coletados e, em seguida, processados. Com vista a medir a confiabilidade e robustez dos resultados obtidos para o diafragma piezelétrico, esses são comparados com os resultados obtidos para o sensor de EA, o qual é comumente utilizado para o monitoramento do processo de retificação. Os sinais do diafragma piezelétrico fornecem diversas informações sobre as falhas características dos rebolos: excentricidade, irregularidade e conicidade da superfície de corte. A análise no domínio tempo-frequência é aplicada para a extração de informações relacionadas às falhas ocasionadas na superfície de corte do rebolo. Além disso, são usadas outras técnicas de processamento digital de sinais auxiliadas por parâmetros estatísticos com vista a tornar o método de prevenção de falhas mais robusto e confiável.

A presente pesquisa se difere de outras nos seguintes aspectos: (i) Nenhuma menção foi relatada na literatura sobre métodos generalizados para o monitoramento da operação de dressagem de rebolos convencionais. Isso se deve principalmente à complexidade dessa ferramenta de retificação: diversos tamanhos, formas e tipos de grãos abrasivos, diversos tipos de ligantes, variação de porosidade e de dureza, entre outras características; (ii) A utilização do diafragma piezelétrico para o monitoramento da regularidade da superfície de corte de rebolos com vista a prevenir falhas na operação de dressagem ainda não foi relatado na literatura; (iii) A análise tempo-frequência de sinais gerados com o diafragma piezelétrico e com sensor de emissão acústica (EA) ainda não foi alvo de pesquisas para monitorar e prevenir falhas em rebolos convencionais no decorrer da operação de dressagem. Esse tipo de análise possui potencial para a identificação dos padrões espectrais característicos dessa operação com vista a desenvolver novas metodologias de monitoramento e, assim, contribuir para a otimização do processo de retificação; (iv) A estatística relação de potência (do inglês, *ratio of power* - ROP), aliada a análise tempo-frequência de sinais de EA e do diafragma

piezelétrico, ainda não foi aplicada para o monitoramento e/ou prevenção de falhas em rebolos convencionais no decorrer da operação de dressagem; (v) Ademais, o método baseado em análise tempo-frequência e em parâmetros estatísticos para quantificar a regularidade e prevenir falhas em rebolos convencionais no decorrer da operação de dressagem é inédito tanto no uso de sinais oriundos de sensores de emissão acústica quanto para o uso de sinais advindos de diafragmas piezelétricos; (vi) Por fim, a aplicação de funções cumulativas por meio de variações da estatística relação de potência (ROP) distingue este trabalho de outros constantes na literatura.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

Neste capítulo será realizada uma breve revisão sobre o processo de retificação e os impactos decorrente da operação de dressagem do rebolo no seu desempenho. Ademais, também neste capítulo serão revistos os temas: (i) processo de retificação tangencial plana; (ii) operação de dressagem de rebolos convencionais; (iii) trabalhos relacionados ao monitoramento do rebolo; (iv) sensores aplicados ao monitoramento indireto; e por fim, (v) as ferramentas de processamento digital de sinais empregadas nesta pesquisa.

2.1. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA

A retificação de superfície é um dos processos de usinagem mais antigos e mais utilizados. Até o momento, ainda existem poucas alternativas disponíveis para a produção de superfícies lisas e planas que satisfaçam às restrições técnicas e econômicas (LEONESIO; BIANCHI; CAU, 2018).

O processo de retificação é agrupado em duas classes principais, a saber: (i) a retificação de superfícies planas e (ii) a retificação de superfícies cilíndricas (ROWE, W BRIAN, 2014). Basicamente, o sistema mecânico da retificação de superfície é composto por máquina-ferramenta, rebolo, peça e fixações. O comportamento estático e dinâmico desse sistema influencia fortemente na qualidade superficial da peça que é a resultante do processo de retificação (LEONESIO; BIANCHI; CAU, 2018).

A máquina retificadora, o rebolo, a peça, o fluido de corte e o cavaco são classificados por Marinescu et al. (2016) e por Malkin e Guo (2018) como os elementos básicos da retificação de superfície, os quais são ilustrados na **Figura 1**. Ademais, os autores Marinescu et al. (2016) afirmam que o dressador usado para condicionar o rebolo também é considerado como um elemento básico da retificação de superfície.

O rebolo é montado em um par de flanges balanceada, a qual é posteriormente acoplada ao eixo de acionamento da máquina retificadora (ROWE, W BRIAN, 2010). Posteriormente, por meio de uma operação denominada de dressagem, o rebolo é condicionado para o uso na retificação. Nesse processo deve haver o equilíbrio entre a alta taxa de remoção da peça e a taxa de desgaste moderada do rebolo. O cavaco é formado a partir do material retirado da peça pelo rebolo e se

mistura com os resíduos do fluido de corte e com partículas do material abrasivo removido do rebolo. O fluido de corte possui a função de lubrificar a zona de corte, reduzir o atrito entre o rebolo e a peça e, ainda, minimizar o desgaste do rebolo. Ademais, o fluido de corte também possui a função de remover da zona de corte o cavaco e as partículas abrasivas removidas do rebolo (MARINESCU et al., 2016).

Até a década de 1960 a velocidade de corte do rebolo se estendia entre 25 e 35 m/s. Atualmente, os rebolos convencionais são usados com essa faixa de velocidade para uma ampla gama de aplicações. Entretanto, existem aplicações que demandam velocidades superiores a 35 m/s, chegando até 120 m/s em casos extremos. Os rebolos convencionais possuem um custo relativamente baixo e são amplamente empregados na indústria metalomecânica (MALKIN, GUO 2008 p. 44; ROWE, W BRIAN, 2010).

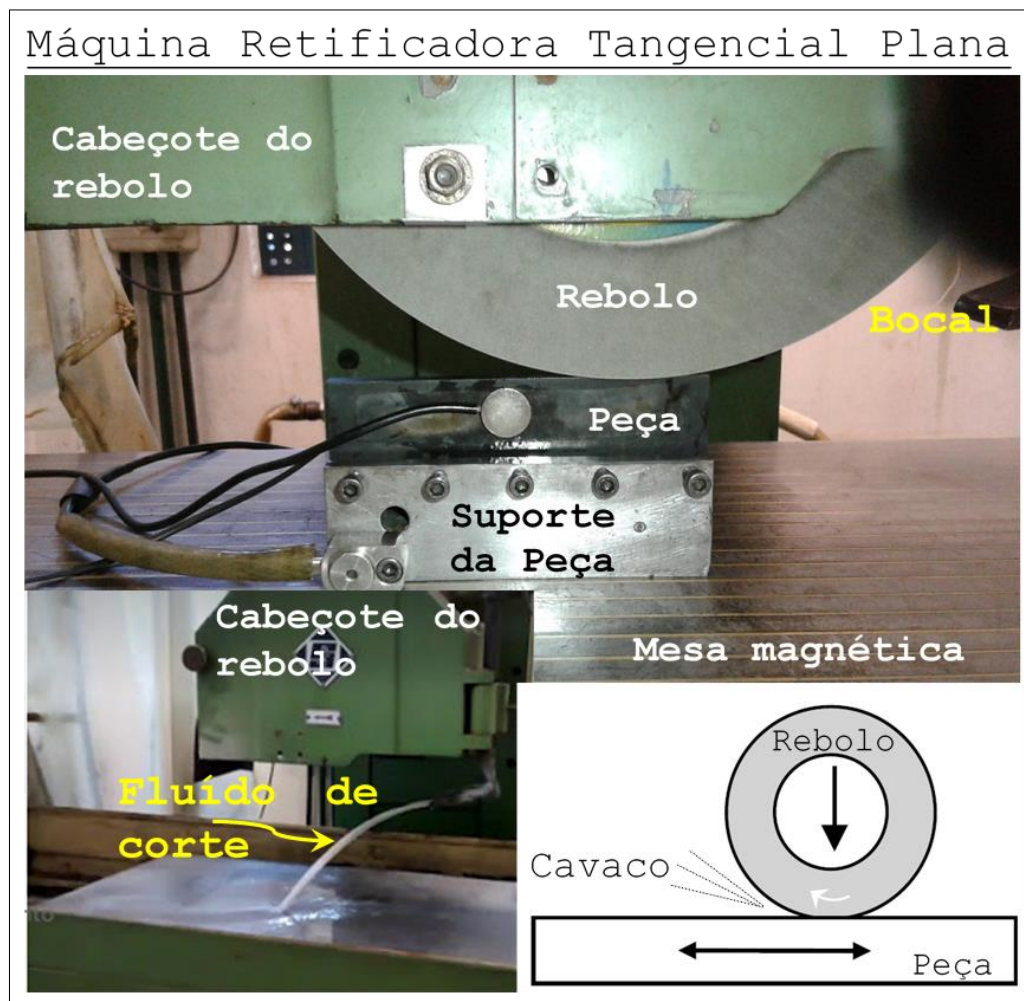


Figura 1. Elementos de um sistema básico de retificação de superfície plana adaptado de (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014)

De acordo com Wang et al. (2016), o processo de retificação envolve forças e velocidades de corte maiores que em outros processos de usinagem. Isto gera grandes quantidades de energias, sendo sua maior parte constituída por energia térmica. 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), entre outros.

Os principais parâmetros que afetam a qualidade da retificação de superfícies planas são: (i) penetração de trabalho (a_e), definida como a profundidade de material removido da peça por revolução do rebolo ou avanço de mesa. Esse parâmetro é medido no plano de trabalho e perpendicularmente à direção de avanço do rebolo, sua unidade de medida é em micrômetros [μm]; (ii) a Velocidade de corte do rebolo (v_s) que é medida em metros por segundos (m/s). O deslocamento do grão abrasivo localizado na superfície de corte do rebolo por uma variação de tempo determina a sua velocidade de corte; (iii) Velocidade da peça (v_w), que no processo de retificação plana é equivalente a velocidade de deslocamento longitudinal da mesa magnética; por fim, (iv) a espessura equivalente de corte (h_{eq}), que é a espessura do material removido ao longo de uma revolução do rebolo ou ao longo do deslocamento longitudinal da mesa/peça. A espessura equivalente de corte relaciona facilmente as medidas dos parâmetros de retificação com os parâmetros de taxa de remoção. Pode ser observado que o aumento da penetração de trabalho e da velocidade da peça tende a aumentar o valor da espessura equivalente de corte enquanto o inverso ocorre quando há o aumento da velocidade de corte (MALKIN, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014).

A penetração de trabalho (a_e), a Velocidade de corte (v_s) e a Velocidade da peça (v_w) influenciam as forças de retificação medidas em Newton (N): (i) Força tangencial (F_t); (ii) Força normal (F_n) e (iii) Força axial (F_a). A força F_t afeta principalmente o consumo de energia e a vida útil do rebolo. A força F_n normal é perpendicular à superfície da ferramenta abrasiva, sendo muito maior que a força tangencial e atua de forma direta para reduzir a penetração de trabalho.

Ademias, a força normal é a principal responsável pelas deflexões da peça, da ferramenta abrasiva e da máquina em relação a superfície da peça. Por fim, a força F_a surge quando há movimentos laterais das ferramentas abrasivas (MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014).

O desempenho do processo de retificação é medido, principalmente, pela energia específica que é definida como a energia gasta por unidade de volume de material removido da peça (SINGH; VENKATESWARA RAO; GHOSH, 2012). De acordo com Rowe, Chen e Morgan (1993), o tipo de diamante usado na dressagem e as condições de dressagem do rebolo são fatores que afetam a agressividade e a topografia da sua superfície de corte. Consequentemente, influem a energia específica, as forças de retificação, a temperatura na zona de corte, a taxa de remoção de material e o desgaste ocasionado no rebolo.

2.1.1 ESPECIFICAÇÃO DOS REBOLOS CONVENCIONAIS

Os rebolos consistem em um arranjo de grãos abrasivos, ligante e poros (ROWE, W BRIAN, 2014). Esses são fabricados com diferentes tamanhos e tipos de grãos abrasivos que podem ser unidos por diversos tipos de ligante. O óxido de alumínio (Al_2O_3) e carboneto de silício (SiC) são os principais grãos abrasivos utilizados para a fabricação de rebolos convencionais. Os grãos de carboneto de silício comumente encontrados na composição de abrasivos são: (i) carboneto de silício preto (C) usado em Ferro fundido comum, metais não ferrosos, materiais não metálicos; E (ii) carboneto de silício verde (GC) usado na retificação de materiais não ferrosos e metal duro. No que diz respeito aos grãos de óxido de alumínio, alguns dos mais utilizados na composição de abrasivos são: (i) óxido de alumínio cinza ou marrom (DA) usado em aço-carbono, forjados, fundidos e outros; (ii) Óxido de Alumínio Branco (AA) usado em aços temperados, na construção de ferramentas de corte e outras finalidades; (iii) Óxido de Alumínio Rosa (DR) usado principalmente em retificação de grandes áreas de contato, em aços sensíveis ao calor, como inoxidáveis, dentre outras aplicações; (iv) óxido de alumínio cerâmico Seeded Gel (SG) indicado para operações de retífica interna, principalmente em fabricantes de rolamentos na retífica de pista e furo; (v) Óxido de alumínio zirconado (ZS) indicado para operações de

condicionamento de barras, placas e outros, em que a pressão de trabalho é extremamente elevada (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014). Esses grãos, geralmente, são unidos por ligantes vitrificados, resinoides ou resina epóxi. Além dos rebolos convencionais, cita-se também os rebolos superabrasivos que são produzidos a partir de abrasivos de diamante e de nitreto cúbico de boro (CBN) (MALKIN; GUO, 2008).

O tamanho do grão abrasivo pode variar de fabricante para fabricante. Entretanto, as duas normas-padrão para classificar o tamanho do grão abrasivo são: (i) a "American National Standards Institution (ANSI)" e (ii) a "Federation of European Producers of Abrasives (FEPA)". Na norma ANSI o tamanho do grão abrasivo é medido por peneiramento "mesh" e quanto maior o número de "mesh" menor o tamanho do grão abrasivo, vide **Figura 2**. Essa norma é amplamente usada para padronizar as especificações dos rebolos convencionais. Por outro lado, a norma FEPA se aplica a padronização das especificações dos rebolos superabrasivos (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014).

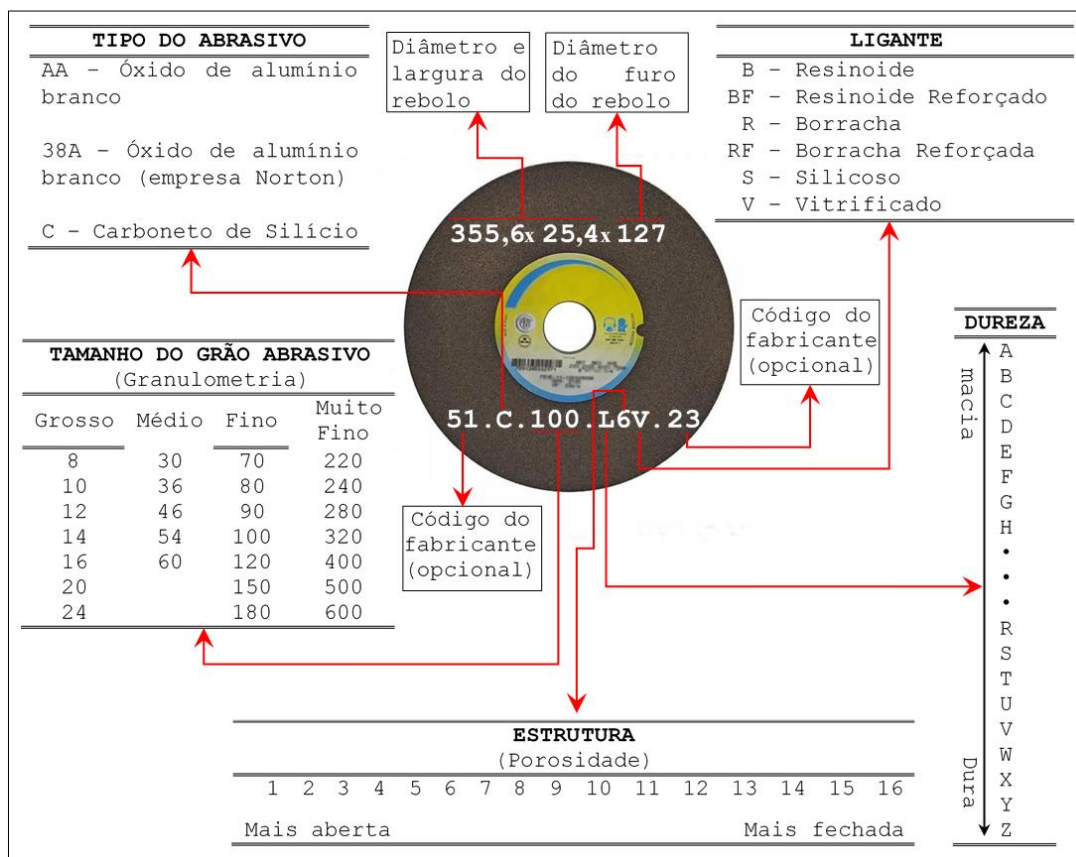


Figura 2. Especificação de rebolos com abrasivos convencionais: adaptado de (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014)

A norma FEPA, na especificação do rebolo, indica o tamanho do grão abrasivo em micrômetros. A especificação padronizada dos rebolos convencionais (**Figura 2**) incluem os seguintes parâmetros: (i) O código do fabricante: se necessário e de uso opcional; (ii) O tipo de abrasivo; (iii) O tamanho do grão abrasivo; (iv) A dureza do rebolo; (v) A estrutura/porosidade do rebolo; (vi) O tipo de ligante/aglomerante; e (vii) O código de identificação do fabricante: de uso opcional (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014).

2.1.2 ALTERAÇÃO NA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO

O processo de retificação desempenha um papel importante na qualidade do acabamento da superfície da peça (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016). Esse processo é complexo e depende de muitos fatores, como o rebolo, os parâmetros de retificação e de dressagem. Durante o processo de retificação, ao remover material da peça, inevitavelmente, o rebolo sofre o desgaste (falha). Isso ocasiona alterações significativas em sua topografia de corte e reduz a precisão no acabamento da superfície da peça (ANH TUNG et al., 2019; BRATAN; ROSHCHUPKIN; NOVIKOV, 2017; MARINESCU et al., 2016). Os autores Bratan, Roshchupkin e Novikov (2017) destacam que entre todos os elementos do sistema tecnológico de retificação, apenas o rebolo e a peça sofrem mudanças significativas em um período relativamente curto. Dentre esses dois elementos, o rebolo é apontado por Vladetskaya, Kharchenko e Vladetskii (2019) como o elo mais fraco do sistema. Portanto, demanda grande atenção quanto a condição de sua topografia de corte e afiação, pois durante o processo de retificação sua topografia de corte é transferida para a superfície da peça (BRATAN; ROSHCHUPKIN; NOVIKOV, 2017).

O desempenho do processo de retificação depende significativamente da preparação do rebolo (HADAD; SHARBATI, 2019). O rebolo é preparado por meio de uma operação chamada de dressagem. Essa também gera transformações topográficas na superfície de corte do rebolo e deve produzir uma topografia de corte adequada, de modo a garantir o melhor acabamento na superfície da peça e reduzir os desvios dimensionais. A quantidade de material a ser removido da peça, as forças de retificação e, principalmente, a qualidade da superfície da peça são fatores dependentes da dressagem.

Essa operação é essencial para garantir que o rebolo esteja adequado para o uso no processo de retificação (AGARWAL, 2016; LINKE, 2008; MALKIN; GUO, 2008; WEGENER et al., 2011).

A execução da operação de dressagem usando um dressador de ponta única é a técnica de dressagem mais simples e, geralmente, a melhor para produzir uma topografia de corte adequada no rebolo e garantir o seu desempenho eficiente na retificação (MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014). O dressador de ponta única é a ferramenta de dressagem mais empregada na indústria para condicionar o rebolo, pois, possui um custo relativamente baixo e é de fácil aquisição. Ademais, de acordo com Oliveira e Dornfeld (1994), o dressador de ponta única pode ser considerado como um apalpador de medição. Essa ferramenta pode ser usada para medir as irregularidades (desgaste na superfície de corte do rebolo) ocasionadas na superfície de corte do rebolo.

2.2. OPERAÇÃO DE DRESSAGEM DE REBOLOS CONVENCIONAIS

Como já mencionado, a dressagem é uma operação de condicionamento da superfície de corte do rebolo para restabelecer suas características geométricas e de afiação perdidas devido ao seu uso. A ferramenta de dressagem é chamada de dressador (MARINESCU et al., 2016). O dressador possui a função de remover os grãos gastos, os cavacos e outros resíduos alojadas nos poros do rebolo, eliminando as falhas e restabelecendo suas características geométricas e de afiação. O dressador é composto por duas partes: (i) um corpo de material metálico e (ii) pontas confeccionadas com diamantes: os quais podem ser naturais ou sintéticos. Existem vários tipos de dressadores, tais como: (i) dressador de ponta única, (ii) dressador conglomerado, (iii) dressador rotativo, entre outros (ANH TUNG et al., 2019; MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; PALMER et al., 2018; ROWE, W BRIAN, 2014). Na **Figura 3a** é exemplificado o dressador de ponta única.

A compreensão dos parâmetros de dressagem é importante para garantir o melhor desempenho do processo de retificação. Na **Figura 3a** e na **Figura 3b** são exemplificados os principais parâmetros da operação de dressagem de rebolos convencionais usando um dressador de ponta única. Os principais parâmetros dessa operação são a velocidade de corte (V_s), a velocidade de avanço do dressador ou velocidade de dressagem (V_d), a profundidade de dressagem (a_d), a largura de atuação do

dressador (b_d), o passo de dressagem (S_d) e o grau de recobrimento (U_d).

A ondulação teórica (W_t) é a altura do efeito de rosca gerado na superfície de corte do rebolo ao utilizar um dressador de ponta única, conforme exemplificado na **Figura 3b**. Essa ondulação possui relação com o macroefeito de dressagem. Outro efeito decorrente da operação de dressagem é o microefeito de dressagem. Esse está relacionado a fraturas ocasionadas nos grãos abrasivos e no ligante e, ainda, com o arrancamento dos grãos abrasivos da superfície de corte do rebolo (ROWE, W BRIAN, 2014).

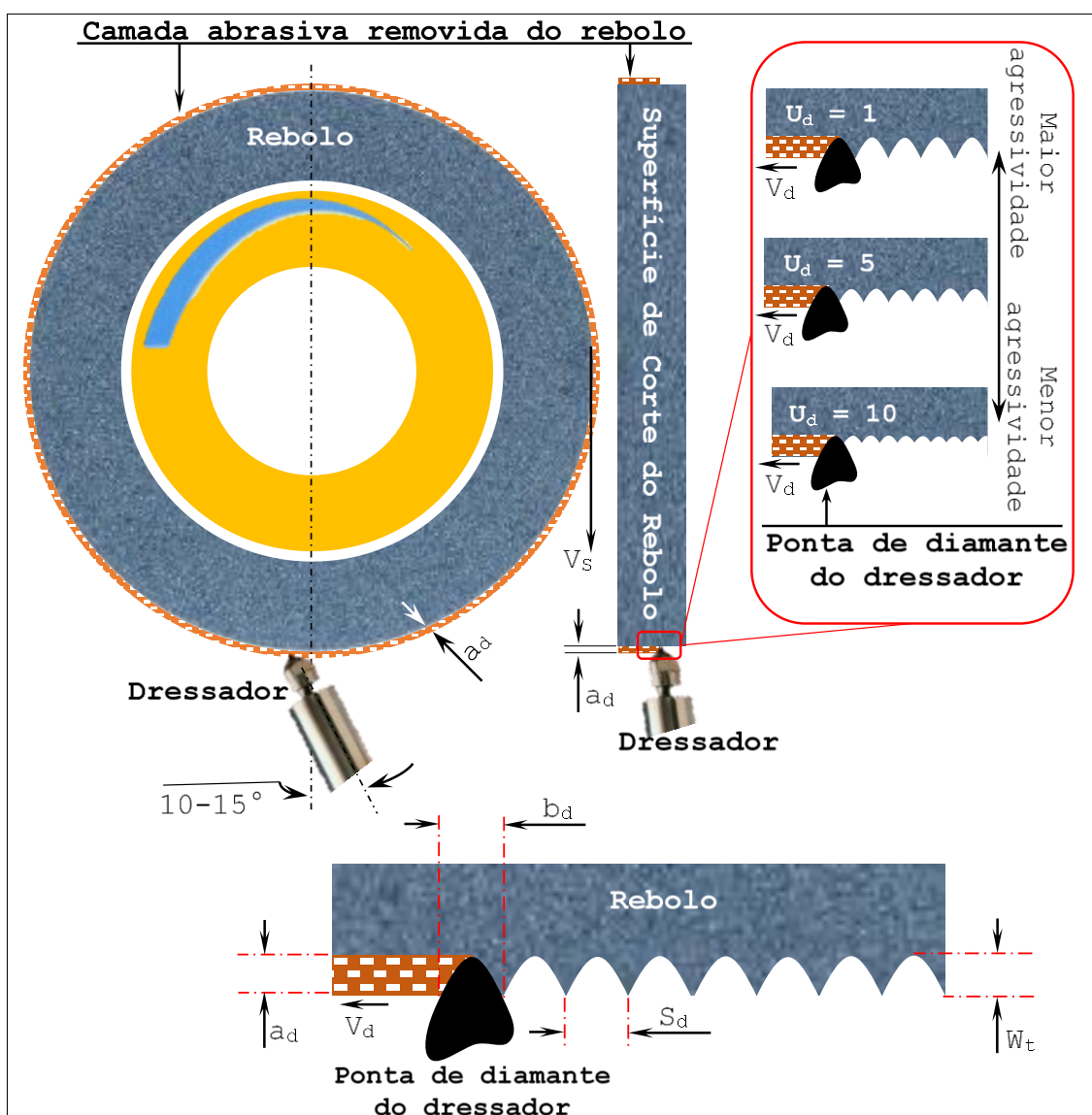


Figura 3. (a) principais parâmetros envolvidos da operação de dressagem adaptado de (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014)

A velocidade de corte do rebolo (V_s) depende da rotação (RPM) do eixo em que o rebolo está acoplado e do diâmetro do rebolo. Os rebolos convencionais fabricados com ligantes vitrificados geralmente trabalham com velocidades periféricas na faixa de 23m/s a 35m/s, dependendo da dureza e do formato do rebolo (MALKIN; GUO, 2008).

O deslocamento transversal da ponta de diamante do dressador ao longo da superfície de corte do rebolo é denominado de velocidade de dressagem (V_d). Os usuários de retificação devem determinar a velocidade de avanço do dressador de modo a garantir que toda a superfície de corte do rebolo se desloque sobre a ponta de diamante do dressador em movimento (MALKIN; GUO, 2008).

Na dressagem de rebolos convencionais com dressador de ponta única, a largura de atuação do dressador (b_d), geralmente, varia entre 0,5mm e 1,00mm. O parâmetro b_d é determinado a partir da profundidade de dressagem (a_d). De acordo com King e Hahn (1992, p. 96) a profundidade de dressagem pode variar de aproximadamente 1 μm para operações de acabamento extremamente fino até aproximadamente 50 μm para operações de desbaste. Os autores destacam que profundidades de dressagem acima de 50 μm não são recomendadas. Por outro lado, de acordo com os autores Marinescu et al. (2016, p. 170), a profundidade de dressagem deve ser mantida abaixo de 30 μm para operação de dressagem de rebolos convencionais de alumina. Valores de a_d acima de 30 μm apenas aumentam o desgaste da ponta de diamante do dressador e não proporcionam alterações significativas na superfície de corte do rebolo. Já de acordo com Malkin e Guo (2008, p. 86), na operação de dressagem usando dressador de ponta única, a profundidade de dressagem comumente empregada varia entre 10 μm e 30 μm .

Os autores Sinha et al. (2014) estudaram a influência da profundidade de dressagem nas forças de retificação e concluíram que tanto a força normal quanto a tangencial geradas no processo de retificação dependem fortemente da profundidade de dressagem. Na pesquisa, os autores concluem ainda que profundidades de dressagem entre 30 μm e 40 μm reduzem ao mínimo as forças geradas no processo de retificação.

2.2.1. PASSO DE DRESSAGEM

O passo de dressagem (S_d) e o formato da ponta de diamante do dressador influenciam no macroefeito de dressagem, sendo o passo de dressagem a largura da rosca formada na superfície do rebolo durante a operação de dressagem (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016; ROWE, W BRIAN, 2014), conforme exemplificado na **Figura 3b**. Esse parâmetro pode ser calculado pela equação (1).

$$S_d = \frac{\pi d_s V_d}{V_s} \quad (1)$$

em que V_d [mm/s] é a velocidade de avanço do dressador, V_s [mm/s] é a velocidade de corte do rebolo e d_s [mm] é o diâmetro do rebolo.

2.2.2. GRAU DE RECOBRIMENTO

O parâmetro grau de recobrimento (U_d) foi desenvolvido por König em 1980 e relaciona os parâmetros b_d e S_d com a topografia da superfície de corte do rebolo gerada a partir da dressagem (AGUIAR et al., 2009; BIANCHI et al., 2011; DE OLIVEIRA, J. F. G. et al., 1992; HASSUI; DINIZ, 2003; MARINESCU et al., 2016). Essa topografia determina a capacidade do rebolo de remover material da peça, isto é, define a sua agressividade. Valores de U_d igual ou muito próximo de 1(um) produzem a mais alta taxa de remoção de material, isto é, o rebolo atinge a sua agressividade máxima. Por outro lado, valores de U_d maiores que 1(um) torna o rebolo menos agressivo. O grau de recobrimento é definido na equação (2).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (2)$$

Os seguintes valores de sobreposição podem ser usados para aplicações gerais (MARINESCU et al., 2016):

- ✓ Retificação de desbaste $U_d = 2-3$;
- ✓ Retificação mediana $U_d = 3-4$;
- ✓ Retificação para acabamento $U_d = 6-8$.

Esses valores são aplicáveis à maioria das operações de dressagem transversal (MARINESCU et al., 2016).

O tempo de dressagem (t_d), isto é, o período em que a ponta de diamante do dressador permanece em contato com a superfície de corte do rebolo durante o passe de dressagem,

também é um parâmetro importante para a operação de dressagem. A equação (3) permite o cálculo deste parâmetro, mensurado em segundos.

$$t_d = \frac{L_R \cdot U_d \cdot 60}{N_s \cdot b_d} \quad (3)$$

em que U_d é o grau de recobrimento, L_R é a largura do rebolo em [mm], b_d é a largura de atuação do dressador em [mm] e N_s é a rotação do rebolo em [rpm].

2.2.3. AGRESSIVIDADE DO REBOLO

O meio mais utilizado para quantificar a agressividade do rebolo é o método do disco retificado proposto por Nakayama et al. (1980) e adaptado por Coelho (1991). Esse método foi recentemente empregado nos trabalhos de (ALEXANDRE et al., 2018; BIANCHI et al., 2011; LOPES et al., 2017; MOIA et al., 2015). Este método consiste na utilização de um equipamento semelhante a uma balança de peso, de modo que em uma das extremidades um disco cilíndrico é mantido fixo (sem rotação) e constantemente em contato com a superfície de corte do rebolo devido à uma força F_N resultante de pesos conhecidos. Desta forma, quando o rebolo entra em estado de rotação o disco é desgastado e isso ocasiona o seu deslocamento (Δ_s) ao longo do tempo, conforme exemplificado na **Figura 4a**. Transformação e regressão são aplicadas na curva de deslocamento versus tempo coletada, **Figura 4b**, permitindo que a agressividade (K) do rebolo possa ser determinada usando a equação (4). Basicamente, esse método quantifica a taxa de remoção de material por unidade de tempo.

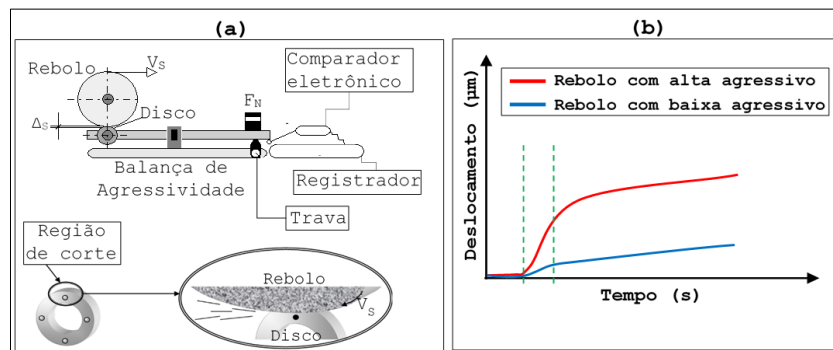


Figura 4. Medição de agressividade: (a) sistema para a medição de agressividade e (b) são as curvas usadas para cálculo de agressividade do rebolo (BIANCHI et al., 2011)

$$K = \frac{2b\sqrt{8r}}{3F_N} a^{2/3} \quad (4)$$

em que b e r são a largura e raio do disco respectivamente, F_N é a força normal aplicada na extremidade oposta ao disco; " a " é o gradiente da linha de regressão obtido a partir da curva característica de deslocamento versus $(t)^{2/3}$ ou curva característica de agressividade do rebolo; e t é o tempo de experimento ou tempo de contato do disco cilíndrico com a superfície de corte do rebolo.

Durante a vida útil do rebolo, isto é, antes de descartá-lo ou substituí-lo, várias operações de dressagem são realizadas no rebolo para remover cavacos (limpando os poros) e grãos abrasivos gastos, uniformizar a topografia de sua superfície de corte e restabelecer a agressividade (ROWE, W BRIAN, 2014). Essa operação garante a qualidade da superfície das peças submetidas ao processo de retificação (CHEN; LIMCHIMCHOL, 2006). Por esse motivo, pesquisadores da área mantém o slogan: "retificação é dressagem" (DENG; XU, 2019; WEGENER et al., 2011). Nesse contexto, o monitoramento do rebolo para determinar o momento certo de interromper a operação de dressagem, garantindo a correção de falhas, se faz necessário tanto para a otimização do processo de retificação quanto para redução do custo de fabricação.

2.3. TRABALHOS RELACIONADOS AO MONITORAMENTO DO REBOLO

Neste tópico será apresentada uma revisão específica dos trabalhos relacionados ao monitoramento do rebolo. Outros trabalhos que abordam o tema podem ser encontradas na literatura, como em Pande e Lal (1980); Mokbel e Maksoud (2000); Hwang et al. (2000); Lezanski (2001); Furutani et al. (2002); Lachance, Warkentin e Bauer (2003); Warren Liao et al. (2007); Guo et al. (2007); Kumar e Choudhury (2007); Liao et al. (2008); Bhuiyan e Choudhury (2014); Nakai et al. (2015a); Alexandre et al. (2018), entretanto, somente os mais relevantes para esta pesquisa foram considerados nesta revisão.

No trabalho de Oliveira e Dornfeld (1994) foi proposto um método para mensurar as características geométricas da superfície de corte do rebolo. Os autores usaram o nível de EA como um gatilho para a medição dimensional e um dressador de ponta única como um apalpador para estudar experimentalmente a interação entre a ferramenta de

dressagem e o rebolo. Os resultados apontam que a energia dos sinais de EA aumentam rapidamente tanto para a retificação não usual quanto para a condição desgastada do rebolo. Desta forma, é possível determinar o momento certo de interromper o processo de retificação para recondicionar o rebolo.

Um sistema de monitoramento baseado em sinais de EA e vibração para determinar a vida útil do rebolo foi proposto pelos autores Hassui et al. (1998). Experimentos usando um rebolo convencional e peças de aço endurecido foram realizados até que a superfície da peça atingisse valores de rugosidade considerados intoleráveis, acima de $1,6 \mu\text{m}$. Os resultados mostraram uma relação direta entre o fim da vida útil do rebolo e o aumento da rugosidade da peça.

Sistemas usando lógica *fuzzy* e neural foram desenvolvidos por Lezanski (2001) para classificar a condição de corte de rebolo de óxido de alumínio na retificação cilíndrica de aço-carbono 45, o qual utiliza como entrada sinais de EA, vibração, força e estatísticas derivadas desses sinais. Os resultados apontam que o melhor índice de desempenho dos sistemas *fuzzy* atingiu 83%, enquanto o sistema neural obteve 94,5% de desempenho.

Na investigação realizada por Lachance, Warkentin e Bauer (2003), foi desenvolvido um sistema automatizado para capturar imagens digitais do rebolo entre os ciclos de retificação, o qual possibilitou medir as áreas planas dos grãos abrasivos de um rebolo de óxido de alumínio por meio do processamento digital de imagens. Os autores destacam que as áreas planas dos grãos aumentam ao longo do tempo, exigindo maiores forças de retificação e geração de calor, o que ocasiona a queima da superfície da peça usinada.

Os autores Kwak e Há (2004a) propuseram uma técnica para demonstrar o comportamento do ruído mecânico e determinar o momento de interromper o processo de retificação para realizar a dressagem do rebolo. O método se baseou na decomposição de *Wavelet* discreta dos sinais de força obtidos por um dinamômetro em ensaios experimentais na retificação. Os resultados experimentais indicaram que a força de retificação aumenta linearmente com o número de peças usinadas.

Os autores Sutowski e Plichta (2006) realizaram uma investigação do desgaste do rebolo com base nas mudanças de parâmetros geométricos e no valor quadrático médio (*root*

mean square - RMS) dos sinais de emissão acústica e de força tangencial e normal. Os resultados mostraram que o RMS dos sinais de EA são eficientes para averiguar a capacidade de corte do rebolo. Os autores destacam o valor RMS obtido a partir dos sinais de EA está relacionado com as deformações ocorridas no material usinado e que o RMS captura a influência dos grãos abrasivos gastos no resultado do processo.

Métodos de seleção e extração de características dos sinais de EA e cinco classificadores para o monitoramento da condição do rebolo foram investigados por Warren Liao (2010). A decomposição por *Wavelet* discreta e a modelagem autorregressiva (AR) foram utilizadas para extrair as características dos sinais de EA. Os melhores subconjuntos de características foram encontrados para três métodos diferentes de seleção de características, sendo dois deles propostos e baseados na otimização de colônias de formigas (ACO) e do reconhecido método "*Sequential Forward Floating Selection*". Os resultados dos testes experimentais mostram a eficácia da extração e seleção de características empregados.

Nos trabalhos desenvolvidos por Moia et al. (2015) e Lopes et al. (2017), foram propostos métodos que classificam as condições de desgaste e de afiação do rebolo. Os métodos foram baseados em sinais gerados por um sensor de EA em ensaios experimentais de dressagem. Uma rede neural Perceptron multicamadas é empregada pelos autores Moia et al. (2015). Os resultados dos cálculos de estatísticas empregadas nos sinais originais de EA são utilizados como entradas para a rede. Diferente do trabalho desenvolvido pelos autores MOIA et al. (2015), o trabalho de Lopes et al. (2017) fez um estudo do conteúdo harmônico dos sinais de EA via densidade espectral de potência (do inglês, *power spectral density* - PSD). As bandas de frequências relacionadas com as condições de desgaste e de afiação do rebolo foram selecionadas. Os sinais foram filtrados nas bandas selecionadas e a estatística *counts* foi aplicada aos sinais filtrados e não filtrados. Assim, os autores concluíram que os sinais filtrados possuem maior relação com as condições de desgaste e de afiação do rebolo.

No que diz respeito ao monitoramento da operação de dressagem de rebolos convencionais de óxido de alumínio usando diafragma piezoelétrico de baixo custo, no ano de

2018 esse transdutor foi utilizado por JUNIOR, P. et al. (2018a/b) para avaliar o desgaste da ferramenta de dressagem, o qual é ocasionado por sucessivos passes de dressagem. Os autores propuseram uma nova técnica baseada no método da impedância eletromecânica (EMI), índices de danos e modelos neurais para detectar o desgaste ocasionado na ponta de diamante de um dressador. Por outro lado, os autores Dotto et al. (2019) propuseram um novo método para obter imagens da superfície de corte de rebolos convencionas de óxido de alumínio a partir de sinais coletados com sensor de emissão acústica e diafragma piezelétrico durante a operação de dressagem. Os autores discorrem que os resultados obtidos usando o diafragma piezelétrico foram tão eficientes quanto aos obtidos com o sensor de emissão acústica. A contribuição dos autores para a comunidade científica se restringiu à construção de mapas acústicos a partir dos sinais originais gerados pelo sensor de EA e pelo diafragma piezelétrico. Estes mapas fornecem informações de possíveis falhas ocasionadas na superfície de corte de rebolos convencionais. Entretanto a técnica ainda não foi validada para rebolos estruturalmente distintos. Além disso, as falhas tratadas neste trabalho foram inseridas propositalmente na superfície de corte do rebolo e não ocasionadas devido ao uso no processo de retificação.

Ressalta-se que a excentricidade, a conicidade e as irregularidades na superfície de corte do rebolo, geradas devido ao desgaste da sua camada abrasiva durante a retificação, são as principais falhas corrigidas pela dressagem. As falhas de desbalanceamento e empeno, mais comuns em rebolos convencionais, não podem ser corrigidas por esse processo.

2.4. SENSORES APLICADOS AO MONITORAMENTO INDIRETO

Teste não destrutivo (NDT) refere-se a ensaios realizados para avaliar a estabilidade e a condição interna de materiais, equipamentos e estruturas sem precisar destruí-los (SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE INSPECT, 2016). Nesse contexto, os principais sensores utilizados para o monitoramento não destrutivo ou monitoramento indireto de equipamentos/estruturas são: (i) sensores de emissão acústica (CARPINTERI; LACIDOGNA; PUGNO, 2007; KARPUSCHEWSKI; WEHMEIER; INASAKI, 2000; LINDLEY; PALMER; RICHARDS, 1978; MOIA et al., 2015; ROBERTS; TALEBZADEH, 2003; WEI et al.,

2019); (ii) sensores de vibração (HASSUI; DINIZ, 2003; LOPES, W.N. et al., 2019; THOMAZELLA et al., 2019); (iii) sensores de força (DENKENA et al., 2019; DORNFELD, D. A.; DEVRIES, 1990; SARAVANAPRIYAN; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 2001); (iv) sensores de potência elétrica (KWAK; HA, 2004b); e (v) diafragmas piezoelétricos de baixo custo (ALEXANDRE et al., 2019; VIERA et al., 2019; DOTTO et al., 2019; JUNIOR et al., 2018a, b; RIBEIRO et al., 2017).

2.4.1. SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA

Desde seu primeiro uso na década de 1950, a emissão acústica (EA) tornou-se um método amplamente empregado como testes não destrutivos. Esse método deve ser considerado como uma técnica passiva não destrutiva (**Figura 5**), devido à sua capacidade de identificar falhas em desenvolvimento. No modo passivo, as técnicas de EA frequentemente são usadas para detectar falhas em estruturas no seu estágio inicial, isto é, antes da estrutura entrar em colapso. Por outro lado, no monitoramento de condições e no monitoramento de processos de usinagem, o método de EA é comumente empregado para detectar, identificar e localizar falhas (DORNFELD, D., 1994; GROSSE; OHTSU, 2008; YANG et al., 2020).

Os sinais de emissão acústica (EA) possuem características variadas em função da fonte que gera esses sinais (GROSSE; OHTSU, 2008). A emissão acústica são ondas elásticas transitórias geradas na estrutura por uma fonte externa (impactos) ou interna (rachaduras, trincas e outras), vide **Figura 5**. Essa técnica pode fornecer informações de falhas em estruturas, as quais podem ser ocasionadas devido ao estresse, tensão, compressão, alterações mecânicas e outros. Fornece também informações de falhas em componentes submetidos a forças mecânicas ou cíclicas.

As principais aplicações usando emissão acústica envolvem a extração de informações das formas de onda originais aplicando diversas técnicas de processamento de sinais:

- i. Técnicas para extração de informações no domínio do tempo;
- ii. Técnicas para extração de informações no domínio da frequência;

- iii. Técnicas para extração de informações no domínio tempo-frequência.

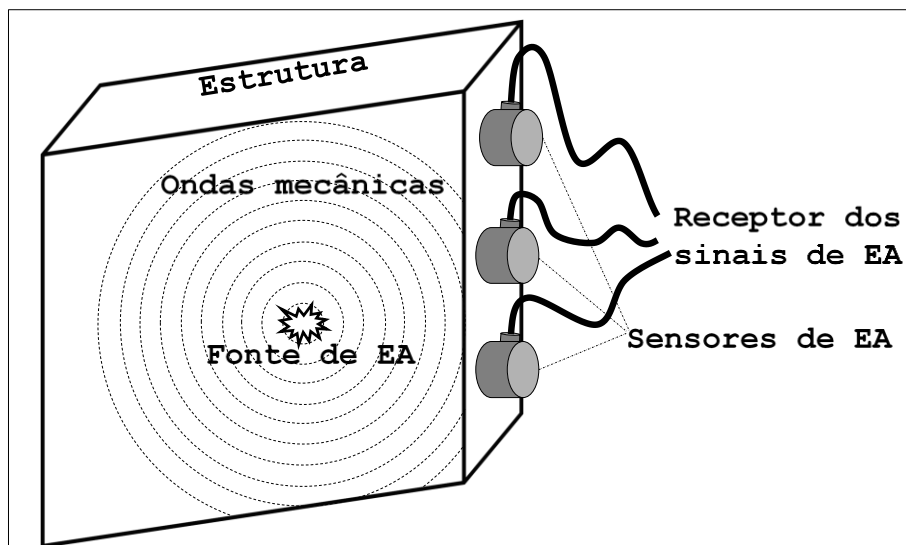


Figura 5. Monitoramento via técnica de EA adaptado de (GROSSE; OHTSU, 2008)

No monitoramento da condição ou monitoramento de processos, o sinal contendo ambas as condições (íntegra e com dano) é processado com o objetivo de identificar características que podem ser utilizadas para detectar e prevenir falhas (EATON et al., 2011; WEVERS, 1997; YANG et al., 2020). No processo de retificação, os sinais originais de emissão acústica carregam informações da máquina ferramenta, do rebolo e da peça usinada. As informações mais importantes se referem a:

- i. Falhas na máquina, tais como folgas e defeitos em rolamentos;
- ii. Falhas no rebolo como excentricidade, conicidade e desgaste da superfície de corte, empastamento (cavaco dentro dos poros do rebolo) da superfície de corte do rebolo e desgaste dos seus grãos abrasivos;
- iii. Erros de dressagem e desgaste do dressador;
- iv. Danos ocasionados a peça, tais como queima de retificação, alterações de rugosidade, alterações de dureza, dentre outros.

2.4.2. DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO DE BAIXO CUSTO

Os diafragmas piezelétricos são constituídos por um material cerâmico com propriedades piezelétricas acoplado a um metal, que pode ser latão ou liga de níquel, ambos com forma cilíndrica e com espessura muito fina. A cerâmica, que

é o material ativo, é revestida com uma fina película metálica, geralmente de prata, que serve como eletrodo, vide **Figura 6a**. Os diafragmas piezelétricos, os quais são comumente usados em dispositivos sonoros, também são denominados *buzzers*. Esses componentes acústicos simples são amplamente utilizados em diversos dispositivos eletrônicos para produzir som, tais como alarmes, sinais sonoros (*beep*) e toques (SILVA e GUIMARÃES, 2016). Uma das propriedades do material piezelétrico é a capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica, a qual é denominada de efeito piezelétrico direto (LAURO et al., 2014; SILVA e GUIMARÃES, 2016). Essa característica, presente nos diafragmas piezelétricos, permite que esses transdutores sejam usados na forma passiva para o monitoramento de estruturas e interações entre corpos.

Os diafragmas piezelétricos podem operar como sensores e atuadores devido ao efeito piezoelétrico (JUNIOR, M. et al., 2018). O efeito piezoelétrico consiste na geração de um dipolo elétrico que surge quando um material ou estrutura é submetido a uma força mecânica (externa ou interna). Isso ocasiona ondas acústicas no interior do material que gera tensão elétrica no diafragma (sinal elétrico). No efeito reverso, a indução de sinal elétrico no material piezoelétrico causa uma deformação mecânica no material (ALBUQUERQUE et al., 2016) e gera ondas acústicas. Aplicando esses conceitos, os autores pesquisa Alexandre et al. (2019) propuseram uma nova técnica de ultrassom baseada em diafragmas piezoelétricos. Essa técnica é direcionada ao monitoramento de danos ocasionados a peça durante o processo de retificação.

Existem diversos tipos e tamanhos de diafragmas piezelétricos/transdutores/sensor (sensor PZT), vide **Figura 6b**. Esses sensores respondem para uma ampla faixa de frequência e podem ser adaptados conforme o problema a ser analisado/solucionado. Esses componentes são de baixo custo e de fácil aquisição (ALMEIDA; MENDES e BAPTISTA, 2014; ALMEIDA; BAPTISTA e AGUIAR, 2015; SILVA e GUIMARÃES, 2016), o que os torna atraentes para serem empregados para o monitoramento dos processos de manufatura. O preço desses diafragmas varia de acordo com o seu tamanho e, no Brasil, custam entre R\$ 0,05 e R\$ 10,00, sendo facilmente encontrados em lojas de componentes eletrônicos. No trabalho desenvolvido pelos autores Aulestia et al. (2019) foi usado

um diafragma piezelétrico modelo 7BB-35-3 (**Figura 6b**), do fabricante Murata Manufacturing, para a captação de sinais durante o processo de retificação de cerâmica avançada. No trabalho desenvolvido pelos autores Junior, P. et al. (2018a/b) foram usados dois diafragmas piezelétricos modelo 7BB-20-6 (**Figura 6b**), também do fabricante Murata Manufacturing, para inferir sobre o desgaste da ponta de diamante de um dressador.

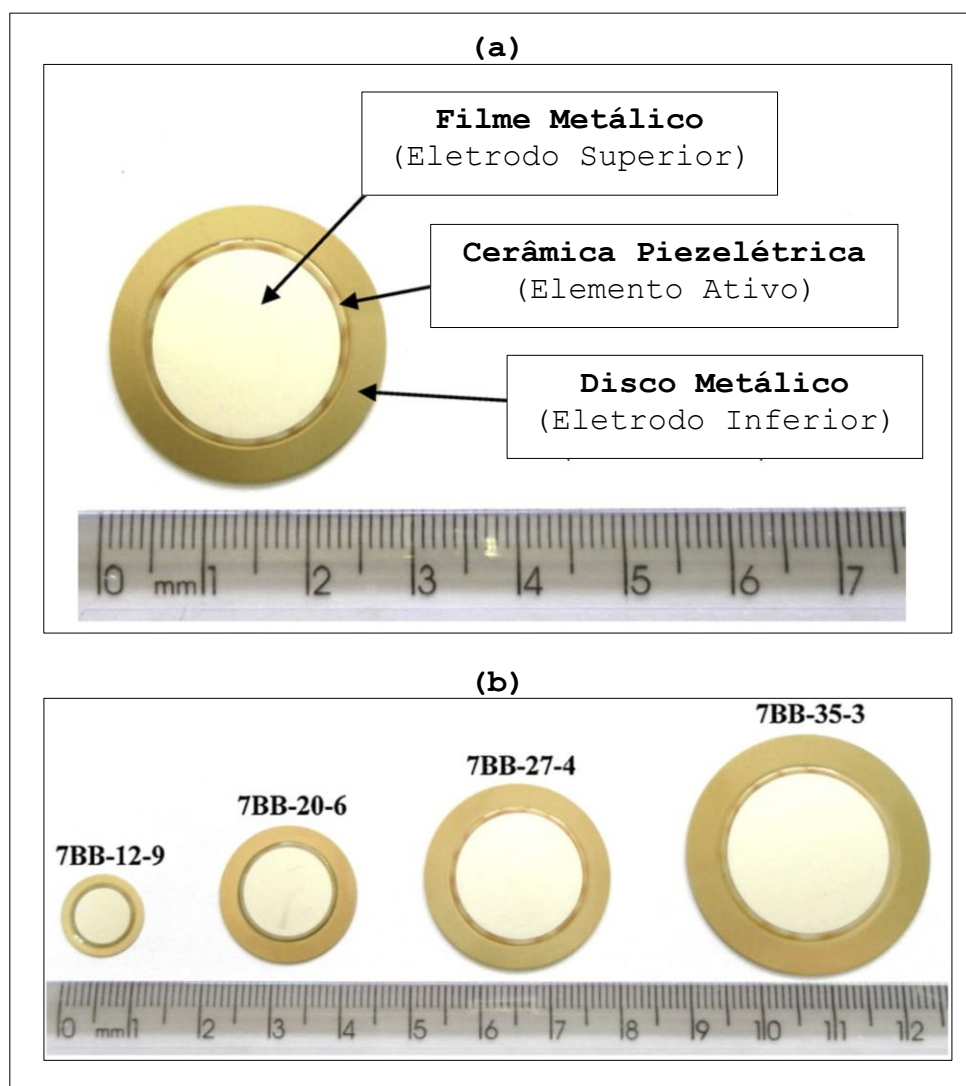


Figura 6. Diafragmas piezoelétricos da empresa Murata (SILVA; GUIMARÃES, 2016)

2.5. FERRAMENTAS PARA O PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Diversas ferramentas podem ser usadas para o processamento digital de sinais com o objetivo de extrair informações no domínio do tempo, no domínio da frequência e em ambos os domínios. As principais ferramentas usadas para a extração de informações no domínio da frequência em

pesquisas voltadas para o processo de retificação são: (i) transformada rápida de Fourier (do inglês, *fast Fourier transform* - FFT), usada por Liao et al. (2008); Mokbel e Maksoud (2000); Warren Liao et al. (2007); e (ii) a densidade espectral de potências (PSD), usada por Bales et al. (2016); Gruhn, Fischer e Vielhauer (2012); Lopes et al. (2017); Zeng e Forssberg (1994). Nesse mesmo processo, as principais ferramentas usadas para extração de informações no domínio tempo-frequência são: (i) transformada *Wavelet*, usada por Kwak e Ha (2004a); Liao et al. (2006); Warren Liao et al. (2007); Yang e Yu (2012); e (ii) a transformada de Fourier de tempo curto (STFT), usada por Aulestia Viera et al. (2019); Lopes et al. (2019); Thomazella et al. (2019). Ademais, diversas estatísticas, como a relação de potência (ROP), o coeficiente de correlação e o coeficiente de determinação, têm sido empregadas para assistir essas ferramentas na extração de informações de sinais oriundos de processos de usinagem: como a retificação (THOMAZELLA et al., 2019; VIERA et al., 2019).

2.5.1. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

À análise no domínio da frequência é aplicada para extrair informações que não são mostradas no domínio do tempo. A transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) e densidade espectral de potência (PSD) são as principais ferramentas para extração de informações no domínio da frequência. Ambos os métodos são implementados no software MATLAB®. A transformada discreta de Fourier é implementada por um algoritmo denominado transformada rápida de Fourier (FFT). O curto tempo de processamento e a necessidade de baixo poder computacional são as principais vantagens da FFT (LYONS; RICHARD, 2010).

A FFT tem sido utilizada com frequência em trabalhos que investigam sinais oriundos do processo de retificação, no entanto, neste trabalho emprega-se a densidade espectral de potência (PSD). A PSD é uma função que representa a distribuição de energia sobre o domínio da frequência de sinais aleatórios ou periódicos (BARBÉ; PINTELON; SCHOUKENS, 2010). O método proposto por Welch (1967) e implementado no software MATLAB® é amplamente empregado para a análise espectral via PSD e considerado como o mais eficiente, principalmente, para a análise de sinais aleatórios. Este

método separa os dados em vários segmentos sobrepostos, calcula um espectro de potência usando a FFT sobre cada segmento e faz a média destes espectros (WELCH, 1967).

2.5.2. ANÁLISE NO DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA

As ferramentas de análise tempo-frequência, como transformada *Wavelet* e Transformada de Fourier de Tempo curto (STFT), podem ser aplicadas para a análise de sinais oriundos da operação de dressagem de rebolos convencionais ou mesmo oriundos do processo de retificação (interação entre a peça e o rebolo). A STFT faz uso da técnica de janelamento, em que o sinal é analisado usando janelas de comprimento fixo. Essa técnica consiste em dividir o sinal em janelas de curta duração, que são tratadas como quase estacionárias, permitindo localizar os componentes de frequência em relação ao tempo. Um problema nas aplicações é encontrar um tamanho de janela adequado. O uso de uma janela curta resulta em uma resolução satisfatória no tempo com uma resolução em frequência insuficiente para realizar uma análise consistente dependendo da aplicação. Por outro lado, uma janela longa resulta em uma resolução na frequência consistente, no entanto, a resolução no tempo é precária (ROTHER; JELALI; SÖFFKER, 2015; SUBHASHREE; PREETHI; SUPRIYA, 2016). Existem vários tipos de janelas que podem ser utilizadas para obtenção da STFT, entre elas as janelas *Retangular*, *Gaussiana*, *Blackman*, *Hanning*, *Hamming* e *Kaiser*. Geralmente, cada janela tem estrutura definida e fixa, entretanto, a janela Kaiser possui um parâmetro variável que permite alterações em sua estrutura.

A STFT é um algoritmo bem estabelecido que foi introduzido para superar a restrição de tempo da transformada rápida de Fourier (SUBHASHREE; PREETHI; SUPRIYA, 2016). Essa técnica oferece uma compreensão entre as resoluções espectrais e temporais. Enquanto a transformada rápida de Fourier é adequada para o estudo de sinais estacionários, os quais não variam ao longo do tempo: como funções senoidais, a STFT é adequada para sinais não estacionários. Neste caso, os parâmetros como amplitude, frequência e fase podem variar ao longo do tempo (GARRIDO, 2016). A equação (5) define a transformada de Fourier de tempo curto (STFT) citada nos trabalhos de (KIM, B. S. et al., 2007; KIM, H.; MELHEM, 2003; SHIMAUCHI et al., 2017).

$$\text{STFT}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u) f(t+u) e^{-j\omega u} du \quad (5)$$

em que t é o tempo, ω é a frequência, $f(t)$ é um sinal no domínio do tempo, e $h(u)$ é uma função janela no tempo como *retangular, Gaussiana, Blackman, Hanning, Hamming, Kaiser*, dentre outras. A STFT pode ser calculada usando o algoritmo “*spectrogram*” (JIANMING et al., 2016), o qual está disponível no software MATLAB®. A resolução no tempo e na frequência depende do comprimento da janela (BACCAR; SÖFFKER, 2015). A resolução em cada domínio possui limitação imposta pelo princípio de incerteza de Heisenberg (LIMA et al., 2016). Essa ferramenta não fornece boa resolução no tempo e na frequência de modo simultâneo. Portanto, para realizar análises tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência usando a STFT, as resoluções tempo-frequência devem ser equilibradas/balanceadas.

A transformada *Wavelet*, por outro lado, é uma ferramenta para estudar fenômenos localizados e intermitentes em vários sinais (KWAK; HA, 2004a). Essa é mais poderosa e versátil do que a transformada de Fourier devido às seguintes propriedades: (i) São capazes de capturar propriedades dos dados dependentes do tempo em locais específicos, enquanto a transformada de Fourier pode somente capturar propriedades globais; (ii) São mais eficientes quando comparada a Transformada Rápida de Fourier; (iii) Permite ajustes precisos para várias aplicações; e (iv) Possuem um conjunto infinito de funções bases possíveis (WARREN LIAO et al., 2007). Entretanto, a transformada *Wavelet* exige um alto poder computacional quando comparado com os recursos computacionais necessários para aplicações com a transformada de Fourier de tempo curto (STFT), sendo essa a sua principal desvantagem.

2.5.3. RELAÇÃO DE POTÊNCIA – ROP

A estatística relação de potência (ROP) descrita no livro de Sikorski (2012), equação (6), quantifica a significância da potência de uma faixa de frequência em relação a potência total de um determinado espectro de frequência. Essa técnica tem sido utilizada para analisar sinais de emissão acústica (EA) e de vibração advindos do processo de retificação.

No trabalho desenvolvidos pelos autores Martins et al. (2014), a ROP foi uma das estatísticas utilizadas para

entrada dos modelos neurais propostos para caracterizar a condição de desgaste do dressador a partir de sinais de emissão acústica (EA). Os autores fazem um estudo do conteúdo harmônico dos sinais de EA e selecionam bandas de frequência que possuem maior relação com as condições de desgaste do dressador. Posteriormente, os autores aplicam as estatísticas em cada banda selecionada e utilizam seus resultados nos modelos neurais. Os autores concluem que a combinação de bandas de frequência caracterizou melhor o nível de desgaste do dressador.

No trabalho desenvolvido pelos autores Miranda et al. (2015), os resultados da estatística ROP e valor quadrático médio (*root mean square* - RMS) são utilizados como entradas em modelos *fuzzy* para prever o nível de desgaste do dressador de ponta única. Testes experimentais foram realizados usando um dressador de diamante sintético em uma máquina de retificação equipada com rebolo de óxido de alumínio. Os sinais de EA e vibração foram coletados, posteriormente, os autores realizaram um estudo sobre o conteúdo em frequência desses sinais, selecionando as bandas de frequência que melhor se correlacionam com o desgaste do diamante. Em seguida, a partir da banda selecionada a estatística ROP foi aplicada nos sinais. Assim, os autores concluíram que os modelos *fuzzy* usando como entradas ROP e RMS foram efetivos para prever o nível de desgaste do dressador.

No trabalho desenvolvido pelos autores Alexandre et al. (2018), a estatística ROP foi aplicada em sinais EA advindos de ensaios experimentais de dressagem de um rebolo de óxido de alumínio. Os autores fazem um estudo do conteúdo harmônico dos sinais de EA e selecionam uma faixa de frequência que melhor descreve as condições da superfície de corte do rebolo. Os resultados da ROP foram utilizados como entrada de modelos *fuzzy* para avaliar a uniformidade superficial de corte do rebolo e sua condição de dressagem. Os autores concluíram que o modelo *fuzzy* foi eficaz no diagnóstico das condições da superfície do rebolo.

Ao combinar a ROP com a análise tempo-frequência via STFT, obtém-se uma relação de potência ao longo do tempo. Esse conceito foi utilizado na pesquisa desenvolvida pelos autores Thomazella et al. (2019) para o monitoramento de vibrações autoexcitadas no processo de retificação de peças de aço AISI 1045. Para uma determinada faixa de frequências, em relação a potência total do espectro médio da STFT, os

autores calculam a relação de potência ao longo do tempo. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que a ROP propiciou a extração de informações referente ao fenômeno de "chatter" na retificação.

No que diz respeito à aplicação da estatística ROP para auxiliar à análise tempo-frequência de sinais oriundos da operação de dressagem de rebolos convencionais, nos bancos de dados pesquisados, nenhuma menção ao tema foi encontrada na literatura. Esse é um dos fatores que torna o tema deste trabalho inovador, pois, nesta pesquisa a ROP é utilizada em conjunto com a STFT para quantificar a regularidade e prevenir falhas na superfície de corte de rebolos convencionais estruturalmente distintos.

Para um bloco de dados a ROP pode ser calculada a partir da equação (6) (MARTINS et al., 2013; WANG, Z. et al., 2001).

$$ROP = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_2} |X_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \quad (6)$$

em que N é o comprimento do segmento de dados do sinal amostrado durante a usinagem, n_1 e n_2 definem a faixa de frequências a ser analisada, e X_k representa a k-ésima saída da Transformada discreta de Fourier.

2.5.4. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E DE DETERMINAÇÃO

O coeficiente de correlação de Pearson (r) quantifica o grau de associação entre duas variáveis. Essa estatística mede a covariação entre duas variáveis e tem natureza simétrica. Esse coeficiente mede apenas uma dependência linear entre as variáveis, tal que para duas situações iguais o valor de "r" é igual a 1(um). Na equação (7) é definido o coeficiente de correção entre duas curvas.

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}\right] \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N}\right]}} \quad (7)$$

em que N é o número de amostras, x a variável independente e y a variável dependente. Os valores de "r" se estendem na faixa de ± 1 e a classificação pode ser feita da seguinte forma: (i) quando a função é ascendente a correlação é

positiva e o valor de "r" se aproxima do valor 1 (um positivo); (ii) quando a função é decrescente a correlação é negativa e o valor de "r" se aproxima do valor -1 (um negativo); por fim, (iii) a situação de não correlação ocorre para o valor de R igual a zero (COHEN, 1988; FILHO; JÚNIOR, 2009; MOORE, 1996; SEDGWICK, 2012; STANTON, 2001).

Por outro lado, o coeficiente de determinação (r^2), equação (8), quantifica a capacidade da variável independente Y de explicar a variável dependente Y_e . Os limites de r^2 se estendem entre 0 e 1, onde r^2 igual 0 (zero) significa que não existe correlação entre as variáveis e R^2 igual a 1 (um) indica uma correlação de 100% entre as variáveis, ou seja, quanto mais próximo de 1 (um) maior a correlação entre as variáveis.

$$r^2 = \frac{\sum (Y_e - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (8)$$

em que Y são os valores reais, Y_e são os valores estimados e $\bar{Y}$ o valor médio de Y. O coeficiente de determinação quantifica a relação entre duas curvas, isto é, a partir da correlação entre as variáveis, determina a confiabilidade com que a variável medida explica a variável estimada (AULESTIA et al., 2019; FERREIRA et al., 2018; GUO, S. et al., 2017; STANTON, 2001).

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo serão descritos os procedimentos e material utilizados nos ensaios de retificação e de dressagem, bem como o processamento digital dos sinais, gerados pelo diafragma piezelétrico (PZT) e pelo sensor de EA, que foram coletados durante a operação de dressagem. Para este trabalho foram utilizados três rebolos de óxido de alumínio estruturalmente distintos. O banco de ensaios foi configurado com intuito de coletar as variáveis de saída do processo de modo a propiciar a análise de falhas nos rebolos a partir de técnicas de processamento digital empregadas nos sinais gerados pelos sensores EA e PZT. Esta pesquisa é dividida em quatro etapas principais. A síntese destas etapas pode ser visualizada no fluxograma mostrado na **Figura 7**:

- Na primeira etapa foram realizados vários testes preliminares para determinar os melhores parâmetros a serem utilizados nos ensaios de retificação não usual e nos ensaios de dressagem definitivos;
- Na segunda etapa foram realizados os ensaios definitivos de retificação e de dressagem de dois dos rebolos de óxido de alumínio que se diferem apenas no que diz respeito à granulometria. Esses ensaios foram realizados para a proposta do método, onde se empregou uma profundidade de dressagem constante e igual a 10 μm ;
- Na terceira etapa, os sinais coletados durante a operação de dressagem foram processados digitalmente para a extração de informações referente às falhas ocasionadas na superfície de corte dos rebolos. O método proposto classifica o rebolo com superfície de corte regular ou irregular, com falhas ou sem falhas, mas não caracteriza o tipo da falha. A partir dos sinais EA e PZT obtêm-se os coeficientes da STFT. Posteriormente, calcula-se uma relação de potência de tempo-frequência (ROP_{STFT}). Então, calcula-se a relação de potência de tempo-frequência normalizada de valores cumulativos (ROP_{NC}) para obter o fator de forma do rebolo (WSF);
- Na quarta etapa foi realizado um ensaio de dressagem do rebolo que se difere dos outros quanto a sua porosidade. Nesse ensaio empregou-se uma profundidade de dressagem constante e igual a 40 μm com o objetivo de verificar a robustez e a eficiência do método proposto.

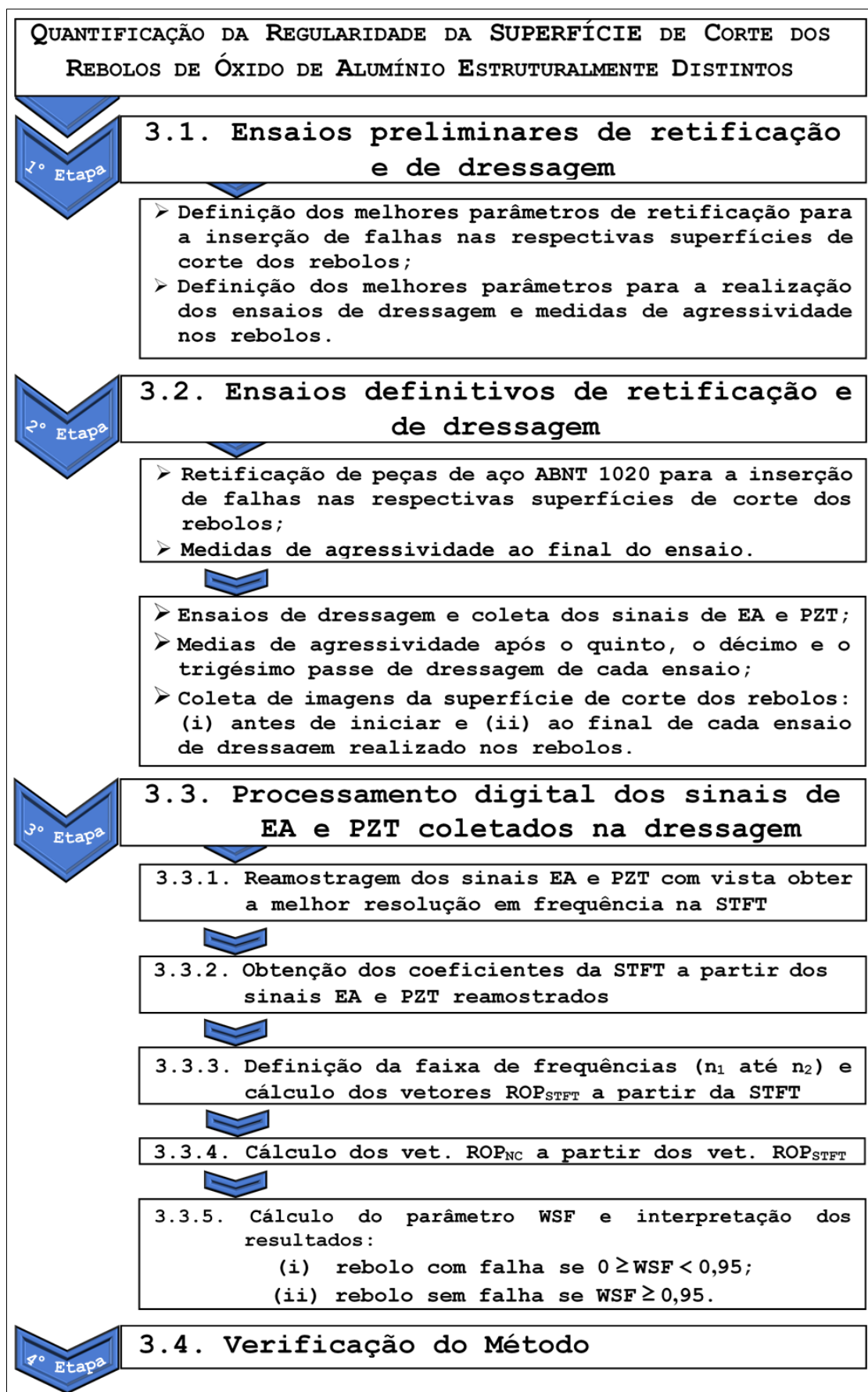


Figura 7. Fluxograma que descreve a síntese da metodologia empregada e dos resultados obtidos nesta pesquisa

3.1. MATERIAL E EQUIPAMENTOS: ENSAIOS PRELIMINARES

Os testes preliminares foram realizados com vista a obter os parâmetros mais adequados para realizar os ensaios de dressagem, tais como: velocidade de deslocamento do dressador (V_d), profundidade de dressagem (a_d), grau de recobrimento (U_d) e o número de passes de dressagem necessário para condicionar o rebolo para o uso na retificação. Nos ensaios, foram utilizados dois rebolos de óxido de alumínio que se diferem quanto suas especificações granulométricas. Os dois rebolos possuem porosidade (estrutura) fechada e igual a "1" (zero). Ambos do fabricante NORTON, modelos 38A.150.LVH e 38A.100.LVH, com dimensões, respectivas, de 324mm x25,4mm x127mm e 355,6mm x25,4mm x127 mm. Para realização dos ensaios foi utilizada uma máquina retificadora tangencial plana, modelo RAPH 1055 da Sulmecânica. Na **Figura 8** é exemplificado o diagrama esquemático do banco de ensaios. A ferramenta de dressagem utilizada foi do tipo diamante CVD de ponta única.

Assim como no trabalho desenvolvido pelos autores Oliveira e Dornfeld (1994), nessa pesquisa, o dressador de ponta única também foi empregado como um apalpador de medição e os sinais gerados pelos sensores EA e PZT devido ao contato rebolo/dressador foram usados para mensurar as falhas ocasionadas na superfície de corte dos rebolos.

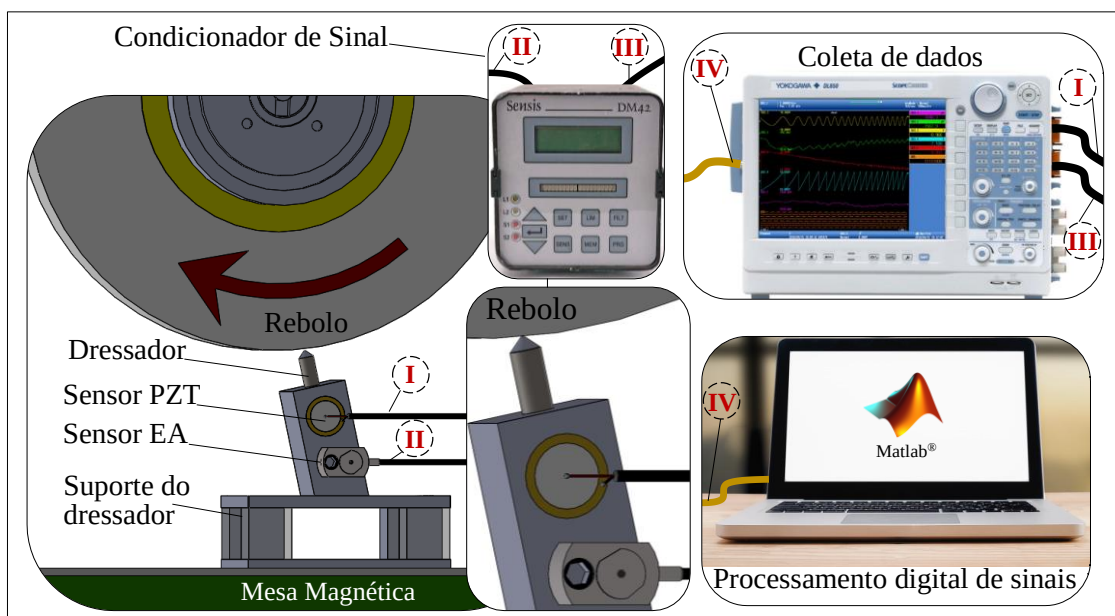


Figura 8. Esquemático do banco de ensaios

As ondas mecânicas geradas na operação de dressagem devido ao contato entre dressador e o rebolo foram

convertidas em um sinal elétrico, simultaneamente, por um sensor de emissão acústica (EA) e por um sensor/diafragma piezelétrico (PZT) de baixo custo, modelo 7BB-35-3, da empresa Murata *Electronics*. Ambos os sensores foram fixados ao suporte do dressador. Antes da aquisição de dados, usou-se um módulo, da empresa Sensis, modelo: DM-42, para condicionar os sinais gerados pelo sensor de EA que também foi fabricado pela empresa Sensis. Diferente dos sinais de EA, os sinais gerados pelo sensor PZT não foram condicionados para a aquisição, pois, essa pesquisa também possui a finalidade de quantificar a eficiência do diafragma piezelétrico comparando seus resultados com os obtidos para o sensor de EA convencional.

No decorrer dos ensaios de dressagem, os sinais de EA e PZT foram coletados simultaneamente a uma frequência de amostragem de 2MHz (dois milhões de amostras por segundo) usando um osciloscópio, modelo DL850, da empresa Yokogawa.

3.1.1 AFERIÇÃO DA AGRESSIVIDADE

Nesta pesquisa, o método do disco retificado foi empregado para mensurar a agressividade dos rebolos (ALEXANDRE et al., 2018; BIANCHI et al., 2011; LOPES et al., 2017; MOIA et al., 2015). Na **Figura 9** é exemplificado o banco de ensaios usado para a coleta das curvas que fornecem informações sobre a agressividade dos rebolos.

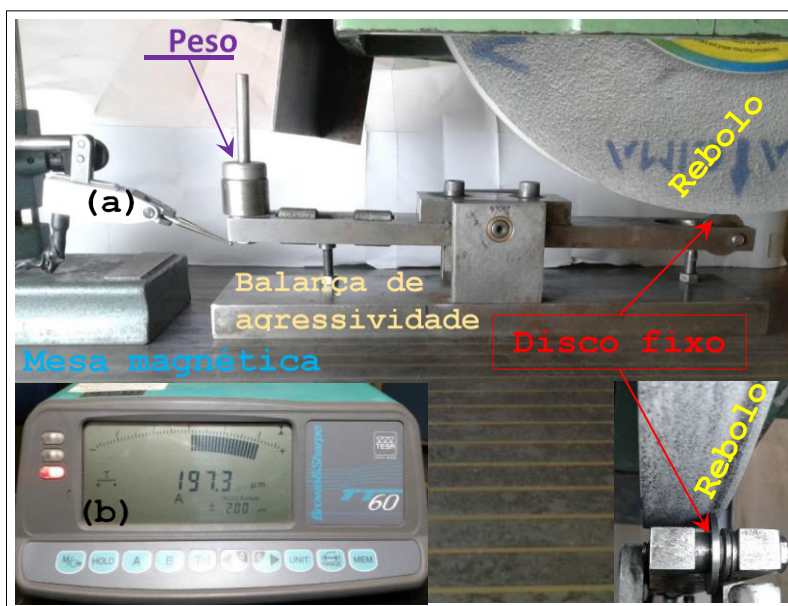


Figura 9. Banco de ensaios usado para mensurar a agressividade dos rebolos: (a) sensor de deslocamento e (b) registrador eletrônico

A massa aplicada na balança de agressividade foi de 102,36 gramas, a qual teve a função de manter o disco em pleno contato com a superfície de corte do rebolo. As curvas de deslocamento da balança de agressividade em função do tempo, indicada pelo sensor de deslocamento: **Figura 9a**, foram registradas por um instrumento TESATRONIC modelo TT60 (**Figura 9b**) da empresa Tesa Technology e coletadas via comunicação serial por meio do *software* MATLAB®. As amostras (discos) cilíndricas com 24mm de diâmetro externo, 7,8 mm de diâmetro interno e espessura de 2mm, utilizadas para a aferição de agressividade dos rebolos, foram confeccionadas a partir de uma barra cilíndrica de aço ABNT 1020.

Após análise dos testes preliminares, nos ensaios de dressagem definitivos, optou-se por mensurar a agressividade dos rebolos em quatro etapas: (i) após a inserção de falhas na superfície de corte do rebolo (empastamento e desgaste da camada abrasiva); (ii) após 05(cinco) passes de dressagem; (iii) após 10(dez) passes de dressagem e (iv) após 30(trinta) passes de dressagem. Em cada etapa a agressividade foi medida em 03(três) posições ao longo da superfície de corte do rebolo.

3.2. ENSAIOS DEFINITIVOS: EMPASTAMENTO E DRESSAGEM DOS REBOLOS

Neste trabalho, o processo de inserção de falhas na superfície de corte dos rebolos, via retificação não usual de peças de aço ABNT 1020, foi realizado sem a utilização de fluido de corte. Os ensaios de dressagem definitivos foram divididos em dois blocos principais: (i) o Bloco A que se refere ao modelo de rebolo R100 (38A.100.LVH); e (ii) o Bloco B que se refere ao modelo de rebolo R150 (38A.150.LVH). Cada bloco foi dividido em 03(três) conjuntos de ensaios, mostrados na Tabela **I** e na Tabela **II**. Os parâmetros utilizados nos ensaios de dressagem do Bloco A, usando o rebolo R100, são mostrados na Tabela **I** e na Tabela **II** são apresentados os parâmetros utilizados nos ensaios de dressagem do Bloco B que fez uso do rebolo R150. Os parâmetros apresentados tanto na Tabela **I** quanto na Tabela **II** são: a rotação do eixo em que o rebolo está acoplado (N_s); o diâmetro equivalente do rebolo (d_s); a velocidade de corte do rebolo (V_s); a profundidade de dressagem (a_d); a largura de atuação do dressador (b_d); o tempo de dressagem (t_d); o grau de recobrimento (U_d); o avanço axial do dressador por

revolução do rebolo ou passo de dressagem (S_d); e por fim, o número de passes de dressagem (P_d).

TABELA I. PARÂMETROS DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM DO BLOCO A

Bloco A: Rebolo R100			
	<i>conjunto R100A</i>	<i>conjunto R100B</i>	<i>conjunto R100C</i>
N_s [RPM]	1800	1800	1800
d_s [mm]	352,80	351,60	351,20
V_s [m/s]	33,25	33,14	33,10
a_d [mm]	0,01	0,01	0,01
b_d [μ m]	695	522	684
t_d [s]	2,435	5,675	6,810
S_d [mm]	0,3475	0,1491	0,1244
U_d	2	3,5	5,5
P_d	30	30	30

TABELA II. PARÂMETROS DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM DO BLOCO B

Bloco B: Rebolo R150			
	<i>conjunto R150A</i>	<i>conjunto R150B</i>	<i>conjunto R150C</i>
N_s [RPM]	1800	1800	1800
d_s [mm]	324,00	321,12	319,84
V_s [m/s]	30,54	30,27	30,14
a_d [mm]	0,01	0,01	0,01
b_d [μ m]	691	681	800
t_d [s]	2,450	4,350	5,820
S_d [mm]	0,3475	0,1946	0,1455
U_d	2	3,5	5,5
P_d	30	30	30

A profundidade de dressagem igual a 10 μ m foi usada com o objetivo de avaliar o histórico de desgaste ocasionado nas respectivas superfícies de corte dos rebolos após submetê-los ao processo de retificação não usual de peças de aço ABNT 1020. A largura de atuação do dressador foi medida a partir de imagens coletadas por meio de um microscópio

digital do fabricante/marca DTN, modelo USB: *DNT DigiMicro 2.0 Scale*, o qual é equipado com uma câmera com resolução de dois megapixels (2 MP). Na **Figura 10a** é exposto o banco de ensaio.

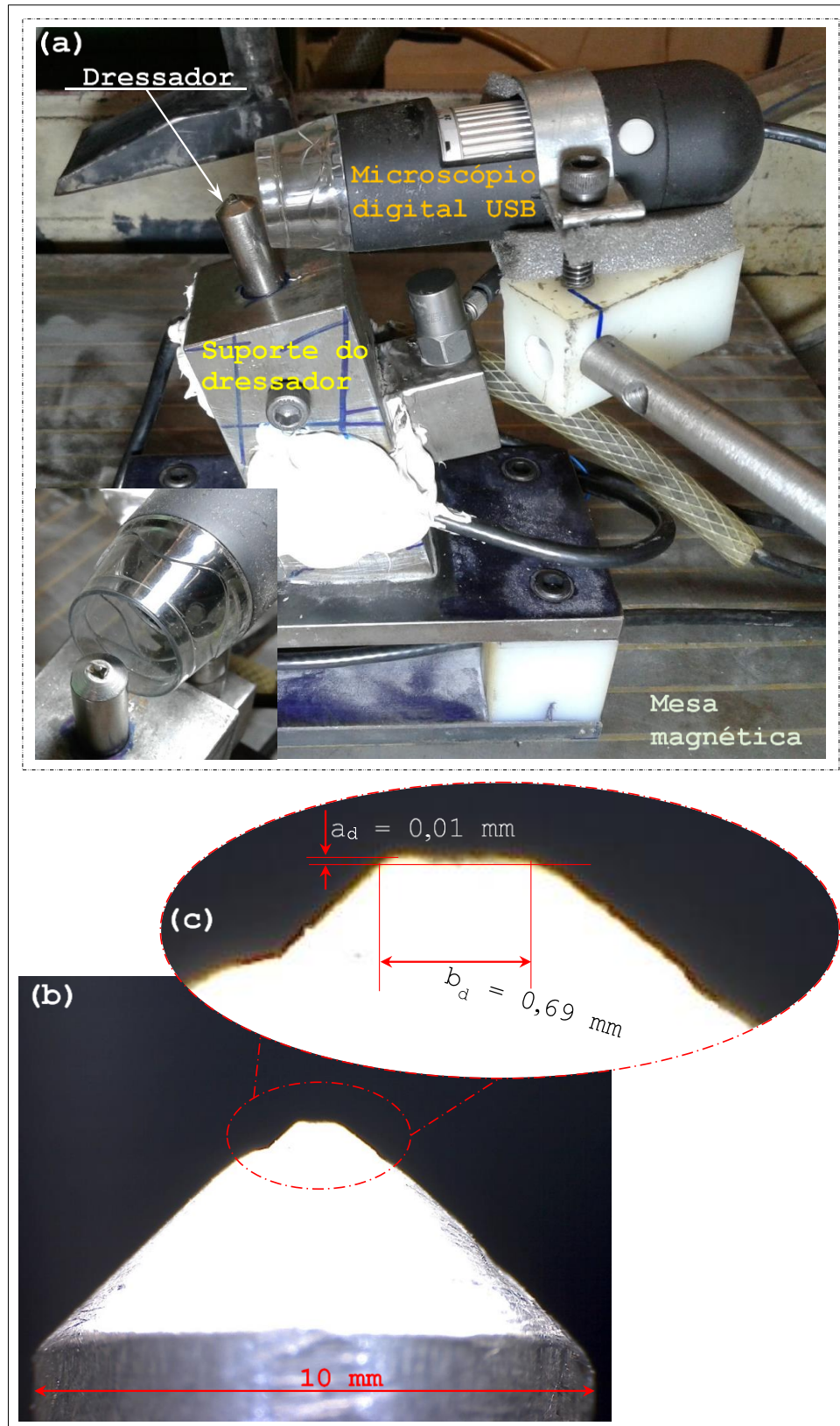


Figura 10. Aferição da largura de atuação do dressador

O microscópio também possui um *software* que, calibrado adequadamente, possibilitou mensurar a ponta de diamante do dressador a partir das imagens capturadas com esse equipamento. O microscópio digital permite uma ampliação na faixa de 20 a 200 vezes. Na **Figura 10a** é exposto o esquemático do banco de ensaios usado para coletar imagens da ponta de diamante do dressador. Ressalta-se que as imagens foram coletadas sempre da mesma posição com uma ampliação de 25 vezes. A posição do microscópio digital em relação a ponta de diamante do dressador foi de 8 mm. Na **Figura 10b** mostrada uma das imagens coletadas durante os ensaios de dressagem. Para capturar as imagens foi posicionada sobre a ponta do dressador uma lâmpada emissora de luz branca. Por isso, nas imagens capturadas, o formato da ponta de diamante do dressador é desenhado com uma cor branca devido a luz que a envolve, vide **Figura 10b**. Essa metodologia propicia a medição da largura de atuação do dressador com maior confiabilidade.

O corpo do dressador com 10 mm de diâmetro foi usado como parâmetro para calibrar o *software* do microscópio digital, conforme exemplificado na **Figura 10b**. Posteriormente, a região referente a ponta do dressador foi ampliada (vide **Figura 10c**) e, então, a partir da profundidade de dressagem de 0,01mm, empregada nos ensaios realizados com os rebolos R100 e R150, mensurou-se a largura de atuação do dressador. No ensaio de verificação do método usou-se profundidade de dressagem igual a 0,04mm (seção 3.4 deste capítulo) com o objetivo de verificar a robustez e a eficiência do método proposto.

Os ensaios de dressagem definitivos usando os rebolos R100 e R150 consistiram em 30(trinta) passes da ponta de diamante do dressador em suas respectivas superfícies de corte, isto é, para cada conjunto de ensaio removeu-se 30(trinta) camadas de material abrasivo da superfície de corte do rebolo. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de garantir que as respectivas superfícies de corte dos rebolos estivessem regulares e sem falhas ao final da dressagem. Os ensaios definitivos foram executados seguindo sempre a mesma sequência, a qual é disposta em duas etapas:

- i. Previamente ao ensaio de dressagem, com o rebolo condicionado para a retificação, objetivando a inserção de falhas em sua superfície de corte, realizou-se a retificação não usual de peças de aço

ABNT 1020, com dimensões 150mm x48mm x12mm. A usinagem consistiu em 20 passadas do rebolo na superfície da peça, onde usou-se a penetração de trabalho de 20 micrômetros, sendo a velocidade da mesa igual a 2,88 m/min. Posteriormente, imagens da superfície de corte do rebolo foram coletadas usando o microscópio digital e um celular da empresa Samsung, modelo Galaxy J2, equipado com uma câmera de cinco megapixels (5 MP) que permitiu a captura de imagens em alta qualidade: resolução de 2592x1944 pixels. Por fim, mediu-se a agressividade do rebolo em 03(três) posições ao longo de sua superfície de corte;

- ii. Após a inserção de falhas na superfície de corte do rebolo, empregando fluido de corte, iniciou-se o ensaio de dressagem: com a_d igual a 10 μ m (0,01mm). Após 05(cinco), 10(dez) e 30(trinta) passes de dressagem, o ensaio foi interrompido e a agressividade do rebolo foi medida em 03(três) posições ao longo de sua superfície de corte. No final do ensaio fez-se a captura de imagens usando o microscópio digital e o celular.

Ressalta-se que para cada passe de dressagem foram coletados, simultaneamente, um sinal que se refere ao sensor de EA e outro que se refere ao sensor PZT. Esses sinais, além de possuírem informações da topografia do rebolo, apresentam também informações referentes às falhas ocasionadas em sua superfície de corte durante o processo de retificação.

3.2.1. VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO DO REBOLO

O volume de material removido do rebolo (VMR) foi determinado por diferença de diâmetro (LOPES et al., 2017), conforme equação (9). Essa medida é aproximada, visto que existem fatores que não foram levados em consideração, tais como: o desgaste ocasionado na superfície de corte dos rebolos e a ondulação teórica: efeito causado pela dressagem.

$$VMR = \pi L_R [r^2 - (P_d \cdot a_d)^2] \quad (9)$$

em que L_R é a largura do rebolo; P_d é o número de passes de dressagem; a_d é a profundidade de dressagem e r é o raio do rebolo.

3.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DOS SINAIS DE EA E PZT

Nessa seção são apresentados os passos que foram executados para a obtenção do Fator de Forma do Rebolo (WSF), parâmetro proposto nessa pesquisa para quantificar a regularidade e prevenir falhas na superfície de corte de rebolos de óxido de alumínio quando submetidos a dressagem com dressador de ponta única. Na **Figura 11** é apresentado um fluxograma que descreve a síntese desse procedimento de modo simplificado.

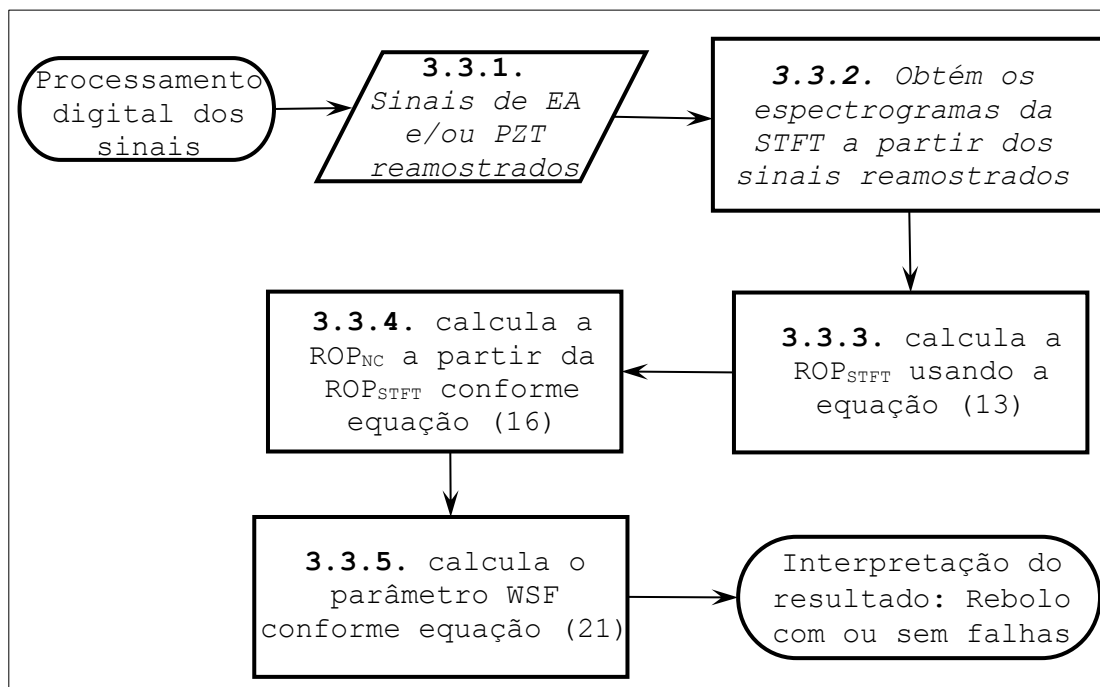


Figura 11. Fluxograma simplificado do procedimento executado para obter o fator de forma do rebolo

3.3.1 REAMOSTRAGEM DOS SINAIS DE EA E PZT

Inicialmente, para todos os ensaios, extraiu-se dos sinais originais de EA e PZT apenas os dados relativos ao passe de dressagem. Pois, todos os sinais coletados constituem-se de ruído antes do passe de dressagem, do sinal relativo ao próprio passe de dressagem e de ruído após o passe de dressagem. Em seguida, obteve-se a PSD desses sinais por meio do método *Welch* implementado no *software* MATLAB® usando uma janela de *Hanning* com 50% de sobreposição. Para a obtenção dos espectros seguiram-se as seguintes etapas: (i) obtenção de três pontos equidistantes ao longo do sinal relativo ao passe de dressagem; (ii) a partir de cada ponto selecionado na etapa (i), obteve-se vetores com 32768 pontos e, então, computou-se a PSD de cada vetor; por fim, (iii)

após a obtenção dos três espectros, calculou-se um espectro PSD médio.

Das análises efetuadas com base nos espectros PSD calculados, notou-se que o conteúdo harmônico mais significativo tanto dos sinais de EA quanto dos sinais PZT se encontra localizado nas frequências abaixo de 200 kHz. Por isso, os sinais de EA e PZT foram filtrados digitalmente utilizando um filtro passa-baixa do tipo *Butterworth*, com frequência de corte de 150 kHz e de ordem 30. Este apresentou resposta em frequência adequada para aplicação nesta pesquisa. Posteriormente, foram reamostrados digitalmente a um quarto (1/4) da frequência de amostragem original. Esse procedimento foi realizado para todos os sinais coletados nos ensaios de dressagem. Desta forma, garantiu-se uma frequência de amostragem, aproximada, de três vezes a frequência máxima contida nos sinais de EA e PZT, obedecendo o teorema da amostragem de *Nyquist-Shannon*.

3.3.2. OBTENÇÃO DOS ESPECTROGRAMAS DA STFT

Após a reamostragem digital dos sinais EA e PZT obteve-se os coeficientes da STFT por meio do algoritmo *spectrogram* disponível no MATLAB®. O comprimento da janela usada para computar a STFT dos sinais de EA e PZT foi definido por meio de um algoritmo, o qual foi desenvolvido para evitar que a escolha desse parâmetro fosse baseada em tentativa e erro. Na **Figura 12** o algoritmo é exposto em forma de fluxograma.

Os parâmetros de entrada do algoritmo são: (i) a resolução no domínio do tempo (Δt) desejada para a STFT; (ii) a frequência de amostragem dos sinais de EA e PZT (F_s); e por fim, (iii) a porcentagem de sobreposição de janelas (*over%*). Esse último parâmetro é o método utilizado para melhorar a resolução no tempo sem perda de resolução na frequência (LIMA et al., 2016), no entanto, há um custo computacional. Por isso, o usuário tem a opção de sobrepor ou não as janelas. Ressalta-se que a máxima sobreposição das janelas (*Over%*), informada para o algoritmo em valores percentuais, é regida pela equação (10).

$$\text{Over\%} \leq \frac{M-1}{M} \cdot 100 \quad (10)$$

em que M é o comprimento da janela, que possui grande influência quanto a resolução tempo-frequência da STFT. Observe no fluxograma exposto na **Figura 12** que a quantidade

de pontos para o cálculo da transformada Discreta de Fourier, denominado de NFFT, foi definido como sendo o dobro do comprimento da janela deslizante.

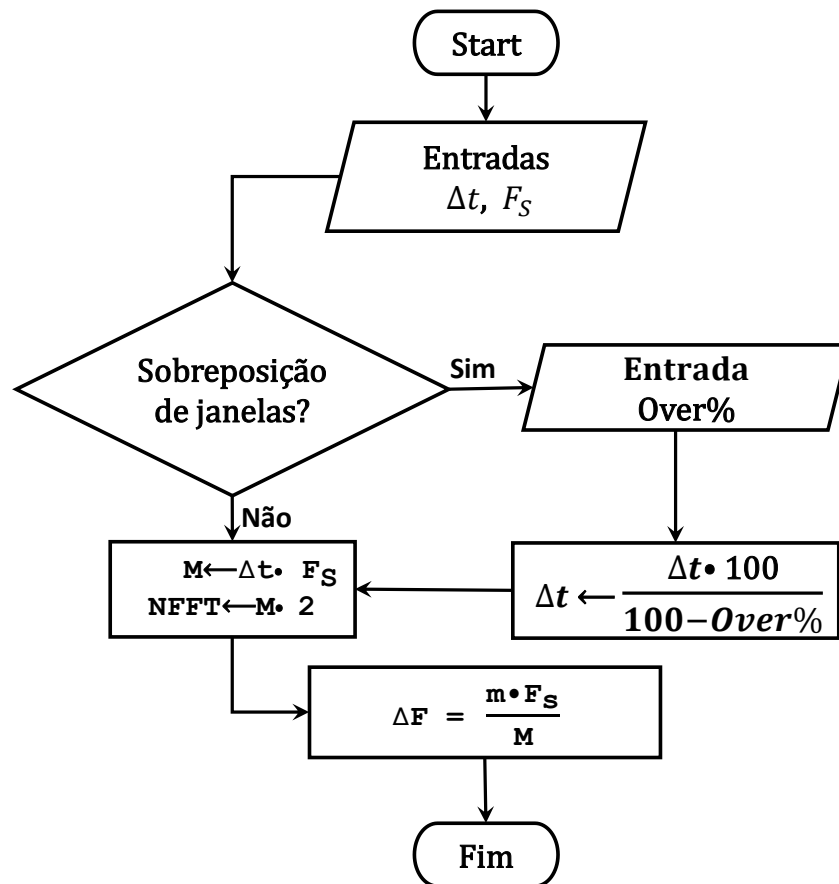


Figura 12. Algoritmo proposto para ajustar o comprimento da janela usada para computar a STFT

Posteriormente à definição dos parâmetros da STFT, o tipo de janela usada para computar seus coeficientes foi definido a partir de processamentos e análises preliminares, onde foram testadas várias janelas: *Hamming*, *Hanning*, *Blackman*, *Flat top*, *Bartlett* e *Tukey*. Em função das análises preliminares, a janela de *Hanning* foi definida como sendo a mais adequada para computar a STFT dos sinais de EA e PZT. A partir de análises visuais, notou-se que a janela de *Hanning* proporcionou uma atenuação satisfatória do ruído de fundo e o menor achatamento das amplitudes das frequências contidas na faixa de 20 a 150 kHz. À análise preliminar foi baseada tanto no espectrograma da STFT quanto em seu espectro médio: equação (11), calculados a partir de seus coeficientes.

$$\overline{\text{STFT}}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |X_{nm}| \quad (11)$$

em que $m=1, 2, 3, \dots, M$ e $n=1, 2, 3, \dots, N$, em que M e N são, respectivamente, o número de colunas e de linhas da matriz que descreve os coeficientes da STFT discreta no domínio tempo-frequência; e X_{nm} representa a k -ésima saída da Transformada discreta de Fourier (DFT) para cada coeficiente da STFT. Posteriormente a definição dos parâmetros, para cada sinal de EA e PZT, foram calculados os coeficientes da STFT utilizando o algoritmo espectrograma disponível no *software* MATLAB®, usando os seguintes parâmetros:

- janela de *Hanning* com comprimento de 4096 pontos;
- sobreposição de janelas igual a 75%;
- e 8192 pontos para computar a transformada Discreta de Fourier.

Assim, obteve-se para os espectrogramas da STFT, aproximadamente, 2 milissegundos de resolução no domínio do tempo e 488 Hz de resolução no domínio da frequência. Para a apresentação na seção de resultados, foram gerados três espectrogramas para cada conjunto de ensaio, tal que cada espectrograma representa as seguintes condições dos rebolos: (i) com falhas; (ii) intermediária (níveis de falhas mais amenos), e (iii) sem falhas. As condições da superfície de corte dos rebolos foram caracterizadas por um operador qualificado, sendo este o principal método de controle utilizado na indústria da manufatura. A condição de rebolo sem falhas significa que a ferramenta está em plenas condições de uso. Por outro lado, as condições de rebolo com falha e intermediária representam o caso oposto, isto é, o rebolo não apresenta condições satisfatórias para ser empregado no processo de retificação.

3.3.3. RELAÇÃO DE POTÊNCIA DE TEMPO-FREQUÊNCIA

Diferentemente da ROP tradicional usada nas pesquisas desenvolvidas pelos autores Alexandre et al. (2018); Miranda et al. (2015); Wang et al. (2001) e da variação dessa estatística usada pelos autores Thomazella et al. (2019), nesta pesquisa, a ROP é usada para relacionar, no domínio do

tempo, a potência dos coeficientes da STFT em uma determinada faixa de frequência com a potência total do espectrograma. A potência total do espectrograma pode ser calculada usando a equação (12).

$$POT_{STFT}(m) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |X_{nm}|^2 \quad (12)$$

em que POT_{STFT} é a potência total do espectrograma e X_{nm} é a n -ésima saída da DFT calculada para o m -ésimo intervalo de tempo do sinal.

A partir da equação (13) é possível calcular a ROP_{STFT} : relação de potência de tempo-frequência.

$$ROP_{STFT}(m) = \frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} |X_{nm}|^2}{POT_{STFT}} \quad (13)$$

em que n_1 é a posição inicial e n_2 é a posição final da faixa de frequências a ser analisada, isto é, o número de linhas dos coeficientes da STFT discreta no domínio da frequência; N é o número de linhas e M é número de colunas da matriz que descreve os coeficientes da STFT discreta, respectivamente, no domínio da frequência e do tempo; e por fim, X_{nm} é a n -ésima saída da DFT calculada para o m -ésimo intervalo de tempo do sinal, sendo “ n ” a posição na linha (eixo de frequência) e “ m ” a posição na coluna (eixo de tempo) da matriz que descreve os coeficientes da STFT.

A faixa de frequência (n_1 - n_2) usada para calcular a ROP_{STFT} foi selecionada automaticamente por meio de um algoritmo (vide **Figura 13**), sendo usado nesse processo um sinal de EA/PZT que caracterize a condição de rebolo com superfície de corte regular. Assim, a partir da STFT desse sinal, um espectro médio de frequência é obtido e, então, dentro da faixa de frequências que se estende 20 a 150 kHz, seleciona-se a frequência com maior amplitude (f_m), conforme exemplificado na **Figura 13**, círculo de cor azul. Posteriormente, obtém-se a amplitude média do espectro na faixa de 20 a 150 kHz, exemplificada na **Figura 13** pela reta azul. Por fim, a primeira frequência abaixo da frequência f_m e a primeira frequência acima de f_m com amplitude menor que

a média (reta azul), sinalizam o início e o fim da faixa de frequência que será usada para computar a ROP_{STFT} . No exemplo mostrado na **Figura 13**, a posição da frequência 42,66 kHz e a posição da frequência 65,43 kHz, respectivamente, descrevem o início e fim da faixa de frequência usada para calcular a ROP_{STFT} de um conjunto de ensaio. O algoritmo desenvolvido faz essa seleção automaticamente para cada conjunto de ensaio tanto para os sinais de EA quanto para os sinais PZT.

O algoritmo de escolha automática da faixa de frequência para calcular a ROP_{STFT} foi desenvolvido após estudos preliminares, onde notou-se que a ROP_{STFT} obtida para uma faixa de frequência composta por frequências em torno de f_m , resulta em um sinal uniforme ao longo do tempo quando o rebolo se encontra com sua superfície de corte regular. Isso ocorre porque para essa condição do rebolo as frequências contidas nos sinais de EA e PZT possuem um comportamento uniforme ao longo do tempo. Esse foi constatado principalmente nas frequências em torno da frequência f_m , sendo essa uma das características observadas para os sinais coletados a partir da dressagem, preliminar, de rebolos de óxido de alumínio.

A partir das faixas de frequências selecionadas, automaticamente para cada conjunto de ensaio, usando a equação (13), foi calculado um vetor ROP_{STFT} para cada sinal que compõem o conjunto de ensaio, isto é, para cada conjunto de ensaio selecionou-se uma faixa de frequência automaticamente e, posteriormente, obteve-se 30 (trinta) vetores ROP_{STFT} . Esse processo resulta na relação de potência de tempo-frequência, ou seja, a relação de potência de cada coeficiente da STFT é obtida no domínio do tempo, conforme exemplificado na **Figura 14**. Essa estatística, derivada dos sinais de EA e PZT, carrega informações da condição da superfície de corte do rebolo. Essas informações estão relacionadas, principalmente, às falhas causadas na superfície de corte do rebolo durante sua fabricação ou devido ao uso no processo de retificação.

Com vista a exemplificar o processamento dos sinais de EA e PZT fornecendo mais detalhes quanto a obtenção dos vetores ROP_{STFT} , na **Figura 15** é mostrado um espectrograma dos sinais de EA coletados nos ensaios preliminares de dressagem. Na **Figura 15a** são mostrados, como exemplo, os sinais de EA tanto para um rebolo com sua superfície de corte desgastada

(sinal na cor vermelha) quanto para um rebolo com sua superfície de corte regular (sinal na cor azul).

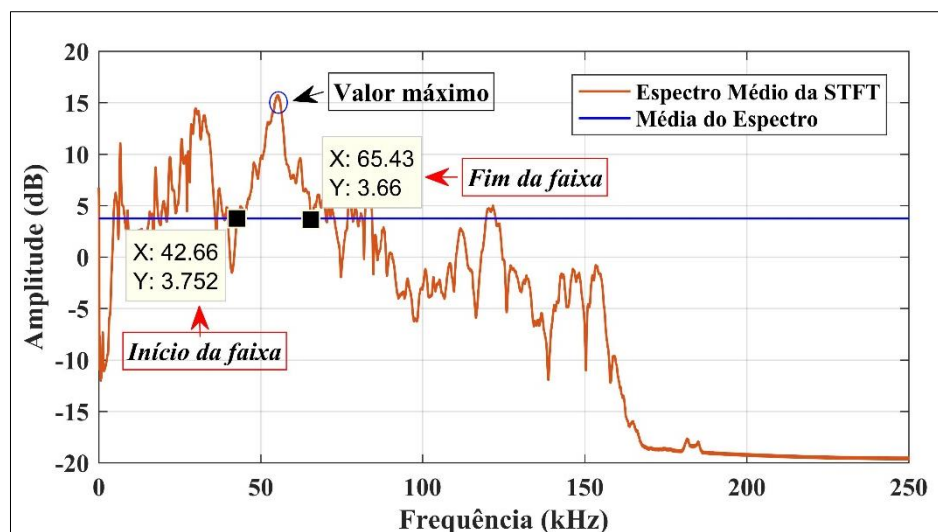


Figura 13. Seleção automática da faixa de frequências n_1 (início da faixa) até n_2 (fim da faixa)

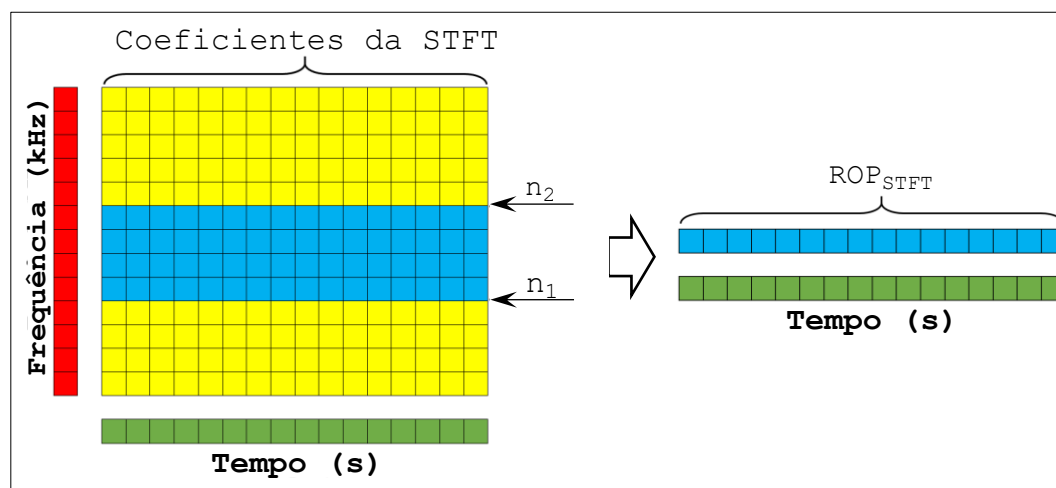


Figura 14. Obtenção dos vetores ROP_{STFT} a partir dos coeficientes da STFT

Na **Figura 15b** é mostrado o espectrograma da STFT para o rebolo com sua superfície de corte desgastada e na **Figura 15c** é mostrado o espectrograma da STFT para o rebolo com sua superfície de corte regular. Os vetores ROP_{STFT} obtidos para os espectrogramas mostrados na **Figura 15** são apresentados na **Figura 16** tanto para o rebolo com sua superfície de corte desgastada quanto para o rebolo com sua superfície de corte regular. A ROP_{STFT} permite a extração de informações dos sinais de EA e PZT e viabilizam a identificação de falhas ocasionadas no rebolo, tais como: excentricidade, conicidade e desgaste da superfície de corte do rebolo.

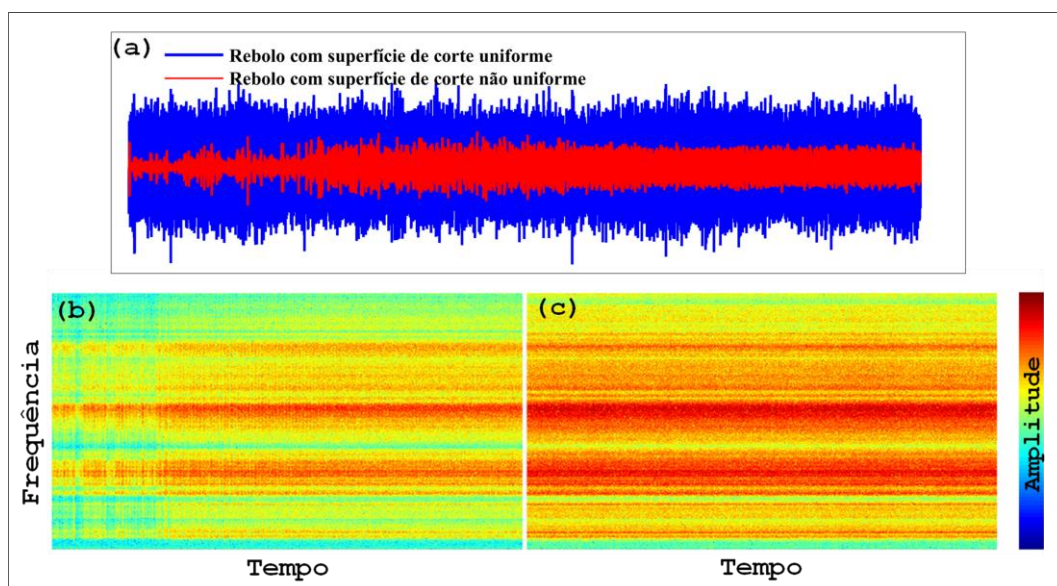


Figura 15. Espectrograma dos ensaios preliminares de dressagem

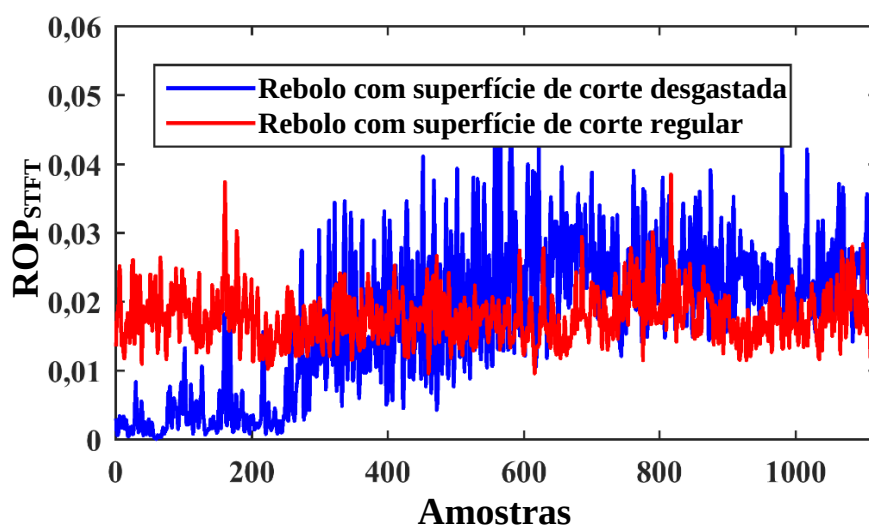


Figura 16. Vetores ROP_{STFT} obtidos para os espectrogramas da Figura 15

Além disso, a partir da ROP_{STFT} há a possibilidade do desenvolvimento de técnicas que, possivelmente, podem ser generalizadas para o monitoramento da operação de dressagem de rebolos de óxido de alumínio. Por conseguinte, favorecendo a otimização da operação de dressagem e, principalmente, do processo de retificação.

3.3.4. RELAÇÃO DE POTÊNCIA DE TEMPO-FREQUÊNCIA CUMULATIVA NORMALIZADA

A partir das curvas (vetores) ROP_{STFT} obtidas via STFT, fez-se a normalização de todos os vetores calculados, a qual dar-se-á dividindo-os pelo seu próprio nível médio. Desta forma, os valores desses vetores são transportados para uma faixa de valores em torno do valor 1(um), isto é, um nível DC é somado aos valores dos vetores ROP_{STFT} de tal forma que os fazem oscilar em torno do valor 1(um).

Após a normalização dos vetores ROP_{STFT} temos uma relação de potência de tempo-frequência normalizada pela média (ROP_N) que pode ser calculada com base nas equações (14) e (15).

$$\overline{ROP}_{STFT} = \frac{\sum_{m=1}^M ROP_{STFT}(m)}{M} \quad (14)$$

em que $\overline{ROP}_{STFT}$ é a média dos valores do vetor $ROP_{STFT}(m)$.

$$ROP_N(m) = \frac{ROP_{STFT}(m)}{\overline{ROP}_{STFT}} \quad (15)$$

em que $m = 1, 2, 3, \dots, M$, sendo M o número de amostras dos vetores ROP_{STFT} no domínio do tempo; $ROP_{STFT}(m)$ e $\overline{ROP}_{STFT}$ são, respectivamente, os valores e a média do vetor ROP_{STFT} . Os vetores ROP_{STFT} mostrados na **Figura 16** também são mostrados na **Figura 17a**: antes do procedimento de normalização; e na **Figura 17b** após serem normalizados.

Posteriormente à normalização dos vetores ROP_{STFT} , procedimento exemplificado na **Figura 17b**, para cada vetor ROP_N é calculado um somatório cumulativo de seus valores, conforme expresso na equação (16), resultando em vetores que representam a relação de potência de tempo-frequência normalizada de valores cumulativos (ROP_{NC}).

$$ROP_{NC} = \sum_{m=1}^M ROP_N(m) \quad (16)$$

em que M e $ROP_N(m)$ são, respectivamente, o número de amostras e os valores do vetor ROP_{STFT} normalizado. De mesma forma, também é calculado um somatório cumulativo do vetor DC de referência. O resultado do somatório cumulativo do vetor DC

de referência com N amostras é denominado reta de referência cumulativa (RFC), representada pela equação (17).

$$RFC(k) = k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (17)$$

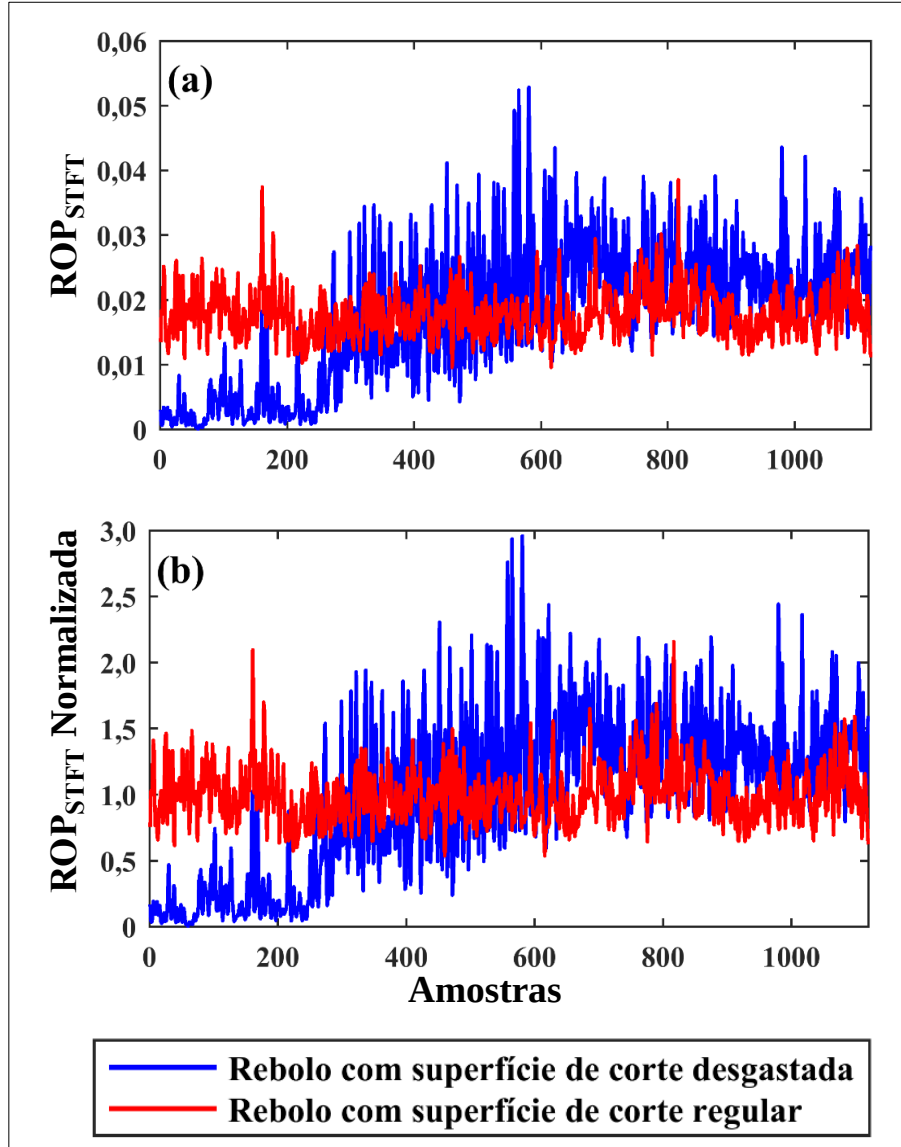


Figura 17. (a) Vetores ROP_{STFT} e (b) vetores ROP_{STFT} normalizados

O somatório cumulativo dos vetores ROP_N expostos como exemplo na **Figura 17b**, são apresentados na **Figura 18** tanto para o rebolo com superfície de corte irregular (não uniforme) quanto para o rebolo com superfície de corte regular/uniforme. Na **Figura 18** também é exemplificado o somatório cumulativo do vetor DC de referência (reta tracejada e de cor preta - RFC).

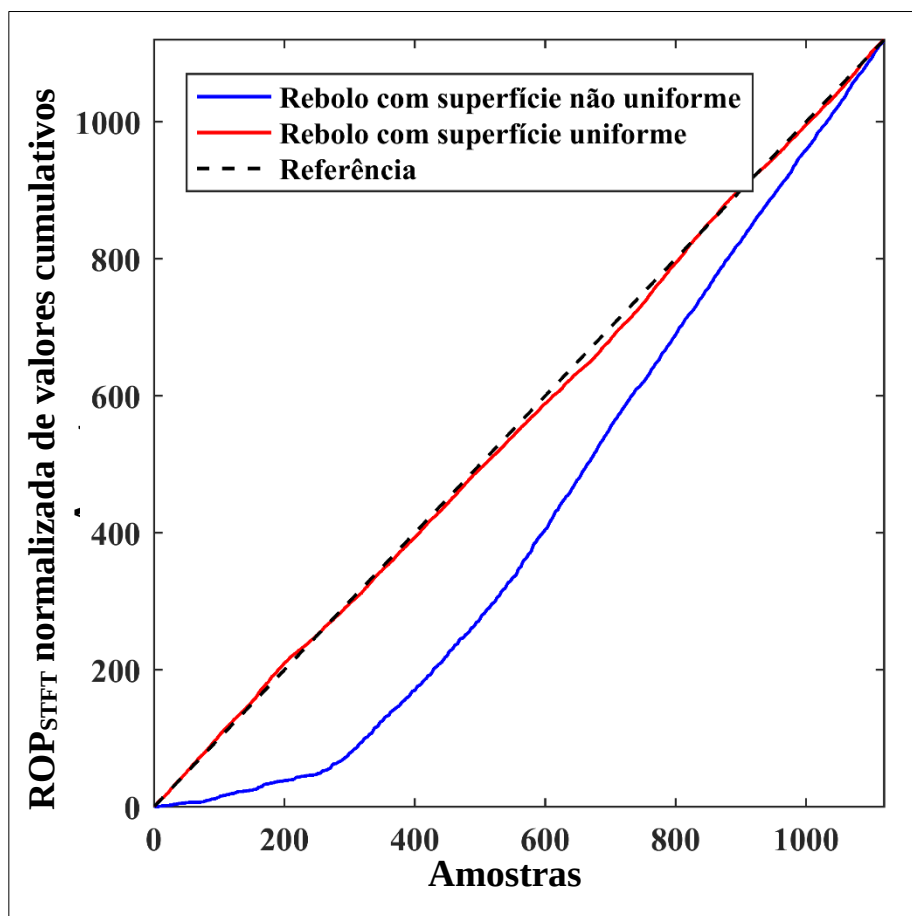


Figura 18. Somatório cumulativo dos vetores ROP_{NC} mostrados na Figura 16 e do vetor DC de referência

3.3.5. FATOR DE FORMA DO REBOLO - WSF

A reta de referência cumulativa possui um coeficiente angular igual a 1 (um), o que resulta em um ângulo de 45° de inclinação em relação ao eixo das abscissas. Observe no exemplo da **Figura 18** que quando o rebolo se encontra com sua superfície de corte uniforme, o somatório cumulativo do vetor ROP_N gera uma curva que tende a uma inclinação de 45° (ROP_{NC}), ou seja, os valores do vetor ROP_{NC} se aproximam dos valores do vetor RFC que é uma reta de referência. Isso significa que quanto menor a faixa de oscilação dos valores do vetor ROP_N menor a distância entre as curvas ROP_{NC} e a reta de referência. O módulo das distâncias entre as curvas ROP_{NC} e RFC, expresso pela equação (18), forma um vetor denominado de VDC que é o vetor de distância entre as curvas. Essa distância é calculada ponto a ponto e pode ser traduzida como erro entre as curvas ROP_{NC} e a reta de referência.

$$VDC = |ROP_{NC}(m) - RFC(m)| \quad (18)$$

em que $m = 1, 2, 3, \dots, M$, sendo M o número de amostras no domínio do tempo; ROP_{NC} é o vetor relação de potência de tempo-frequência normalizada de valores cumulativos e RFC são os valores cumulativos do vetor DC de referência. A distância entre as curvas ROP_{NC} e RFC será máxima quando os valores de ROP_{NC} forem iguais a zero ou iguais a $N+1$. Nessas condições o somatório do módulo das distâncias entre as curvas ROP_{NC} e RFC ($\sum VDC$) será igual ao somatório dos valores da reta de referência ($\sum RFC$), tal que a razão (RZC) entre o $\sum VDC$ e o $\sum RFC$ será um valor unitário. Isso significa que quanto menor a distância entre as curvas ROP_{NC} e RFC mais próximo de zero será a razão entre o $\sum VDC$ e o $\sum RFC$, conforme expresso pela equação (19).

$$RZC = \frac{\sum_{m=1}^M |ROP_{NC}(m) - RFC(m)|}{\sum_{m=1}^M ROP_{NC}(m)} \quad (19)$$

em que ROP_{NC} é o vetor relação de potência de tempo-frequência normalizada de valores cumulativos; RFC são os valores cumulativos do vetor DC de referência; $m = 1, 2, 3, \dots, M$, sendo M o número de amostras no domínio do tempo ou número de colunas da matriz que descreve os coeficientes da STFT. Nessa pesquisa, o termo $|ROP_{NC}(m) - RFC(m)|$ que resulta na distância entre os valores dos vetores ROP_{NC} e RFC , é diretamente proporcional as falhas ocasionadas na superfície de corte do rebolo. A partir dessas informações, o parâmetro Fator de Forma do Rebolo (WSF), equação (20), é proposto para quantificar a regularidade/uniformidade da superfície de corte do rebolo.

$$WSF = 1 - RZC \quad (20)$$

em que RZC é a razão entre o somatório do módulo das distâncias entre as curvas ROP_{NC} e RFC ($\sum VDC$) e o somatório dos valores da reta de referência ($\sum RFC$). O fator WSF calculado a partir dos procedimentos descritos pelas equações (18), (19) e (20) é compilado na equação (21).

$$WSF = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M |ROP_{NC}(m) - RFC(m)|}{\sum_{m=1}^M RFC(m)} \quad (21)$$

em que ROP_{NC} é o vetor relação de potência de tempo-frequência normalizada de valores cumulativos; RFC são os valores cumulativos do vetor DC de referência, os quais podem ser substituídos pelo índice $m = 1, 2, 3, \dots, M$, sendo M o número de amostras no domínio do tempo. O parâmetro WSF se estende na faixa de valores entre 0(zero) e 1(um), tal que: (i) terá valor 0(zero) quando RZC tender a 1(um) e (ii) terá valor 1(um) quando RZC tender a zero. Na **Figura 19a** são exemplificados os limites críticos para calcular o parâmetro WSF, isto é, o pior cenário possível. Observe na **Figura 19a** que quando o ângulo de inclinação da reta de referência (reta tracejada e de cor preta) se aproxima de 45° em relação às curvas ROP_{NC} (retas contínuas e de cor azul), o parâmetro WSF tende a zero, sendo este o pior caso possível. Por outro lado, quando o ângulo de inclinação da reta de referência (reta tracejada e de cor preto) em relação às curvas ROP_{NC} (retas contínuas e de cor azul) tende a 0(zero), o parâmetro WSF tende a um valor unitário, sendo está a melhor situação possível.

Na **Figura 19b** são replicadas as curvas ROP_{NC} mostradas na **Figura 18**. Observe, nesse exemplo, que quando o rebolo se encontra com sua superfície de corte regular os valores do vetor ROP_{NC} (**Figura 19b** - curva na cor vermelha) são aproximadamente iguais aos valores da curva de referência (**Figura 19b** - reta tracejada e de cor preta). Nesse caso RZC tende a 0(zero) e o parâmetro WSF tende 1(um). Por outro lado, quando o rebolo se encontra com sua superfície de corte irregular os valores do vetor ROP_{NC} (**Figura 19b** - curva na cor azul) se diferenciam significativamente dos valores da reta de referência (**Figura 19b** - reta tracejada e de cor preta). Nesse caso, RZC tende a 1(zero) e o parâmetro WSF tende a zero.

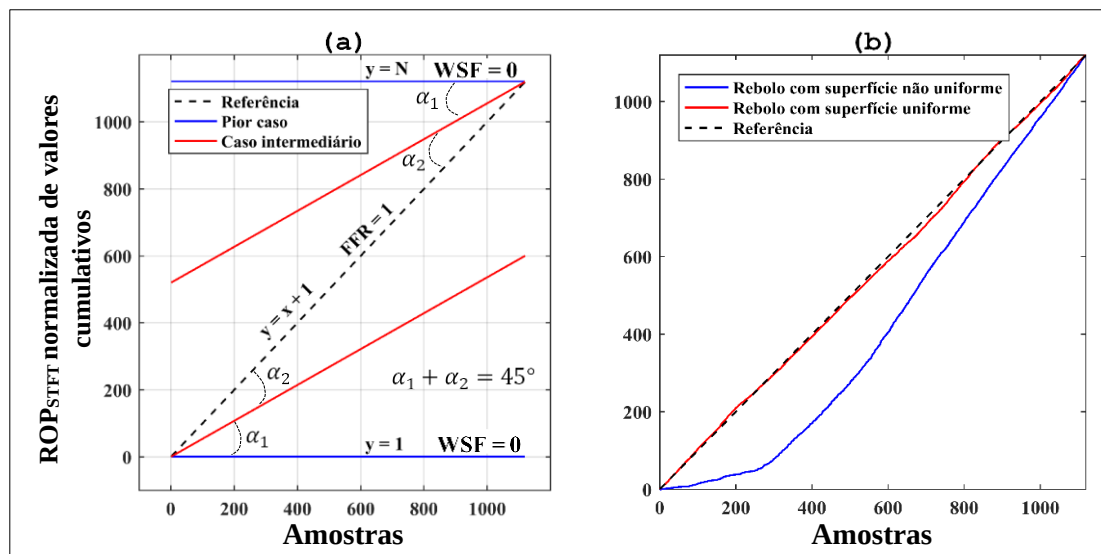


Figura 19. Parâmetro WSF: limites críticos

A interpretação do parâmetro WSF pode ser considerada:

- (i) para valores entre 0,95 e 1(um): significa que a topografia da superfície de corte do rebolo se encontra regular/uniforme, indicando o seu condicionamento para o uso no processo de retificação;
- (ii) para valores abaixo de 0,95 tendendo a 0(zero), o rebolo se encontra com sua superfície de corte totalmente irregular e não deve ser usado no processo de retificação, caso contrário, danos indesejáveis podem ser acarretados à peça em acabamento.

3.3.6. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE CURVAS

As curvas WSF obtidas para os sinais coletados com o sensor de EA foram usadas como parâmetro para verificar a eficiência do sensor PZT em quantificar a regularidade das superfícies de corte dos rebolos. Para isso, obteve-se o coeficiente de correlação de Pearson (R) para as duas curvas WSF obtidas em cada conjunto de ensaio, as quais referem-se aos sinais de EA e aos sinais PZT coletados simultaneamente durante os ensaios de dressagem. Assim, para cada conjunto de ensaio mensurou-se um valor que indica a direção e o grau da relação linear entre as curvas WSF calculadas para os sinais coletados com sensores EA e PZT. Ressalta-se que valores entre 0,10 e 0,30 indicam uma correlação fraca; valores entre 0,40 e 0,60 significam que há uma correlação moderada; e por fim, valores entre 0,70 e 1,00 sinalizam que entre as duas curvas existe uma correlação forte (FILHO; JÚNIOR, 2009; TAYLOR, 1990).

3.4. ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DO MÉTODO

O ensaio para verificação do método foi realizado no mesmo banco de ensaios usado para efetuar os testes de dressagem dos rebolos R100 e R150. Onde foi empregado um rebolo de óxido de alumínio branco da empresa NORTON, modelo 38A.150.L6VH com 127mm de furo, 355,6mm de diâmetro externo e 25,4mm de largura. A composição desse rebolo se difere do rebolo R100 tanto na granulometria quanto na porosidade. Já em relação ao rebolo R150 diverge apenas no que se refere a sua porosidade. Os ensaios de dressagem usando os rebolos R100 e R150 foram realizados de modo a observar as falhas referentes ao desgaste da topografia de corte dos rebolos. Essas falhas foram ocasionadas na superfície de corte dos rebolos devido ao seu uso no processo retificação.

Por outro lado, o ensaio de verificação do método concentra-se na primeira dressagem realizada no rebolo R150.6, a qual é realizada com o objetivo de condicioná-lo para a retificação. Neste ensaio são obtidas as informações referentes às falhas: conicidade e excentricidade do rebolo. Essas falhas são ocasionadas no rebolo durante o seu processo de fabricação. Ressalta-se que após aquisição do rebolo, antes de usá-lo no processo de retificação, duas etapas devem ser realizadas: (i) o balanceamento e (ii) a operação de dressagem.

Os parâmetros usados no ensaio de dressagem para a verificação do método são expostos na Tabela **III**. A profundidade de dressagem (a_d) usada no ensaio de verificação do método foi de $40\mu\text{m}$ ($0,04\text{mm}$). A agressividade do rebolo R150.6 não foi mensurada, visto que o objetivo deste ensaio se restringe a verificar se o parâmetro WSF é capaz de quantificar a regularidade da superfície de corte de rebolos de óxido de alumínio estruturalmente distinto empregando uma profundidade de dressagem superior a $10\mu\text{m}$ ($0,01\text{mm}$).

TABELA III. PARÂMETROS DOS ENSAIOS DE DRESSAGEM PARA A VERIFICAÇÃO DO MÉTODO

Rebolo R150.6 (38A.150.L6VH)							
N_s [RPM]	d_s [mm]	V_s [m/s]	b_d [μm]	t_d [s]	S_d [mm]	U_d	P_d
1800	355,60	33,52	670	5,55	0,1523	4,44	50

Nesse ensaio, dois erros de dressagem foram introduzidos com vista a testar a confiabilidade e robustez do método

proposto. Ademias, a metodologia utilizada para o processamento dos sinais de EA e PZT coletados durante os ensaios de dressagem realizados usando os rebolos R100 e R150, também foi empregada para o processamento dos sinais de EA e PZT coletados, ao mesmo tempo, durante o ensaio realizado para a verificação do método. Neste ensaio, também foi calculado o coeficiente de correlação entre as curvas WSF obtidas a partir dos sinais de EA e PZT. O objetivo foi verificar a eficiência do PZT em quantificar a regularidade da superfície de corte de rebolos para falhas distintas das observadas nos rebolos R100 e R150.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e descritos os resultados da aferição da agressividade dos rebolos, bem como, à análise de falha (desgaste da camada abrasiva do rebolo) via processamento digital dos sinais de EA e PZT coletados durante a operação de dressagem. Os resultados são dispostos da seguinte forma: na seção **4.1** são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o rebolo R100; na seção **4.2** são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o rebolo R150; por fim, na seção **4.3** são apresentados os resultados da verificação do Método: rebolo R150.6, onde são analisadas as falhas: excentricidade e conicidade.

4.1. RESULTADOS OBTIDOS PARA O REBOLO R100: 38A.100.LVH

Nessa seção os resultados obtidos para o rebolo R100 são dispostos em tópicos da seguinte forma: no tópico **4.1.1** são apresentados e discutidos os resultados que se referem a agressividade do rebolo em função do volume de material removido; no tópico **4.1.2** são apresentados os resultados referente à análise no domínio da frequência dos sinais originais de EA e PZT antes da reamostragem digital; no tópico **4.1.3** são apresentados os resultados referente aos sinais originais de EA e PZT coletados durante o ensaio de dressagem, os quais foram reamostrados digitalmente; no tópico **4.1.4** são apresentados e discutidos os resultados referente à análise tempo-frequência dos sinais originais de EA e PZT reamostrados, sendo os espectrogramas calculados a partir dos parâmetros obtidos por meio do algoritmo proposto; no tópico **4.1.5** são apresentados os resultados da ROP_{STFT} normalizada/cumulativa dos sinais de EA e PZT; e por fim, no tópico **4.1.6** são apresentados os resultados referente ao WSF tanto para os sinais de EA quanto para os sinais PZT.

4.1.1. AGRESSIVIDADE DO REBOLO EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO

A agressividade do rebolo R100 medida para cada conjunto de ensaios é mostrada na **Figura 20**, bem como, o volume de material removido durante os ensaios de dressagem. Na **Figura 20a** são mostrados os resultados obtidos para o conjunto R100A; na **Figura 20b** são expostos os resultados obtidos para o conjunto R100B e, por fim, na **Figura 20c** são exibidos os resultados obtidos para o conjunto R100C.

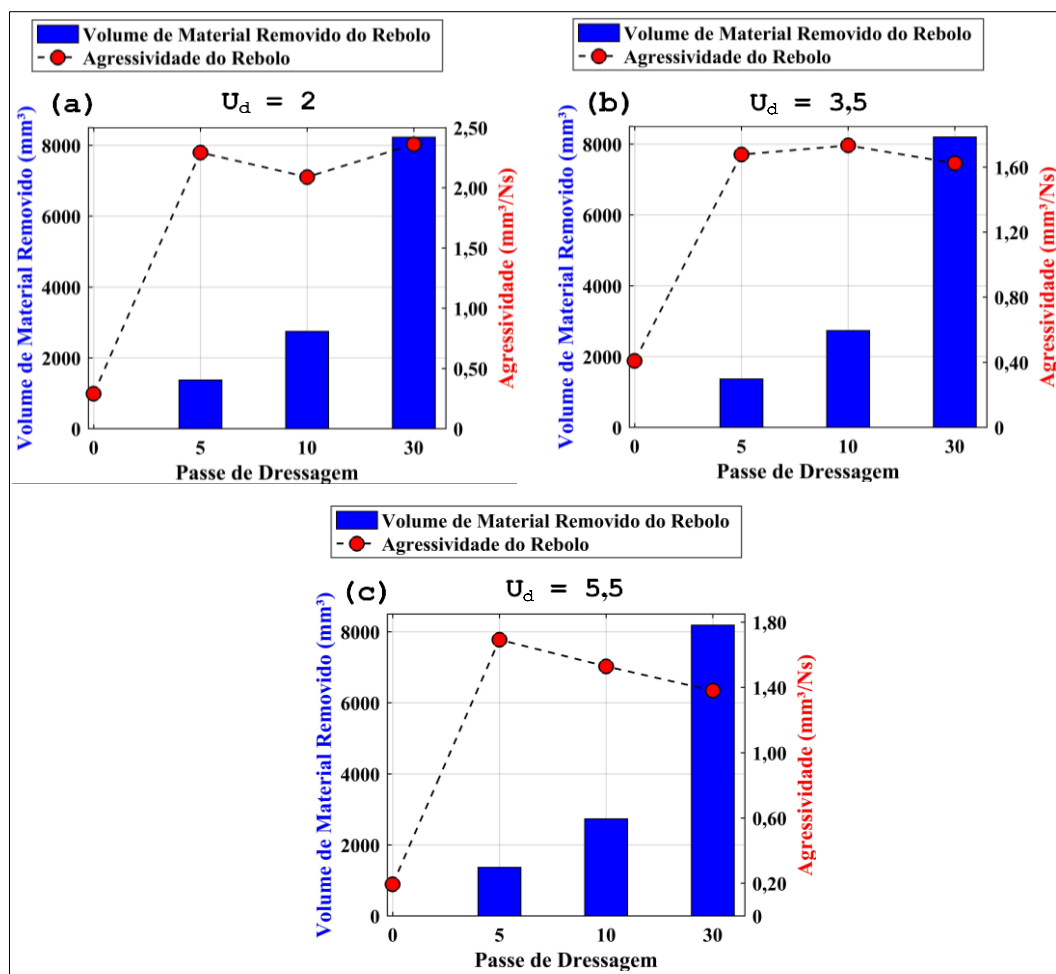


Figura 20. Agressividade do rebolo R100 para os conjuntos de ensaios: R100A, R100B e R100C

Observa-se na **Figura 20** que, após a retificação não usual de peças de aço ABNT 1020, os valores aproximados da agressividade do rebolo para os conjuntos R100A, R100B e R100C são de, respectivamente, 0,30 mm³/Ns, 0,40 mm³/Ns e 0,20 mm³/Ns. Após, aproximadamente, 1400 mm³ de material removido do rebolo, esses valores saltam para 2,29 mm³/Ns, 1,68 mm³/Ns e 1,69 mm³/Ns, respectivamente. O que equivale a um significativo aumento de 663%, 320% e 745% na agressividade do rebolo para os conjuntos R100A, R100B e R100C, respectivamente. Por outro lado, nota-se na **Figura 20a**, na **Figura 20b** e na **Figura 20c** que após, aproximadamente, 8000 mm³ de material abrasivo removido da superfície de corte do rebolo R150 sua agressividade não sofre variação significativa. Para esse volume de material removido, a agressividade do rebolo é de aproximadamente 2,36 mm³/Ns, 1,62 mm³/Ns e 1,38 mm³/Ns, respectivamente, para os conjuntos R100A, R100B e R100C.

Observa-se na **Figura 20** que a partir de 1400 mm³ de material removido da superfície de corte do rebolo sua agressividade aumentou em 3,0% para o conjunto R100A e diminuiu, respectivamente, em 3,6% e 18,3% para os conjuntos R100B e R100C. A variação de agressividade do rebolo a partir de 1400 mm³ de material removido é insignificante quando comparada com a variação obtida para a faixa de 0-1400 mm³ de material removido do rebolo. Isso significa, que em termos de agressividade, a partir de 1400 mm³ removidos o rebolo se encontra com sua capacidade de corte restabelecida, sendo este o momento adequado para finalizar a operação de dressagem. Nota-se ainda que após o processo de retificação não usual, o rebolo removeu um pequeno volume de material do disco usado para medir a sua agressividade, isto é, a energia específica de retificação gasta pelo sistema foi muito maior que o volume de material removido do disco. Por outro lado, ao condicionar o rebolo, gastando a mesma energia específica, foi removido do disco um volume de material significativamente maior, atestando a agressividade do rebolo. Isso ocorreu em todas as condições de dressagem realizadas no rebolo R100. Esses resultados são similares aos obtidos pelos autores Lopes et al. (2017) e Moia et al. (2015).

4.1.2. ANÁLISE DO CONTEÚDO HARMÔNICO DOS SINAIS ORIGINAIS DE EA E PZT

Os espectros da PSD dos sinais de EA e PZT para o rebolo R100 com e sem falhas são apresentados na **Figura 21**: conjunto R100A - U_d igual 2; conjunto R100B - U_d igual a 3,5; e conjunto R100C - U_d igual a 5,5. Desta forma é possível analisar o conteúdo harmônico em função das falhas inseridas na superfície de corte do rebolo durante a retificação não usual, assim como, as frequências mais significativas da operação de dressagem do rebolo.

Observa-se na **Figura 21** que em todos os casos o espectro de frequência obtido para o rebolo com falhas possui menor potência que o espectro de frequência obtido para o rebolo sem falhas. Isso ocorre devido ao contato entre a porta do dressador e a superfície de corte do rebolo. Para o rebolo com falhas, devido ao desgaste da camada abrasiva, não há pleno contato entre a ponta de diamante do dressador com a superfície de corte do rebolo, gerando uma fonte acústica

não uniforme ao longo do tempo. Por essa razão, os espectros de frequências para o rebolo com falhas possuem menor potência. Por outro lado, para o rebolo sem falhas, isto é, com superfície regular, há o pleno contato entre a ponta de diamante do dressador com a superfície de corte do rebolo. Além disso, os grãos abrasivos estão expostos na superfície de corte do rebolo e ao entrar em contato com a ponta de diamante do dressador ficam suscetível a fraturas. Por isso, os espectros de frequências para o rebolo sem falhas possuem maior potência.

Verifica-se na **Figura 21** que o conteúdo harmônico mais significativo da operação de dressagem estão abaixo de 200 kHz tanto para os sinais coletados com o sensor de EA quanto para os sinais coletados com o sensor PZT, similar ao descrito pelos autores Moia et al. (2015). Desta forma a reamostragem dos sinais a 500 kHz, obedecendo o Teorema de Nyquist, é justificada, pois as frequências acima de 150 kHz, por possuírem níveis baixos de potência, inibem a identificação de uma possível relação desse conteúdo harmônico com as condições topográficas da superfície de corte do rebolo.

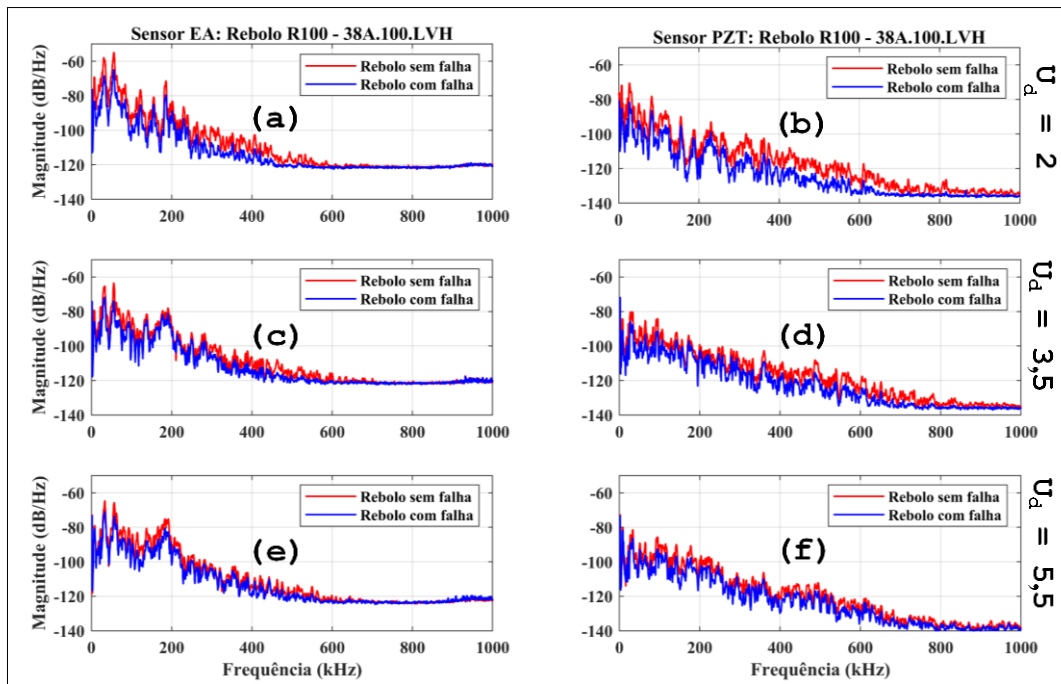


Figura 21. Conteúdo harmônico dos sinais de EA e PZT para o rebolo R100

O método *Welch*, utilizado para obter a PSD dos sinais de EA e PZT, permite analisar o conteúdo harmônico desses sinais no domínio da frequência. No entanto, esse método não

possibilita fazer uma análise no domínio do tempo, ou seja, é possível identificar a existência de falhas na superfície de corte do rebolo, porém não é possível identificar o momento e a região em que ocorreu a falha. Por isso, técnicas como a STFT são necessárias para que uma análise no domínio do tempo e da frequência possa ser realizada e as informações pertinentes ao processo possam ser extraídas com maiores detalhes.

4.1.3. SINAIS ORIGINAIS DE EA E PZT REAMOSTRADOS

Os sinais originais dos conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C para o sensor de EA e para o sensor PZT após a reamostragem são apresentados na **Figura 22** e na **Figura 23**, respectivamente. Para cada conjunto de ensaio são mostrados quatro sinais para o sensor de EA e quatro sinais para o sensor PZT que se refere: (i) ao primeiro passe de dressagem, vide **Figuras 22a/e/i** e **Figuras 23a/e/i**; (ii) ao quinto passe de dressagem, vide **Figuras 22b/f/j** e **Figuras 23b/f/j**; (iii) ao décimo passe de dressagem, vide **Figuras 22c/g/k** e **Figuras 23c/g/k**; por fim, (iv) ao trigésimo passe de dressagem, vide **Figuras 22d/h/l** e **Figuras 23d/h/l**.

Observa-se na **Figura 22a/e/i** e na **Figura 23a/e/i**, rebolo com falhas (primeiro passe de dressagem), que tanto os sinais de EA quanto os sinais PZT apresentam amplitudes irregulares ao longo do tempo. Isso ocorre porque durante a retificação foram gerados desgastes ao longo da superfície de corte do rebolo, o que não permite o pleno contato entre a ponta de diamante do dressador com a superfície de corte do rebolo. Por não haver o pleno contato durante o passe de dressagem, não há a geração de uma fonte acústica contínua e uniforme, ocasionando sinais irregulares ao longo do tempo. Em contrapartida, para o rebolo sem falhas (trigésimo passe de dressagem), tanto o sensor de EA quanto o sensor PZT apresentam sinais uniformes ao longo do tempo. Isso ocorre devido à uniformidade da superfície de corte do rebolo que permite o seu pleno contato com a ponta de diamante do dressador. Em razão disso, há a geração de uma fonte acústica contínua e uniforme ao longo do tempo. Esse efeito se deve ainda ao fato de as arestas dos grãos abrasivos estarem expostas e, conseqüentemente, um atrito maior ocorre entre o rebolo e o dressador (LOPES et al., 2017; MOIA et al.,

2015), originando sinais uniformes e com maiores amplitudes durante os passes de dressagem.

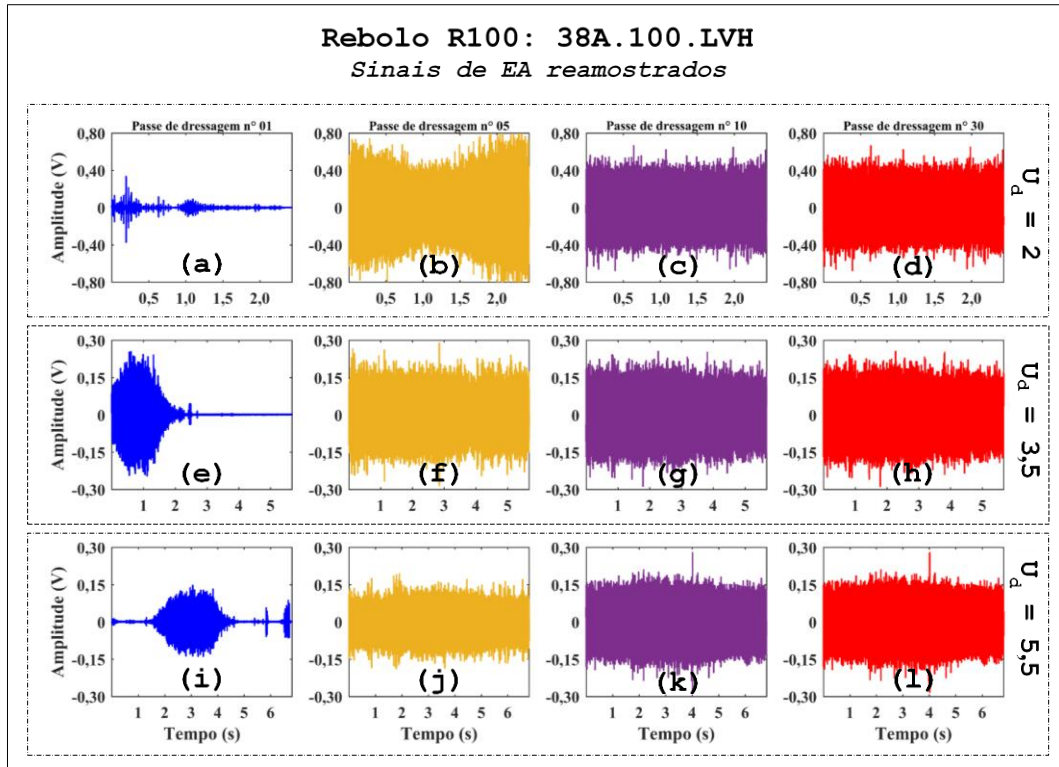


Figura 22. Sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100

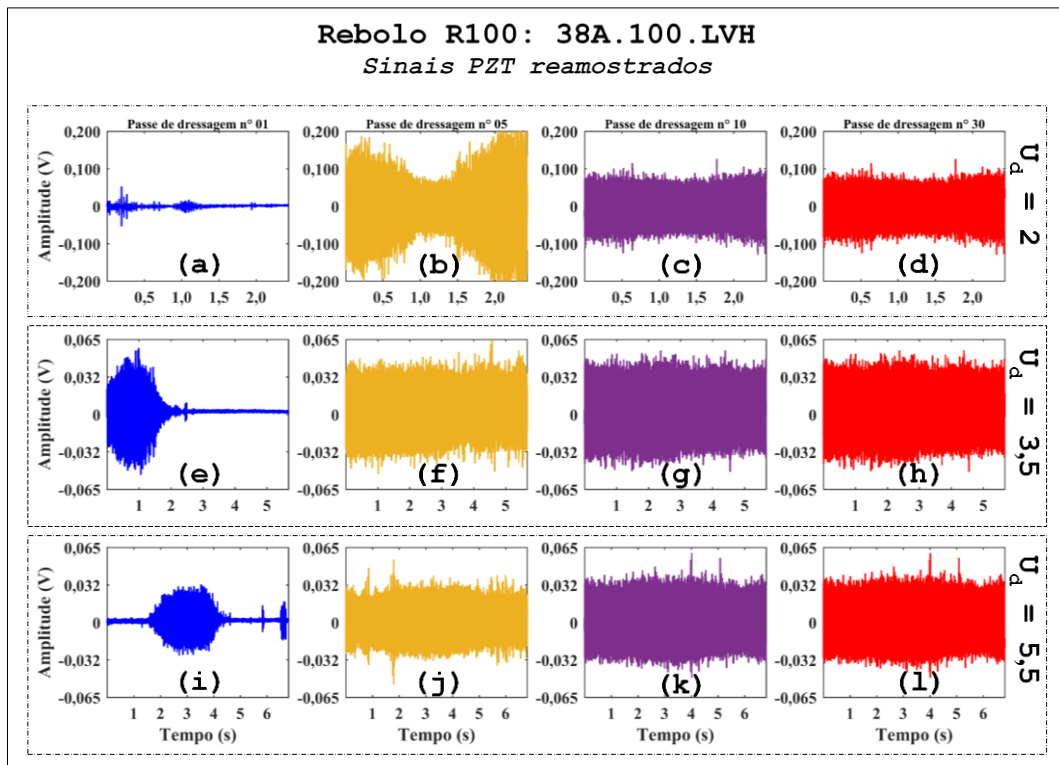


Figura 23. Sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100

4.1.4. ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIAS DOS SINAIS DE EA E PZT REAMOSTRADOS

Na **Figura 24** são expostas as imagens que representam duas condições extremas de cada operação de dressagem: rebolo com superfície de corte irregular e rebolo com superfície regular. A **Figura 24a**, a **Figura 24e** e a **Figura 24i** mostram a superfície de corte do rebolo antes de iniciar a operação de dressagem, essas são imagens coletadas com a câmera do aparelho celular. A **Figura 24b**, a **Figura 24f** e a **Figura 24j** são, respectivamente, ampliações das imagens mostradas na **Figura 24a**, na **Figura 24e** e na **Figura 24i**, as quais foram coletadas com o microscópio digital. Por outro lado, a **Figura 24c**, a **Figura 24g** e a **Figura 24k**, também coletadas com o aparelho celular, mostram a superfície de corte do rebolo após a finalização da operação de dressagem. Por fim, a **Figura 24d**, a **Figura 24h** e a **Figura 24l**, nessa ordem, expõem as ampliações coletadas com o microscópio digital.

Observa-se na **Figura 24a/b**, na **Figura 24e/f** e na **Figura 24i/j**, respectivamente para os conjuntos de ensaios: R100A, R100B e R100C, que antes de iniciar a operação de dressagem o rebolo se encontra com uma quantidade relevante de cavaco em sua superfície de corte, o que gerou uma transformação considerável na sua superfície de corte. Isso se deve a retificação não usual de peças de aço ABNT 1020 que resultou em um nível acentuado de desgaste e de empastamento da camada abrasiva do rebolo.

Em contrapartida, a operação de dressagem transformou a superfície de corte rebolo, deixando-a regular e condicionando-o para o uso na retificação. No decorrer da operação de dressagem, o rebolo atinge condições intermediárias, ou seja, a dressagem não está completa. E a cada passe de dressagem o rebolo atinge uma nova condição topográfica e de afiação de sua superfície de corte. Esse fenômeno ocorre até o momento em que o rebolo atinge a condição plena de dressagem, isto é, quando o rebolo se encontra condicionado para o uso na retificação, com sua superfície de corte regular e agressiva.

Os sinais de EA e PZT, coletados durante a operação de dressagem, mapeiam as diversas condições topográficas e, também, a agressividade da superfície de corte do rebolo. A partir dos sinais de EA e PZT, aplicando técnicas avançadas de processamento digital de sinais, como a STFT, é possível

relacioná-los com a regularidade da superfície de corte do rebolo com maior qualidade.

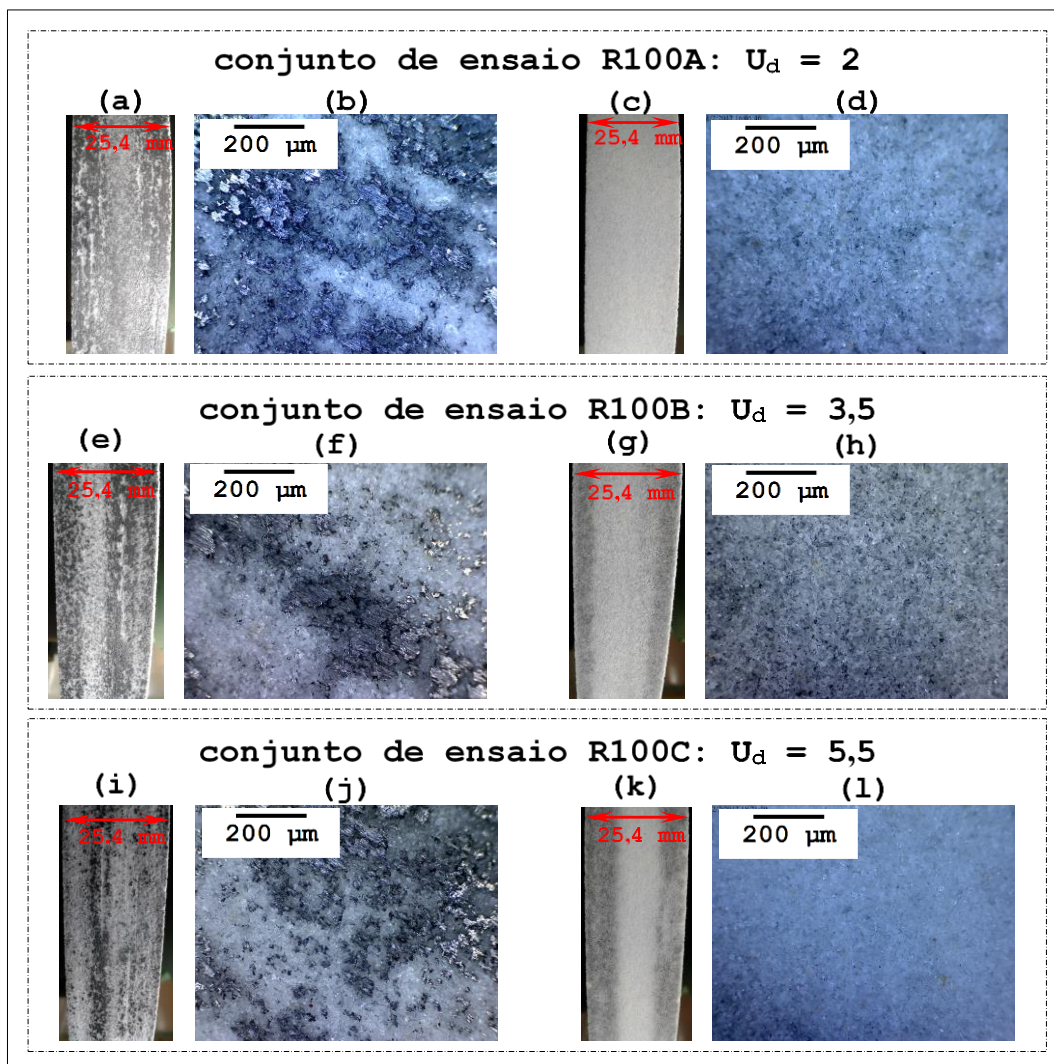


Figura 24. Imagens da superfície de corte do rebolo R100 antes de iniciar o ensaio de dressagem e após finalização do ensaio de dressagem

Os espectrogramas da STFT dos sinais de EA e PZT reamostrados, para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C, são apresentados na **Figura 25** e na **Figura 26**, respectivamente, para o sensor de EA e para o sensor PZT. Esses espectrogramas se referem aos sinais de EA e PZT mostrados na **Figura 22** e na **Figura 23**.

Na **Figura 25** e na **Figura 26**, para cada conjunto de ensaio são mostrados quatro espectrogramas para o sensor de EA e quatro espectrogramas para o sensor PZT que se referem ao primeiro, quinto, décimo e trigésimo passe de dressagem. Observa-se na **Figura 25** e na **Figura 26** que os sinais de EA e PZT, coletados durante a operação de dressagem, mapeiam as falhas na superfície de corte do rebolo. Consequentemente,

a partir dos espectrogramas desses sinais é possível analisar o comportamento de seus respectivos conteúdos harmônicos em função das condições topográficas da superfície de corte do rebolo.

Nota-se, nas **Figuras 25a/e/i** e nas **Figuras 26a/e/i**, que nos espectrogramas dos sinais de EA e PZT, para o rebolo com falhas - primeiro passe de dressagem, há uma variação de tonalidade ao longo do eixo de tempo, e isso ocorre para todas as frequências dentro da faixa em análise, que se estende de 0 a 150 kHz. Essa variação está relacionada com o empastamento e desgaste do rebolo, pois, nesse estágio o contato entre o dressador e o rebolo se dá de forma não uniforme, gerando baixos níveis de energia, principalmente, nas regiões de corte do rebolo em que as condições de empastamento e de desgaste da superfície de corte do rebolo são mais acentuadas, similar ao descrito pelos autores Moia et al. (2015). Em razão disso, nessas regiões, pouca atividade acústica é gerada, refletindo diretamente na regularidade dos níveis de energia do conteúdo harmônico dos sinais de EA e PZT ao longo dos passes de dressagem.

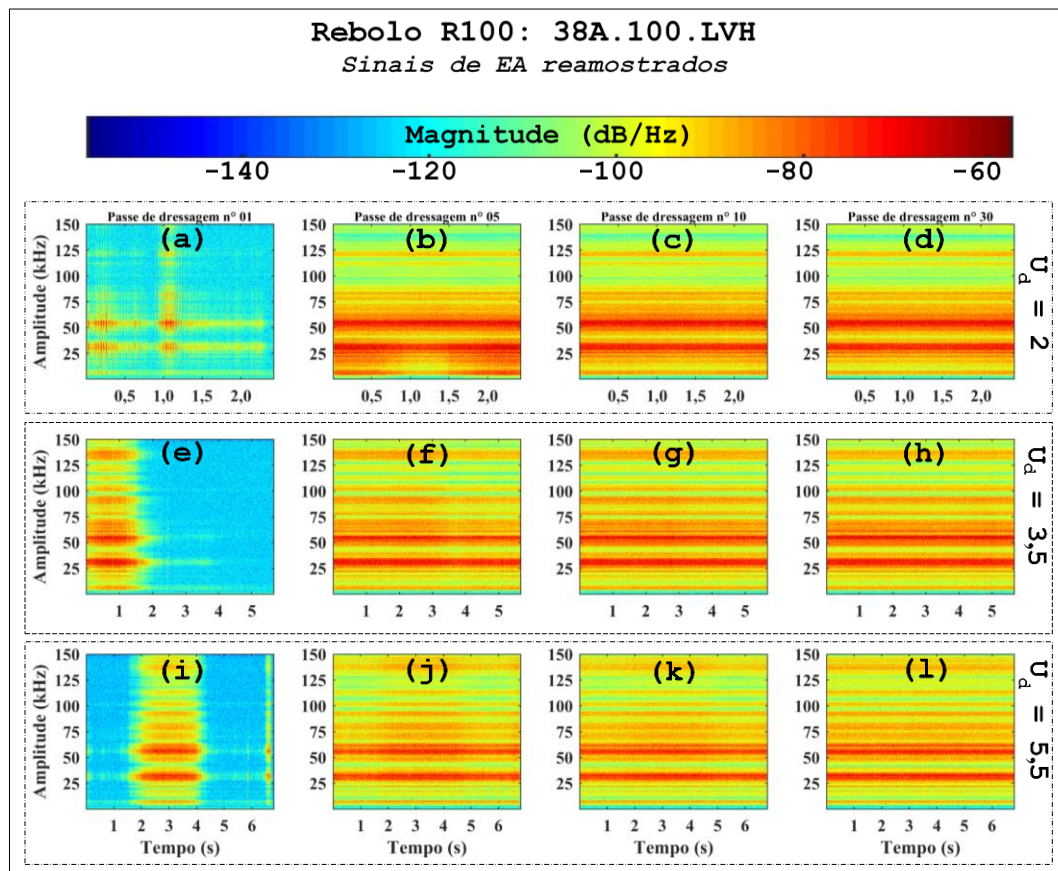


Figura 25. Espectrogramas dos sinais de EA para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C

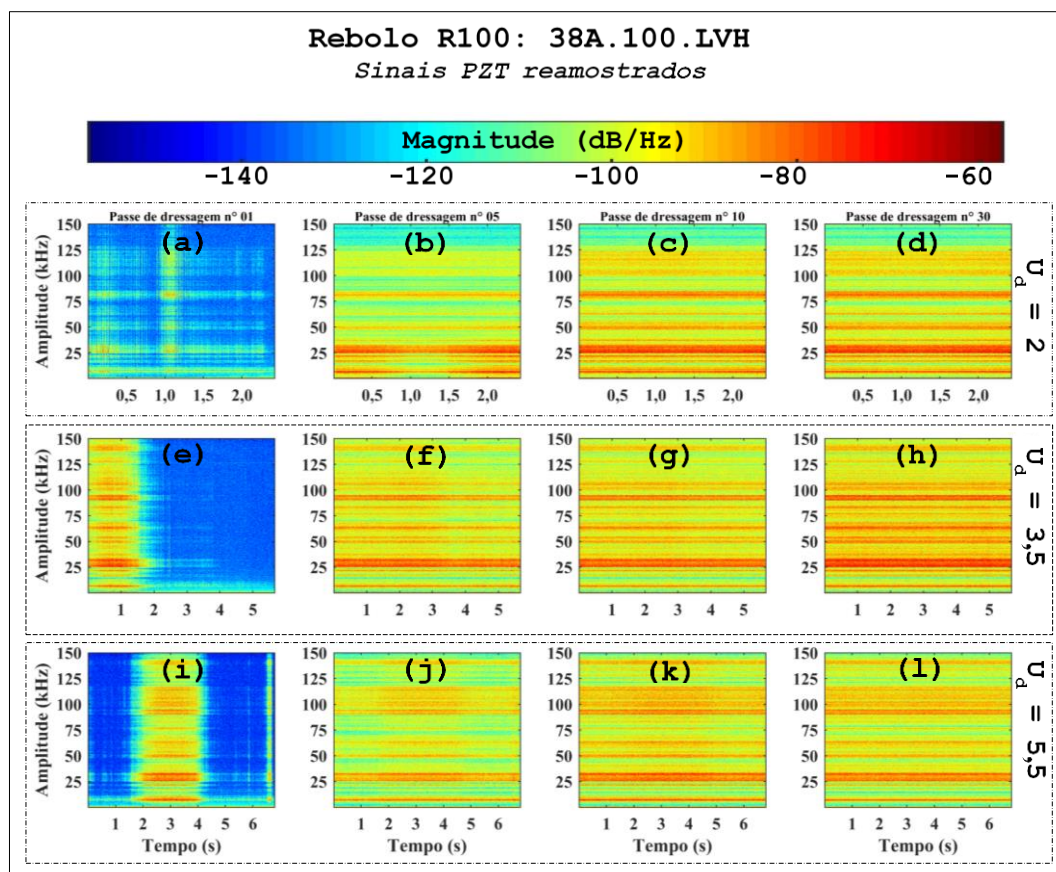


Figura 26. Espectrograma dos sinais PZT para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C

Por outro lado, nas **Figuras 25d/h/l** e nas **Figuras 26 d/h/l**, nos espectrogramas do trigésimo passe de dressagem de cada conjunto de ensaio, os quais representam o rebolo sem falhas, isto é, quando sua superfície de corte se encontra regular: rebolo plenamente dressado, observa-se que o conteúdo harmônico dos sinais de EA e PZT ao longo do tempo é uniforme. Isto ocorre, porque para um rebolo dressado, com superfície regular, o contato entre o dressador e o rebolo é pleno e ocorre do início ao fim do passe de dressagem. Isto se deve ainda ao fato de as arestas dos grãos abrasivos estarem expostas e, conseqüentemente, um atrito maior ocorre entre o rebolo e o dressador (LOPES et al., 2017; MOIA et al., 2015). Conseqüentemente, o atrito gerado entre os grãos abrasivos do rebolo e o dressador produzem uma atividade acústica contínua e uniforme ao longo do passe de dressagem, conseqüentemente, o conteúdo harmônico segue o mesmo comportamento.

Nota-se também, na **Figura 25** e na **Figura 26**, tanto para o sensor de EA quanto para o sensor PZT de todos os conjuntos de ensaios, que as frequências características da operação

de dressagem estão distribuídas de forma contínua ao longo do tempo, ou seja, o conteúdo harmônico característico da operação de dressagem se encontra presente em todos os instantes de tempo. No entanto, para o rebolo com falhas o conteúdo harmônico característico da dressagem assume níveis de energia distintos, isto é, a energia dos sinais de EA e PZT sofrem variação ao longo do tempo. Em contrapartida, para a condição de rebolo sem falhas, plenamente dressado, esse conteúdo harmônico é uniforme ao longo da operação de dressagem e a variação de energia é insignificante, o que possibilita a implementação de técnicas para quantificar a regularidade topográfica da superfície de corte do rebolo e, então, classificá-lo como adequado ou não adequado para o uso na retificação.

4.1.5. ROP_{STFT} NORMALIZADA/CUMULATIVA DOS SINAIS DE EA E PZT REAMOSTRADOS

As curvas ROP_{STFT} normalizada (ROP_N) e as curvas ROP_{STFT} cumulativa normalizada (ROP_{NC}) dos sinais de EA e dos sinais PZT são, respectivamente, expostas na **Figura 27** e na **Figura 28** para o rebolo R100: com falha, em condição intermediária e sem falhas. Na **Figura 27a** e na **Figura 28a** são apresentadas as curvas ROP_N e ROP_{NC} para o conjunto de ensaios R100A: U_d igual a 2. Na **Figura 27d** e na **Figura 28d** são apresentadas as curvas ROP_N e ROP_{NC} para o conjunto de ensaios R100B: U_d igual a 3,5. E, por fim, na **Figura 27g** e na **Figura 28g** são apresentadas as curvas ROP_N e ROP_{NC} para o conjunto de ensaios R100C: U_d igual a 5,5.

As curvas ROP_N dos sinais de EA são expostas na **Figura 27a**, na **Figura 27c** e na **Figura 27e**, nesta ordem, para os conjuntos R100A, R100B e R100C. De mesma maneira, as curvas ROP_N dos sinais de PZT são expostas na **Figura 28a**, na **Figura 28c** e na **Figura 28e**, nesta ordem, para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C. Já as curvas ROP_{NC} dos sinais de EA são expostas na **Figura 27b**, na **Figura 27d** e na **Figura 27f**, na devida ordem, para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C. De modo semelhante, as curvas ROP_{NC} dos sinais PZT são apresentadas na **Figura 28b**, na **Figura 28d** e na **Figura 28f**, na devida ordem, para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C.

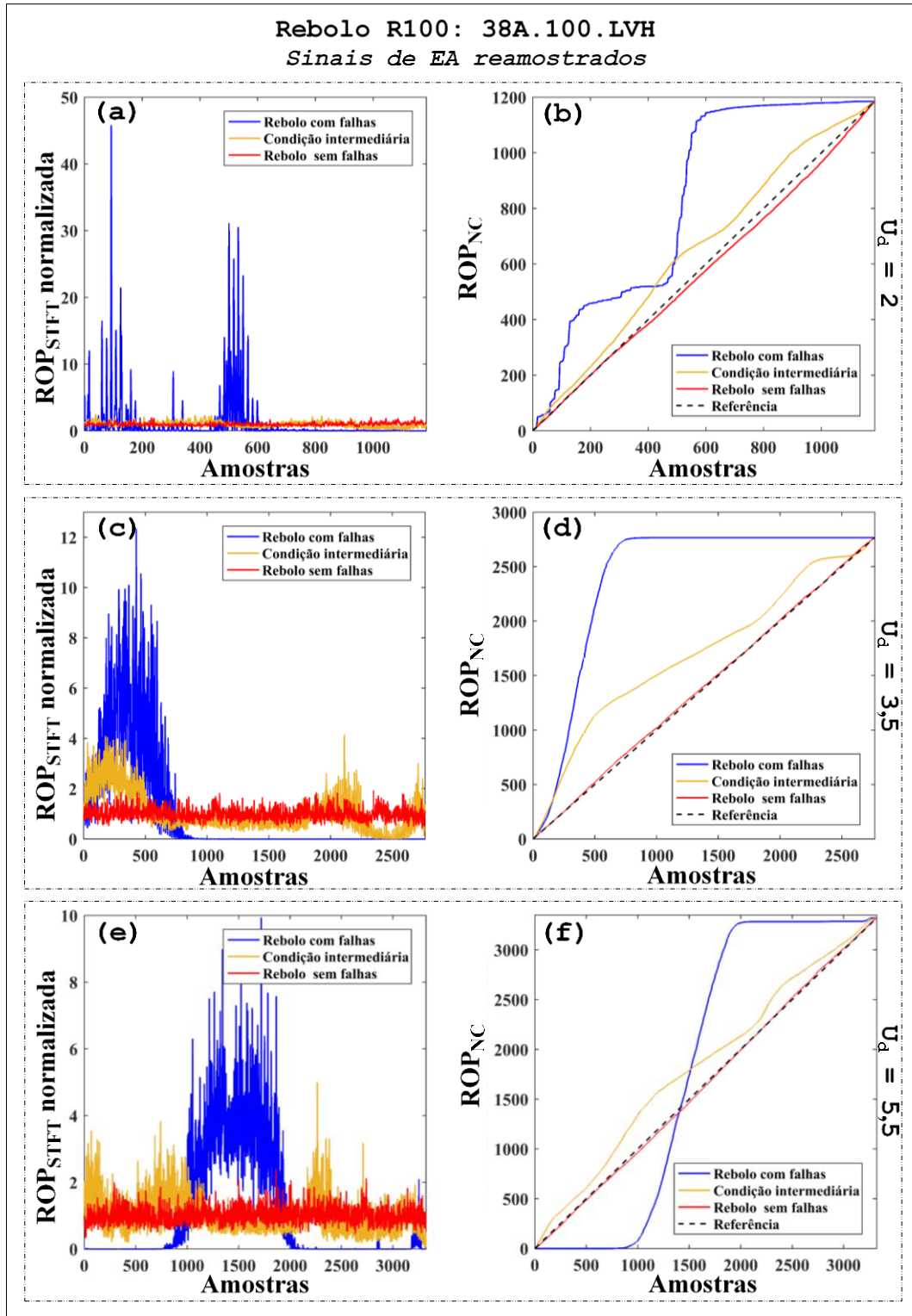


Figura 27. ROP_{STFT} dos sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100

Em geral, comparando as curvas ROP_N obtidas para os sinais coletados com sensor de EA com as curvas ROP_N calculadas para os sinais coletados com o sensor PZT, constata-se na **Figura 27** e na **Figura 28** que as curvas ROP_N

e ROP_{NC} possuem assinaturas semelhantes, mesmo com a variação dos parâmetros de dressagem.

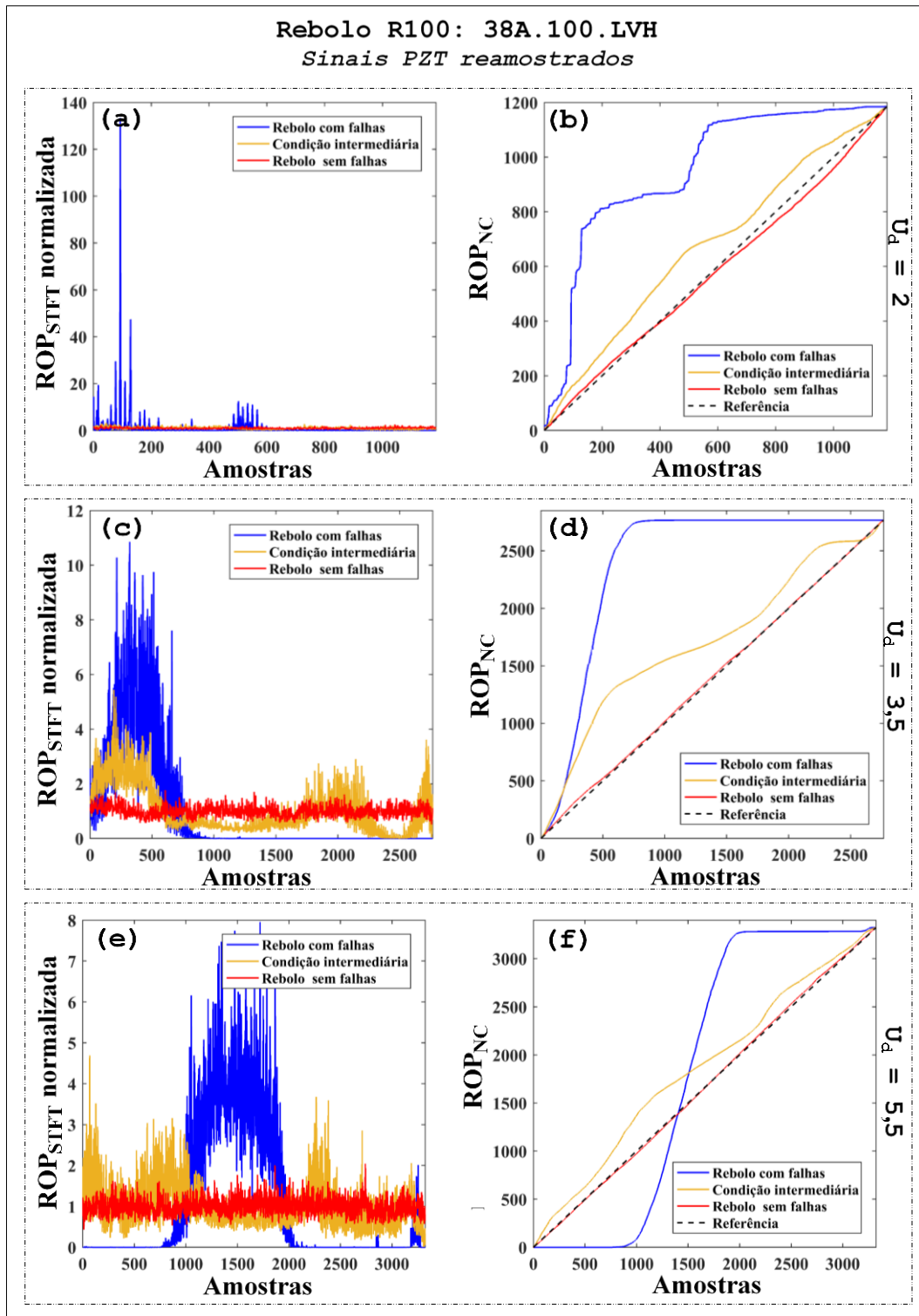


Figura 28. ROP_{STFT} dos sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R100

Visualmente, nota-se que apenas para o conjunto R100A: condição de rebolo com falhas (**Figura 27a/b** e **Figura 28a/b**), nota-se uma diferença significativa nas assinaturas das

curvas ROP_N e ROP_{NC} tanto em amplitude quanto em assinatura. Por outro lado, para os demais conjuntos de ensaios, nota-se na **Figura 27** e na **Figura 28** que não é possível destacar diferenças significativas de amplitude e de assinaturas entre as curvas ROP_N e ROP_{NC} dos sinais de EA quando comparadas as curvas obtidas para os sinais coletados com o sensor PZT. Isso se deve, principalmente, a técnica de normalização que foi aplicada com o objetivo de transportar os valores das curvas ROP_{STFT} para uma mesma referência.

Observa-se na **Figura 27** e na **Figura 28** que as curvas ROP_{NC} para a condição de rebolo com falhas possuem valores significativamente distantes da reta de referências (reta pontilhada e de cor preta), a qual representa o somatório do valor DC de referência que possui valor unitário. Isso significa que o rebolo se encontra com sua superfície de corte danificada, isto é, empastada e com vários níveis de desgaste. Essa condição do rebolo se deve a sua submissão a uma retificação não usual, a qual ocasionou uma superfície de corte irregular e sem agressividade, sem capacidade de corte, tornando-o impróprio para exercer sua função, que é conceder a superfície da peça, a melhor geometria e o melhor acabamento possível.

Por outro lado, para a condição de rebolo sem falhas observa-se na **Figura 27** e na **Figura 28** que as curvas ROP_{NC} possuem praticamente a mesma inclinação (45°) da reta de referência, ou seja, as distâncias entre as curvas ROP_{NC} e a reta de referência é praticamente nula. Nota-se ainda na **Figura 27** (sensor EA) e na **Figura 28** (sensor PZT) que apenas para a condição de rebolo sem falhas do conjunto R100A, a distância entre a curva ROP_{NC} e a reta de referência possui uma distância visualmente significativa. Possivelmente, isso ocorre devido os parâmetros de dressagem selecionados para o conjunto de ensaio R100A que gera maior macroefeito deixando o rebolo mais agressivo do que nos outros casos. Desta forma, a variação do sinal acústico ocasiona maior irregularidade na magnitude das frequências constantes na faixa de 20 kHz a 150 kHz, consequentemente os valores da curva ROP_{STFT} sofreram maior variação em torno do seu valor médio. Outra hipótese possível é que a ponta de diamante do dressador tenha sofrido desgaste e isso interferiu na sua inserção efetiva na superfície de corte do rebolo, a qual deveria ser de $10\mu\text{m}$, mas devido a alteração na forma da ponta

de diamante, a profundidade efetiva de dressagem pode ter sido alterada.

4.1.6. FATOR DE FORMA DO REBOLO - WSF

Os valores do fator de forma do rebolo (WSF) R100 obtidos para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C são mostrados na **Figura 29** tanto para os sinais coletados com o sensor de EA quanto para os sinais coletados com o sensor PZT. Na **Figura 29a** são mostrados os valores WSF calculados para o conjunto de ensaio R100A; na **Figura 29b** são expostos os valores WSF calculados para o conjunto de ensaio R100B; e por fim, na **Figura 29c** são apresentados os valores WSF obtidos para o conjunto de ensaio R100C.

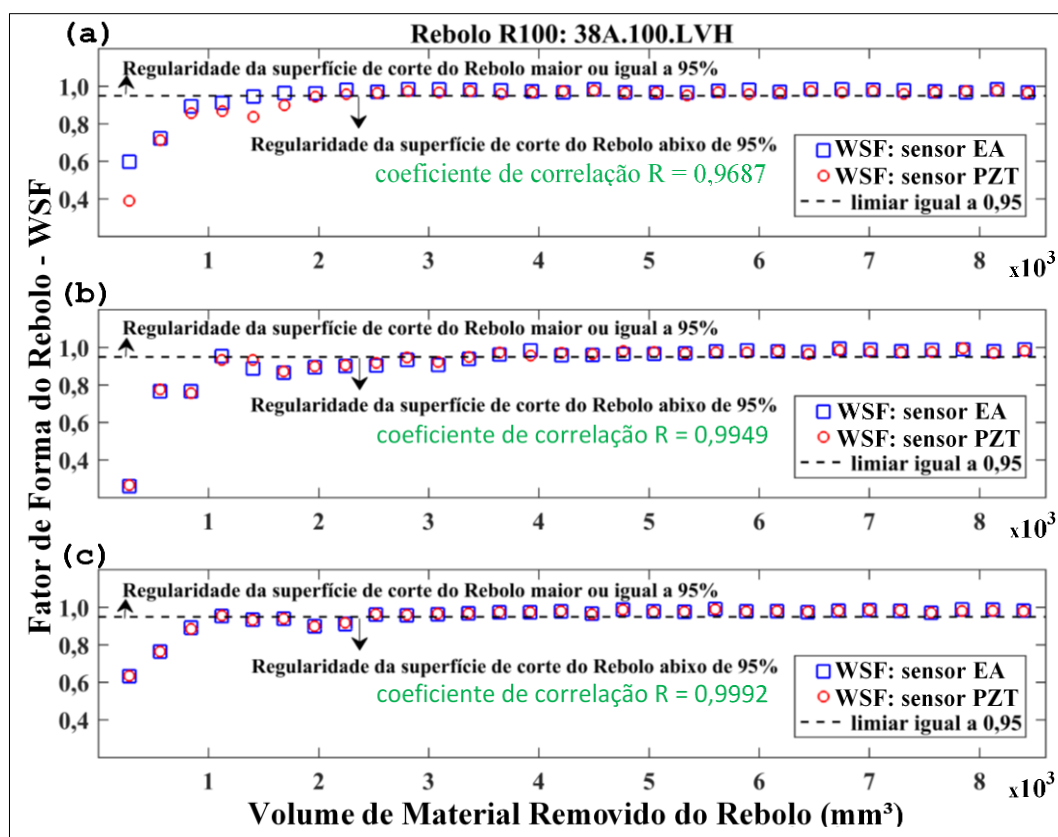


Figura 29. Fator de forma do rebolo R100 para os sinais de EA e PZT dos conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C

A partir de 4000 mm³ de material removido do rebolo, nota-se na **Figura 29** que para todas as condições de dressagem os valores WSF são maiores ou iguais a 0,95. Isso significa que a partir de 4000 mm³ de material removido do rebolo o erro entre as curvas ROP_{NC} e a reta de referência é menor ou igual a 5%, isto é, o rebolo se encontra com no mínimo 95%

de sua superfície de corte uniforme/regular e está condicionado para o uso no processo de retificação.

Observa-se na **Figura 29** que o coeficiente de correlação obtidos para os conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C, onde foram comparadas as curvas WSF obtidas para o sensor EA e as curvas WSF obtidas para o sensor PZT em função do volume de material removido do rebolo, indicam uma correlação muito forte (acima de 90%) entres as curvas (TAYLOR, 1990). Isso significa que, usando a técnica proposta nesse estudo, o sensor PZT se assemelha ao sensor de EA quanto a capacidade de quantificar a regularidade da superfície de corte do rebolo.

Na **Figura 29a**: conjunto R100A e na **Figura 29c**: conjunto R100C, observa-se que o rebolo atinge 95% ou mais de regularidade de sua superfície de corte a partir de, aproximadamente, 2500 mm³ de material removido. Por outro lado, na **Figura 29b**: conjunto R100b, nota-se que o rebolo atinge 95% ou mais de regularidade de sua superfície de corte a partir de, aproximadamente, 3500 mm³ de material removido. Isso significa que se o condicionamento do rebolo estiver ligado apenas a remoção de material, pode haver casos em que será removido mais material abrasivo do que o necessário, ultrapassando o momento adequado para interromper a dressagem, portanto, aumentando os custos de produção. Por outro lado, também pode haver casos em que a quantidade de material removido do rebolo não será suficiente para condicioná-lo.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS PARA O REBOLO R150: 38A.150.LVH

Nessa seção, os resultados obtidos para o rebolo R150 são dispostos em tópicos da seguinte forma: no tópico **4.2.1** são apresentados e discutidos os resultados que se referem a agressividade do rebolo em função do volume de material removido; no tópico **4.2.2** são apresentados os resultados referente à análise no domínio da frequência dos sinais originais de EA e PZT antes da reamostragem digital; no tópico **4.2.3** são apresentados os resultados referente aos sinais originais de EA e PZT coletados durante o ensaio de dressagem, os quais foram reamostrados digitalmente; no tópico **4.2.4** são apresentados e discutidos os resultados referente à análise tempo-frequência dos sinais originais de EA e PZT reamostrados, sendo os espectrogramas calculados a partir dos parâmetros obtidos por meio do algoritmo proposto;

no tópico **4.2.5** são apresentados os resultados da ROP_{STFT} normalizada/cumulativa dos sinais de EA e PZT; e por fim, no tópico **4.2.6** são apresentados os resultados referente ao WSF tanto para os sinais de EA quanto para os sinais PZT.

4.2.1. AGRESSIVIDADE DO REBOLO EM FUNÇÃO DO VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO

A agressividade do rebolo R150 medida para cada conjunto de ensaios é mostrada na **Figura 30**, bem como, o volume de material removido durante os ensaios de dressagem. Na **Figura 30a** são mostrados os resultados obtidos para o conjunto R150A; na **Figura 30b** são expostos os resultados obtidos para o conjunto R150B e, por fim, na **Figura 30c** são exibidos os resultados obtidos para o conjunto R150C. Observa-se na **Figura 30** que após o processo de retificação não usual a agressividade do rebolo R150 se encontra abaixo de $0,40 \text{ mm}^3/\text{Ns}$, faixa semelhante à obtida para o rebolo R100. Esses valores estão relacionados, principalmente, ao desgaste da camada abrasiva e ao empastamento da superfície de corte dos rebolos.

Nota-se ainda na **Figura 30** que para condições de dressagem semelhantes, a agressividade do rebolo R150 é menor que a agressividade do rebolo R100. Verifica-se que os valores de agressividade medidos para o rebolo R150 ao final de cada conjunto de ensaio: ensaios R150A, R150B e R150C são, respectivamente, 62%, 61% e 63% menor que a agressividade obtida ao final dos conjuntos de ensaios R100A, R100B e R100C executados para o rebolo R100. Isso se deve a diferença de granulometria entre os rebolos. Os grãos usados para fabricar o rebolo R100 são mais grossos que os grãos usados para fabricar o rebolo R150, por isso, sua agressividade é menor.

Observa-se na **Figura 30** que após 1300 mm^3 de material removido do rebolo R150 a agressividade para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C, sofreu, respectivamente, um aumento aproximado de 398%, 262% e 267% em relação a agressividade medida antes de iniciar a operação de dressagem. Observa-se ainda na **Figura 30** que, assim como foi observado para o rebolo R100, a partir de, aproximadamente, 1300 mm^3 de material removido do rebolo R150, esse se encontra com sua agressividade restabelecida. Nota-se que, a partir de 1300 mm^3 de material removido o rebolo se

encontra agressivo, pois, a partir desse ponto não há alterações significativas em sua agressividade e isso ocorre para todas as condições de dressagem realizadas no rebolo R150. Assim como observado para o rebolo R150, nota-se também que após submeter o rebolo R150 a um processo de retificação não usual de peças de aço ABNT 120, foi removido um pequeno volume de material do disco usado para medir a agressividade do rebolo, isto é, a energia específica de retificação gasta pelo sistema foi muito maior que o volume de material removido do disco. Por outro lado, ao condicionar o rebolo, gastando a mesma energia, foi removido do disco um volume de material significativamente maior, atestando a agressividade do rebolo. Isso também ocorreu em todas as condições de dressagem realizadas no rebolo R150.

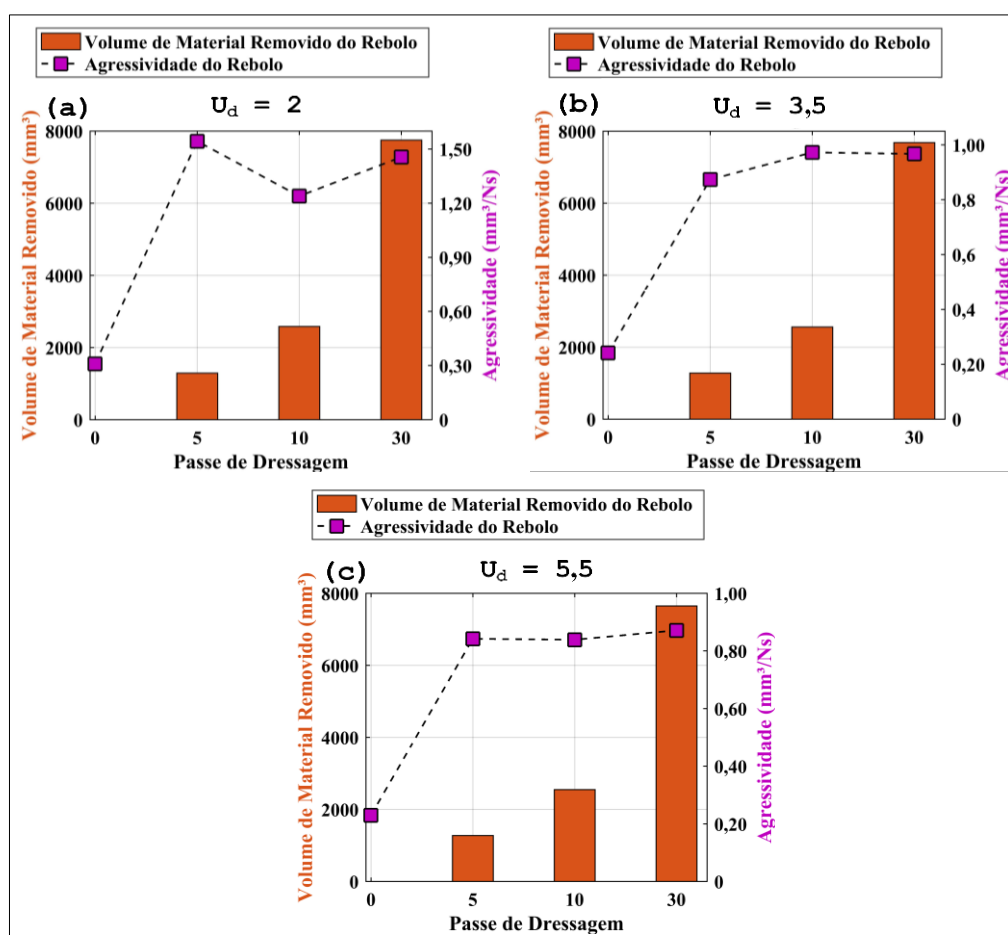


Figura 30. Agressividade do rebolo R150 para os conjuntos de ensaios: R150A, R150B e R150C

4.2.2. ANÁLISE DO CONTEÚDO HARMÔNICO DOS SINAIS ORIGINAIS DE EA E PZT

Os espectros da PSD dos sinais de EA e PZT para o rebolo R100 com e sem falhas são apresentados na **Figura 31**: (a) e

(b) conjunto R100A - U_d igual 2; (c) e (d) conjunto R100B - U_d igual a 3,5; e (e) e (f) conjunto R100C - U_d igual a 5,5.

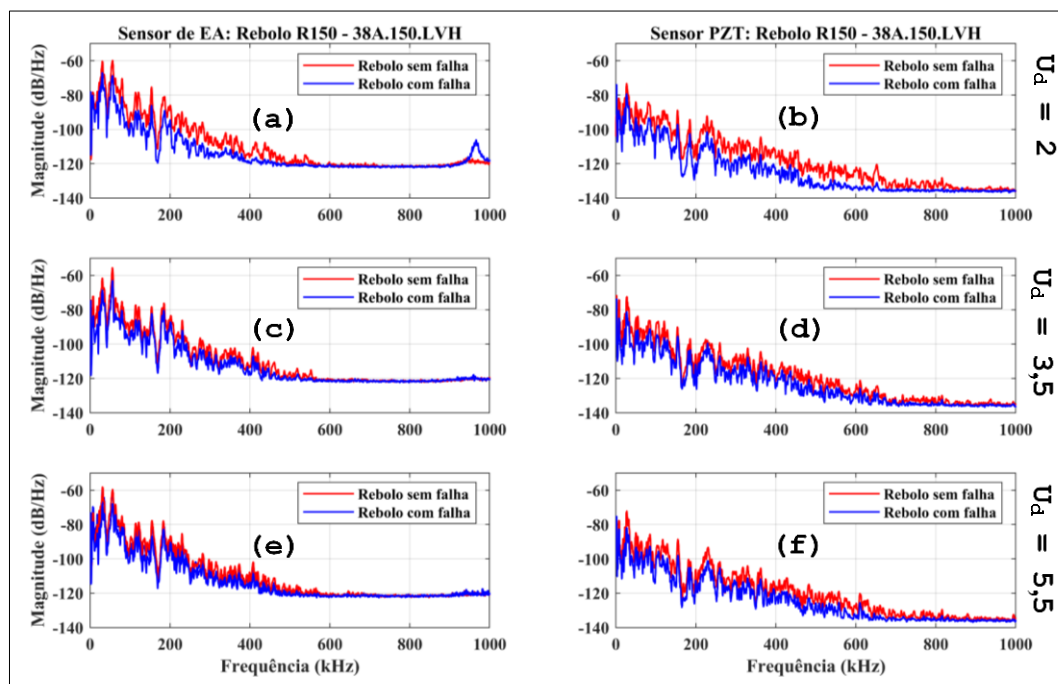


Figura 31. Conteúdo harmônico dos sinais originais de EA e PZT para o rebolo R150

Observa-se na **Figura 31** os sinais de EA e PZT coletados para a condição de rebolo R150 com falhas resulta em espectros com menor potência quando comparados aos espectros a condição de rebolo sem falhas, tal como foi observado para o rebolo R100. Verifica-se também na **Figura 31** que o conteúdo harmônico mais significativo da operação de dressagem do rebolo R150 se encontra abaixo de 200 kHz tanto para os sinais coletados com o sensor de EA quanto para os sinais coletados com o sensor PZT, sendo esse resultado também similar ao obtido para o rebolo R100. Nota-se uma similaridade significativa de assinatura dos espectros obtidos a partir dos sinais de EA e PZT de ambos os rebolos tanto na condição com falha quanto na condição sem falhas.

4.2.3. SINAIS ORIGINAIS DE EA E PZT REAMOSTRADOS

Os sinais originais de EA e PZT reamostrados são, respectivamente, mostrados na **Figura 32** e na **Figura 33** para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C do rebolo R150. Assim como para o rebolo R100, para cada conjunto de ensaio do rebolo R150, na **Figura 32** e na **Figura 33**, são mostrados quatro sinais para o sensor de EA e quatro sinais para o sensor PZT que se refere: (i) ao primeiro passe de dressagem

- **Figuras 32a/e/i;** (ii) ao quinto passe de dressagem - **Figuras 32b/f/j;** (iii) ao décimo passe de dressagem - **Figuras 32c/g/k;** por fim, (iv) ao trigésimo passe de dressagem - **Figuras 32d/h/l.**

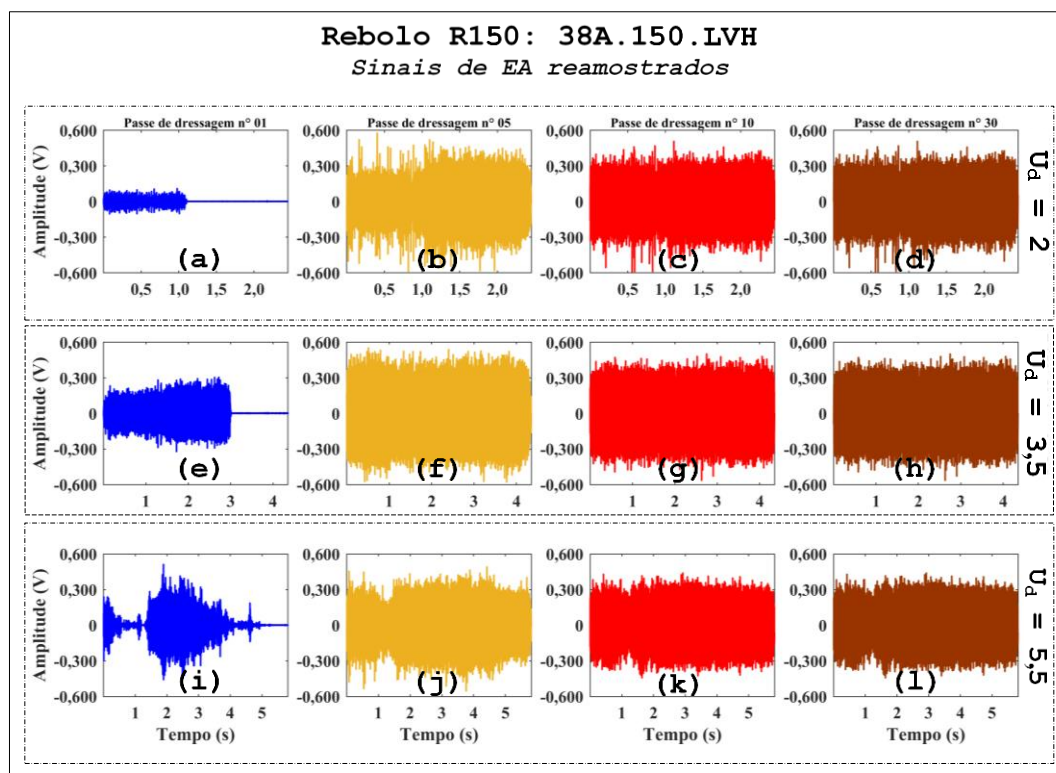


Figura 32. Sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150

Observa-se na **Figura 32** e na **Figura 33** que os sinais de EA e PZT reamostrados coletados em ensaios com o rebolo R150 possuem níveis distintos de amplitude quando comparados com os sinais de EA e PZT coletados em ensaios com o rebolo R100. Nota-se também que para o rebolo R150 sem falhas (trigésimo passe de dressagem) ao mudar os parâmetros de dressagem, os sinais de EA e PZT atingem níveis distintos de amplitude. Isso dificulta a constituição de métodos que possam ser generalizados para o monitoramento da operação de dressagem de rebolos com estruturas distintas, consequentemente, refletindo na otimização do processo de retificação onde emprega-se diversos tipos de rebolos.

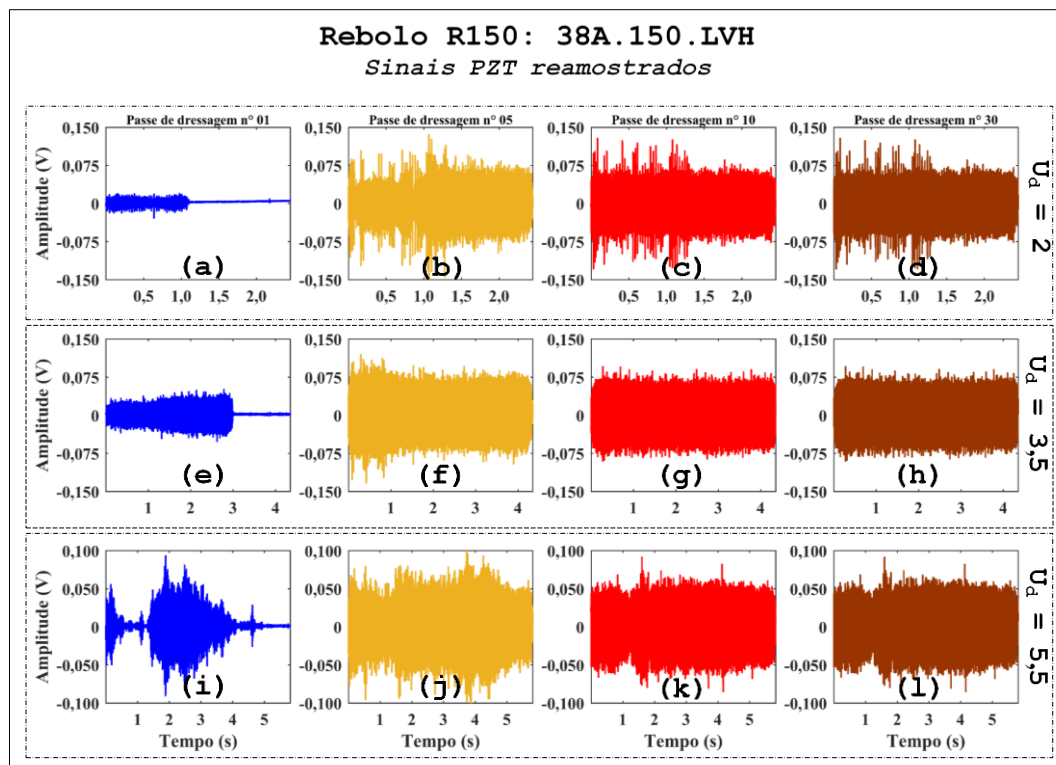


Figura 33. Sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150

4.2.4. ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIAS DOS SINAIS DE EA E PZT REAMOSTRADOS

Na **Figura 34** são expostas as imagens que representam duas condições extremas de cada operação de dressagem: rebolo com superfície de corte irregular e rebolo com superfície regular. Os espectrogramas da STFT dos sinais de EA e PZT dos conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C para o rebolo R150, são apresentados na **Figura 35** e na **Figura 36**, respectivamente. Na **Figura 34a**, na **Figura 34e** e na **Figura 34i** são mostradas as superfícies de corte do rebolo R150 antes de iniciar a operação de dressagem, essas são imagens coletadas com o aparelho celular. A **Figura 34b**, a **Figura 34f** e a **Figura 34j** são, respectivamente, ampliações das imagens mostradas na **Figura 34a**, na **Figura 34e** e na **Figura 34i**, as quais foram coletadas com o microscópio digital.

Por outro lado, na **Figura 34c**, na **Figura 34g** e na **Figura 34k**, também coletadas com o aparelho celular, são mostradas as superfícies de corte do rebolo R150 após a finalização da operação de dressagem e a **Figura 34d**, a **Figura 34h** e a **Figura 34l**, nessa ordem, expõem as ampliações coletadas com o microscópio digital.

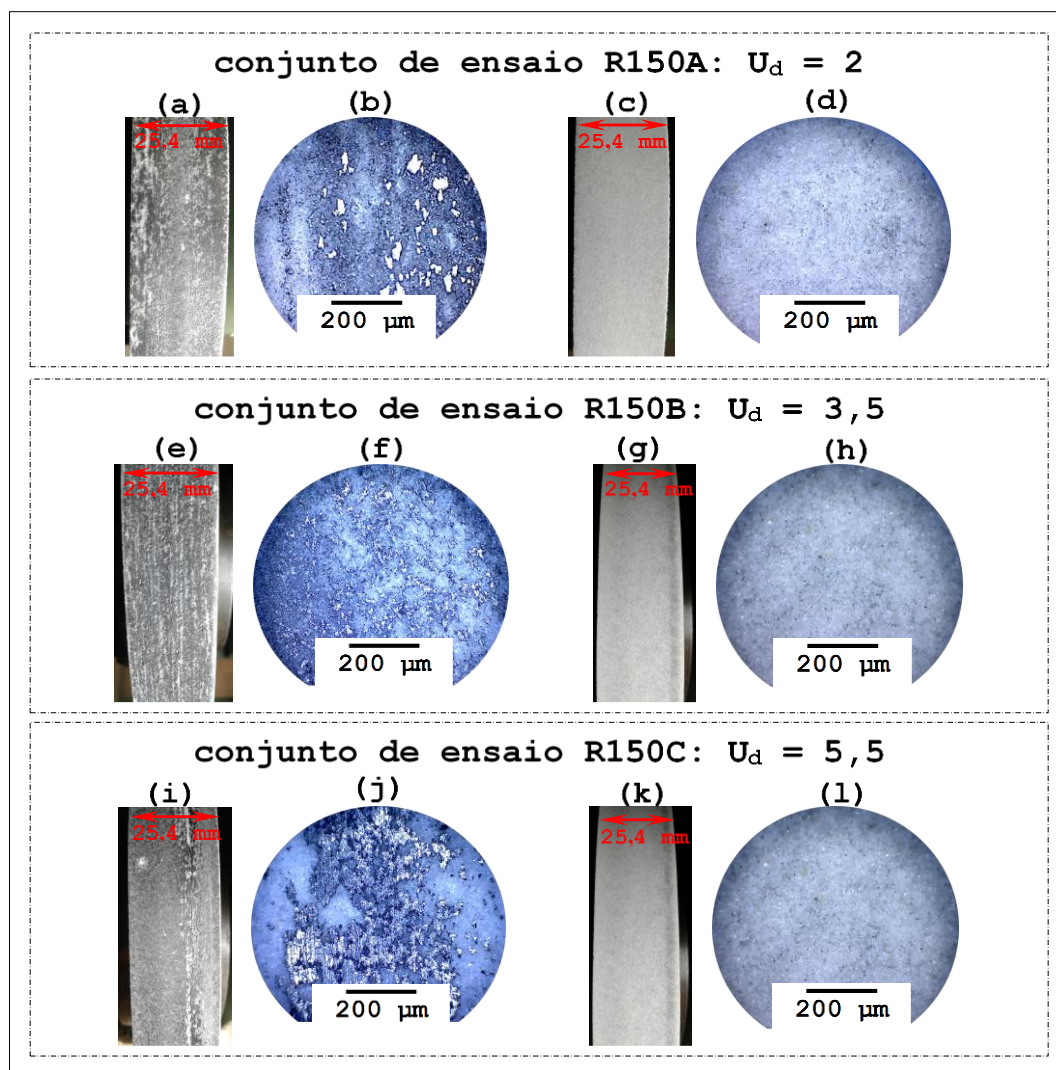


Figura 34. Imagens da superfície de corte do rebolo R100 antes de iniciar o ensaio de dressagem e após a finalização do ensaio de dressagem

Semelhante ao ocorrido com o rebolo R100, observa-se na **Figura 34** que, após ser submetido a retificação não usual, o rebolo R150 encontra-se com sua superfície de corte desgastada e empastada (com cavaco retido em sua superfície de corte): **Figura 34b**, **Figura 34f** e **Figura 34j**, o que também o torna inadequado para o uso na retificação. Essa condição é verificada nos três conjuntos de ensaios do rebolo R150: conjunto R150A, R150B e R150C. Por outro lado, assim como aconteceu com o rebolo R100, a operação de dressagem modificou significativamente a superfície de corte do rebolo R150, removendo os cavacos retidos em sua superfície de corte: **Figura 34d**, **Figura 34h** e **Figura 34l**, restabelecendo a sua forma topográfica e a sua agressividade e, conseqüentemente, tornando-o novamente adequado para o uso na retificação.

As modificações ocasionadas devidos a dressagem estão contidas nas assinaturas espectrais dos sinais de EA e PZT coletados durante os ensaios e a STFT desses sinais fornecem informações que permitem mapear a superfície de corte do rebolo tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, conforme observado nos espectrogramas dos sinais de EA e PZT coletados durante os ensaios de dressagem do rebolo R100.

Nota-se, na **Figura 35** e na **Figura 36**, nos espectrogramas dos sinais de EA e PZT coletados durante os ensaios de dressagem do rebolo R150, a mesma variação de tonalidade ao longo do eixo de tempo observada nos espectrogramas tanto dos para os sinais de EA quanto para os sinais PZT coletados durante os ensaios de dressagem do rebolo R100. Isso caracteriza o rebolo com falhas: com níveis acentuados de desgaste ao longo da sua superfície de corte do rebolo. Ainda referente ao rebolo R100, na **Figura 35** e na **Figura 36**, nota-se também que o conteúdo harmônico dos sinais de EA e PZT ao longo do tempo possuem um comportamento uniforme, similar o observado para o rebolo R100. Isso significa que o

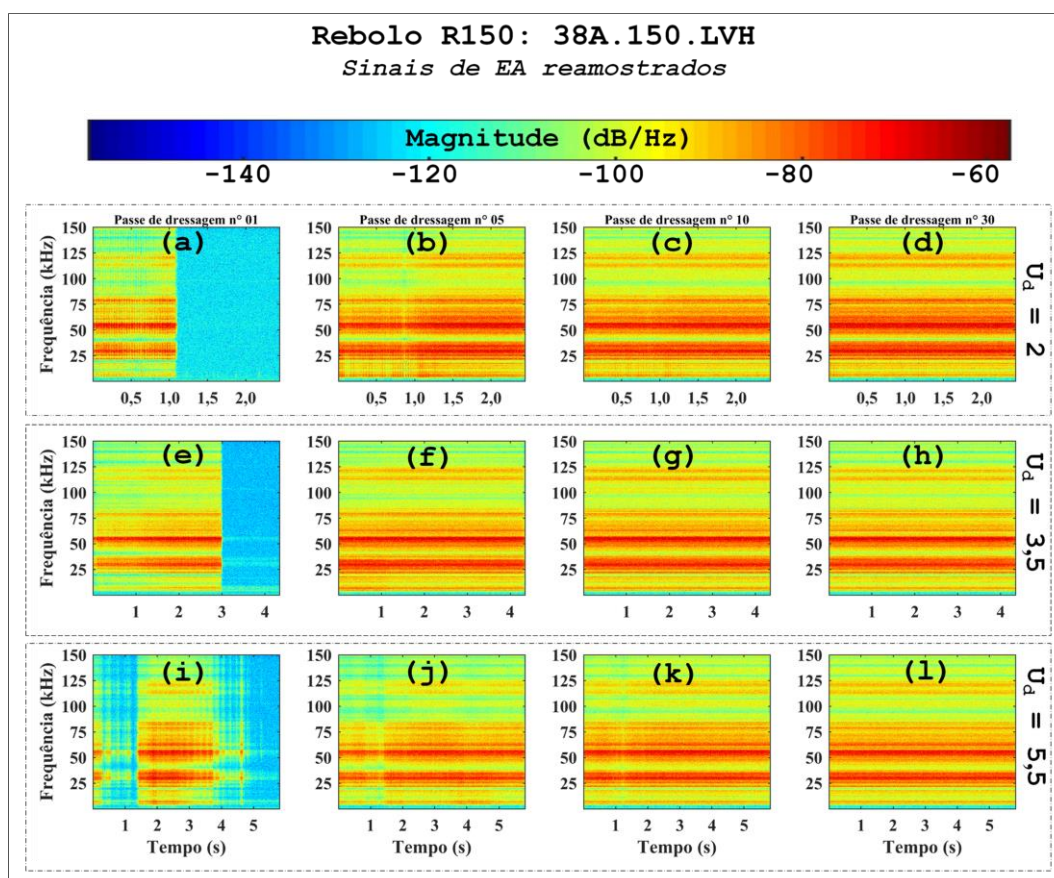


Figura 35. Espectrograma dos sinais de EA para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C

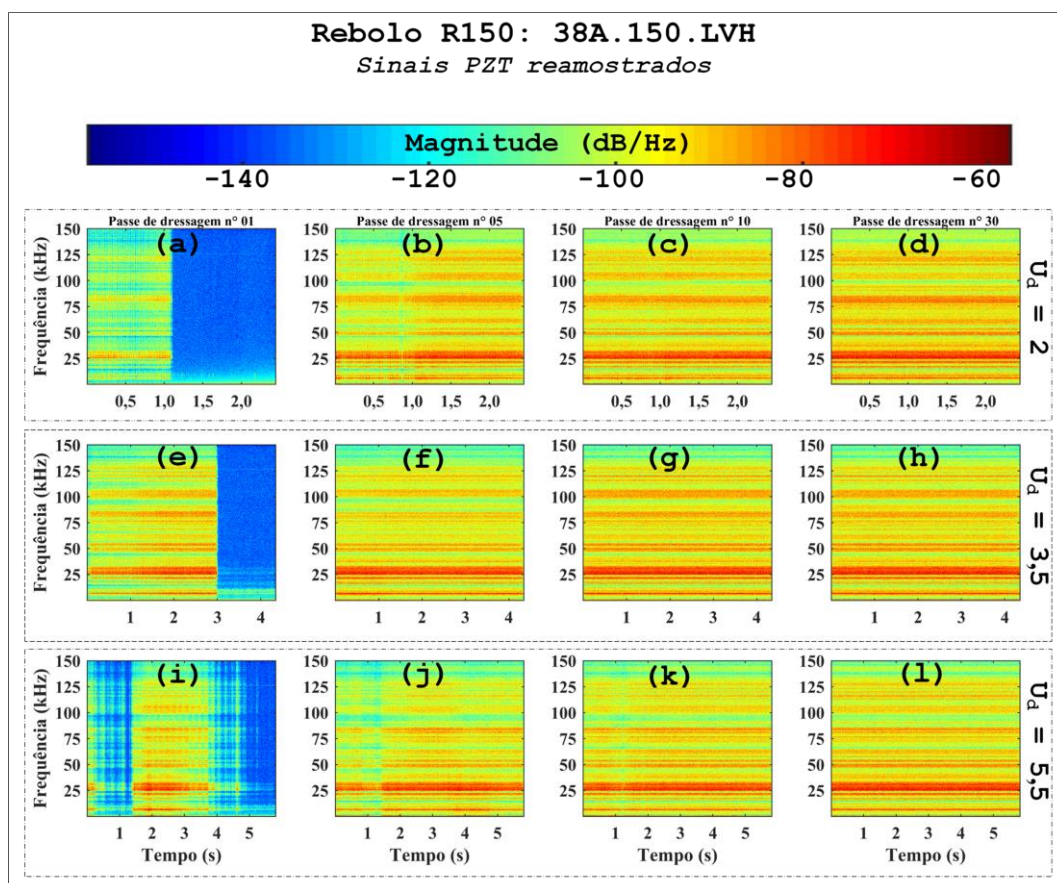


Figura 36. Espectrograma dos sinais PZT para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C

comportamento uniforme ao longo do tempo do conteúdo harmônico de sinais de EA e PZT, observado tanto para o rebolo R100 quanto para o rebolo R150, possivelmente, ocorrerá nos sinais de EA e PZT coletados a partir da dressagem de outros rebolos de óxido de alumínio com diferentes estruturas.

4.2.5. ROP_{STFT} NORMALIZADA/CUMULATIVA DOS SINAIS DE EA E PZT REAMOSTRADOS

As curvas ROP_N e as curvas ROP_{NC} para os sinais de EA e para os sinais PZT são, respectivamente, expostas na **Figura 37** e na **Figura 38** para o rebolo R150 em condição: com falhas, intermediária e sem falhas. Na **Figura 37a** e na **Figura 38a** são apresentados os resultados adquiridos para o conjunto de ensaio R150A: U_d igual a 2. Na **Figura 37d** e na **Figura 38d**

são exibidos os resultados obtidos para o conjunto de ensaio R150B: U_d igual a 3,5. E, por fim, na **Figura 37g** e na **Figura 38g** são expostos os resultados calculados para o conjunto de ensaio R150C: U_d igual a 5,5. Com relação aos sinais coletados com sensor de EA: (i) as curvas ROP_N são expostas na **Figura**

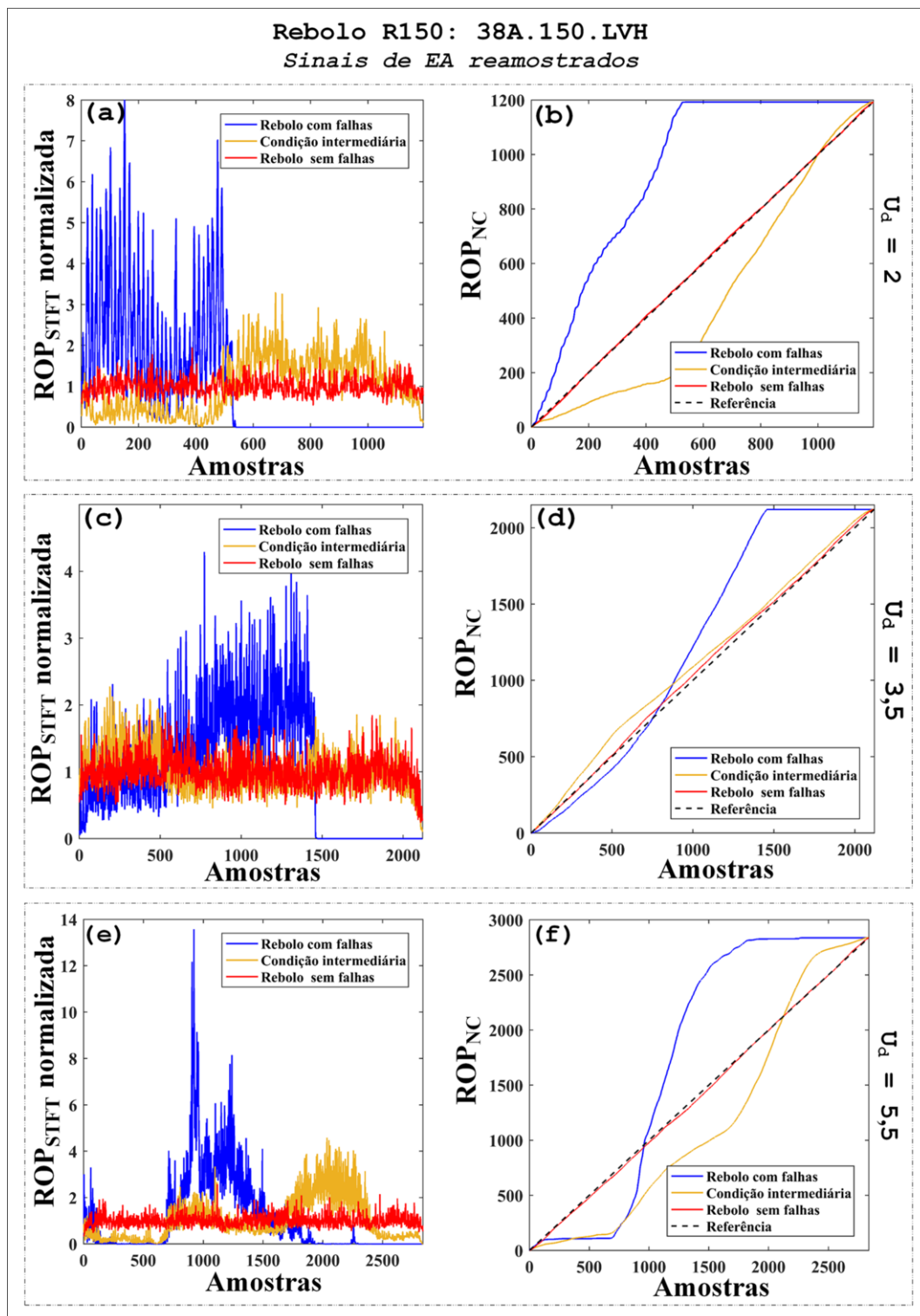


Figura 37. ROP_{STFT} dos sinais de EA coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150

37b, na **Figura 37e** e na **Figura 37h**, nesta ordem, para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C; (ii) Já as curvas ROP_{NC} são expostas na **Figura 37c**, na **Figura 37f** e na **Figura 37i**, na devida ordem, para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C. De mesma maneira, no tocante aos sinais

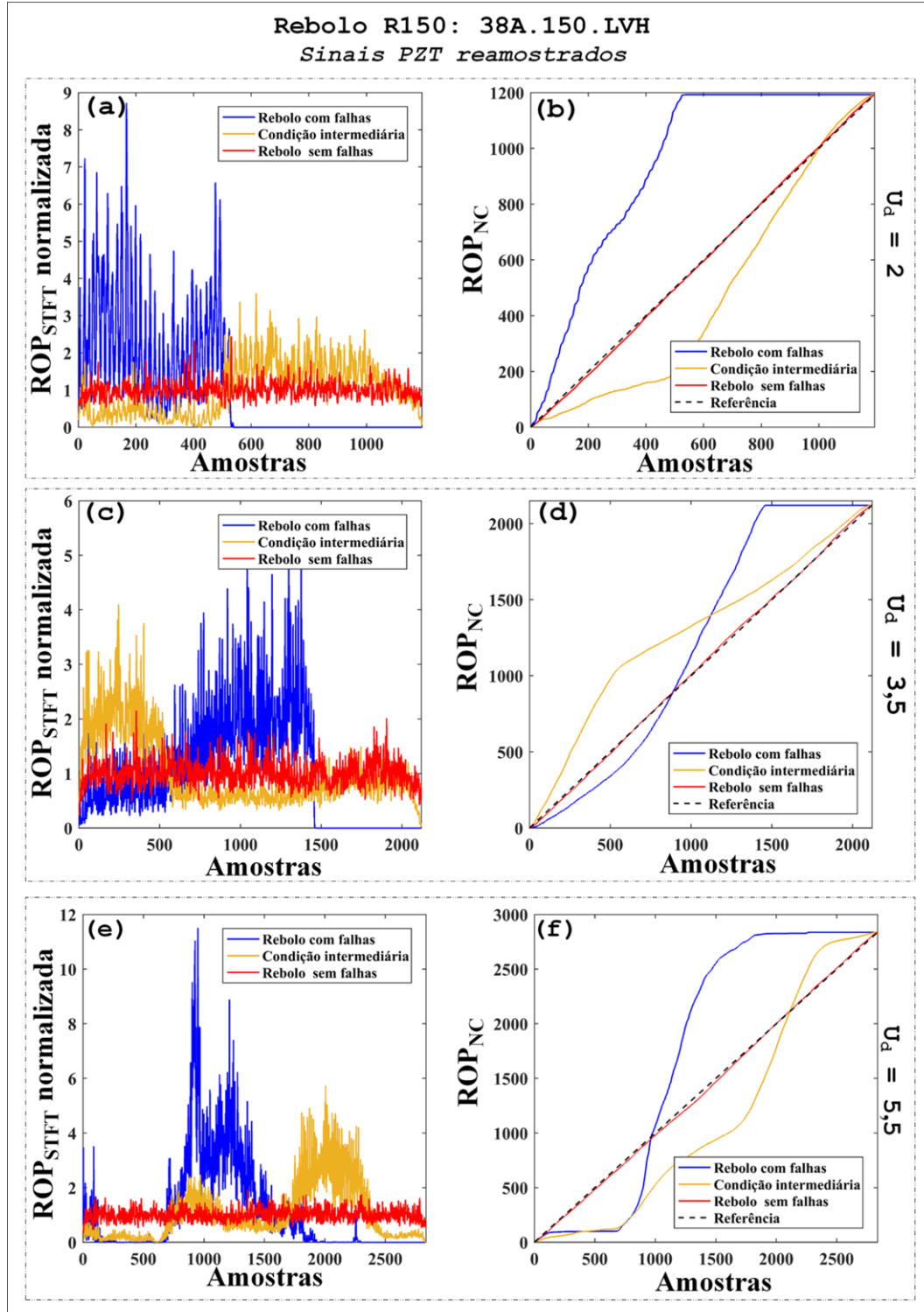


Figura 38. ROP_{STFT} dos sinais PZT coletados nos ensaios de dressagem realizados no rebolo R150

coletados com sensor PZT: (i) as curvas ROP_N são expostas na **Figura 38b**, na **Figura 38e** e na **Figura 38h**, respectivamente, para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C; e (ii) as curvas ROP_{NC} são apresentadas na **Figura 38c**, na **Figura 38f** e na **Figura 38i**, na devida ordem, para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C.

Observa-se na **Figura 37** e na **Figura 38** que as curvas ROP_N e as curvas ROP_{NC} calculadas para os sinais de EA e PZT coletados no decorrer da dressagem do rebolo R150, apresentam resultados semelhantes aos obtidos para o rebolo R100. Nota-se ainda na **Figura 37** e na **Figura 38** que as curvas ROP_{NC} calculadas para o rebolo R150 com falhas possui uma distância significativa da reta de referência e à medida que o formato original do rebolo é restabelecido mediante a operação de dressagem, isto é, a cada camada de material abrasivo removida do rebolo, essa distância tende a zero.

Ao comparar as curvas ROP_{STFT} dos sinais de EA com as curvas ROP_{STFT} dos sinais PZT: **Figura 37** e **Figura 38**, respectivamente, constata-se que existe uma diferença na assinatura das curvas. Entretanto, no geral, as curvas possuem uma similaridade significativa quanto as suas tendências. Observa-se na **Figura 37** e na **Figura 38** que o momento no qual a distância entre as curvas ROP_{NC} e a reta de referência não apontar variações significativas, isso indica que a superfície de corte do rebolo se encontra regular. E, ainda, o seu condicionamento para o uso no processo de retificação.

4.2.6. FATOR DE FORMA DO REBOLO - WSF

Os valores do fator de forma do rebolo (WSF) R150 calculados para os conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C são mostrados na **Figura 39** tanto para os sinais coletados com o sensor de EA quanto para os sinais coletados com o sensor PZT. Na **Figura 39a** são mostrados os valores WSF calculados para o conjunto de ensaio R150A; na **Figura 39b** são expostos os valores WSF calculados para o conjunto de ensaio R150B; e por fim, na **Figura 39c** são apresentados os valores WSF obtidos para o conjunto de ensaio R150C. Observa-se na **Figura 39** que os conjuntos de ensaios R150A e R150C, apresentam uma correlação muito forte/alta (TAYLOR, 1990) quando comparadas as curvas WSF obtidas para o sensor EA com as curvas WSF obtidas para o sensor PZT.

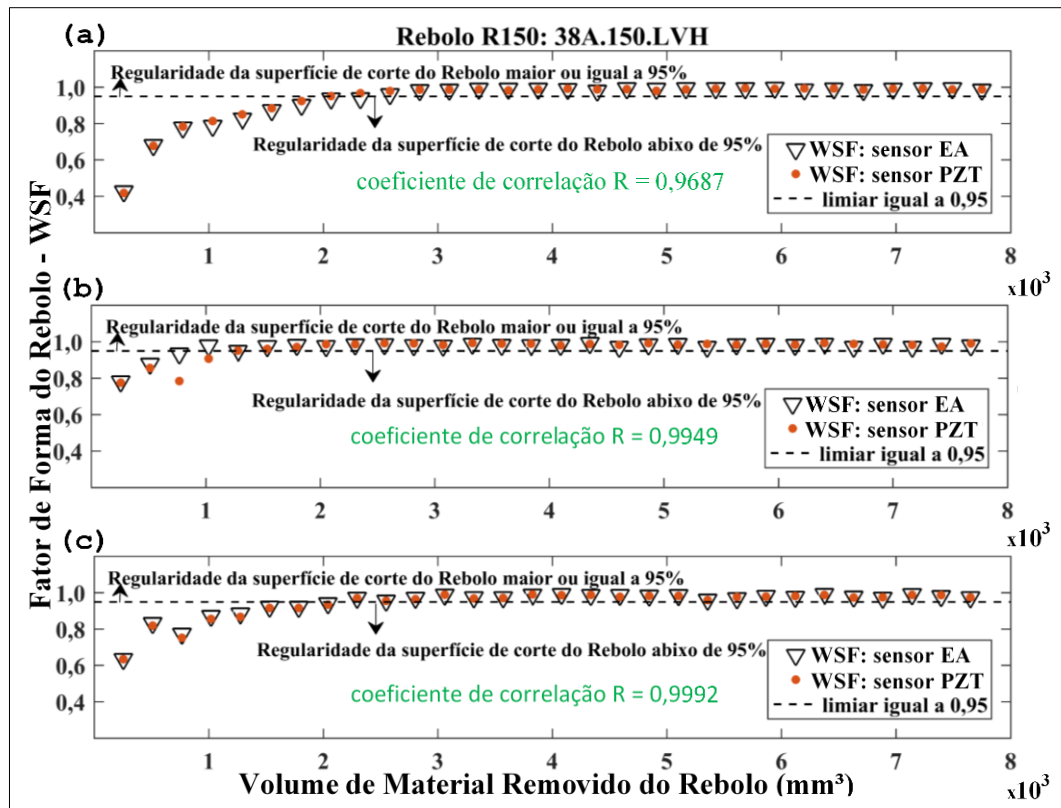


Figura 39. Fator de forma do rebolo R150 para os sinais de EA e PZT dos conjuntos de ensaios R150A, R150B e R150C

A correlação entre as curvas WSF: classificada como muito forte/alta (TAYLOR, 1990) em todos os casos, evidencia que mesmo para rebolos com granulometrias distintas o sensor PZT se assemelha ao sensor de EA quanto a capacidade de quantificar a uniformidade/regularidade da superfície de corte de rebolos de óxido de alumínio usando o método proposto.

Nota-se também na **Figura 39** que o coeficiente de correlação obtido para o conjunto de ensaios R150B, se encontra abaixo de 90%, indicando de acordo com Taylor (1990), uma correlação forte/alta. Essa foi a pior correlação obtida entre as curvas WSF calculadas a partir dos sinais coletados com os sensores de EA e PZT. Em comparação com o menor coeficiente de correlação obtido para os outros conjuntos de ensaios dos rebolos R100 e R150, o valor obtido para o conjunto R150B é, aproximadamente, 13% menor. Essa diferença pode estar relacionada com a faixa de frequência escolhida, automaticamente pelo algoritmo, para computar as curvas ROP_{STFT} . Entretanto, mesmo com essa diferença, a partir de, aproximadamente, 2500 mm³ de material removido do rebolo R150, o valor WSF para o sensor PZT, assim como para o sensor

de EA, indica que a regularidade da superfície de corte do rebolo é maior que 95% ou no mínimo igual a esse valor.

4.3. VERIFICAÇÃO DO MÉTODO

Os espectros PSD para os sinais de EA e PZT coletados durante a operação de dressagem do rebolo R150.6 com e sem falhas são apresentados na **Figura 40**: (a) PSD dos sinais de EA e (b) PSD dos sinais PZT. Observa-se na **Figura 40** que os espectros PSD dos sinais de EA e PZT para o rebolo com falhas possuem potência significativamente menor do que os espectros PSD para o rebolo sem falhas. Esse resultado é semelhante aos obtidos para os rebolos R100 e R150. Nota-se também na **Figura 40** que, assim como para os rebolos R100 e R150, o conteúdo harmônico mais significativos dos sinais de EA e PZT, coletados durante a dressagem do rebolo R150.6, se encontra abaixo de 150 kHz.

Percebe-se ainda na **Figura 40** que a diferença de potência entre os espectros PSD calculados para o rebolo R150.6 com e sem falhas é maior que a diferença de potência entre os espectros PSD calculados para os rebolos R100 e R150 com e sem falhas. Isso ocorre tanto em relação aos sinais coletados com o sensor de EA quanto em relação aos sinais coletados com o sensor PZT. Essa diferença está relacionada com as falhas excentricidade e conicidade que foram inseridas na superfície de corte do rebolo durante sua fabricação.

As falhas excentricidade e a conicidade do rebolo R150.6, classificadas a partir de análises visuais, são denotadas tanto no sinal coletado com o sensor EA quanto no sinal coletado com o sensor PZT, respectivamente, expostos na **Figura 41a** e na **Figura 41b**. Os sinais mostrados na **Figura 41** referem-se ao quinto passe de dressagem efetuado no rebolo R150.6 a uma profundidade de dressagem de 40 μ m. Observa-se na **Figura 41** que tanto as amplitudes do sinal de EA (**Figura 41a**) quanto às amplitudes do sinal PZT (**Figura 41b**) perdem energia conforme a ponta de diamante do dressador se desloca ao longo da superfície de corte do rebolo **R150.6**. Desta forma, as amplitudes dos sinais EA e PZT compõem uma figura geométrica com o formato de um cone, isto é, as amplitudes dos sinais EA e PZT mapeiam a superfície cônica do rebolo.

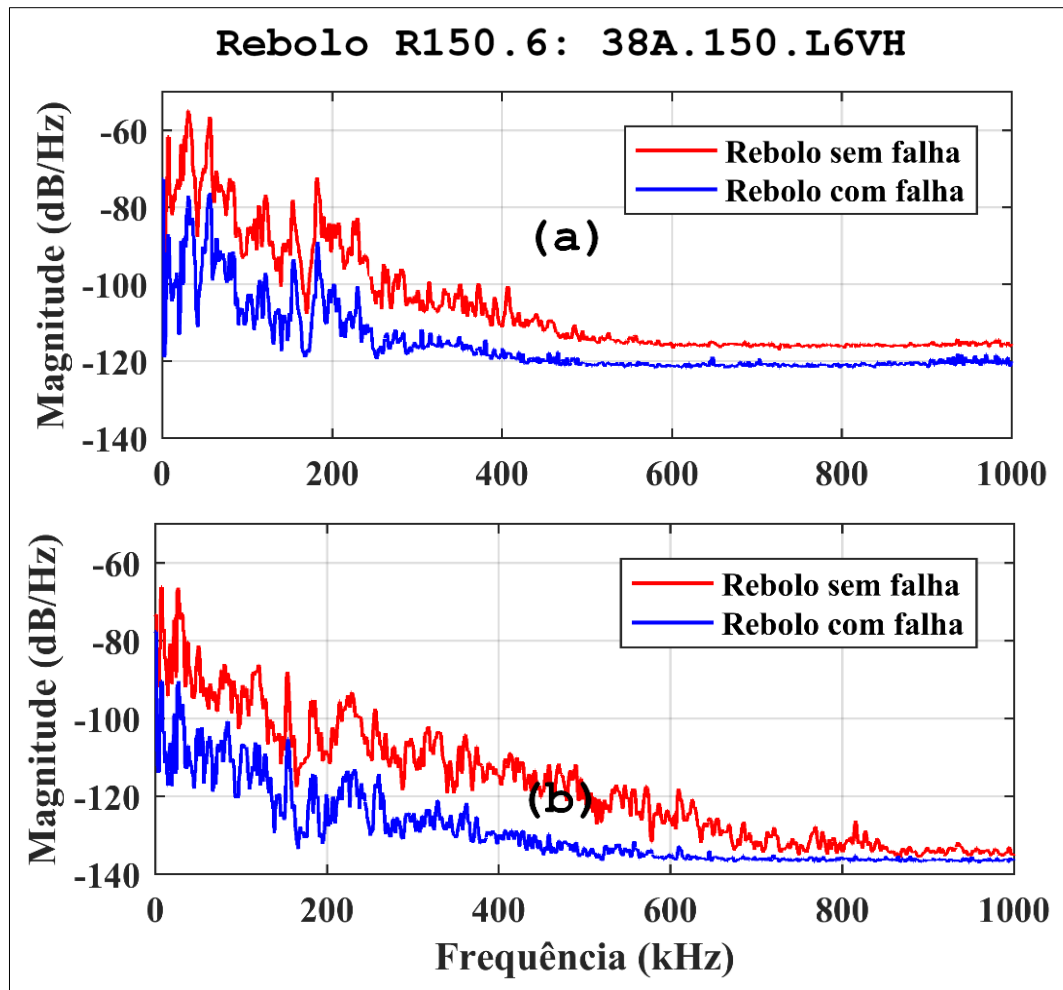


Figura 40. Conteúdo harmônico dos (a) sinais de EA e (b) PZT coletados no ensaio de dressagem do rebolo R150.6

A partir da figura geométrica na forma de cone formada pelas amplitudes dos sinais de EA e PZT mostrados, respectivamente, na **Figura 41a** e **Figura 41b**, é possível inferir que o rebolo se encontra cônico e inadequado para o uso no processo de retificação de precisão. Além da conicidade da superfície de corte do rebolo R150.6, outra falha mapeada tanto no sinal EA quanto no sinal PZT (**Figura 41a/b**) é a excentricidade. Essa é mapeada pelos sinais de EA e PZT a partir da inexistência de contato entre o dressador e o rebolo ao longo do passe de dressagem. O contato entre a ponta do dressador e a superfície de corte do rebolo gera vibrações mecânicas que são convertidas em sinais elétricos pelos sensores de EA e PZT. Consequente, se não houver contato entre o rebolo e o dressador não há fonte acústica, portanto, o sinal coletado pelos sensores refere-se ao ruído do meio industrial.

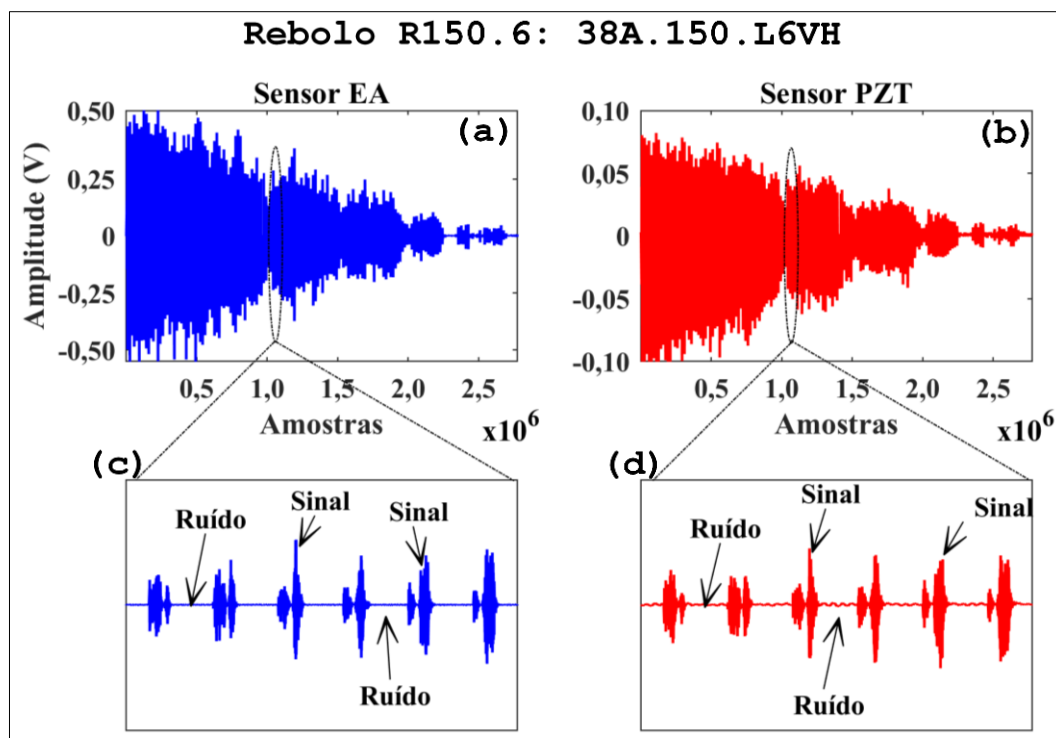


Figura 41. Sinais de EA e PZT após a reamostragem digital

A excentricidade do rebolo é uma falha denotada nos sinais de EA e PZT pela alternância entre sinal e ruído, indicando que a ponta de diamante do dressador manteve contato intermitente com a superfície de corte do rebolo ao longo do passe de dressagem. A partir da ampliação de um pequeno intervalo de cada sinal: exibida na **Figura 41c** para o sensor de EA e na **Figura 41d** para o sensor PZT, pode-se melhor analisar essa falha.

Observa-se na **Figura 41c** e na **Figura 41d** que a alternância entre sinal e ruído durante o passe de dressagem é, praticamente, periódica tanto para o sinal de EA quanto para o sinal PZT. Nota-se também que existe uma variação de amplitude ao longo dos sinais de EA e PZT que, possivelmente, deve estar relacionada com nível da falha a cada volta do rebolo: maior ou menor excentricidade. As falhas excentricidade e conicidade do rebolo R150.6 também são mapeadas pela STFT dos sinais de EA e PZT, conforme mostrado na **Figura 42**, tal que: (i) a **Figura 42** refere-se ao primeiro passe de dressagem; (ii) a **Figura 42b** concerne-se ao vigésimo quinto passe de dressagem e (iii) a **Figura 42c** trata-se do quinquagésimo passe de dressagem. Observe na **Figura 42a** e na **Figura 42b** que linhas horizontais aparecem tanto nos espectrogramas que se referem aos sinais coletados com o sensor de EA quanto nos espectrogramas que se referem aos

sinais coletados com o sensor PZT. Essas linhas são ocasionadas nos espectrogramas devido a alternância de sinal e ruído que aparecem nos sinais de EA e PZT por causa da excentricidade do rebolo, o que ocasiona a perda abrupta de potências nas amplitudes das frequências ao longo do tempo. Por outro lado, para o rebolo sem falhas as frequências dos sinais de EA e PZT não sofrem perda de potência ao longo do tempo.

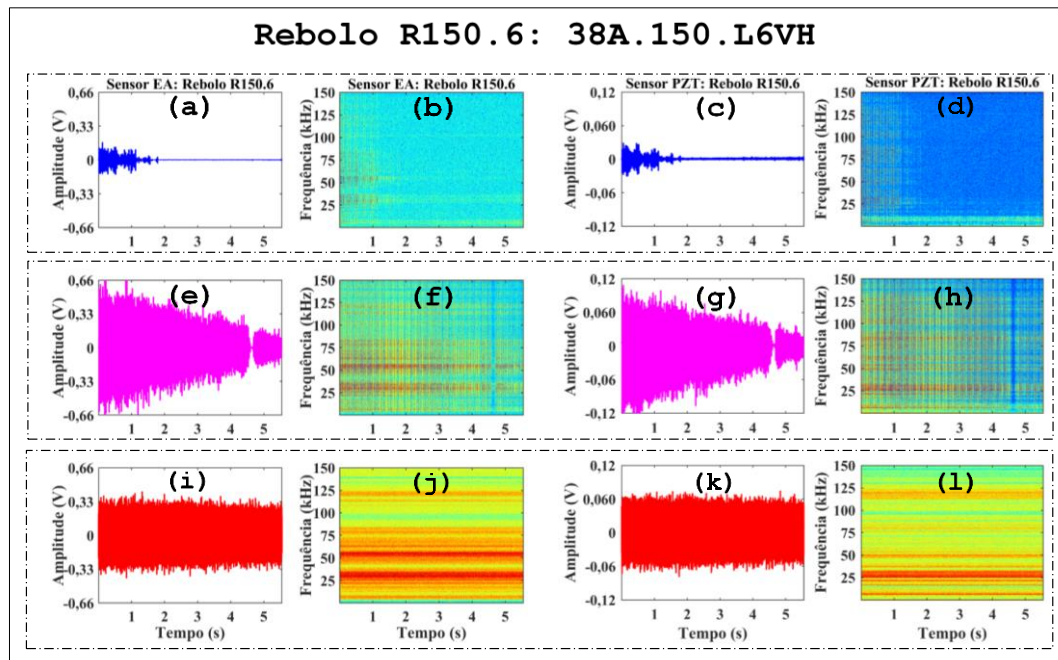


Figura 42. Sinais EA e PZT reamostrados e seus respectivos espectrogramas

Observa-se que para o rebolo R150.6 sem falhas, os espectrogramas exibidos na **Figura 42c** apresentam resultados semelhantes aos observados nos espectrogramas dos sinais de EA e PZT coletados a partir da dressagem dos rebolos R100 e R150, também, sem falhas. Isso indica que o conteúdo harmônico de sinais de EA e PZT ao longo do tempo se comporta de forma similar, o que facilita a generalização de técnicas de controle para a otimização da operação de dressagem. Consequentemente, a automatização do processo de retificação torna-se viável.

A ROP_{NC} é uma técnica que apresenta resultados satisfatórios para a generalização de um sistema de controle automático da operação de dressagem de rebolos de óxido de alumínio com dressador de ponta única. Observa-se na **Figura 43** que as curvas ROP_{NC} calculadas para os sinais de EA e PZT coletados no decorrer da dressagem do rebolo R150.6 apresentam resultados similares aos obtidos para os rebolos

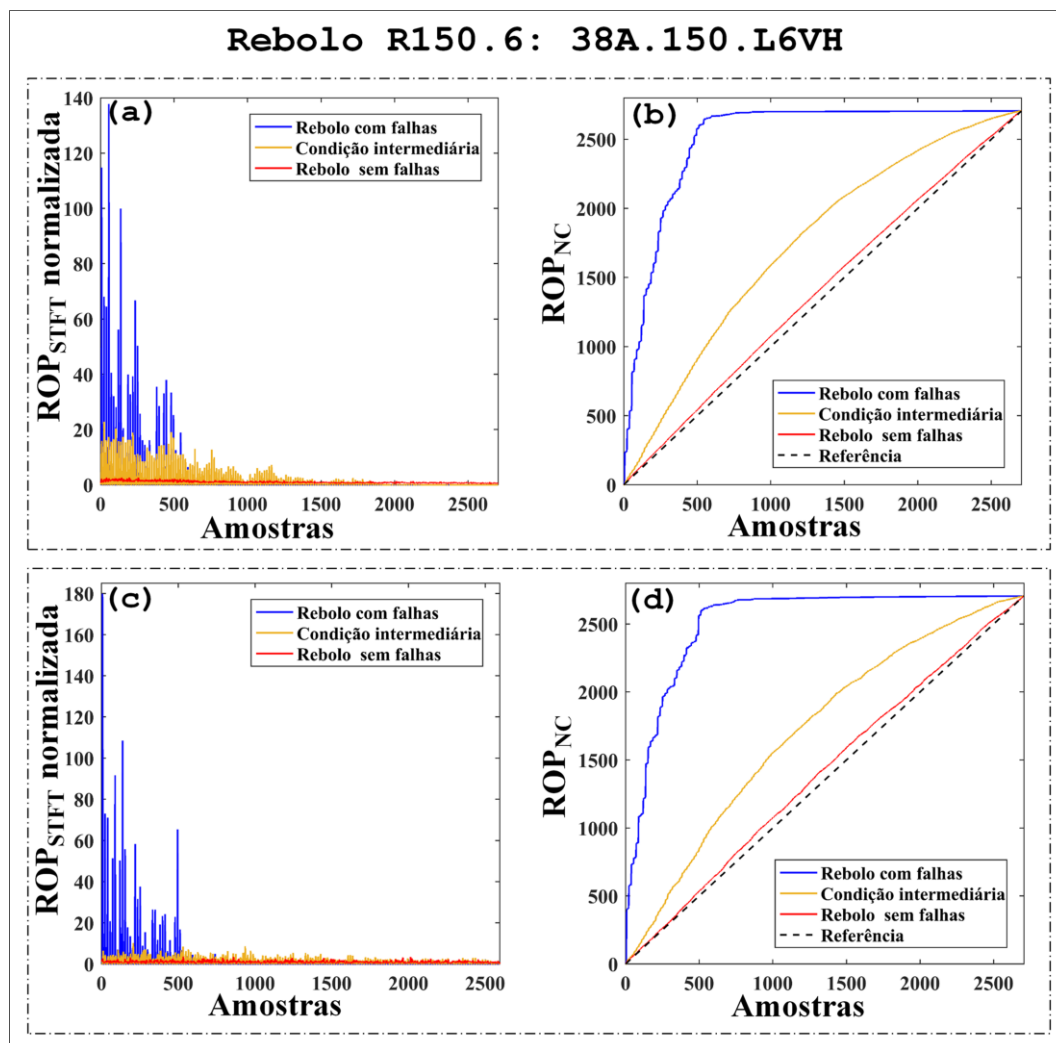


Figura 43. ROP_{STFT} dos sinais de EA e PZT coletados no ensaio de dressagem realizado rebolo R150.6

R100 e R150. Na **Figura 43a** são mostrados os resultados obtidos para os sinais coletados com o sensor de EA e na **Figura 43b** são expostos os resultados calculados para os sinais coletados com o sensor PZT. Os resultados exibidos representam três condições do rebolo R150.6: (i) com falha; (ii) intermediária e (iii) sem falhas. Igualmente ao observado para os rebolos R100 e R150, nota-se na **Figura 43** que para o rebolo R150.6 excêntrico e cônico, a ROP_{STFT} possui valores significativamente distantes da reta de referência. Por outro lado, o nível das falhas é minimizado conforme a remoção de camadas de material abrasivo da superfície de corte do rebolo, tornando-o concêntrico.

O parâmetro WSF calculado a partir das curvas ROP_{NC} , **Figura 44**, mostra que o rebolo R150.6 se encontra condicionado para o uso após a remoção de, aproximadamente,

48000 mm³ de material abrasivo, o que equivale a quarenta e sete passes de dressagem. Isso significa que foram removidos aproximadamente 1,9 mm de raio do rebolo, isto é, o rebolo atinge 95% de regularidade de sua superfície de corte a partir do quadragésimo sétimo passe de dressagem. O resultado reforça a afirmação feita na seção 4.2 - “o parâmetro WSF pode ser usado para quantificar a regularidade da superfície de corte de rebolos de óxido de alumínio com estruturas distintas”.

A utilização de rebolos com falhas como a excentricidade e conicidade pode provocar a transferência da sua superfície de corte para a superfície da peça, a qual se encontra em processo de acabamento. Isso pode alterar a textura da superfície da peça e, também, a sua geometria, ocasionando sua perda e elevando os custos de produção.

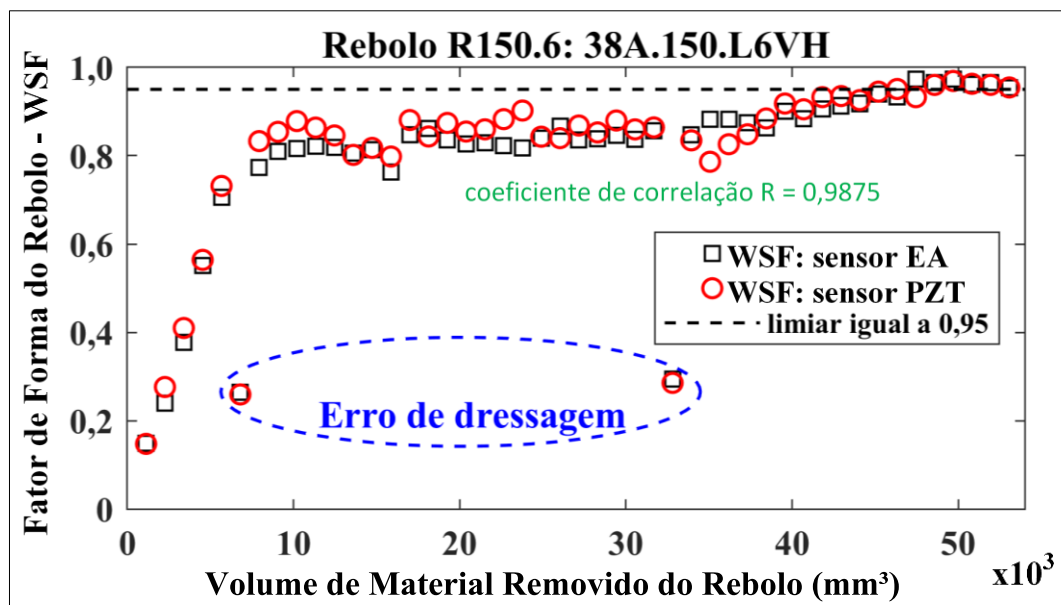


Figura 44. Fator de forma do rebolo R150.6 calculado a partir dos sinais de EA e PZT

O parâmetro WSF, ao atingir o limiar de 95%, garante que o rebolo esteja sem falhas e adequado para o uso no processo de retificação. Observa-se também na **Figura 44** que o parâmetro WSF se mostra eficaz para a indicação de erros de dressagem, como por exemplo: quando a profundidade efetiva de dressagem posterior dar-se-á menor que a profundidade de dressagem anterior.

Nota-se ainda na **Figura 44** que 98,75% foi a correlação auferida entre a curva WSF obtidas com os sinais coletados com o sensor de EA e a curva WSF computada a partir dos

sinais coletados com o sensor PZT. Atestando mais uma vez que o sensor PZT pode substituir o sensor de EA na implementação de um sistema de controle para a operação de dressagem, refletindo na otimização do processo de retificação e, principalmente, no custo de produção. O sistema de controle auxiliará o operador da máquina, garantindo que o rebolo esteja adequado para a retificação e, conseqüentemente, evitando que danos sejam ocasionados a peça em processo de acabamento.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

O processamento digital dos sinais de EA e PZT usando a STFT, a estatística relação de potência e correlação entre curvas, viabilizou a extração de informações características da dressagem. A partir do espectrograma da STFT foi possível observar que o conteúdo harmônico dos sinais de EA e PZT apresentam níveis de amplitude uniformes ao longo do tempo quando o rebolo se encontra com sua superfície de corte regular, isto é, o conteúdo harmônico característico da operação de dressagem se encontra presente em todos os instantes de tempo. Esse comportamento foi observado tanto nos sinais de EA quanto nos sinais PZT coletados a partir da operação de dressagem dos rebolos. Isso significa que esse comportamento é um aspecto característico do conteúdo harmônico gerado por meio da operação de dressagem de rebolos de óxido de alumínio com dressador de ponta única.

A partir do espectrograma da STFT também foi possível obter uma relação de potência considerando tanto as informações contidas no domínio do tempo quanto as contidas no domínio da frequência. O resultado desse processo foi uma relação de potência de tempo-frequência (ROP_{STFT}), que carrega informações de falhas (excentricidade, conicidade e desgaste da camada abrasiva do rebolo) ocasionadas na superfície de corte do rebolo no seu processo de fabricação e devido ao uso no processo de retificação. Isso possibilitou o desenvolvimento do parâmetro WSF que apresenta valores entre 0 e 1 para indicar a regularidade da superfície de corte do rebolo. Valores do WSF abaixo de 0,95 ou 95%, indicam falhas na superfície de corte do rebolo, o que inviabiliza o seu uso no processo de retificação. Por outro lado, valores do WSF igual ou superior a 95%, indicam que a superfície de corte do rebolo se encontra sem falhas: rebolo condicionado para o uso no processo de retificação. Isso significa que o parâmetro WSF demonstrou ser eficiente para quantificar a regularidade da topográfica de corte de rebolos convencionais de óxido de alumínio durante a operação de dressagem e, ainda, para prevenir falhas no decorrer dessa operação, garantindo que o rebolo esteja adequado para o uso na retificação.

A partir dos sinais elétricos obtidos durante a operação de dressagem por meio do sensor PZT, o parâmetro WSF pode ser usado no futuro para o desenvolvimento de um sistema de

monitoramento indireto de baixo custo, robusto e confiável que seja capaz de definir o momento adequado para interromper a operação de dressagem. Vale salientar que o uso de diafragmas piezelétricos no sensoriamento de processos como a dressagem representa o rompimento de uma barreira tecnológica, até o momento, pouco explorada pela comunidade científica.

O método proposto apresentou resultados eficientes e robustos na quantificação da regularidade da superfície de corte de rebolos estruturalmente distintos e em diferentes condições de dressagem. Assim, estudos futuros poderão demonstrar a generalização do método tanto para rebolos convencionais quanto para rebolos superabrasivos. Outro ponto de extrema importância a ser considerado é que a aplicação da metodologia desenvolvida apresentou resultados satisfatórios para diferentes rebolos, sem a necessidade de ajustes nos algoritmos ou modelos matemáticos, o que atende aos requisitos necessários para que a técnica seja empregada no chão de fábrica, sem a interferência ou análise de operadores experientes.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ❖ Verificar do método apresentado em rebolos convencionais com estruturas diferentes das utilizadas nesta pesquisa (Tipo Grãos, Granulometria, Dureza e porosidade) e comparar com os diversos parâmetros envolvidos no processo;
- ❖ Investigar o método quanto a sua aplicação em rebolo convencionais usando dressadores conglomerados, rotativos e outros;
- ❖ Investigar o método quanto a sua aplicação em rebolo superabrasivos com estruturas distintas usando dressadores conglomerado, rotativo e outros;

REFERÊNCIAS

- A, E. S. S.; PANDE, S. J.; LAL, G. K. Evaluation of grinding wheel surface by means of grinding sound discrimination. . [S.l: s.n.]. , 1980
- 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, 2016.
- AGUIAR, P. R. et al. Monitoring the dressing operation in the grinding process. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, v. 5, n. 1, p. 3, 2009. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=23110>>.
- ALBUQUERQUE CASTRO, B. et al. A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by Piezoelectric Sensor. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 7, p. 3225-3231, jul. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7587624/>>.
- ALEXANDRE, FELIPE A. et al. A Novel Ultrasound Technique Based on Piezoelectric Diaphragms Applied to Material Removal Monitoring in the Grinding Process. *Sensors*, v. 19, n. 18, p. 3932, 12 set. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/18/3932>>.
- ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO et al. Tool Condition Monitoring of Aluminum Oxide Grinding Wheel using AE and Fuzzy Model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.
- ALMEIDA, VINICIUS A. D.; MENDES, L. C.; BAPTISTA, F. G. Detecção de dano baseada na impedância E/M com transdutores piezelétricos de baixo custo. XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014.
- ANH TUNG, L. et al. Optimization of dressing parameters of grinding wheel for 9CrSi tool steel using the taguchi method with grey relational analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 635, p. 012030, 28 out. 2019. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/635/1/012030>>.
- AULESTIA VIERA, M. A. et al. A Time-Frequency Acoustic Emission-Based Technique to Assess Workpiece Surface Quality in Ceramic Grinding with PZT Transducer. *Sensors*, v. 19, n. 18, p. 3913, 11 set. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/18/3913>>.
- BACCAR, D.; SÖFFKER, D. Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 60, p. 198-207, 2015.
- BADGER, J.; MURPHY, S.; O'DONNELL, G. E. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 125, p. 11-19, fev. 2018. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069551730161X>>.
- BALES, G. et al. Recognizing Gaze-Motor Behavioral Patterns in Manual Grinding Tasks. *Procedia Manufacturing*, v. 5, p. 106-121, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978916300117>>.
- BARBÉ, K.; PINTELON, R.; SCHOUKENS, J. Welch method revisited: Nonparametric power spectrum estimation via circular overlap. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 58, n. 2, p. 553-565, 2010.

BHUIYAN, M. S. H.; CHOUDHURY, I. A. Review of Sensor Applications in Tool Condition Monitoring in Machining. *Comprehensive Materials Processing*. [S.l.]: Elsevier, 2014. p. 539-569. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321013303>>.

BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resínóide e vitrificado. *Cerâmica*, v. 57, n. 344, p. 431-437, dez. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000400010&lng=pt&tlng=pt>.

BRATAN, S.; ROSHCHUPKIN, S.; NOVIKOV, P. Modeling the Grinding Wheel Working Surface State. *Procedia Engineering*, v. 206, p. 1419-1425, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817353407>>.

CARPINTERI, A.; LACIDOGNA, G.; PUGNO, N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 74, n. 1-2, p. 273-289, jan. 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794406000622>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11633-006-0056-2>>.

COELHO, R. T. Estudo Experimental da Profundidade de Dressagem de Rebolos na Retificação de Precisão Usando Método do Disco Retificado. 1991. 94 f. Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1991.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed ed. [S.l.]: Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1988.

D'ADDONA, D. M. et al. Neural Networks Tool Condition Monitoring in Single-point Dressing Operations. *Procedia CIRP*, v. 41, p. 431-436, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.001>>.

D'ADDONA, D. M. et al. Prediction of Dressing in Grinding Operation via Neural Networks. *Procedia CIRP*, v. 62, p. 305-310, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.043>>.

DE ALMEIDA, VINICIUS AUGUSTO DARE; BAPTISTA, F. G.; DE AGUIAR, P. R. 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.

DE OLIVEIRA, J. F. G. et al. Grinding Process Dominance by Means of the Dressing Operation. *Proceedings of the Twenty-Ninth International Matador Conference*. London: Macmillan Education UK, 1992. p. 547-550. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-349-12433-6_72>.

DE OLIVEIRA, J.F. GOMES; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 50, n. 1, p. 217-220, 2001. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607621088>>.

DE OLIVEIRA, JOÃO F. GOMES; DORNFELD, D. A. Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 43, n. 1, p. 291-294, 1994. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607622161>>.

DENG, H.; XU, Z. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 45, p. 46-69, set. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612519301835>>.

DENKANA, B. et al. Suitability of integrated sensors for the determination of chatter characteristics in a cylindrical grinding machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 102, n. 5-8, p. 2339-2344, 1 jun. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03323-y>>.

DING, N. et al. Experimental Study on the Relationship Between Acoustic Emission Signal and Grinding Wheel Wear. dez. 2019, [S.l.]: IEEE, dez. 2019. p. 2699-2703. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8997572/>>.

DORNFELD, D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. *NDT & E International*, v. 27, n. 4, p. 210, 1994.

DORNFELD, D. A.; DEVRIES, M. F. Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. *CIRP Annals*, v. 39, n. 1, p. 101-105, 1990. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607610129>>.

DORNFELD, D.; CAI, H. G. An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. *Journal of Engineering for Industry*, v. 106, n. 1, p. 28-33, 1 fev. 1984. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/106/1/28/392628/An-Investigation-of-Grinding-and-Wheel-Loading>>.

DOTTO, F. R. L. et al. In-Dressing Acoustic Map by Low-cost Piezoelectric Transducer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 1-1, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8835102/>>.

DURGUMAHANTI, U. S. P.; VIJAYENDER, P. S.; VENKATESWARA, R. A New Model of Grinding Force Prediction and Analysis. *International Journal of Machina Tools & Manufacture*, v. 50, p. 231-240, 2010.

EATON, M. et al. Characterisation of Damage in Composite Structures using Acoustic Emission. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 305, p. 012086, 19 jul. 2011. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/305/i=1/a=012086?key=crossref.b02a79e80d0bc2893a7b590ed96b542c>>.

FERREIRA, F. I. et al. Inferential measurement of the dresser width for the grinding process automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 100, n. 9-12, p. 3055-3066, 24 fev. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-2869-x>>.

FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. DA S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson. *Revista Política Hoje*, v. 18, 2009.

FURUTANI, K. et al. In-process measurement of topography change of grinding wheel by using hydrodynamic pressure. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 42, n. 13, p. 1447-1453, out. 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695502000731>>.

GARRIDO, M. The Feedforward Short-Time Fourier Transform. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, v. 63, n. 9, p. 868-872, set. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7419878/>>.

GROSSE, C. U.; OHTSU, M. Acoustic Emission Testing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-69972-9>>.

GRUHN, S.; FISCHER, R.; VIELHAUER, C. Surface classification and detection of latent fingerprints based on 3D surface texture parameters. 1 jun. 2012, [S.l: s.n.], 1 jun. 2012. p. 84361C. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.922772>>.

GUO, C. et al. Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 56, n. 1, p. 343-346, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607000844>>.

GUO, S. et al. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. Journal of Cleaner Production, v. 140, p. 1060-1076, jan. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616316833>>.

HADAD, M.; SHARBATI, A. Some Experimental Aspects of Grinding Soft Steel Under Different Machining Conditions. Engineering Science & Technology, v. 1, n. 1, 2019.

HASSUI, A. et al. Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. Wear, v. 217, n. 1, p. 7-14, abr. 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164898001665>>.

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

HWANG, T. W. et al. Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride. Ultrasonics, v. 38, n. 1-8, p. 614-619, mar. 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X99000645>>.

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

JIANG, J. L. et al. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 74, p. 29-40, nov. 2013.

JIANMING, S. et al. Milling tool wear monitoring through time-frequency analysis of sensory signals. 2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2016, p. 1-5, 2016.

JUNIOR, M. M. DOS S. et al. Analysis of Piezoelectric Sensors in Adulteration of Bovine Milk Using the Chromatic Technique. Proceedings, v. 4, n. 1, p. 38, 14 nov. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2504-3900/4/1/38>>.

JUNIOR, P. et al. Dressing tool condition monitoring through impedance-based sensors: Part 1-pzt diaphragm transducer response and emi sensing technique. Sensors (Switzerland), v. 18, n. 12, 2018a.

JUNIOR, P. et al. Dressing Tool Condition Monitoring through Impedance-Based Sensors: Part 2-Neural Networks and K-Nearest Neighbor Classifier Approach. Sensors, v. 18, n. 12, p. 4453, 16 dez. 2018b. Disponível em:

<<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4453>>.

KARPUSCHEWSKI, B.; WEHMEIER, M.; INASAKI, I. Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 49, n. 1, p. 235-240, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607629369>>.

KIM, B. S. et al. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187-188, p. 30-36, 2007.

KIM, H.; MELHEM, H. Fourier and Wavelet Analyses for Fatigue Assessment of Concrete Beams. *Experimental Mechanics*, v. 43, n. 3, p. 131-140, 2003.

KING, R. I.; HAHN, R. S. Handbook of modern grinding technology. First ed. New York: Chapman and Hall, 1992.

KUMAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Prediction of wear and surface roughness in electro-discharge diamond grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 191, n. 1-3, p. 206-209, ago. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013607002749>>.

KWAK, J.-S.; HA, M.-K. Detection of dressing time using the grinding force signal based on the discrete wavelet decomposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 23, n. 1-2, p. 87-92, 1 jan. 2004a. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-003-1556-7>>.

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, mar. 2004b. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360301032X>>.

LACHANCE, S.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Development of an automated system for measuring grinding wheel wear flats. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 22, n. 2, p. 130-135, 2003.

LAURO, C. H. et al. Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. [S.l.: s.n.], 2014

LEONESIO, M.; BIANCHI, G.; CAU, N. Design criteria for grinding machine dynamic stability. *Procedia CIRP*, v. 78, p. 382-387, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118312538>>.

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

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.

LIAO, T. W. et al. GRINDING WHEEL CONDITION MONITORING WITH HIDDEN MARKOV MODEL-BASED CLUSTERING METHODS. *Machining Science and Technology*, v. 10, n. 4, p. 511-538, 7 dez. 2006. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10910340600996175>>.

LIMA, É. M. et al. Analysis of the Influence of the Window Used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault Detection. p. 350-355, 2016.

LINDLEY, T. C.; PALMER, I. G.; RICHARDS, C. E. Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth. *Materials Science and Engineering*, v. 32, n. 1, p. 1-15, jan. 1978. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0025541678902069>>.

LINKE, B. Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 57, n. 1, p. 345-348, 2008.

LOPES, W.N. et al. Monitoring of self-excited vibration in grinding process using time-frequency analysis of acceleration signals. 2019, [S.l.: s.n.], 2019.

LOPES, WENDERSON NASCIMENTO 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*, 21 mar. 2017. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2016.0317>>.

LYONS; RICHARD, G. Understanding Digital Signal Processing. 3. ed. USA: Prentice Hall, 2010.

MALKIN, S.; GUO, C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. 2ª ed. New York: Industrial Press Inc, 2008.

MARINESCU, I. D. et al. Handbook of Machining with Grinding Wheels, Second Edition. [S.l.]: CRC Press; 2 edition (February 8, 2016), 2016.

MARTINS, C. H. R. et al. Neural networks models for wear patterns recognition of single-point dresser. [S.l.]: IFAC, 2013. v. 46. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00222>>.

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, 2014.

MIRANDA, H. I. et al. Monitoring single-point dressers using fuzzy models. *Procedia CIRP*, v. 33, p. 281-286, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.050>>.

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. 63, n. 3, p. 627-640, 2015.

MOKBEL, A. A.; MAKSOUD, T. M. A. Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 101, n. 1, p. 292-297, 2000.

MOORE, L. M. The Basic Practice of Statistics. *Technometrics*, v. 38, n. 4, p. 404-405, nov. 1996. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1996.10484558>>.

NAKAI, M E et al. Neural Tool Condition Estimation in The Grinding of Advanced Ceramics. v. 13, n. 1, p. 62-68, 2015.

NAKAI, MAURICIO EIJI 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.

NAKAYAMA, K. . et al. Sharpness evaluation of grinding wheel face by the grinding of steel ball. *Ann CIRP*, v. 29, p. 227-231, 1980.

NGUYEN, A. T.; BUTLER, D. L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 208, n. 1-3, p. 14-23, 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. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612517303596>>.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. *Procedia Engineering*, v. 63, n. 1996, p. 174-182, 2013.

QI, J. et al. Research on the adaptive adjustment of the parameters in grinding process. ago. 2016, [S.l.]: IEEE, ago. 2016. p. 744-750.

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. 1-12, 2017.

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

ROTHER, A.; JELALI, M.; SÖFFKER, D. A brief review and a first application of time-frequency-based analysis methods for monitoring of strip rolling mills. *Journal of Process Control*, v. 35, p. 65-79, nov. 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959152415001791>>.

ROWE, W. B.; CHEN, X.; MORGAN, M. N. The Identification of Dressing Strategies for Optimal Grinding Wheel Performance. 1993, New York: Department of Mechanical Engineering UMIST, 1993. p. 195-202.

ROWE, W BRIAN. *Modern Grinding Techniques*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9780470882313>>.

ROWE, W BRIAN. *Principles of Modern Grinding Technology*. 2ª ed. [S.l.]: Elsevier's Science & Technology, 2014.

SARAVANAPRIYAN, S. N. A.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. On-line detection of grinding burn by integrated sensing. 2001, [S.l.]: IEEE, 2001. p. 89-94. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/968505/>>.

SEDGWICK, P. Pearson's correlation coefficient. *BMJ*, v. 345, n. jul04 1, p. e4483-e4483, 4 jul. 2012. Disponível em: <<http://www.bmj.com/cgi/doi/10.1136/bmj.e4483>>.

SHIMAUCHI, S. et al. On relationships between amplitude and phase of short-time Fourier transform. mar. 2017, [S.l.]: IEEE, mar. 2017. p. 676-680. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7952241/>>.

SIKORSKI, W. *Acoustic Emission*. [S.l.]: InTech, 2012.

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.

SINGH, V.; VENKATESWARA RAO, P.; GHOSH, S. Development of specific grinding energy model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 60, p. 1-13, set. 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511002161>>.

SINHA, M. K. et al. An investigation into selection of optimum dressing parameters based on grinding wheel grit size. 2014, IIT Guwahati, Assam, India: [s.n.], 2014.

SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE INSPECT, T. J. (Org.). *Practical Acoustic Emission Testing*. Tokyo: Springer Japan, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-4-431-55072-3>>.

STANTON, J. M. Galton, Pearson, and the Peas: A Brief History of Linear Regression for Statistics Instructors. *Journal of Statistics Education*, v. 9, n. 3, jan. 2001. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10691898.2001.11910537>>.

SUBHASHREE, R.; PREETHI, C. S.; SUPRIYA, P. Fault distance identification in transmission line using STFT algorithm. jan. 2016, [S.l.]: IEEE, jan. 2016. p. 1-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7480036/>>.

SUTOWSKI, P.; PLICHTA, S. An investigation of the grinding wheel wear with the use of root-mean-square value of acoustic emission. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 6, n. 1, p. 87-98, 2006.

TAYLOR, R. Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, v. 6, n. 1, p. 35-39, jan. 1990. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/875647939000600106>>.

THOMAZELLA, R. et al. Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 145, 2019.

VLADETSKAYA, E.; KHARCHENKO, A.; VLADETSKII, D. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process. *Materials Today: Proceedings*, v. 11, p. 565-572, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785319300306>>.

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.

WANG, Z. et al. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 41, n. 2, p. 283-309, 2001.

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, 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.

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

WEI, J. et al. Correction to: Acoustic emission signal of fiber-reinforced composite grinding: frequency components and damage pattern recognition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 103, n. 1-4, p. 1403-1404, 14 jul. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03782-3>>.

WELCH, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, v. 15, n. 2, p. 70-73, jun. 1967. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1161901/>>.

WEVERS, M. Listening to the sound of materials: Acoustic emission for the analysis of material behaviour. *NDT & E International*, v. 30, n. 2, p. 99-106, abr. 1997. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869596000515>>.

YANG, Z. et al. A novel feature representation method based on original waveforms for acoustic emission signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 135, p. 106365, jan. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327019305862>>.

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.

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. VIBRATION SIGNAL MEASUREMENT: AN ALTERNATIVE FOR DESCRIBING MECHANICAL GRINDING PROCESS. *Particulate Science and Technology*, v. 12, n. 3, p. 223-233, jul. 1994. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02726359408906652>>.

A, E. S. S.; PANDE, S. J.; LAL, G. K. Evaluation of grinding wheel surface by means of grinding sound discrimination. . [S.l.: s.n.]. , 1980

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, 2016.

AGUIAR, P. R. et al. Monitoring the dressing operation in the grinding process. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, v. 5, n. 1, p. 3, 2009. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=23110>>.

ALBUQUERQUE CASTRO, B. et al. A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by Piezoelectric Sensor. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 7, p. 3225-3231, jul. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7587624/>>.

ALEXANDRE, FELIPE A. et al. A Novel Ultrasound Technique Based on Piezoelectric Diaphragms Applied to Material Removal Monitoring in the Grinding Process. *Sensors*, v. 19, n. 18, p. 3932, 12 set. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/18/3932>>.

ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO et al. Tool Condition Monitoring of Aluminum Oxide Grinding Wheel using AE and Fuzzy Model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.

ALMEIDA, VINICIUS A. D.; MENDES, L. C.; BAPTISTA, F. G. Detecção de dano baseada na impedância E/M com transdutores piezelétricos de baixo custo. *XX Congresso Brasileiro de Automática*, 2014.

ANH TUNG, L. et al. Optimization of dressing parameters of grinding wheel for 9CrSi tool steel using the taguchi method with grey relational

analysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 635, p. 012030, 28 out. 2019. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/635/1/012030>>.

AULESTIA VIERA, M. A. et al. A Time-Frequency Acoustic Emission-Based Technique to Assess Workpiece Surface Quality in Ceramic Grinding with PZT Transducer. *Sensors*, v. 19, n. 18, p. 3913, 11 set. 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/18/3913>>.

BACCAR, D.; SÖFFKER, D. Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 60, p. 198-207, 2015.

BADGER, J.; MURPHY, S.; O'DONNELL, G. E. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 125, p. 11-19, fev. 2018. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069551730161X>>.

BALES, G. et al. Recognizing Gaze-Motor Behavioral Patterns in Manual Grinding Tasks. *Procedia Manufacturing*, v. 5, p. 106-121, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978916300117>>.

BARBÉ, K.; PINTELON, R.; SCHOUKENS, J. Welch method revisited: Nonparametric power spectrum estimation via circular overlap. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 58, n. 2, p. 553-565, 2010.

BHUIYAN, M. S. H.; CHOUDHURY, I. A. Review of Sensor Applications in Tool Condition Monitoring in Machining. *Comprehensive Materials Processing*. [S.l.]: Elsevier, 2014. p. 539-569. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321013303>>.

BIANCHI, E. C. et al. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resínóide e vitrificado. *Cerâmica*, v. 57, n. 344, p. 431-437, dez. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000400010&lng=pt&tlng=pt>.

BRATAN, S.; ROSCHUPKIN, S.; NOVIKOV, P. Modeling the Grinding Wheel Working Surface State. *Procedia Engineering*, v. 206, p. 1419-1425, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817353407>>.

CARPINTERI, A.; LACIDOGNA, G.; PUGNO, N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 74, n. 1-2, p. 273-289, jan. 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794406000622>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11633-006-0056-2>>.

COELHO, R. T. Estudo Experimental da Profundidade de Dressagem de Rebolos na Retificação de Precisão Usando Método do Disco Retificado. 1991. 94 f. Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de São Carlos, 1991.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed ed. [S.l.]: Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1988.

D'ADDONA, D. M. et al. Neural Networks Tool Condition Monitoring in Single-point Dressing Operations. *Procedia CIRP*, v. 41, p. 431-436, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.001>>.

D'ADDONA, D. M. et al. Prediction of Dressing in Grinding Operation via Neural Networks. *Procedia CIRP*, v. 62, p. 305-310, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.043>>.

DE ALMEIDA, VINICIUS AUGUSTO DARE; BAPTISTA, F. G.; DE AGUIAR, P. R. 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.

DE OLIVEIRA, J. F. G. et al. Grinding Process Dominance by Means of the Dressing Operation. *Proceedings of the Twenty-Ninth International Matador Conference*. London: Macmillan Education UK, 1992. p. 547-550. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-349-12433-6_72>.

DE OLIVEIRA, J.F. GOMES; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 50, n. 1, p. 217-220, 2001. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607621088>>.

DE OLIVEIRA, JOÃO F. GOMES; DORNFELD, D. A. Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 43, n. 1, p. 291-294, 1994. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607622161>>.

DENG, H.; XU, Z. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 45, p. 46-69, set. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612519301835>>.

DENKANA, B. et al. Suitability of integrated sensors for the determination of chatter characteristics in a cylindrical grinding machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 102, n. 5-8, p. 2339-2344, 1 jun. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03323-y>>.

DING, N. et al. Experimental Study on the Relationship Between Acoustic Emission Signal and Grinding Wheel Wear. dez. 2019, [S.l.]: IEEE, dez. 2019. p. 2699-2703. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8997572/>>.

DORNFELD, D. Application of acoustic emission techniques in manufacturing. *NDT & E International*, v. 27, n. 4, p. 210, 1994.

DORNFELD, D. A.; DEVRIES, M. F. Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. *CIRP Annals*, v. 39, n. 1, p. 101-105, 1990. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607610129>>.

DORNFELD, D.; CAI, H. G. An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. *Journal of Engineering for Industry*, v. 106, n. 1, p. 28-33, 1 fev. 1984. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/106/1/28/392628/An-Investigation-of-Grinding-and-Wheel-Loading>>.

DOTTO, F. R. L. et al. In-Dressing Acoustic Map by Low-cost Piezoelectric Transducer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 1-1, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8835102/>>.

DURGUMAHANTI, U. S. P.; VIJAYENDER, P. S.; VENKATESWARA, R. A New Model

of Grinding Force Prediction and Analysis. *International Journal of Machina Tools & Manufacture*, v. 50, p. 231-240, 2010.

EATON, M. et al. Characterisation of Damage in Composite Structures using Acoustic Emission. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 305, p. 012086, 19 jul. 2011. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/305/i=1/a=012086?key=crossref.b02a79e80d0bc2893a7b590ed96b542c>>.

FERREIRA, F. I. et al. Inferential measurement of the dresser width for the grinding process automation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 100, n. 9-12, p. 3055-3066, 24 fev. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-2869-x>>.

FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. DA S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson. *Revista Política Hoje*, v. 18, 2009.

FURUTANI, K. et al. In-process measurement of topography change of grinding wheel by using hydrodynamic pressure. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 42, n. 13, p. 1447-1453, out. 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695502000731>>.

GARRIDO, M. The Feedforward Short-Time Fourier Transform. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, v. 63, n. 9, p. 868-872, set. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7419878/>>.

GROSSE, C. U.; OHTSU, M. *Acoustic Emission Testing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-69972-9>>.

GRUHN, S.; FISCHER, R.; VIELHAUER, C. Surface classification and detection of latent fingerprints based on 3D surface texture parameters. 1 jun. 2012, [S.l: s.n.], 1 jun. 2012. p. 84361C. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.922772>>.

GUO, C. et al. Power and Wheel Wear for Grinding Nickel Alloy with Plated CBN Wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, n. 1, p. 343-346, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607000844>>.

GUO, S. et al. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 1060-1076, jan. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616316833>>.

HADAD, M.; SHARBATI, A. Some Experimental Aspects of Grinding Soft Steel Under Different Machining Conditions. *Engineering Science & Technology*, v. 1, n. 1, 2019.

HASSUI, A. et al. Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. *Wear*, v. 217, n. 1, p. 7-14, abr. 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164898001665>>.

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

HWANG, T. W. et al. Acoustic emission monitoring of high speed grinding

of silicon nitride. *Ultrasonics*, v. 38, n. 1-8, p. 614-619, mar. 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X99000645>>.

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

JIANG, J. L. et al. 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 74, p. 29-40, nov. 2013.

JIANMING, S. et al. Milling tool wear monitoring through time-frequency analysis of sensory signals. 2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2016, p. 1-5, 2016.

JUNIOR, M. M. DOS S. et al. Analysis of Piezoelectric Sensors in Adulteration of Bovine Milk Using the Chromatic Technique. *Proceedings*, v. 4, n. 1, p. 38, 14 nov. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2504-3900/4/1/38>>.

JUNIOR, P. et al. Dressing tool condition monitoring through impedance-based sensors: Part 1-pzt diaphragm transducer response and emi sensing technique. *Sensors (Switzerland)*, v. 18, n. 12, 2018a.

JUNIOR, P. et al. Dressing Tool Condition Monitoring through Impedance-Based Sensors: Part 2-Neural Networks and K-Nearest Neighbor Classifier Approach. *Sensors*, v. 18, n. 12, p. 4453, 16 dez. 2018b. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4453>>.

KARPUSCHEWSKI, B.; WEHMEIER, M.; INASAKI, I. Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 49, n. 1, p. 235-240, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607629369>>.

KIM, B. S. et al. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 187-188, p. 30-36, 2007.

KIM, H.; MELHEM, H. Fourier and Wavelet Analyses for Fatigue Assessment of Concrete Beams. *Experimental Mechanics*, v. 43, n. 3, p. 131-140, 2003.

KING, R. I.; HAHN, R. S. *Handbook of modern grinding technology*. First ed. New York: Chapman and Hall, 1992.

KUMAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Prediction of wear and surface roughness in electro-discharge diamond grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 191, n. 1-3, p. 206-209, ago. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013607002749>>.

KWAK, J.-S.; HA, M.-K. Detection of dressing time using the grinding force signal based on the discrete wavelet decomposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 23, n. 1-2, p. 87-92, 1 jan. 2004a. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-003-1556-7>>.

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, mar. 2004b. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360301032X>>.

LACHANCE, S.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Development of an automated system

for measuring grinding wheel wear flats. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 22, n. 2, p. 130-135, 2003.

LAURO, C. H. et al. Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. [S.l: s.n.], 2014

LEONESIO, M.; BIANCHI, G.; CAU, N. Design criteria for grinding machine dynamic stability. *Procedia CIRP*, v. 78, p. 382-387, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118312538>>.

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

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.

LIAO, T. W. et al. GRINDING WHEEL CONDITION MONITORING WITH HIDDEN MARKOV MODEL-BASED CLUSTERING METHODS. *Machining Science and Technology*, v. 10, n. 4, p. 511-538, 7 dez. 2006. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10910340600996175>>.

LIMA, É. M. et al. Analysis of the Influence of the Window Used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault Detection. p. 350-355, 2016.

LINDLEY, T. C.; PALMER, I. G.; RICHARDS, C. E. Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth. *Materials Science and Engineering*, v. 32, n. 1, p. 1-15, jan. 1978. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0025541678902069>>.

LINKE, B. Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 57, n. 1, p. 345-348, 2008.

LOPES, W.N. et al. Monitoring of self-excited vibration in grinding process using time-frequency analysis of acceleration signals. 2019, [S.l: s.n.], 2019.

LOPES, WENDERSON NASCIMENTO 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*, 21 mar. 2017. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2016.0317>>.

LYONS; RICHARD, G. *Understanding Digital Signal Processing*. 3. ed. USA: Prentice Hall, 2010.

MALKIN, S.; GUO, C. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. 2ª ed. New York: Industrial Press Inc, 2008.

MARINESCU, I. D. et al. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, Second Edition. [S.l.]: CRC Press; 2 edition (February 8, 2016), 2016.

MARTINS, C. H. R. et al. Neural networks models for wear patterns recognition of single-point dresser. [S.l.]: IFAC, 2013. v. 46. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00222>>.

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, 2014.

MIRANDA, H. I. et al. Monitoring single-point dressers using fuzzy models. *Procedia CIRP*, v. 33, p. 281-286, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.050>>.

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. 63, n. 3, p. 627-640, 2015.

MOKBEL, A. A.; MAKSOUD, T. M. A. Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 101, n. 1, p. 292-297, 2000.

MOORE, L. M. The Basic Practice of Statistics. *Technometrics*, v. 38, n. 4, p. 404-405, nov. 1996. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1996.10484558>>.

NAKAI, M E et al. Neural Tool Condition Estimation in The Grinding of Advanced Ceramics. v. 13, n. 1, p. 62-68, 2015.

NAKAI, MAURICIO EIJI 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.

NAKAYAMA, K. . et al. Sharpness evaluation of grinding wheel face by the grinding of steel ball. *Ann CIRP*, v. 29, p. 227-231, 1980.

NGUYEN, A. T.; BUTLER, D. L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 208, n. 1-3, p. 14-23, 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. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612517303596>>.

PUERTO, P. et al. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. *Procedia Engineering*, v. 63, n. 1996, p. 174-182, 2013.

QI, J. et al. Research on the adaptive adjustment of the parameters in grinding process. ago. 2016, [S.l.]: IEEE, ago. 2016. p. 744-750.

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. 1-12, 2017.

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

ROTHER, A.; JELALI, M.; SÖFFKER, D. A brief review and a first application of time-frequency-based analysis methods for monitoring of strip rolling mills. *Journal of Process Control*, v. 35, p. 65-79, nov. 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959152415001791>>.

ROWE, W. B.; CHEN, X.; MORGAN, M. N. The Identification of Dressing Strategies for Optimal Grinding Wheel Performance. 1993, New York: Department of Mechanical Engineering UMIST, 1993. p. 195-202.

ROWE, W BRIAN. Modern Grinding Techniques. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9780470882313>>.

ROWE, W BRIAN. Principles of Modern Grinding Technology. 2ª ed. [S.l.]: Elsevier's Science & Technology, 2014.

SARAVANAPRIYAN, S. N. A.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. On-line detection of grinding burn by integrated sensing. 2001, [S.l.]: IEEE, 2001. p. 89-94. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/968505/>>.

SEDGWICK, P. Pearson's correlation coefficient. BMJ, v. 345, n. jul04 1, p. e4483-e4483, 4 jul. 2012. Disponível em: <<http://www.bmj.com/cgi/doi/10.1136/bmj.e4483>>.

SHIMAUCHI, S. et al. On relationships between amplitude and phase of short-time Fourier transform. mar. 2017, [S.l.]: IEEE, mar. 2017. p. 676-680. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7952241/>>.

SIKORSKI, W. Acoustic Emission. [S.l.]: InTech, 2012.

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.

SINGH, V.; VENKATESWARA RAO, P.; GHOSH, S. Development of specific grinding energy model. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 60, p. 1-13, set. 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511002161>>.

SINHA, M. K. et al. An investigation into selection of optimum dressing parameters based on grinding wheel grit size. 2014, IIT Guwahati, Assam, India: [s.n.], 2014.

SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE INSPECT, T. J. (Org.). Practical Acoustic Emission Testing. Tokyo: Springer Japan, 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-4-431-55072-3>>.

STANTON, J. M. Galton, Pearson, and the Peas: A Brief History of Linear Regression for Statistics Instructors. Journal of Statistics Education, v. 9, n. 3, jan. 2001. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10691898.2001.11910537>>.

SUBHASHREE, R.; PREETHI, C. S.; SUPRIYA, P. Fault distance identification in transmission line using STFT algorithm. jan. 2016, [S.l.]: IEEE, jan. 2016. p. 1-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7480036/>>.

SUTOWSKI, P.; PLICHTA, S. An investigation of the grinding wheel wear with the use of root-mean-square value of acoustic emission. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 6, n. 1, p. 87-98, 2006.

TAYLOR, R. Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. Journal of Diagnostic Medical Sonography, v. 6, n. 1, p. 35-39, jan. 1990. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/875647939000600106>>.

THOMAZELLA, R. et al. Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 145, 2019.

VLADETSKAYA, E.; KHARCHENKO, A.; VLADETSKII, D. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process. *Materials Today: Proceedings*, v. 11, p. 565-572, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785319300306>>.

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.

WANG, Z. et al. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 41, n. 2, p. 283-309, 2001.

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, 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.

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

WEI, J. et al. Correction to: Acoustic emission signal of fiber-reinforced composite grinding: frequency components and damage pattern recognition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 103, n. 1-4, p. 1403-1404, 14 jul. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03782-3>>.

WELCH, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, v. 15, n. 2, p. 70-73, jun. 1967. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1161901/>>.

WEVERS, M. Listening to the sound of materials: Acoustic emission for the analysis of material behaviour. *NDT & E International*, v. 30, n. 2, p. 99-106, abr. 1997. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869596000515>>.

YANG, Z. et al. A novel feature representation method based on original waveforms for acoustic emission signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 135, p. 106365, jan. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327019305862>>.

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.

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. VIBRATION SIGNAL MEASUREMENT: AN ALTERNATIVE FOR DESCRIBING MECHANICAL GRINDING PROCESS. *Particulate Science and Technology*, v. 12, n. 3, p. 223-233, jul. 1994. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02726359408906652>>.

APÊNDICES

APÊNDICE A

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 dessa tese durante seu período de Doutorado. Na **Figura 45** é mostrada uma síntese da produção científica obtida no período em que esta pesquisa foi desenvolvida.

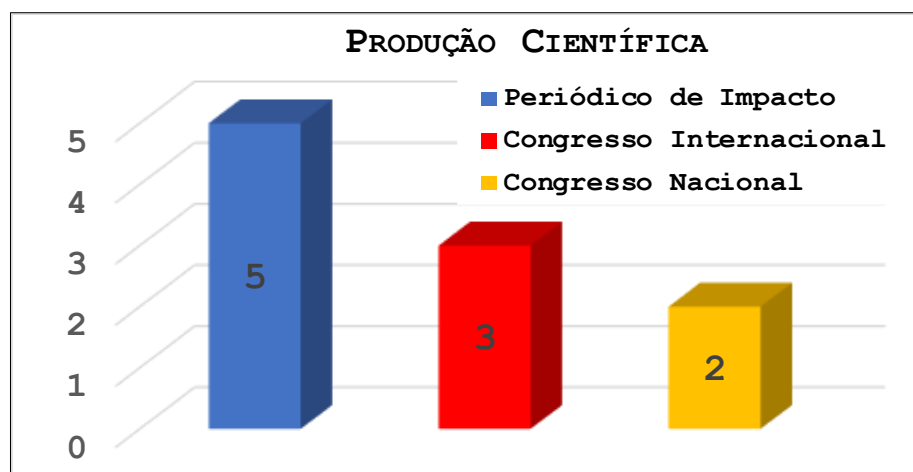


Figura 45. Síntese da produção científica

PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA COM A ÁREA DE DESENVOLVIMENTO DA TESE

- ❖ ★ DOTTO, FABIO ROMANO LOFRANO; AGUIAR, PAULO ROBERTO; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. In-Dressing Acoustic Map by Low-cost Piezoelectric Transducer. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS **JCR**, v. 1, p. 1-1, 2019.
- ❖ ★ THOMAZELLA, ROGÉRIO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; AGUIAR, PAULO ROBERTO DE; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; FIOCCHI, ARTHUR ALVES; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals. MEASUREMENT **JCR**, v. 1, p. 1, 2019.
- ❖ ★ VIERA, MARTIN AULESTIA; AGUIAR, PAULO ROBERTO DE; OLIVEIRA JUNIOR, PEDRO; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; DA SILVA, ROSEMAR BATISTA; D'ADDONA, DORIANA MARILENA; ANDREOLI, ANDRE LUIZ.

A Time-Frequency Acoustic Emission-Based Technique to Assess Workpiece Surface Quality in Ceramic Grinding with PZT Transducer. SENSORS **JCR**, v. 19, p. 3913, 2019.

- ❖ DOTTO, FÁBIO ROMANO LOFRANO; AGUIAR, PAULO ROBERTO DE.; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; SIMÕES, LEONARDO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; D'ADDONA, DORIANA MARILENA; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. Acoustic image-based damage identification of oxide aluminum grinding wheel during the dressing operation. PROCDIA CIRP, v. 79, p. 298-302, 2019.
- ❖ LOPES, THIAGO GLISSOI; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; RODRIGUES, RODRIGO; GIROTO, PEDRO; AGUIAR, PAULO; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. A Influência da Determinação de Limiar a ser aplicado na Métrica Counts no Estudo do Processo De Dressagem. In: COBEF 2019, 2019. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.
- ❖ **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; THOMAZELLA, ROGERIO; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; AGUIAR, PAULO ROBERTO; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; JUNIOR, BENTO RODRIGUES PONTES; VIERA, MARTIN A. AULESTIA. Monitoring of Self-Excited Vibration in Grinding Process Using Time-Frequency Analysis of Acceleration Signals. In: 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2018, São Paulo. 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2018. p. 659.
- ❖ ★ CONCEIÇÃO JUNIOR, PEDRO; AGUIAR, PAULO ROBERTO; FRANÇA, THIAGO; SANTOS RIBEIRO, DANILO; ISAAC FERREIRA, FABIO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; BIANCHI, EDUARDO; FOSCHINI, CESAR. Feature Extraction Using Frequency Spectrum and Time Domain Analysis of Vibration Signals to Monitoring Advanced Ceramic in Grinding Process. IET Science Measurement & Technology **JCR**, v. 1, p. 1, 2018.
- ❖ FERREIRA, FABIO ISAAC; AGUIAR, PAULO ROBERTO DE; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; MARTINS, CESAR HENRIQUE ROSSINOLI; RUZZI, RODRIGO DE SOUZA; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; D'ADDONA,

DORIANA MARILENA. Inferential measurement of the dresser width for the grinding process automation. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY **JCR**, v. 1, p. 1, 2018.

- ❖ THOMAZELLA, ROGERIO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; ALEXANDRE, FELIPE; LOFRANO DOTTO, FABIO ROMANO; RODRIGUES, RODRIGO; AGUIAR, PAULO; RODRIGUES DE PONTES JUNIOR, BENTO; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; AULESTIA, MARTIN. Detecção do fenômeno de chatter no processo de retificação por meio de análise tempo-frequência. In: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.
- ❖ LOPES, BARBARA GUEDES; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO; **LOPES, WENDERSON NASCIMENTO**; AGUIAR, PAULO ROBERTO DE; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; VIERA, MARTIN ANTONIO AULESTIA. Study on the effect of the temperature in Acoustic Emission Sensor by the Pencil Lead Break Test. In: 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2018, São Paulo. 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2018. p. 1226.