

unesp

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

ERICK LUIZ VIEIRA RUAS

**MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM ATRAVÉS DE ÍNDICE DE
DANO, EM DADOS ADQUIRIDOS POR TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE
BAIXO CUSTO.**

**Bauru - SP
2022**

ERICK LUIZ VIEIRA RUAS

MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM ATRAVÉS DE ÍNDICE DE DANO
EM DADOS ADQUIRIDOS POR TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO.

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

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Wenderson Nascimento Lopes

**Bauru - SP
2022**

Ruas, Erick Luiz Vieira.

Monitoramento da operação de dressagem através de índice de dano, em dados adquiridos por transdutores piezelétricos de baixo custo. / Ruas, Erick Luiz Vieira, 2022

70 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Wenderson Nascimento Lopes

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Operação de dressagem. 2. Sensores piezelétricos. 3. Índice de dano. 4. monitoramento indireto. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ERICK LUIZ VIEIRA RUAS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 14 dias do mês de outubro do ano de 2022, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ERICK LUIZ VIEIRA RUAS, intitulada **MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM ATRAVÉS DE ÍNDICE DE DANO, EM DADOS ADQUIRIDOS POR TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO.** A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica docente voluntario / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. RICARDO ALEX DANTAS DA CUNHA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ensino, Pesquisa, Extensão e Inovação - DEPEI / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: _ _ _ _ _

Aprovado

. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Dedico a **Deus**, a **Pátria** e a minha **Família**, que me deram todo o suporte para chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

É por dever de justiça que eu devo começar meus agradecimentos ao Grande Arquiteto do Universo, que é Deus, nosso senhor Jesus Cristo, que sempre foi bom e zeloso por mim e minha família. Obrigado por todos os ensinamentos, todos os dias de luta, todos os dias de glória. Sem crer na esperança de que o Senhor tem um propósito para mim, e de que me protege e orienta a todo momento, nunca teria chegado até aqui.

Agradeço profundamente o meu núcleo familiar, minha esposa Renata Ruas, que é a minha base, amiga e companheira, nas horas boas e ruins, você Renata representa os meus alicerces para suportar todas as adversidades da vida, eu te amo profundamente. Aos meus filhos Vinícius Ruas e Elisa Ruas, desde que os vi pela primeira vez foi um amor fulminante e vocês por muitas vezes foram a fonte de todo o meu sorriso e alegria, vocês são um pedaço do meu coração fora do meu peito, estarei sempre com vocês, e isso é uma promessa.

Meus pais Sérgio e Valéria, que desde muito cedo não mediram esforços para me colocar no caminho da retidão e que com base nos seus exemplos sou o homem que sou hoje, um homem livre e de bons costumes, me orgulho de toda a história que vocês construíram juntos, quero deixar registrado que eu sempre me espelho em vocês para a educação dos meus filhos. Minha irmã Yelena, que hoje, além de muito amiga, serve para mim como exemplo de trabalho, luta, coragem e determinação, agradeço também a sua família Thomaz e Yasmin.

Agradeço a toda a Família Graminha, família que ganhei ao me casar, e hoje são exemplos para mim. Sr. Aparecido, D. Fátima e Anderson, obrigado por toda ajuda que vocês nos deram em todos os momentos e em todas as adversidades. E aproveito para homenagear aqui a memória da D. Fátima, que no transcurso deste mestrado veio a adoecer e falecer, D. Fátima sempre me tratou como um filho e sempre esteve presente para nos prestar socorro, até hoje nossa família sente sua falta.

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Roberto de Aguiar e coorientador e irmão Wenderson Nascimento Lopes, agradeço a oportunidade de poder me orientar e principalmente de confiar em mim e sempre me ajudar nos momentos mais conturbados, a minha admiração e respeito por vocês é muito grande, levarei a amizade de vocês para toda a vida.

Aqui, gostaria de registrar também um agradecimento profundo e honesto a minha família do Guarujá, José Dimas, Dimas Pai, Rafael Mason, André e suas respectivas esposas, considero

vocês meus irmãos, agradeço todo o companheirismo e amizade de vocês e, principalmente, a todo esforço que fizeram diversas vezes para me visitar, não importando a distância. Vocês são fantásticos!

Agradeço meus amigos da loja Fraternidade Acadêmica Justiça e Lealdade de Lins, pelos profundos conhecimentos e apoio. Agradeço também aos amigos da Incubadora de empresas, Thiago e Estela, Claudio e Angela e famílias, ter vocês por perto sempre me trouxe felicidade.

Aos meus amigos de laboratório e mestrado, Vital, Leandro, Pedro, Everaldo, Breno, Glisoi e Cristiano, estar ao lado de vocês é como estar ao lado de gigantes. Faço aqui também um agradecimento ao meu grande amigo Felipe Alexandre que veio a nos deixar no transcurso do meu mestrado, muito do que está aqui você nos ajudou, Phelps você foi um ser humano extraordinário!

Por fim, agradeço ao Departamento de Engenharia Elétrica e Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, São Paulo, por fornecer as instalações e ativos necessários para a realização deste trabalho e a Enel Distribuidora de Energia, em especial meus colegas Elizeu, Glauber Ferreira e Jenny, por me conceder a oportunidade de dar continuidade e fechamento ao meu mestrado.

“Eu era só uma criança que sonhava em ser cientista, pois eles tornavam o mundo melhor. Hoje entendo que o ENGENHEIRO é um destes cientistas. E eu sou um deles” – **Erick Ruas**

“Trabalhe no seu sonho. Se não você vai ser pago para trabalhar no sonho de alguém” – **Flávio Augusto**

RESUMO

Diversos estudos que visam o monitoramento da operação de dressagem no processo de retificação têm utilizado sinais de emissão acústica (EA) para extrair informações e classificar as condições do rebolo. Entretanto, ainda existem lacunas para serem preenchidas quanto a métodos de transição entre a condição do rebolo dressado e não dressado, ao mesmo tempo em que diversas métricas baseadas em processamento digital de sinais, ainda não foram testadas para a extração de características de sinais gerados por transdutores piezelétricos durante a operação de dressagem. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo apresentar um novo método baseado em sinais de transdutores piezelétricos, e na combinação do índice desvio do valor médio quadrático (RMSD) e densidade espectral de potência (PSD) para determinar o momento adequado para interromper a operação de dressagem de rebolos convencionais de óxido de alumínio. A metodologia proposta foca em expandir o uso de transdutores alternativos, do tipo diafragma piezelétrico, para monitorar a dressagem de rebolos e usa um sensor de EA comercial como referência. A fim de validar o método, ensaios experimentais de dressagem foram realizados, e os sinais gerados pelo sensor de EA e pelo diafragma piezelétrico foram coletados e, posteriormente, processados digitalmente para extração de características com base na abordagem proposta. Os resultados mostram que usando o índice RMSD foi possível extrair informações referente as condições da superfície de corte do rebolo a partir dos sinais de ambos os sensores EA e diafragma piezelétrico. Os resultados indicam ainda que ao selecionar bandas de frequências que possuem maior relação com as condições da superfície de corte do rebolo, foi possível definir um limiar que pode ser usado para interromper a operação de dressagem no momento adequado, garantindo que o rebolo esteja restabelecido para o uso na retificação. Por fim, os resultados demonstram a viabilidade de um novo método não invasivo para o monitoramento da operação de dressagem de rebolos convencionais, contribuindo, principalmente, para a otimização do processo de retificação.

Palavras-Chave: Operação de dressagem, Sensores piezelétricos, Índice de dano, monitoramento indireto.

ABSTRACT

Several studies aimed at monitoring the dressing operation in the grinding process have used acoustic emission (AE) signals to extract information and classify the conditions of the grinding wheel. However, there are still gaps to be filled in terms of transition methods between the condition of the dressed and undressed grinding wheel, while several metrics based on digital signal processing have not yet been tested for the extraction of characteristics from signals generated by piezoelectric transducers during the dressing operation. In this context, the present research aims to present a new method based on signals from piezoelectric transducers and the combination of the root mean square deviation index (RMSD) and power spectral density (PSD) to determine the appropriate moment to interrupt the dressing operation of conventional aluminum oxide grinding wheels. The proposed methodology focuses on expanding the use of alternative piezoelectric diaphragm transducers to monitor the dressing of grinding wheels and uses a commercial AE sensor as a reference. In order to validate the method, experimental dressing tests were performed, and the signals generated by the AE sensor and the piezoelectric diaphragm were collected and then digitally processed to extract features based on the proposed approach. The results show that using the RMSD index it was possible to extract information regarding the conditions of the grinding wheel's cutting surface from the signals of both AE sensors and piezoelectric diaphragm. The results also indicate that by selecting frequency bands that have a greater relationship with the conditions of the grinding wheel's cutting surface, it was possible to define a threshold that can be used to interrupt the dressing operation at the appropriate time, ensuring that the grinding wheel is restored to be used in grinding. Finally, the results demonstrate the feasibility of a new non-invasive method for monitoring the dressing operation of conventional grinding wheels, mainly contributing to the optimization of the grinding process.

Keywords: Dressing operation, Piezoelectric sensors, damage index, indirect monitoring.

SUMÁRIO

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA	iv
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVO	18
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	19
2.1.1 O REBOLO	21
2.1.2 DESGASTE DO REBOLO	23
2.2 A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM	24
2.2.1 PARÂMETROS DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM E TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE CORTEDO REBOLO	25
2.2.2 GRAU DE RECOBRIMENTO DE DRESSAGEM (U _d)	28
2.2.3 AGRESSIVIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO (K)	29
2.3 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	31
2.3.1 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO APLICADAS AO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	32
2.3.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	33
2.3.3 A TECNOLOGIA DE EMISSÃO ACÚSTICA	34
2.3.4 SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA	35
2.3.5 TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO	37
2.3.6 PARÂMETROS E VANTAGENS DA EMISSÃO ACÚSTICA	38
2.4 MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM	39
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS	42
3.1.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS: ENSAIOS PRELIMINARES	45
3.1.2 AFERIÇÃO DA AGRESSIVIDADE	47
3.1.3 DEFINIÇÃO DA LARGURA DO DRESSADOR b _d	47
3.2 ENSAIOS DEFINITIVOS: EMPASTAMENTO E DRESSAGEM DOS REBOLOS	49

3.2.1	EMPASTAMENTO DA SUPERFÍCIE DE CORTE	49
3.2.2	DRESSAGEM DO REBOLO	49
3.2.3	VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO DO REBOLO	51
3.3	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	51
3.4	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DO MÉTODO	53
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO		54
4.1	Resultados obtidos do ensaio de dressagem para a Demonstração do Método	54
4.2	Resultados obtidos do ensaio de dressagem para a Verificação do método	57
4.3	Compilação dos resultados	61
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES		64
REFERÊNCIAS		65
Apêndice		70
	PUBLICAÇÕES OBTIDAS	70
	Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congressos	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Modelos de máquinas empregadas no processo de retificação adaptado de (MARINESCU et al., 2006).....	20
Figura 2 Esquema de um processo típico de retificação tangencial plana, adaptado (BIANCHI et al., 2011).....	20
Figura 3 Elementos de composição do rebolo, adaptado de (LOPES, 2018).....	22
Figura 4 Representação esquemática do processo de dressagem, adaptado de (BIANCHI et al., 2011).....	26
Figura 5 Representação do micro efeito de dressagem (MARINESCU et al., 2006).....	27
Figura 6 Representação do macro efeito de dressagem, adaptado de (LOFRANO DOTTO et al., 2020).....	28
Figura 7 grau de recobrimento, adaptado por (MOIA et al., 2015).....	29
Figura 8 Mecanismo cinemático da medição da agressividade do rebolo (BIANCHI et al., 2011).....	30
Figura 9 Componentes do sensor de emissão acústica, adaptado de (MARTINS et al., 2014).....	36
Figura 10 Definição de parâmetros de sinal descontínuos (MÁTHIS; CHMELÍK, 2012).....	38
Figura 11 Fluxograma que descreve a síntese da metodologia empregada nos ensaios e dos resultados obtidos nesta pesquisa.....	43
Figura 12 Fluxograma que descreve a metodologia empregada tratamento dos sinais adquiridos.....	45
Figura 13 Esquema de distribuição dos componentes utilizados nos ensaios.....	46
Figura 14 Bancada de ensaios para medir a agressividade do rebolo adaptado de (DE OLIVEIRA et al., 1992).....	47
Figura 15 Banco de ensaios para aferição da largura de atuação do dressador (LOPES et al., 2017).....	48
Figura 16 Aferição da largura de atuação do dressador.....	48
Figura 17 Sequência do tratamento de dados.....	51
Figura 18 Processo de escolha de bandas.....	52
Figura 19 Montagem da nova matriz e aplicação do RMSD.....	53
Figura 20 Superfície de corte do rebolo.....	54
Figura 21 Agressividade versus volume de material removido do ensaio de demonstração do método.....	54
Figura 22 Sinais originais referente ao ensaio de demonstração do método: (a) sensor EA e (b) Diafragma piezelétrico.....	55
Figura 23 Espectros do Ensaio 1 EA e Diafragma Piezelétrico.....	56
Figura 24 Índice RMSD para rebolo dressado e não dressado.....	57
Figura 25 Superfície de corte do rebolo usado para validação do método.....	58
Figura 26 Agressividade versus volume de material removido do ensaio de verificação do método.....	58
Figura 27 Sinais originais referente ao ensaio de verificação do método: (a) sensor EA e (b) Diafragma piezelétrico.....	59
Figura 28 - Espectros PSD dos sinais originais referente ao ensaio de verificação do método: (a) sensor EA e (b) diafragma piezelétrico.....	60
Figura 29 Índice RMSD para rebolo dressado e não dressado na verificação do método.....	60
Figura 30 Índice RMSD nos ensaios definitivos para o sensor EA.....	62
Figura 31 Índice RMSD nos ensaios definitivos para o diafragma piezelétrico PZT.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Parâmetros do ensaio de demonstração do método	49
Tabela 2 Parâmetros do Ensaio de Dressagem para a Verificação do Método	53

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

a	Coefficiente angular da reta de regressão
b	Largura do disco retificado [mm]
b_d	Largura de dressagem ou largura de atuao do dressador [μ m]
b_s	Largura da superfície de corte do rebolo [mm]
CVD	Deposio de vapor químico (do inglês, <i>Chemical Vapour Deposition</i>)
DFT	Transformada discreta de Fourier
d_s	Diâmetro externo do rebolo [mm]
EA	Emissão acústica
FFT	Transformada rápida de Fourier
F_N	Força normal utilizada para quantificar a agressividade do rebolo [N]
L_R	Largura do rebolo
n	Rotao do rebolo [RPM]
P_d	Quantidade de passes de dressagem
PSD	Densidade espectral de potência (<i>Power Spectral Density</i>)
r	Raio do disco retificado para quantificar a agressividade do rebolo [mm]
RMSD	Desvio do valor médio quadrático (<i>Root Mean Square Deviation</i>)
S_d	Passo de dressagem [mm]
t	Tempo [s]
U_d	Grau de recobrimento
V	Volume de material removido [mm ³]
V_d	Velocidade transversal do rebolo ou velocidade de dressagem [m/s]
V_s	Velocidade de corte do rebolo [m/s]
V_{sd}	Velocidade de avanço do dressador [m/s]
V_w	Velocidade da peça [m/s]

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A globalização traz um cenário de alta concorrência em todo o mercado, não sendo diferente para a indústria de manufatura (MCMILLAN; RODRIK; KENNEDY, 2011). Desta maneira, a indústria de manufatura apresenta grande disparidade de performance entre os sistemas que ainda se utilizam de processos manuais, para com os que já se utilizam de tecnologia, o que implica na necessidade de uma produção cada vez mais composta por processos automatizados e independentes da ação humana. Pode-se entender por sistemas de manufatura disposições complexas de equipamentos e máquinas que se utilizam de insumos para fabricação de produtos. Estas máquinas e equipamentos são caracterizadas por parâmetros mensuráveis que transformam matérias primas em bens de produção ou de consumo (ALEXANDRE, 2018).

Bens de consumo são produtos que podem ser adquiridos diretamente pelo público em geral. Por outro lado, os bens de produção são caracterizados por produtos que são desenvolvidos para outras empresas usarem na fabricação de outros bens de consumo ou de produção (BLACK, J. T.; KOHSER, 2008). Dentro da indústria de manufatura existem diversos processos mecânicos de fabricação, sendo um deles a retificação, que geralmente se encontra nas etapas finais da cadeia produtiva de usinagem. O processo de retificação é constituído pela remoção de material da superfície de uma peça por meio de abrasão de um material com dureza superior ao da peça usinada. A ferramenta utilizada para esse processo é o rebolo (LOPES *et al.*, 2017), que é composto por grãos abrasivos unidos por um material ligante.

O processo de retificação é usado para o acabamento de uma grande variedade de peças, podendo ser o seu material de diversas espécies, composições e densidades. Este processo visa obter peças com baixa rugosidade superficial, controle dos erros dimensionais e de forma de peça, vida útil da peça prolongada, baixos custos, entre outras vantagens (ALEXANDRE, 2018). Com isso, o processo de retificação se caracteriza por obter alta qualidade na superfície da peça, essa qualidade é evidenciada em aspectos como serventia, disponibilidade, robustez, confiabilidade, desempenho, durabilidade e inclusive em questões estéticas da peça (KALPAKJIAN, SEROPE; SCHMID, 2014).

Por ser um procedimento que se encontra no final do processo de usinagem, um dano na peça causa prejuízo significativo para a empresa, tanto na perda do material, que por muitas vezes terá que ser descartado, quanto na perda de todo o valor agregado que é depositado na peça nos processos anteriores como homem-hora, máquina-hora, bem como o desgaste do processo (LOFRANO DOTTO *et al.*, 2020).

Para que a operação de retificação atenda requisitos técnicos como rugosidade e tolerâncias

dimensionais, é preciso que o rebolo apresente uma condição de corte adequada. A condição de um rebolo é avaliada através de suas propriedades, como uma superfície de corte uniformizada, sem impurezas, grãos abrasivos com suas propriedades de corte, entre outras propriedades. As principais falhas que o processo de retificação pode ocasionar na peça são tensões residuais, trincas e queima da peça (ALEXANDRE, 2018).

Sob este prisma, a manutenção das características da superfície de corte do rebolo recebe uma atenção especial, sendo a dressagem a operação utilizada para a restauração destas propriedades. Esta operação é de tal importância para a indústria que, conforme apresentado em (WEGENER *et al.*, 2011), recebe a seguinte máxima: “Retificação é Dressagem”, (*Grinding is dressing*).

Mesmo com a evolução da tecnologia dentro das indústrias de manufatura, muitos processos ainda geram paradas indesejáveis ou prejuízos financeiros por conta da forma que a operação de dressagem é realizada, que na sua maioria, dependem da atuação humana e experiência do operador para a averiguar se o rebolo restituiu ou não as suas propriedades na superfície de corte. Conforme apresentado em (LOPES *et al.*, 2017), estes testes ainda são baseados em informações sensíveis como variação dos ruídos causados pelo contato da peça com o dressador ou pela visualização da coloração da superfície de corte do rebolo.

Desta forma, o desenvolvimento de um monitoramento de forma indireta para a avaliação do estado da superfície de corte do rebolo é de grande valia para a indústria de manufatura, pois a resolução destes problemas traria o aumento da produtividade, diminuição dos custos devido a desgastes desnecessários e melhor aproveitamento dos componentes e ferramentas envolvidos no processo de dressagem (YANG; YU, 2013).

Contudo, o custo da resolução deste problema não pode ser maior que o benefício financeiro que solução trás, por este motivo ocorre a busca de soluções de baixo custo, que realmente compensem os investimentos para a aplicação da solução. Nesse contexto, técnicas avançadas de processamento digital de sinais associadas a sensores piezelétricos de baixo custo são de grande valia para o desenvolvimento de métodos de monitoramento indireto capaz de auxiliar operadores quando do monitoramento da superfície de corte de rebolos convencionais.

Técnicas avançadas de processamento digital de sinais associadas a sensores piezelétricos podem ser encontradas na literatura. Entretanto, a identificação da condição do rebolo utilizando a densidade espectral de potência (PSD) associada ao índice desvio do valor médio quadrático (RMSD) ainda não foram identificados na literatura, sendo este o fator principal que difere a presente pesquisa de outros estudos.

1.2. OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo apresentar um novo método baseado em sensor de EA e diafragma piezelétrico, bem como na densidade espectral de potência (PSD) e no índice RMSD para determinar o momento adequado de interrupção da operação de dressagem de rebolos convencionais de óxido de alumínio.

Cabe salientar que a presente pesquisa se difere de outras da literatura nas seguintes características: (i) o índice RMSD ainda não foi investigado como alternativa para a composição de métodos não invasivos para o monitoramento da operação de dressagem de rebolos convencionais; (ii) O índice RMSD ainda não foi empregado para a extração de característica de sinais gerados por sensores piezelétricos ao logo da operação de dressagem, como por exemplo, sensores de EA e diafragmas piezelétricos. Neste contexto, o presente estudo visa preencher a lacuna existente sobre abordagens que determine o tempo adequado de transição entre as condições do rebolo dressado e não dressado, visando avançar o conhecimento sobre condições da superfície de corte do rebolo a partir de sinais EA gerados com o diafragma piezelétrico, que se apresenta com um transdutor alternativo e vem sendo cada vez mais usado na composição de métodos de monitoramento do processo de retificação. Este trabalho também visa contribuir com um método de seleção de bandas de frequências que possuem maior relação com as condições da superfície de corte do rebolo, e propõe a definição de um limiar que pode ser usado para interromper a operação de dressagem no momento adequado, garantindo que o rebolo esteja restabelecido para o uso no processo de retificação. Por fim, a presente pesquisa dá origem a um novo método não invasivo robusto e confiável que contribui, principalmente, para a otimização do processo de retificação.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A retificação é um dos processos de usinagem mais antigos conhecidos pelo homem, esta atividade pode ser rastreada desde os tempos neolíticos. Nesta época, a falta de tecnologia e equipamentos restringiam as operações primitivas em atividades manuais. Com o tempo, os processos mecânicos de fabricação por abrasão evoluíram sendo inseridos na indústria de manufatura, trazendo sob a luz da ciência em 1914 (MARINESCU *et al.*, 2006). Utiliza um disco chamado rebolo, que é composto por um material abrasivo, unido por um material ligante, que gira em alta velocidade e por meio da abrasão remove material da peça a ser usinada, peça essa que é feita de um material de dureza inferior à do rebolo (DE LIMA *et al.*, 2011).

Mesmo sendo um processo muito antigo sua complexidade é alta, isso ocorre devido ao número elevado de fatores e variáveis que podem interferir na ação, como o tipo de peça a ser usinada, o tipo de máquina retificadora, o rebolo a ser utilizado, o tipo do grão que possuem tamanhos e formas aleatórias, entre outros fatores conforme apresentado por (NGUYEN; BUTLER, 2008).

A retificação é um processo largamente utilizado na indústria metal mecânica, que tem como intuito realizar o acabamento de peças com alta precisão, sendo geralmente realizada nos finais da cadeia de usinagem, conferindo assim um acabamento com melhor qualidade e precisão nas superfícies da peça usinada. Por este fato, a peça que está passando pelo processo de retificação, traz consigo um grande valor agregado, que é adquirido nos processos anteriores, fazendo com que o processo de retificação receba assim uma atenção especial, pois uma falha neste processo acarretará em onerosos custos de produção, conforme descrito pelos autores (PATNAIK DURGUMAHANTI; SINGH; VENKATESWARA RAO, 2010).

Em (DE AGUIAR; DOTTO; BIANCHI, 2005), os autores descrevem a retificação como sendo um processo que detém consigo um baixo domínio tecnológico quando comparados a outros processos convencionais de usinagem, isso ocorre pelo fato do processo de retificação não depender somente da máquina e do rebolo, mas dependa também da interferência direta de uma mão de obra qualificada, que por ventura, pode desconhecer os parâmetros envolvidos no processo como um todo.

O rebolo é um disco composto por grãos abrasivos de tamanhos e formatos aleatórios e unidos por um elemento ligante. O fato dos grãos abrasivos não terem uma forma geométrica não definida e que sua geometria não possa ser descrita de modo preciso, esse processo é classificado como um processo de usinagem com ferramentas de geometria não definida (MARINESCU *et al.*, 2006).

Existem três modelos de máquinas que são empregadas no processo de retificação: as retificadoras planas tangenciais e verticais, as retificadoras cilíndricas universais e a cilíndricas sem centro (*centerless*), conforme apresentado na Figura 1 (MARTINS, 2013). Ressalta-se que no presente trabalho utilizou em seus ensaios a retificadora plana tangencial, de eixo horizontal.

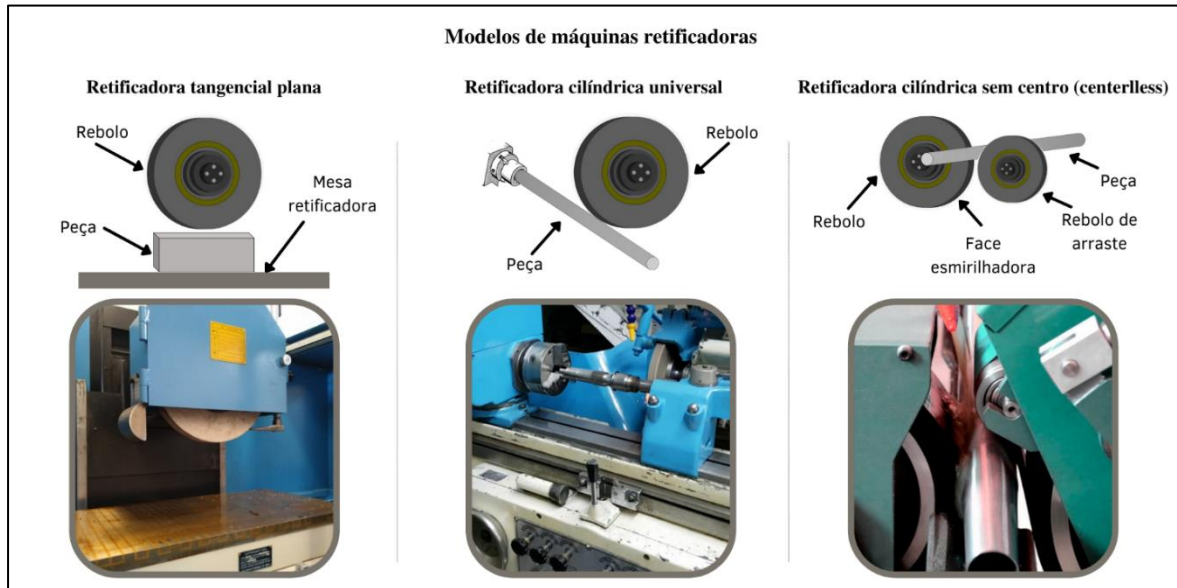


Figura 1 Modelos de máquinas empregadas no processo de retificação adaptado de (MARINESCU *et al.*, 2006)

Sob o prisma apresentado por (MARINESCU *et al.*, 2006), é possível evidenciar os cinco elementos principais que atuam no processo de retificação, sendo eles: (i) A ferramenta abrasiva que é o rebolo; (ii) O fluido de corte refrigerante; (iii) A peça usinada; (iv) Os cavacos inerentes da ação; (v) Atmosfera. Na Figura 2 também são ilustrados esses elementos.

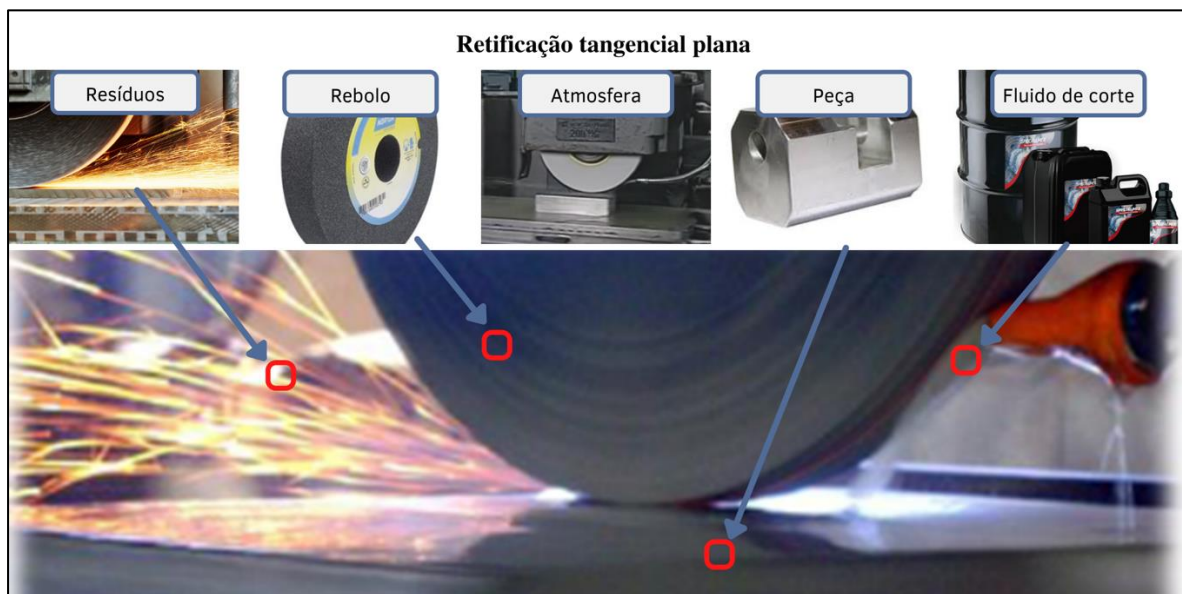


Figura 2 Esquema de um processo típico de retificação tangencial plana, adaptado (BIANCHI *et al.*, 2011)

Com o início do processo de retificação, os grãos abrasivos do rebolo removem material da peça usinada, causando também o desgaste do rebolo devido ao atrito. Com este atrito entre a peça usinada e a superfície de corte do rebolo, geram-se fragmentos que são arrancados da peça,

denominados cavacos, juntamente com grãos abrasivos que se soltam durante a operação. Estes materiais sólidos inerentes a retificação são denominados de resíduos sólidos (LOPES, 2018).

Por sua vez, o fluido de corte utilizado no processo também recebe atenção especial. Conforme apresentado em (BANERJEE; GHOSAL; DUTTA, 2008) o fluido de corte sendo o responsável por uma refrigeração de forma abundante na área da retificação, com o objetivo de reduzir a temperatura intrínseca ao contato entre a peça usinada e a superfície de corte do rebolo. Além da refrigeração da peça usinada, do rebolo e dos cavacos que surjam com avançar da retificação, o fluido de corte também visa a lubrificação, limpeza da região de contato entre a peça usinada e o rebolo e a proteção contra oxidação da região usinada. Já (MARINESCU *et al.*, 2006), define o fluido de corte como um dos componentes mais importantes para garantir a qualidade da superfície da peça usinada, sendo necessário garantir a integridade de variáveis como: constituição do óleo e sua concentração, vazão e pressão do fluido e eficiência de refrigeração.

A atmosfera também interfere no processo de retificação, isso acontece porque a área usinada sofre as consequências das altas temperaturas que surgem no processo. Em se tratando de metal, as peças podem perder ou ganhar características diferentes com o restante da sua estrutura, como por exemplo alterar o padrão de sua micro estrutura da liga metálica utilizada na peça, podendo por muitas vezes essas alterações serem irreversíveis (WILLIAN D. CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Em suma, o processo de retificação se caracteriza pela remoção de material de uma peça a ser usinada por meio da abrasão entre a superfície de corte do rebolo com a superfície da peça, em consequência há a retirada de cavacos da peça usinada por conta dos grãos abrasivos contidos no rebolo. Cada grão que compõe a superfície de corte do rebolo tem forma e tamanho aleatório, eles compõem a estrutura topográfica da superfície de corte do rebolo e são responsáveis pela retirada do material da peça usinada (KOPAC; KRAJNIK, 2006).

Contudo, para que a qualidade da superfície retificada da peça usinada seja satisfatória e atenda aos requisitos solicitados no projeto da usinagem, o rebolo utilizado deve estar em plenas condições de uso, com a sua topografia alinhada e de forma concêntrica, sem impurezas e afiação adequada para o processo de retificação, conseguindo assim usinar a peça com os padrões desejados (LOPES, 2018).

2.1.1 O REBOLO

Conforme apresentado, o rebolo é constituído por grãos abrasivos juntamente com um material ligante, na indústria metalmeccânica pode-se encontrar diversos tipos de ligantes, sendo os mais comuns os de resina orgânica, borracha, vitrificado e o metálico. Entre os abrasivos mais comuns tem-se o carboneto de silício, alumina com zircônia e o óxido de alumínio

(MALKIN; GUO, 2008). A Figura 3 apresenta a composição de um rebolo.



Figura 3 Elementos de composição do rebolo, adaptado de (LOPES, 2018)

As condições da superfície de corte do rebolo, bem como a topografia e sua afiação influenciam de forma direta na qualidade da usinagem conforme apresentado em (LOPES *et al.*, 2017). Para que estas condições sejam satisfeitas e o rebolo recupere estas características, o rebolo deve ser submetido a operação de dressagem.

Tanto os grãos abrasivos, quanto o aglomerante usados na retificação, devem ser escolhidos de acordo com o tipo de material a ser usinado e qual o tipo de especificações de acabamento definidos no projeto, de acordo com (MARINESCU *et al.*, 2006), a eficiência do processo de retificação dependem de alguns fatores como a granulometria e natureza do grão abrasivo, tipo de ligante utilizado, da dureza e da porosidade resultante da ligação entre os grãos abrasivo e do material ligante. Seguindo o que apresenta (MALKIN; GUO, 2008), pode-se incluir também as características do material a ser usinado, a composição do fluido de corte bem como os parâmetros da retificação e da operação de dressagem.

Conforme (MARINESCU *et al.*, 2006), é entendido por porosidade do rebolo a distância entre os grãos abrasivos presentes na superfície de corte, sendo que, quanto maior a distância entre um grão e outro, menor será o atrito propiciado entre o contato da peça e a superfície de corte do rebolo, tornando assim a ação de abrasão mais suave e refrigerada, em contra partida se o rebolo apresentar uma maior densidade de grãos no rebolo, maior será a área de contato, consequentemente maior será o atrito.

A porosidade também facilita a retirada de cavacos removidos da peça, pois após a passagem do grão, pequenos filamentos se desprendem da peça entrando nestes espaços e facilitando a remoção do material, geralmente estes cavacos são removidos logo após o rompimento deste filamento, ou pelo fluido de corte (LOPES *et al.*, 2017).

A norma que regula a identificação dos grãos abrasivos é a ANSI *Standard* B74. 12-1977 “*Specification for Size of Abrasive Grain*”, nela é possível identificar o tamanho médio do grão que é feita em *mesh* por polegada, que representa o número de aberturas por polegada obtida em um processo de peneiramento, sendo quanto maior o *mesh*, maior será a quantidade de aberturas e mais fino deverá ser o grão. A variação dos grãos abrasivos vão de grosseira até a

escala de ultrafina, sendo que essas classes mais finas são utilizadas quando o projeto solicita uma rugosidade menor na superfície da peça usinada (MALKIN; GUO, 2008). Em contrapartida, grãos maiores são utilizados para a remoção de grandes volumes de materiais ou para retificações de peças com maior porte.

Desta maneira, como apresentado em (ALEXANDRE *et al.*, 2017), pode-se definir que quanto maior a escala do grão abrasivo que compõe o rebolo, esse grão terá um tamanho médio menor, e maior será a sua classificação, sendo as granulometrias menores são utilizadas quando o projeto exige que a peça usinada tenha um acabamento superficial com menos rugosidade.

Tanto em (MARINESCU *et al.*, 2006) quanto em (LOPES, 2018), é apresentado o fato de que à medida que os passes de retificação vão acontecendo, os grãos abrasivos perdem a sua capacidade de corte. Esse fato ocasiona um aumento de pressão no ponto de contato entre a peça usinada e o rebolo, ocasionando a ruptura do grão ou simplesmente o desprendimento do grão com o ligante do rebolo.

2.1.2 DESGASTE DO REBOLO

De acordo com (WEGENER *et al.*, 2011), pode-se dividir o desgaste do rebolo no processo de retificação em quatro tipos distintos, sendo eles:

1. Fratura do material aglomerante: devidos aos impactos entre o rebolo e a peça usinada;
2. Fratura do grão por impacto ou variações na temperatura: que são originados pelos danos térmicos ou mecânicos originados pela natureza do processo;
3. Degradação do grão abrasivo: que se deve pelo ataque químico por elementos do fluido refrigerante;
4. Fratura entre o grão abrasivo e o aglomerante: também resultantes dos impactos entre o rebolo e a peça.

De acordo com (LOPES, 2018), muitas variáveis interferem na degradação do rebolo no decorrer do processo de retificação. Os impactos ocasionados pelo atrito são consideravelmente pequenos entre estes fatores, contudo eles são responsáveis pelas irregularidades na superfície de corte do rebolo, causando assim arestas de corte devido ao contato excessivo entre a peça e os grãos abrasivos na superfície de corte, interferindo diretamente na agressividade do rebolo.

Com a degradação do rebolo, o controle do processo de retificação pode ser afetado de diversas maneiras, tudo interferindo no custo final do processo. (MENDES, 2011) em seu estudo apresenta as seguintes interferências:

- Extravio na topografia do rebolo;

- Rugosidade fora dos requisitos do projeto e danos na peça;
- Intensos processos de retificação;
- Obstrução dos poros e conseqüentemente o aumento da pressão exercida na superfície de corte;
- Perda de agressividade e diminuição da vida útil do rebolo.

Conforme exposto por (DERKX *et al.*, 2008), em se tratando de custos, esse é o principal motivo da grande variedade de estudos elaborados para a retificação de precisão. A possibilidade de identificar alterações topográficas na superfície de corte dos rebolos utilizados nos processos de retificação, ou ainda, identificar possíveis não conformidades na estrutura do rebolo, são de grande valia para a indústria de manufatura. Principalmente se este monitoramento for em tempo real, avaliando as condições de desgaste da superfície de corte, determinando se ele está ou não, em condições de realizar o processo de retificação de forma satisfatória, minimizando assim custos de produção e os riscos inerentes a possíveis danos das peças usinadas.

2.2 A OPERAÇÃO DE DRESSAGEM

Conforme apresentado em (LOPES, 2018), a operação de dressagem consiste no condicionamento da superfície de corte do rebolo, reavendo sua característica de corte e especificações geométricas, especificações estas que forma perdidas ao longo de processos de retificações realizados com o rebolo. Após sucessivas passagens do rebolo pelo processo de retificação, é natural que ele sofra pelo desgaste apresentado pela ação, diminuindo assim, a capacidade de corte e remoção de material, que o rebolo exerce sobre a peça usinada. Essa habilidade de remoção de material que o rebolo possui é denominada de agressividade.

Analogamente, pode-se entender que a quantidade de material a ser removido da peça usinada por meio da retificação, influenciam nas variações das forças aplicadas no processo de retificação, bem como a qualidade da superfície de corte do rebolo são ligadas de forma direta a qualidade da operação de dressagem feita no rebolo, mantendo o slogan “Retificação é dressagem” apresentado por (WEGENER *et al.*, 2011).

Frente ao exposto, a possibilidade de definir o momento ótimo para a interrupção da operação de dressagem é de grande valia para a indústria de manufatura, pois assim é possível minimizar os danos causados nas peças por causa de rebolos não completamente dressados, evita-se também passes de dressagem desnecessários economizando assim o rebolo, juntamente com a possibilidade de minimizar os custos de produção (MOIA *et al.*, 2015).

2.2.1 PARÂMETROS DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM E TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE CORTEDO REBOLO

Devido a sua natureza, o processo de retificação resulta em uma alteração considerável na superfície de corte, isso se deve a vários fatores como a quebra dos grãos abrasivos, bem como a retirada do grão na totalidade, ou também pela ocupação dos cavacos nos poros do rebolo, cavacos estes que são inerentes ao processo, entre outras interferências comuns ao processo de retificação. Essas mudanças na superfície de corte impactam de forma direta na agressividade do rebolo e conseqüentemente geram alterações significativas na agressividade do rebolo, que podem vir a causar danos permanentes na peça, como queima resultante ao excesso de calor ou erros dimensionais e geométricos resultando no descarte da mesma (MALKIN; GUO, 2008).

Outro ponto a se destacar é a topografia da superfície de corte que também pode afetar o processo de retificação. Uma topografia irregular pode ocasionar tensões excessivas em certos pontos entre o contato do rebolo na peça, essas tensões podem ocasionar demasiada quebra de grãos abrasivos ou mesmo ocorrer queima da peça devido aumento da temperatura (MOIA *et al.*, 2015).

Pode-se caracterizar a topografia da superfície de corte do rebolo pela quantidade de arestas de corte, isso impacta diretamente na forma e na geometria do cavaco produzido no processo de retificação conforme afirmado em (LIN; LIU; HUANG, 2007; SALEH; BISHWAS; RAHMAN, 2010). Com isso pode-se afirmar que o processo de retificação tem a sua qualidade impactada diretamente pela topografia da superfície de corte do rebolo, sendo assim, ela se torna um parâmetro importante na operação de dressagem, tendo os seus resultados monitorados com maior intensidade.

A operação de dressagem tem por objetivo remodelar e afiar a superfície de corte do rebolo, tendo já alguns autores abordado os parâmetros que regem essa operação como (MARTINS *et al.*, 2013, 2014; MIRANDA *et al.*, 2015). Segundo os autores, pode-se descrever essas variáveis como:

- Passo de dressagem (S_d);
- Profundidade de dressagem (a_d);
- Largura de dressagem (b_d);
- Espessura do rebolo (b_s);
- Grau de recobrimento (U_d).

Estas variáveis, que estão representadas na Figura 4, podem ser modificadas ao ser alterado o modelo de rebolo utilizado ou o tipo de dressador. Calcula-se a largura de atuação do dressador ou largura de dressagem (b_d) realizando a medição da ponta do dressador (LOPES,

2018) e a partir da inserção a_d da ponta do dressador na superfície de corte do rebolo. Esse parâmetro (b_d) é diretamente proporcional ao grau de recobrimento.

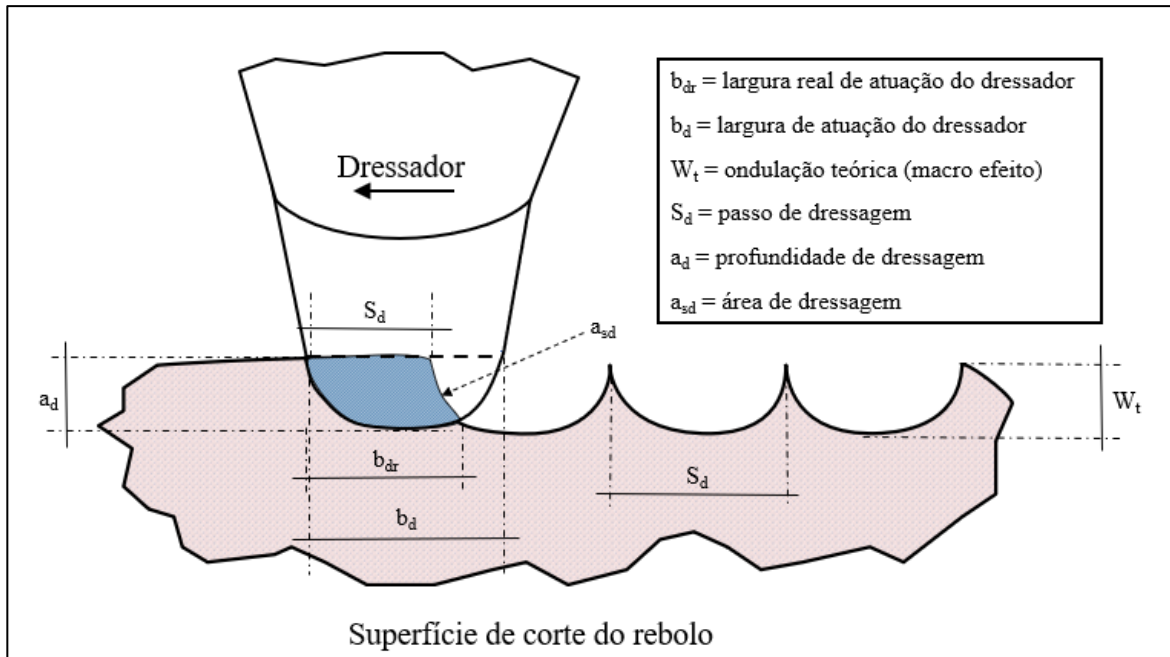


Figura 4 Representação esquemática do processo de dressagem, adaptado de (BIANCHI *et al.*, 2011)

Na Figura 4, é possível ver em perspectiva uma operação de dressagem, ela é composta por uma mesa retificadora com acionamento hidráulico, o qual é acoplado sobre ela a base do suporte do dressador, que no presente estudo suporta um dressador de ponta única, dressador este que é comumente utilizado na indústria pois contém uma mecânica mais simples e por ser de menor custo. Nesta operação, o dressador passa pela superfície de corte do rebolo, que se encontra em rotação e acoplado ao eixo da retificadora. Assim, para cada passe do dressador pela superfície de corte do rebolo, uma camada de profundidade a_d é removida de sua estrutura, ação muito similar ao processo de torneamento (WEGENER *et al.*, 2011).

O passo de dressagem S_d , que é o avanço axial do dressador em relação ao rebolo, foi descrito por (MARINESCU *et al.*, 2006) conforme equação (1).

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

Sendo que, V_{sd} [mm/s] representa a velocidade de avanço do dressador, já V_s [mm/s] é a velocidade de corte do rebolo e d_s [mm] representa o diâmetro do rebolo.

Para que o processo de dressagem seja realizado, dressador é colocado com um ângulo de ataque negativo em relação ao sentido de rotação do rebolo, essa disposição melhora a eficiência do processo evitando assim problemas. Sendo assim, (MALKIN; GUO, 2008) descreve como a angulação ideal para o processo de dressagem uma faixa entre 10° a 15° .

(MARINESCU *et al.*, 2006) em seu livro afirma que a operação de dressagem afeta o rebolo

com dois efeitos distintos, sendo o macro efeito e o micro efeito de dressagem. O micro efeito é caracterizado pela fratura dos grãos abrasivos conforme apresentado na Figura 5.

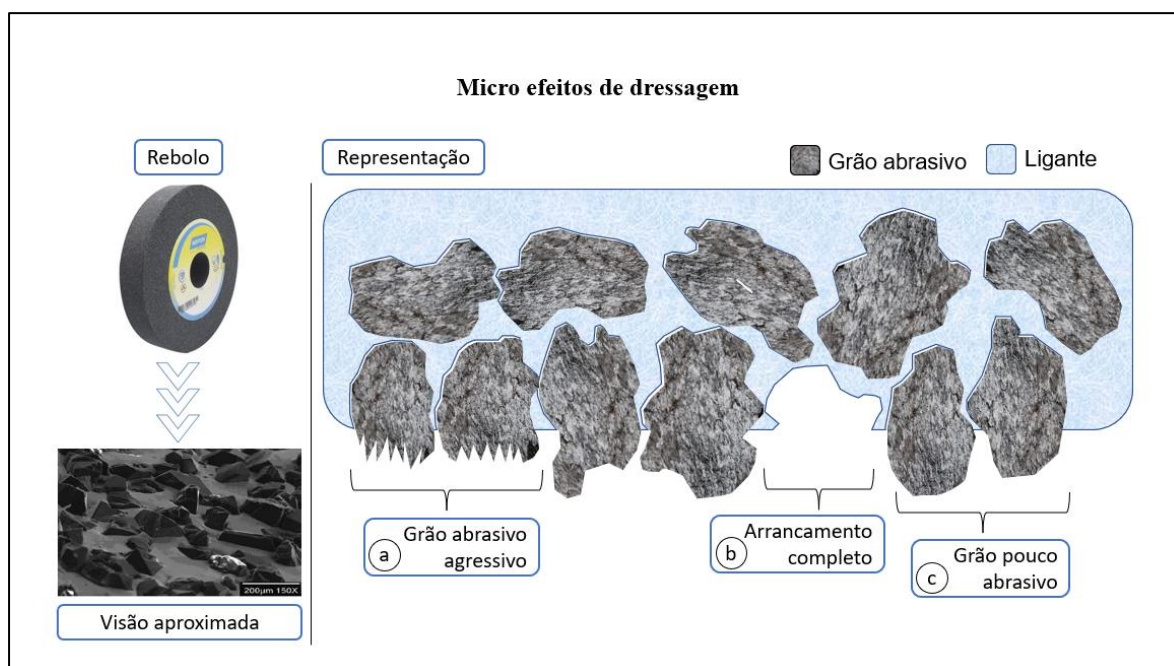


Figura 5 Representação do micro efeito de dressagem (MARINESCU *et al.*, 2006)

É possível identificar três situações para o micro efeito de dressagem, a primeira é a fratura do grão abrasivo, contudo o mesmo ainda se encontram com condições de uso Figura 5 (a), ou também pelo arrancamento por inteiro dos grãos do ligante do rebolo Figura 5 (b). Observe que, com o arrancamento total ou parcial dos grãos, se formam novas arestas de corte, à medida que o dressador se desloca na região de trabalho do rebolo.

Já na Figura 5 (c), é possível identificar um grão abrasivo pouco agressivo, em outras palavras, um grão que não possui arestas de corte (LOPES *et al.*, 2017). Frente a estas características, a agressividade da superfície de corte do rebolo está diretamente ligada a friabilidade ou o quão quebradiço é o grão abrasivo, sendo assim, quanto mais friável os grãos forem, menor será a resistência a fratura, conseqüentemente aumentará a quantidade de arestas cortantes influenciando diretamente na agressividade do rebolo.

O outro efeito apresentado por (MARINESCU *et al.*, 2006) é o macro efeito ou também conhecido como ondulação teórica, que é o efeito de rosca que é impresso na superfície de corte do rebolo decorrente do deslocamento do dressador de forma transversal em relação ao sentido de rotação do rebolo conforme Figura 6:

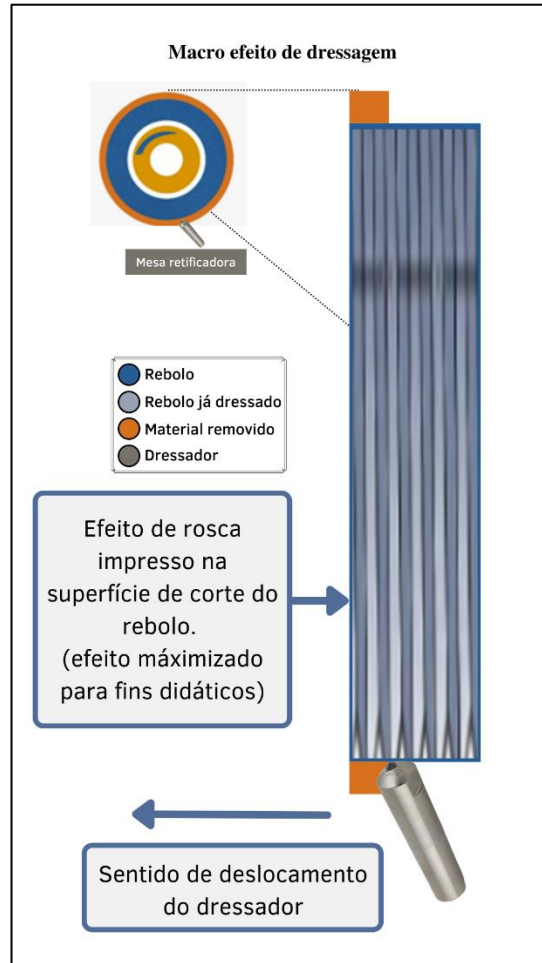


Figura 6 Representação do macro efeito de dressagem, adaptado de (LOFRANO DOTTO *et al.*, 2020).

Esse formato de rosca que é impresso na superfície de corte do rebolo está diretamente ligado ao formato do dressador e com a profundidade de penetração da ponta do dressador na superfície de corte (MARTINS *et al.*, 2013; MOIA *et al.*, 2015). São por meio destas variáveis que é definida o grau de recobrimento de dressagem que segundo (LOPES *et al.*, 2017) é o parâmetro mais importante da operação de dressagem, pois é por meio do grau de recobrimento que é possível controlar a agressividade do rebolo, que está diretamente ligado a quantidade de remoção de material da peça ao ser submetida ao processo de retificação.

2.2.2 GRAU DE RECOBRIMENTO DE DRESSAGEM (U_d)

De acordo com (MARINESCU *et al.*, 2006), o parâmetro U_d foi apresentado por König em 1980 com o intuito de relacionar as variáveis que abrangem a dressagem com a topografia do rebolo impressa pela operação. Por definição, o grau de recobrimento representa a quantidade de vezes que um ponto da superfície de corte do rebolo é recoberto pela largura (b_d [mm]) que abrange a ponta do dressador durante a operação de dressagem, pelo passo de dressagem (S_d [mm]). Com isso, o parâmetro de grau de recobrimento é representado pela equação (2).

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

Onde U_d representa grau de recobrimento de dressagem, que relaciona a largura de atuação do dressador (b_d) e o seu deslocamento (S_d), sendo importante observar que a largura de atuação do dressador é alterada à medida que o dressador é desgastado, sendo necessário ajustar o avanço do dressador para poder obter o (U_d) desejado.

Se o resultado desta expressão apresentar um número próximo a 1, indica que a agressividade do rebolo está alta, facilitando a retirada de material da peça, pelo contrário, quanto mais distante de 1, sua superfície indica menos agressividade, favorecendo assim um trabalho de acabamento de peça, conforme o apresentado na Figura 7.

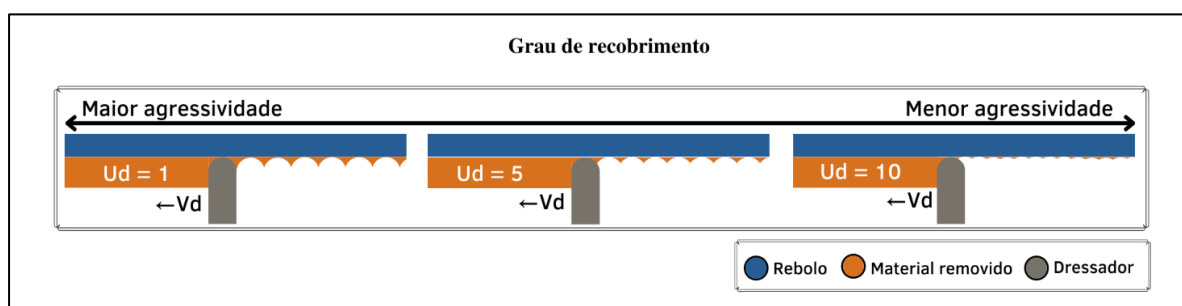


Figura 7 grau de recobrimento, adaptado por (MOIA *et al.*, 2015)

Baseados no grau de recobrimento pode-se definir qual a melhor situação do rebolo para o trabalho que ele será empregado, aumentando a sua agressividade para maior remoção de material ou diminuindo sua agressividade para trabalho mais finos como o de acabamento de peça (MOIA *et al.*, 2015).

2.2.3 AGRESSIVIDADE DA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO (K)

Intrínseco ao processo de retificação, a agressividade da superfície de corte do rebolo figura entre os principais parâmetros a serem monitorados, influenciando diretamente na qualidade da peça usinada, pois é dela que resulta a remoção de material. Essa remoção de material é decorrente da junção de três características como a granulometria do rebolo, tipo de aglomerante e pela porosidade do rebolo, outros aspectos também são encontrados, mas de maneira menos impactante. Além de interferir na remoção do material, a agressividade do rebolo interfere de forma significativa também na superfície da peça. Outro parâmetro a ser observado é o grau de recobrimento (U_d), que representa a agressividade da superfície de corte do rebolo, sendo que, com um grau de recobrimento baixo entende-se que há poucas bordas ativas, conseqüentemente a pressão gerada devido o contato entre a peça e o rebolo será baixa, resultando assim um maior poder de remoção de material (DE OLIVEIRA *et al.*, 1992).

Ainda seguindo o exposto por (DE OLIVEIRA *et al.*, 1992), observa-se que o contrário também é verdadeiro, sendo que, quando obtemos valores maiores do grau de recobrimento, há um número maior de arestas de corte expostas, arestas estas que compartilham os esforços solicitados no processo de retificação e assim, resulta num poder de remoção de material menor

no processo de retificação.

Com intuito de quantificar a agressividade imposta pelo rebolo no processo de retificação, é apresentado por (NAKAYAMA *et al.*, 1980) o método do disco retificado, proposta essa que foi abordada e aperfeiçoada por (COELHO, 1991) e mais tarde utilizadas em (BIANCHI *et al.*, 2011; MOIA *et al.*, 2015). Este método é composto por um dispositivo em situação de alavanca, similar a uma balança de peso, conforme Figura 8.

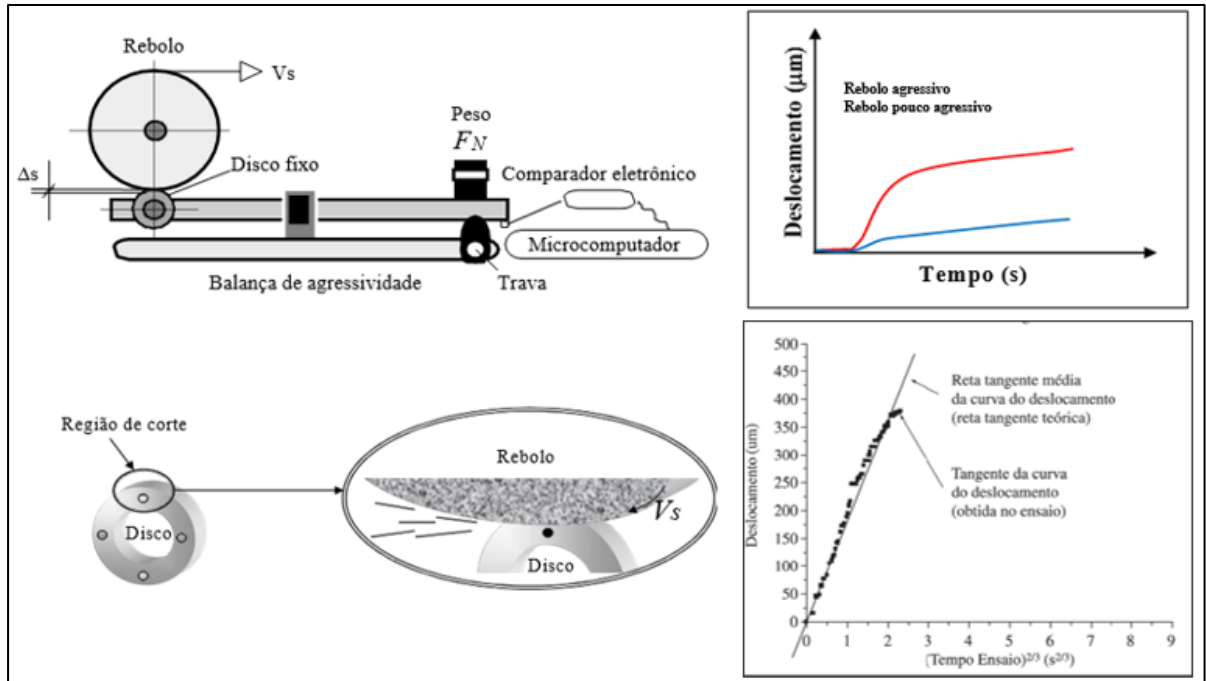


Figura 8 Mecanismo cinemático da medição da agressividade do rebolo (BIANCHI *et al.*, 2011)

Em um dos lados, o eixo que faz a base do mecanismo, encontra-se acoplado de forma perpendicular ao rebolo, o rebolo é responsável por fazer o contato com a superfície de corte do rebolo sob uma força normal no sentido do rebolo. Essa força normal é originada por um peso acoplado na outra extremidade do eixo, aplicando assim, por meio da gravidade, uma força constante F_N . Junto a essa extremidade é acoplado também um comparador eletrônico, que mede a variação do deslocamento deste eixo e converte essa variação em um sinal eletrônico analógico, esta variação é enviada a um microcomputador, sendo possível avaliar o deslocamento, conforme o gráfico contido na Figura 8. Com essas informações é possível inferir que, quanto maior o deslocamento apresentado, maior será a agressividade do rebolo. A agressividade (K) do rebolo é determinada pela equação (3):

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

Sendo K a agressividade do rebolo [$\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{s}$], b representando a largura do disco [mm] F_N a força normal aplicada [N], r o raio do disco [mm] e a é o coeficiente angular médio obtido pelo deslocamento em função do tempo, conforme apresentado por (COELHO, 1991),

utilizando regressão linear. Ainda em (COELHO, 1991), o autor relaciona o deslocamento do disco (δ) em função do tempo (t) conforme equação (4):

$$\delta(t) = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{K \cdot F_N}{b\sqrt{8r}} \cdot t \right) + \left(\frac{2 \cdot \sqrt{(\delta_0)^3} \cdot b\sqrt{8r}}{KF_N} \right) \quad (4)$$

sendo b a largura do disco e r o seu raio, já F_N representa a força normal aplicada na extremidade do eixo e a o coeficiente angular da reta de regressão, obtido a partir da curva característica de deslocamento versus $(t)^{2/3}$ ou curva característica de agressividade do rebolo, onde t é o tempo de experimento ou tempo de contato.

O método de disco retificado apresentou resultados expressivos para definição da afiação do rebolo, tanto no trabalho de (BIANCHI *et al.*, 2011) que utilizou a aquisição dos sinais de emissão acústica (EA) na operação de dressagem medindo a agressividade do rebolo e posteriormente aplicando o processamento dos sinais, correlacionando os sinais aquisitados com a afiação do rebolo, tanto no trabalho apresentado por (MOIA *et al.*, 2015) que utilizou os sinais de EA para monitorar a operação de dressagem, comparando-o com os resultados obtidos pelo processo de disco retificado.

2.3 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Conforme já abordado em (MCMILLAN; RODRIK; KENNEDY, 2011), a quantidade de tecnologia voltada para produtividade aplicada no setor de manufatura é fator decisivo para a capacidade de produção, determinando assim a força que a indústria tem para enfrentar a concorrência do mercado. Neste sentido, utilizar ferramentas e sensores para monitoramento do ritmo de produção, qualidade e segurança de uma indústria, produz impacto direto nos seus resultados. Com isso, a necessidade de automatização de processos, como o de usinagem, desempenham um papel muito importante no desenvolvimento da tecnologia de monitoramento de processos (ALEXANDRE, 2018).

A função de um sistema de monitoramento é adquirir, processar e interpretar sinal de uma dada operação por meio de sensores para definir qual o estado do processo. Nele é possível obter informação em uma grandeza como temperatura, vibração ou deslocamento, e transformá-la num sinal elétrico, possibilitando assim a avaliação deste sinal em sistemas computadorizados. Observando a operação de dressagem, as principais variáveis envolvidas serão velocidade de deslocamento da mesa, velocidade de corte do rebolo e a profundidade de corte (LOPES, 2018).

Neste subtópico serão exibidos trabalhos que abordaram temas específicos que contêm relação ao presente estudo. Trabalhos como o de (DE OLIVEIRA; DORNFELD, 1994), um dos primeiros a abordar o assunto, utiliza a ferramenta de dressagem como apalpador,

conseguindo assim avaliar o nível de emissão acústica gerado no processo inferindo assim as características geométricas do rebolo, o estudo conclui que os níveis dos sinais de EA aumentam de forma considerável quando a uma condição desgastada do rebolo ou uma retificação não usual.

2.3.1 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO APLICADAS AO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

O processo de retificação é encontrado na parte final da cadeia de usinagem, depositando assim um alto valor agregado na peça usinada, porém outro ponto a se destacar é o custo do rebolo e do dressador, que são relativamente caros dependendo de sua composição ou de difícil reposição no mercado, dependendo de suas especificações. Com isso, falhas no rebolo ou no dressador devem ser minimizadas ao máximo tanto para evitar danos a peça usinada como também nos altos custos de reposição das ferramentas (LOPES *et al.*, 2017; VENKATA RAO; MURTHY; MOHAN RAO, 2014). Por consequência, os métodos que possam monitorar estes processos de forma indireta têm destaque na indústria de manufatura pois ajudam a controlar e otimizar a operação.

Diversos estudos abordam formas indiretas de monitoramento, (YANG; YU, 2013) apresenta estudos específicos para o processo de retificação, nele, a utilização de EA é considerado o método mais eficaz para o monitoramento do processo de retificação. A grande vantagem de ser definido a utilização de EA como parâmetro para monitorar tanto o processo de retificação quanto a operação de dressagem é que a EA utiliza de sinais com faixas de frequências mais altas, acima de 20 kHz, essas faixas são muito superiores as frequências utilizadas para sensores de vibração, ruídos de máquinas ou do ambiente fabril e, portanto, não sofre a interferência no momento da coleta de informações do processo (LEE *et al.*, 2006).

No momento do processo de retificação ou também na operação de dressagem, é gerada uma grande quantidade de energia em alta frequência, essa energia é captada pelos sensores e são transformadas em fonte de entrada nos sistemas de monitoramento utilizando EA, com a evolução do poder computacional dos computadores foi possibilitada a utilização deles no monitoramento dos processos de manufatura (MALKIN; GUO, 2008). Outro dado que se destaca com positivo para a utilização da EA para o monitoramento é que as faixas de frequência propagadas pela EA estão muito acima dos ruídos encontrados normalmente nos meios fabris, segundo (ZHANG *et al.*, 2014) estes sinais não exercem influência nos sistemas de monitoramento, facilitando assim a aquisição dos dados quando usado EA.

A técnica de utilização de comparação da acústica produzida por um processo de usinagem não é relativamente nova, há muito tempo, operadores baseando-se em sua experiência já avaliavam o som emitido pelo processo para definir se a ferramenta estava boa ou não. Esse

som é originado pela deformação plástica ocorrida na peça e na ferramenta durante o processo de usinagem, deformação essa que produz uma energia significativa em forma de onda no espectro. Conforme abordado por (LEE *et al.*, 2006), é considerado emissão acústica propagação de ondas elásticas geradas por um material na faixa de frequência ultrassônica que compreende de 20 kHz até 2 MHz.

Ainda seguindo o dito por (LEE *et al.*, 2006), monitorar um processo que tenha uma fonte de EA embutida no processo é muito mais vantajoso pois vira um meio passivo de avaliação, muito similar como se colocar um microfone para “escutar” os ruídos gerados. Diferentemente da técnica ultrassônica não destrutiva, que no seu processo há a necessidade da aplicação de uma fonte geradora de sinal que deverá transmitir a onda pela peça analisada e coletar o sinal os comparando posteriormente.

2.3.2 FERRAMENTAS DE ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Ao se captar os sinais de Emissão Acústica (EA) gerados por um processo, é comum se deparar com ruídos e variações severas de comportamento, ao deparar com um sinal desta complexidade é necessário descobrir quais as frequências que compõe o sinal, passando o gráfico do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta análise espectral do sinal nos permite extrair informações valiosas que não conseguiríamos obter no domínio do tempo. Uma das ferramentas matemáticas utilizadas para esta conversão de domínio é a FFT que é a implementação da Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) que costumeiramente se utiliza para o estudo do conteúdo espectral do sinal. A vantagem de utilização da FFT é que ela não necessita de um alto poder computacional para processá-la, facilitando o estudo e finalizando de forma mais rápida (LOPES, 2018).

A FFT vem sendo muito utilizada em trabalhos que visam investigar o processo de retificação, contudo, o presente estudo empregou a utilização da PSD, conforme empregado em (BARBÉ; PINTELON; SCHOUKENS, 2010), que apresentou a PSD como uma função matemática que tem por objetivo representar a distribuição de energia no domínio da frequência, para sinais que sejam aleatórios ou periódicos. É comum observar a aplicação desta ferramenta em softwares de reconhecimento de fala, sonares e avaliação de radiação eletromagnética.

Em 1967, Welch propôs em seu trabalho um método para a aplicação do algoritmo de transformação rápida de Fourier para aplicar a estimativa do espectro de energia que envolve a secção de dados registrados, a possibilidade de tomar periodogramas modificados dessas seções e a média desses periodogramas modificados, implicando assim um menor consumo computacional. Outro ponto positivo é a diminuição do tamanho do sinal, que se torna uma vantagem quando temos um espaço para armazenamento limitado (WELCH, 1976).

Posteriormente, o uso da técnica desenvolvida por Welch foi aplicada ao banco de funções e algoritmos apresentados pelo *software* Matlab®.

Inerente a complexidade da operação de dressagem, diversas frequências são geradas no contato entre dressador e rebolo, todas com diferentes amplitudes, as quais podem ser melhor observadas utilizando a FFT/PSD e assim passá-las por filtros analógicos ou digitais. Com o sinal já filtrado, fica mais viável a aplicação de diversas estatísticas a fim de obter análises do sinal, correlacionando assim com a operação de dressagem.

2.3.3 A TECNOLOGIA DE EMISSÃO ACÚSTICA

A utilização da tecnologia baseada em Emissão Acústica vem obtendo um espaço cada vez maior em diversos seguimentos, tanto na academia quanto na indústria. Embora outros recursos como a inspeção visual e outras técnicas como as baseadas em vibração estejam já disponíveis para o mercado para avaliação de estruturas como pontes, a utilização da EA é uma opção que apresenta muitos benefícios e está cada vez mais sendo utilizada. A EA são ondas formadas por um estresse de alta frequência geradas por energias que são liberadas de forma rápida de fontes localizadas dentro de um material, como, por exemplo, materiais que apresentem um início ou crescimento de uma fissura (KAPHLE, 2012).

A vantagem da utilização da técnica de EA é que ela é baseada no registro das ondas de alta frequência geradas pela própria estrutura, aquisitando elas por meio de sensores fixados na superfície da peça analisada, para que em seguida sejam analisados os sinais para extrair informações da situação da peça. Desta forma, não há a necessidade de um elemento externo fornecendo energia, pois é possível analisar os sinais aquisitados pelos sinais gerados pela própria fonte, sendo assim possível uma análise em tempo real para detecção de anomalias ou falhas na estrutura (WEGENER *et al.*, 2011).

Apesar das vantagens por hora apresentadas, a EA ainda possui desafios a serem vencidos para a aplicação de monitoramento, principalmente nas áreas de análise de dados de EA, pois esta técnica apresenta um volume muito grande de dados ao se monitorar um processo. (KAPHLE, 2012) define que uma análise de dados eficaz pode estar ligada a três fatores:

1. A localização com precisão da fonte de dano;
2. A identificação e discriminação de sinais de outras fontes de emissão acústica;
3. A quantificação do nível de dano da fonte de EA para avaliação da condição mecânica da estrutura.

Conforme já apresentado por (SCRUBY, 1987) e (LOFRANO DOTTO *et al.*, 2020), pode-se identificar quatro áreas para a utilização da técnica de utilização de EA, sendo estas:

1. Monitoramento de estruturas, avaliando o crescimento de defeitos, avanço de

- rachaduras, deformações ou degradações;
2. Monitoramento e controle de processos, avaliando movimentações, alterações de equilíbrio, alterações de formas e linhas de movimento;
 3. Caracterização dos tipos de materiais;
 4. Vazamento e fluxo, avaliando fluxo de fluidos e partículas que passem em determinados dutos, podendo inferir vazamentos, evolução de gás ou ebulição do fluido.

A aplicação desta técnica tem evoluído também nos monitoramentos de processos de retificação. Para estes processos, a aplicação da técnica visa a avaliação e identificação de danos estruturais como queima e alteração na rugosidade superficial na peça. Essa evolução também ocorre nos processos de monitoramento da operação de dressagem, que tem por finalidade avaliar e identificar as condições de afiação e topografia de corte do rebolo durante a operação de dressagem. Uma das grandes vantagens da utilização da EA nos processos de retificação e na operação de dressagem é a sua alta sensibilidade, que é capaz de detectar falhas, como trincas e fendas, de forma muito antecipada, melhorando assim a manutenção do material (LOPES, 2018).

2.3.4 SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA

Conforme abordado no item 2.3.3, a utilização da emissão acústica vem ganhando espaço no mercado da manufatura, mas para utilizarmos esse tipo de técnica é necessário a utilização de sensores que são responsáveis por adquirir a variação das frequências de emissão acústica e transformá-los em uma grandeza que tenhamos domínio para poder trabalhar estes dados. Essa é a função do sensor de emissão acústica, adquirir o sinal de EA emitido pelo elemento que está sendo analisado e transformá-lo em energia elétrica, para que assim consigamos transformá-los em dados e analisá-los (KAPHLE, 2012).

Os sensores mais utilizados para a captação dos sinais de EA são os do tipo piezelétrico, que consegue transformar uma variação mecânica em energia elétrica. É comum encontrar estes sensores para medições de emissão acústica, força e aceleração. O grande ponto positivo é que os sensores de EA possuem alta sensibilidade, são de fácil implementação e há uma série de modelos disponíveis no mercado. Sua estrutura é simples, ele é composto por uma pastilha de cerâmica piezelétrica que é alocada numa capsula metálica, dentro desta capsula há também um material amortecedor e por fim o elemento piezelétrico é ligado a um eletrodo, conforme estrutura apresentada na Figura 9.

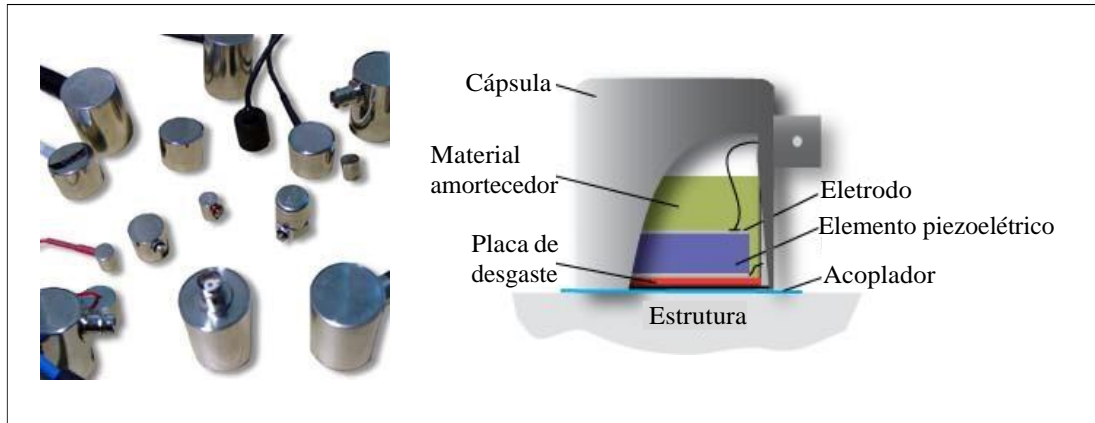


Figura 9 Componentes do sensor de emissão acústica, adaptado de (MARTINS *et al.*, 2014)

Estudos já foram aplicados na intenção de usar a emissão acústica para o monitoramento do processo de retificação quanto a operação de dressagem, em (XUE; NAGHDY; COOK, 2002), os autores apresentam como conclusão do estudo que, após um número expressivo de testes com o intuito de monitorar de forma *on-line* a operação de dressagem, a utilização da emissão acústica se mostrou capaz de detectar, de forma eficaz, condições indesejadas no rebolo como formato fora do especificado, erros de contorno no rebolo ou se o mesmo se encontrava concêntrico. A detecção destas falhas, por sua vez, resulta em um melhor acabamento superficial da peça que será usinada.

Mais estudos colocaram a utilização de EA como base de seus resultados, pode-se citar (INASAKI; OKAMURA, 1985) que apresenta o monitoramento do desgaste da ponta do dressador na operação de dressagem, já em (KARPUSCHEWSKI; WEHMEIER; INASAKI, 2000) os autores apresentam como objetivo o monitoramento da operação de dressagem utilizando o sensor EA, identificando a influência de diversos parâmetros aquisitados na operação correlacionando com os dados obtidos, que por final ainda apresenta uma proposta de monitoramento de dressagem.

Outros estudos que usam como base a EA são os mostrados em (KWAK; HA, 2004; LEE *et al.*, 2006), neles os autores identificam falhas na operação de dressagem baseados nos dados adquiridos pelo sensor, em sequência pode-se apresentar (MARTINS, 2013) que classificou as condições de desgaste do dressador usando redes neurais artificiais. Em (MIRANDA *et al.*, 2015) a aplicação foi processada utilizando modelos *Fuzzy* para predição do desgaste do dressador, e no mesmo ano (MOIA *et al.*, 2015) aplicou estatísticas nos sinais de EA original para definir o momento ótimo para parar a operação de dressagem, e por fim pode-se recitar o trabalho de (LOPES *et al.*, 2017) que estudou o conteúdo harmônico contido nos sinais de EA para definir um critério de parada da operação de dressagem, entre outros estudos que também apresentam a utilização de sensores de emissão acústica.

2.3.5 TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO

Com a necessidade de sempre procurar novas soluções que atinjam o objetivo de maneira mais barata, a indústria de manufatura vem procurando também um substituto para o sensor de EA devido ao seu alto custo no mercado, com isso vem aumentando de forma significativa a utilização dos transdutores de diafragma piezelétricos de baixo custo, conhecidos também como PZT, em substituição ao sensor de EA para muitos setores de engenharia, tudo por conta de boa propriedade de acoplamento eletromecânico, seu baixo custo de implementação e por obter resposta de frequência de banda larga (JUNIOR *et al.*, 2018).

Transdutores de diafragma piezelétrico PZT tem por característica uma estrutura simples, quando comparado a um sensor de EA, ele é composto por uma camada de cerâmica piezelétrica circular, que é o seu elemento ativo, e montada em um diafragma feito de uma camada metálica de forma circular. Essa camada é revestida por uma fina película metálica operando como um eletrodo. O material mais comum que faz o papel piezelétrico é o titânio de bário, já o material do diafragma geralmente é composto por latão, liga de níquel ou aço inoxidável (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016).

Em concordância com (AMERICAN; STANDARD, 1984) o efeito piezelétrico é apresentado quando um material é submetido a um estresse mecânico, produzindo assim uma saída de tensão através da formação de um dipolo elétrico que se encontra no próprio material, por outro lado, quando é aplicada uma diferença de potencial elétrica nas superfícies opostas do material piezelétrico ocorre, de maneira análoga e inversa, a deformação mecânica do material, ocorrendo assim uma interação entre as propriedades mecânicas e elétricas. Sendo assim, os efeitos piezelétricos direto (sensor) e o efeito piezelétrico reverso (atuador) obedecem às equações (4) e (5) respectivamente:

$$D_i = d_{ikl} \cdot T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T \cdot E_k \quad (4)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E \cdot T_{kl} + d_{kij} \cdot E_k \quad (5)$$

onde, d_{ikl} e d_{kij} são constantes piezelétricas respectivamente; E_k é o campo elétrico, D_i é o deslocamento elétrico, S_{ij} é o componente de deformação, ε_T é o componente de permissão em constante estresse, s_E é a constante de conformidade elástica no campo elétrico constante; T_{KL} é o componente vetorial de tração, e o subscritos $i, j, k, e l$ indicar o sistema de coordenadas natural do cristal piezelétrico com valores de 1, 2 e 3 (DE FREITAS *et al.*, 2017).

2.3.6 PARÂMETROS E VANTAGENS DA EMISSÃO ACÚSTICA

De acordo com o apresentado por (KAPHLE, 2012), a utilização da EA como meio de monitoramento de um processo apresenta diversas vantagens, pode-se destacar alguns deles como principais como:

- A utilização da EA se dá por um meio passivo não sendo necessário uma fonte externa de fornecimento de energia pois ela se utiliza da própria energia liberada pelo processo;
- Método não invasivo, pois a aquisição do sinal pode ser obtida pelo simples acoplamento do sensor na superfície do sistema monitorado sem ter a necessidade de alterar as propriedades físicas;
- Método não destrutivo, pois ele consegue adquirir o sinal de forma que não danifique o sistema monitorado;
- Identificação de defeitos em áreas de difícil acesso no sistema monitorado, pois trincas, rachaduras ou variações mecânicas nos materiais geram ondas de EA que podem viajar pelo corpo do sistema até a captação do sensor;
- A utilização da técnica de EA permite adquirir os sinais gerados pelo sistema e analisá-los em tempo real.

A aquisição do sinal de EA ocorre pela liberação de energia elástica gerada por uma alteração irreversível de uma estrutura, essa alteração física provoca a liberação de energia em forma de um pulso de stress, pulso este que se propaga pelo corpo da estrutura através de ondas elásticas transitórias. Em (MÁTHIS; CHMELÍK, 2012), os autores apresentam os parâmetros para análise de um sinal de emissão acústica, estes parâmetros auxiliam a identificar a causa da fonte geradora do sinal como o tempo de subida, a amplitude do pico, a duração e o número de “Counts”, conforme Figura 10.

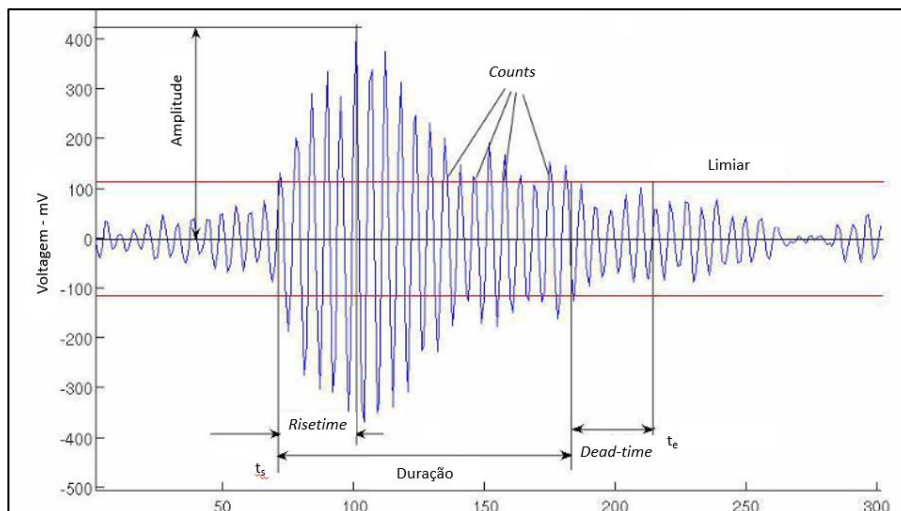


Figura 10 Definição de parâmetros de sinal descontínuos (MÁTHIS; CHMELÍK, 2012)

Ainda conforme apresentado pelos autores, os parâmetros analisados em um sinal de EA são:

- Amplitude – que é a maior amplitude apresentada pelo sinal durante seu evento. Este parâmetro é utilizado na inspeção de EA auxiliando na determinação e detecção do sinal. Geralmente, sinais com amplitudes que não ultrapassem um limite mínimo não são gravados;
- Tempo de subida – que é o tempo decorrido entre o início do evento sendo caracterizado o primeiro cruzamento do limiar e a aquisição da amplitude máxima do sinal, este parâmetro é relacionado entre a propagação da onda entre a fonte de EA, neste caso podendo ser também o evento de alteração de estado físico, até a chegada no sensor, este parâmetro é usado também para qualificar os sinais ou definir como critério para filtro de ruído.
- Duração – representa o tempo que ocorre da primeira passagem do limiar até a última passada, sendo usada para identificar diferentes tipos de fontes ou como parâmetro de filtro do ruído.
- Energia do evento – é a área sob a forma de onda do sinal;
- *Counts* – representa a quantidade de vezes que o sinal adquirido ultrapassou o limiar definido por unidade de tempo. Esta variável está diretamente ligada a magnitude do evento e das características dos materiais que compõem o sistema.

2.4 MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM

A necessidade da indústria de elevar a sua competitividade frente ao mercado agressivo, como o da manufatura, abre oportunidades de estudos para os mais variados tipos de aplicação de tecnologias que visam melhorar os processos. Neste viés, os processos de melhoria e preparação das ferramentas têm ganhado espaço, sendo objeto de diversos trabalhos produzidos pela academia (MANCIO; SELLITTO, 2017).

O desenvolvimento de estudos para analisar as condições de corte do rebolo durante a operação de dressagem é de grande valia, pois com ele é possível avaliar em tempo real a qualidade da condição da superfície de corte do rebolo, inferindo assim um ponto ótimo para a parada da operação, isso aumentaria a vida útil do rebolo bem como a economia com os custos de produção. Aqui são apresentados estudos que se debruçaram especificamente sobre o monitoramento da operação de dressagem (JUNIOR *et al.*, 2018).

A utilização da EA para o monitoramento de vários aspectos da operação de dressagem vem sendo largamente utilizado, em (MARTINS, 2013), o autor apresenta uma classificação de níveis de desgastes apresentados pro dressadores de ponta única, correlacionando os dados captados por um sensor de EA e sendo aplicadas as estatísticas valor médio quadrático (RMS)

e a relação de potência (*Ratio of Power*) que serviram de entradas para duas redes neurais distintas, sendo uma do tipo *perceptron* multicamadas (MLP) e a outra do tipo *Kohonen*, os resultados mostraram desempenhos satisfatórios para ambas redes neurais empregadas.

Já o estudo apresentado por (YANG; YU, 2013) aponta um resultado satisfatório para a utilização da EA para identificar alterações no rebolo no monitoramento do processo de retificação, neste estudo os autores estabelecem um processo de detecção de queima por meio da decomposição das ondas de EA, estabelecendo um sistema de classificação e previsão dos eventos para identificar a queima de forma automática. Outros estudos também usaram a EA com intuito de monitorar tanto o processo de retificação ou a operação de dressagem (MARTINS *et al.*, 2014; MOIA *et al.*, 2015; NAKAI *et al.*, 2015).

Em (RASCALHA; BRANDÃO; FILHO, 2013), os autores apresentam um estudo focado na operação de dressagem na retificação cilíndrica (*centerless*) no qual se utiliza o método *Tamaguchi* e células de carga. No documento foram demonstrados como resultado uma redução no tempo da operação de dressagem acarretando conseqüentemente um aumento na produtividade do processo em questão. A utilização tanto do método *Tamaguchi*, bem como aos das células de carga permitiram uma melhor compreensão da dinâmica da operação de dressagem, resultando num diagnóstico eficaz da operação e ainda auxiliar na identificação de problemas nos dispositivos de retificação. Neste estudo os autores usaram como parâmetros velocidade de corte, profundidade de dressagem, taxa de alimentação do dressador e diâmetro externo do rebolo.

(MIRANDA *et al.*, 2015) em seu trabalho apresenta a previsão do nível de desgaste do dressador de ponta única baseando-se nos sinais de emissão acústica e vibração usando-os como variáveis de entradas de uma modelagem Fuzzy. Para isso, sensores de emissão acústica e vibração foram anexados no suporte da ferramenta captando os sinais a 2 MHz. Com esses dados foram aplicados filtros de passe de banda digital aos sinais brutos, sendo que duas estatísticas foram calculadas para servir como entradas para os modelos *Fuzzy*. Os resultados indicam que os modelos *Fuzzy* quando utilizados estas estatísticas são eficazes para prever o nível de desgaste do dressador.

A utilização da emissão acústica para monitorar o processo de dressagem também foi utilizado no trabalho de (MOIA *et al.*, 2015), que se utilizou destes sinais para classificar a condição da ferramenta por meio de redes neurais artificiais (RNA). Nos testes as variáveis de grau de recobrimento de dressagem e profundidade de dressagem foram manipuladas e testadas. Após isso, diversos métodos estatísticos, como o valor médio quadrático (RMS), foram aplicados ao sinal original, sendo o seu resultado aplicado como entrada em uma rede neural *perceptron* multicamadas. Os resultados apresentados foram satisfatórios pois com eles foi

possível identificar a capacidade de corte do rebolo.

O presente trabalho possui relação com o estudo apresentado por (MOIA *et al.*, 2015), diferenciando-se pelo fato que neste estudo além de ser utilizado o sinal captado pelo sensor de emissão acústica, foi utilizado conjuntamente um diafragma piezelétrico de baixo custo, além de ser feito uma análise do conteúdo espectral dos sinais de EA por meio da PSD associada ao índice de dano RMSD, que ainda não foi utilizada para este fim.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por finalidade elencar os equipamentos e os principais materiais utilizados no estudo, além de abordar os procedimentos e etapas realizadas nos ensaios a fim de se obter as medições das variáveis de agressividade e dressagem do rebolo. Serão abordados também os processos utilizados para o processamento dos sinais de EA coletados nos ensaios, bem como os métodos para chegar ao resultado.

Todos os ensaios aqui referidos foram realizados em ambiente controlado nas dependências do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) e seus respectivos processamentos e análise dos sinais foram realizados no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento Digital de Sinais (LADAPS), ambos os laboratórios pertencentes a Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).

3.1. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS

Para a geração de dados foi desenvolvido um banco de ensaios com intuito de permitir a amostragem das variáveis de saída e assim permitir a análise das condições da superfície de corte do rebolo durante o processo de dressagem, utilizando o conteúdo espectral dos sinais de EA brutos (*raw*) adquirido no processo.

Para facilitar da compreensão do presente trabalho ele foi dividido em quatro etapas principais, seguindo a sequência que pode ser visualizada no fluxograma mostrado na Figura 11.

- A primeira etapa foi constituída por vários testes preliminares para determinar os melhores parâmetros a serem utilizados tanto nos ensaios de retificação com parâmetros severos de corte, usados para inserção de falhas no rebolo, tanto para os ensaios definitivos de dressagem. No presente estudo serão denominados ensaios de retificação com parâmetros severos de corte os passes de retificação realizados de forma forçada, com intuito de queima da peça usinada e inserção de falhas na superfície de corte do rebolo.
- Na segunda etapa, foram realizados os ensaios de retificação com parâmetros severos de corte, o qual foi utilizando o rebolo de óxido de alumínio que será utilizado nos ensaios definitivos, inserindo nele falhas em sua estrutura afim de caracterizar um rebolo pouco dressado. Nesta ação foi empregado uma profundidade de dressagem constante e logo após foi feito a aferição de agressividade.

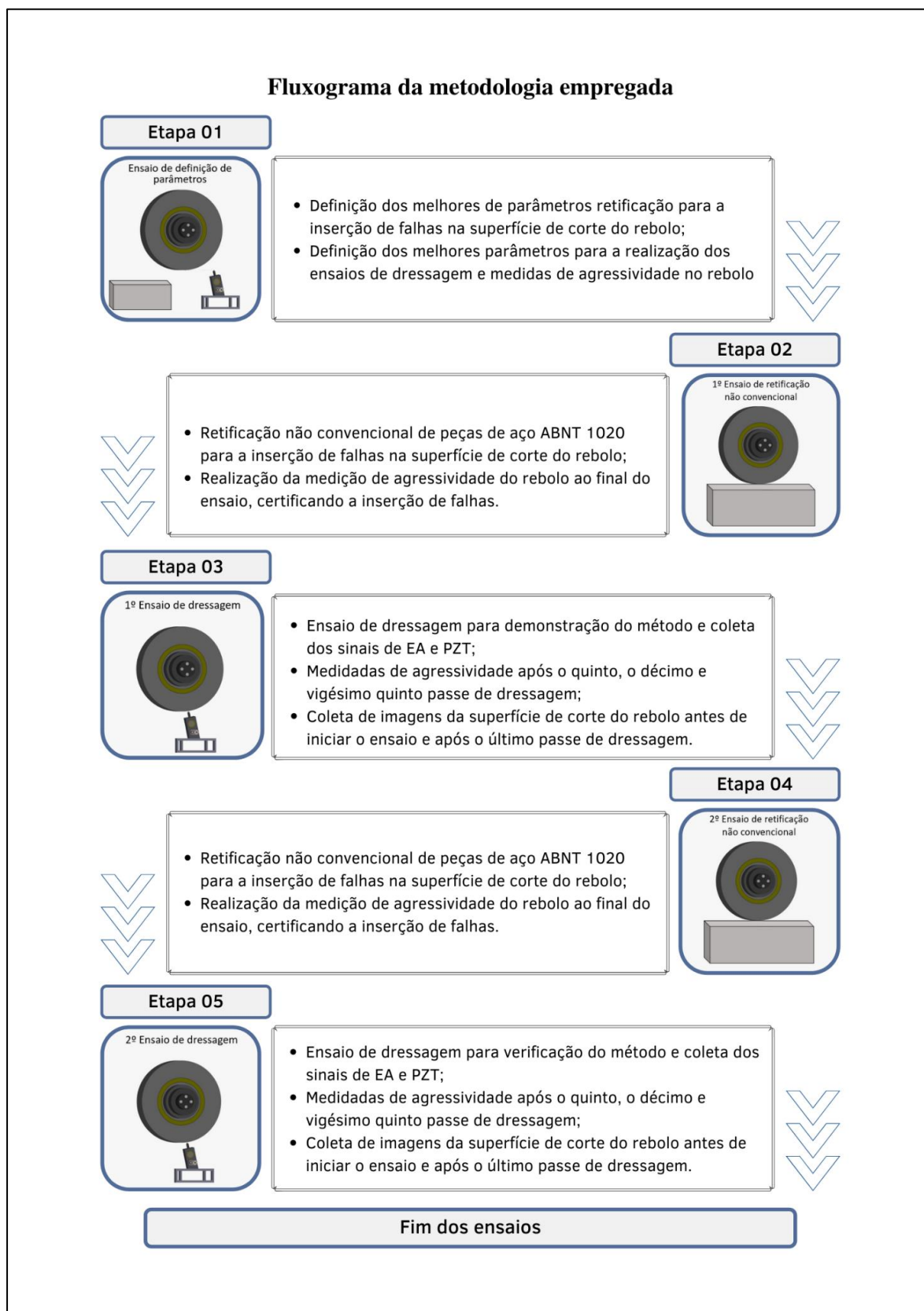


Figura 11 Fluxograma que descreve a síntese da metodologia empregada nos ensaios e dos resultados obtidos nesta pesquisa

- Na terceira etapa foi dado o início nas atividades de dressagem do ensaio de demonstração do método, utilizando os parâmetros de dressagem preconizados na primeira etapa. Ainda nesta etapa, foram adquiridos os sinais gerados durante a

operação de dressagem pelo sensor de EA e o diafragma PZT, logo após foram processados digitalmente e analisados, para assim extrair informações referente às falhas ocasionadas na superfície de corte do rebolo. Ainda nesta etapa foram feitas aferições de agressividade.

- A quarta etapa foi a repetição dos ensaios de retificação com parâmetros severos de corte, usando os mesmos parâmetros para inserção de falhas e ao final foi feito novamente a aferição de agressividade;
- A quinta e última etapa contemplou a realização do ensaio de verificação do método, realizando uma segunda bateria de passes de dressagem com o mesmo rebolo, só que desta vez usando parâmetros diferentes. Durante os passes foram feitas a aferição de agressividade.

Para cada sinal adquirido foi aplicado também uma metodologia sistematicamente para tratamento dos sinais, essa metodologia é representada na Figura 12.

- A primeira etapa constitui na aquisição do sinal bruto (*raw*), sinal este que contém todos os tipos de ruídos inerentes ao processo de dressagem como também ruídos provenientes do ambiente. Foram obtidos os sinais de cada passada dos testes definitivos e para cada passada, os sinais foram aquisitados tanto pelo sensor de EA, quanto para o diafragma PZT.
- Na segunda etapa, no intuito de remoção dos ruídos e delimitação do sinal para somente o momento efetivamente da passada, foi definido como ponto inicial a maior amplitude da borda de subida do sinal. Já para o ponto final, a definição foi feita com o acréscimo de 6 milhões de pontos. Este processo foi definido para todos os sinais cortados terem o mesmo tamanho.
- A terceira etapa constituiu em normalizar o sinal em sua amplitude, dividindo todos os pontos do sinal pelo valor da amplitude máxima do sinal.
- Após a normalização a quarta etapa foi a aplicação da PSD, transpondo o sinal no domínio do tempo, para o domínio da frequência.
- A quinta e última etapa é a submissão dos sinais adquiridos de cada passada, dentro de uma determinada janela de frequência pelo índice RMSD, utilizando a última passada como a *baseline*.

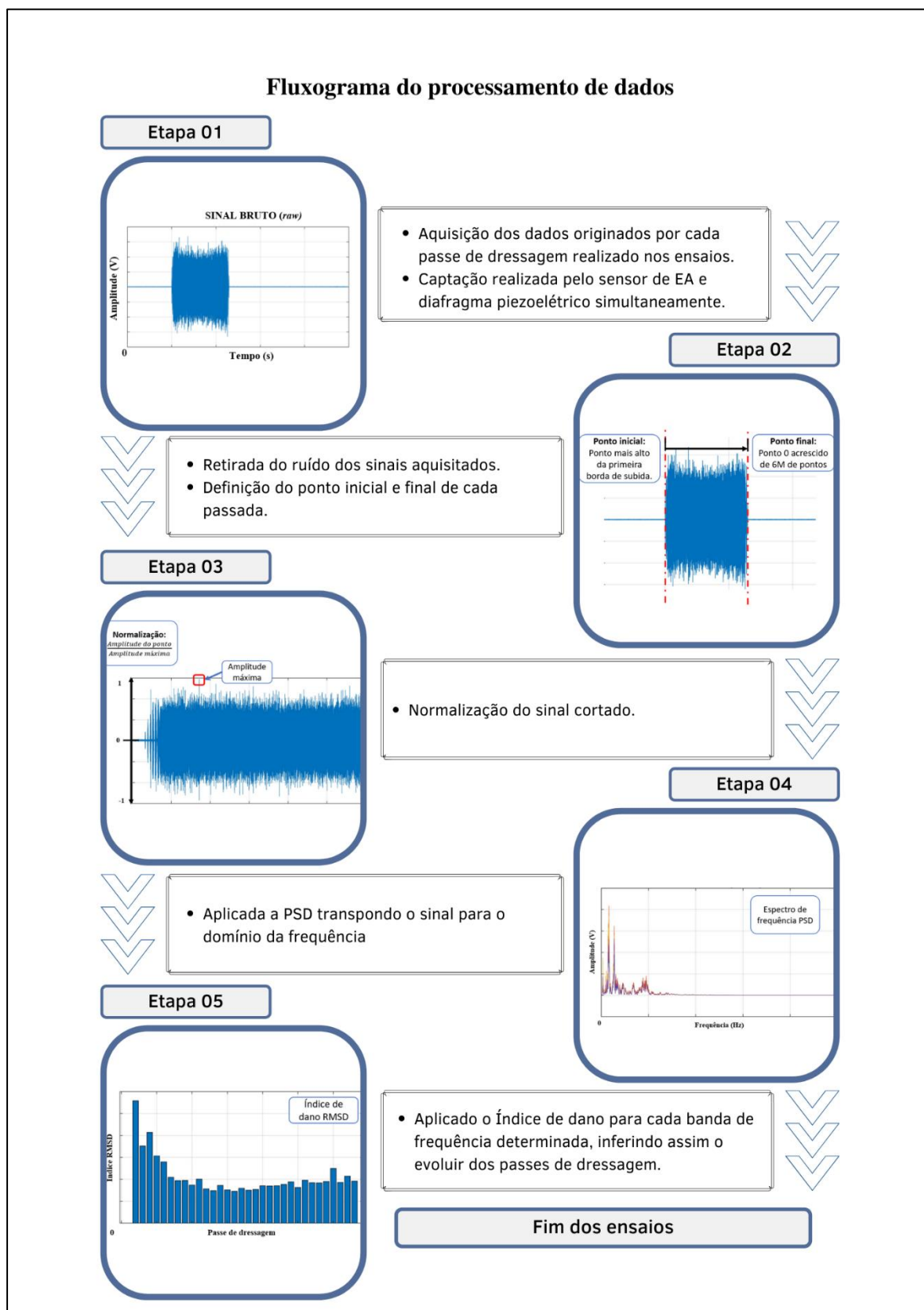


Figura 12 Fluxograma que descreve a metodologia empregada tratamento dos sinais adquiridos

3.1.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS: ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios de dressagem foram executados em uma máquina retificadora tangencial plana, modelo RAPH 1055 da empresa Sulmecânica, a qual estava equipada com um rebolo de óxido de alumínio com ligante vitrificado, este ligante possui uma boa resistência a temperaturas

elevadas devido a sua porosidade, sendo largamente empregado na retificação de precisão. O rebolo foi fabricado pela empresa NORTON, de modelo 38A.100.LVH, com dimensão inicial de 352,8x25,4x127 mm. Nos ensaios, foi empregado um dressador do tipo diamante de ponta única, obtido pela técnica *Chemical Vapour Deposition* (CVD), cujo ba , que representa a largura de atuação do dressador para uma dada profundidade de dressagem (aa), foi medido antes do início de cada ensaio de dressagem. Na Figura 13 é representado o esquema de distribuição dos componentes utilizados nos ensaios de dressagem.

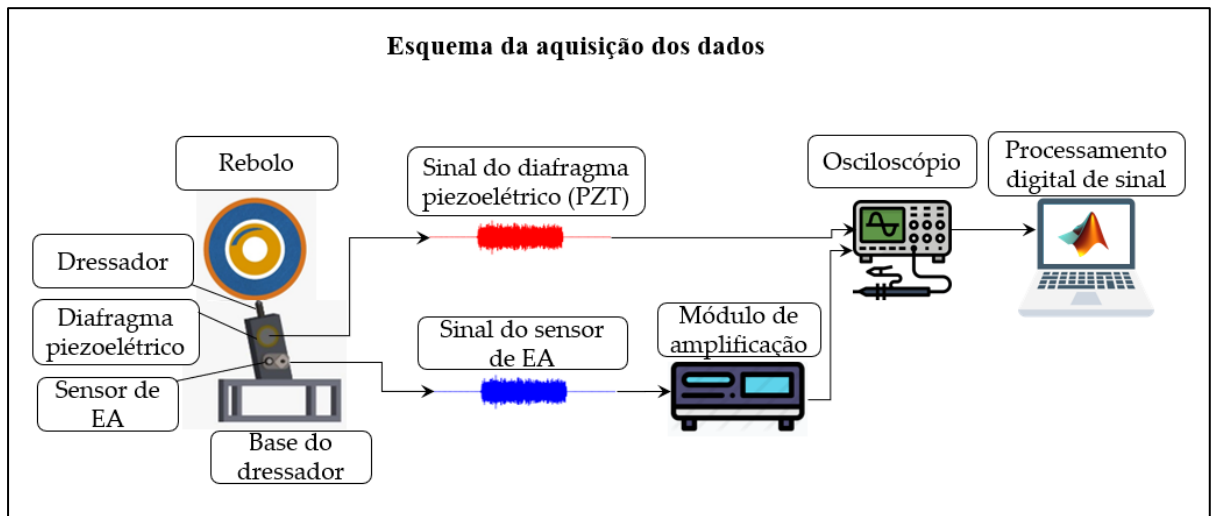


Figura 13 Esquema de distribuição dos componentes utilizados nos ensaios

Para a detecção dos sinais gerados pela operação de dressagem, foram acoplados no suporte do dressador, um sensor EA, fabricado pela empresa Sensis, juntamente com um diafragma piezoelétrico de baixo custo, modelo 7BB-35-3, da empresa Murata Electronics, sinais estes que foram gerados pelo contato entre a superfície de corte do rebolo e a ponta do dressador. Para o condicionamento dos sinais adquiridos pelo sensor de EA, foi utilizado um módulo, da fabricante Sensis, modelo DM-42. O módulo foi conectado na entrada de um filtro analógico passa-baixa, do tipo *Butterworth*, de segunda ordem e frequência de corte de 300 kHz.

O objetivo de usar o referido filtro é de evitar o efeito *aliasing*, efeito este que é o quando a frequência de amostragem utilizada não é suficiente alta para ocorrer a sobreposição do espectro. Quanto este efeito ocorre, frequências originalmente altas aparecem em regiões de frequências mais baixas, impossibilitando a recuperação do sinal original. O efeito *aliasing* ocorre geralmente quando o teorema de Nyquist não é atendido, necessitando assim colocar um filtro passa-baixa antes da aquisição dos dados.

Os sinais adquiridos pelo diafragma piezoelétrico não foram condicionados para a coleta, ligando-o diretamente ao osciloscópio. Os sinais gerados nos ensaios foram coletados de forma simultânea a uma frequência de amostragem de 2MHz usando um osciloscópio modelo DL850, da empresa Yokogawa, os quais foram, posteriormente, analisados no software MATLAB®.

3.1.2 AFERIÇÃO DA AGRESSIVIDADE

Com intuito de aferir a superfície de corte do rebolo, a pesquisa utilizou-se do método do disco retificado, método este desenvolvido primeiramente por (NAKAYAMA *et al.*, 1980), e posteriormente melhorado por (COELHO, 1991), método este encontrados e validados nos trabalhos publicados de (BIANCHI *et al.*, 2011; LOPES *et al.*, 2018, 2017; MOIA *et al.*, 2015).

Em suma, foi aplicada uma massa de 102,36g na balança de agressividade, massa essa que tinha por objetivo manter o contato estabelecido entre a superfície de corte do rebolo com a ponta do dressador. Com o início do movimento giratório do rebolo, um sensor de deslocamento, que está acoplado na balança de agressividade começa a registrar variações. A Figura 14 apresenta o banco de ensaio utilizado para fazer a aquisição das curvas de agressividade do rebolo captadas no método de disco retificado.

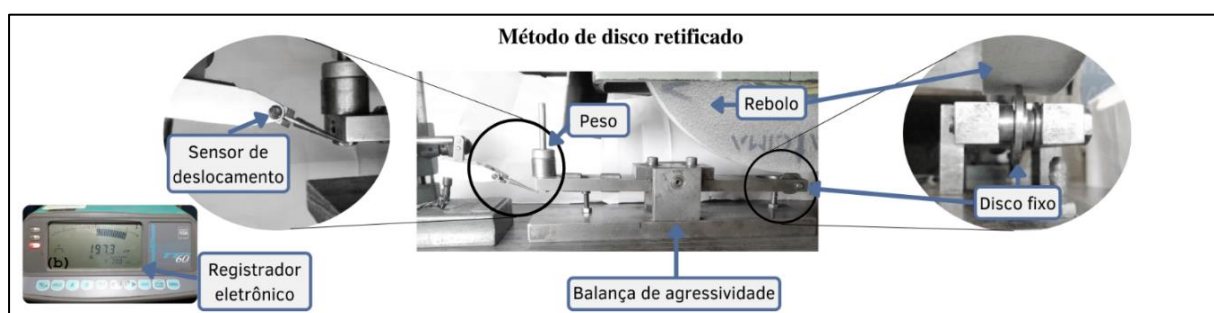


Figura 14 Bancada de ensaios para medir a agressividade do rebolo adaptado de (DE OLIVEIRA *et al.*, 1992).

As variações de deslocamento foram registradas por um sensor TESATRONIC modelo TT60 da empresa Tesa Technology e coletadas via comunicação serial por meio do *software* MATLAB®. Com base nos testes preliminares, foi definido a mensuração da agressividade de corte do rebolo em quatro momentos, sendo o primeiro logo após o processo de inserção de falhas na superfície de corte do rebolo, momento este que o rebolo se encontrava com empastamento e grande desgaste das camadas abrasivas. O segundo, terceiro e quarto momentos foram definidos sendo logo após o quinto, décimo e vigésimo quinto passe de dressagem respectivamente. Em todas as etapas a agressividade foi medida em 03 (três) pontos distintos ao longo da superfície de corte do rebolo.

3.1.3 DEFINIÇÃO DA LARGURA DO DRESSADOR b_d

No intuito de realizar a medição da largura do dressador (b_d) foi utilizado um projetor de perfil Nikon, modelo 6C, com precisão de 1 μm e lente de aproximação em 50 (cinquenta) vezes. A Figura 15 apresenta o banco de ensaio utilizado para realização da medição.



Figura 15 Banco de ensaios para aferição da largura de atuação do dressador (LOPES *et al.*, 2017)

Vale ressaltar que o microscópio, ao ser calibrado da forma correta, possibilitou mensurar a ponta de diamante do dressador utilizado pelas imagens por ele capturadas, isso permitiu uma ampliação digital da imagem em torno de 200 vezes. Os seguintes passos foram utilizados para identificar o b_d , conforme Figura 16.

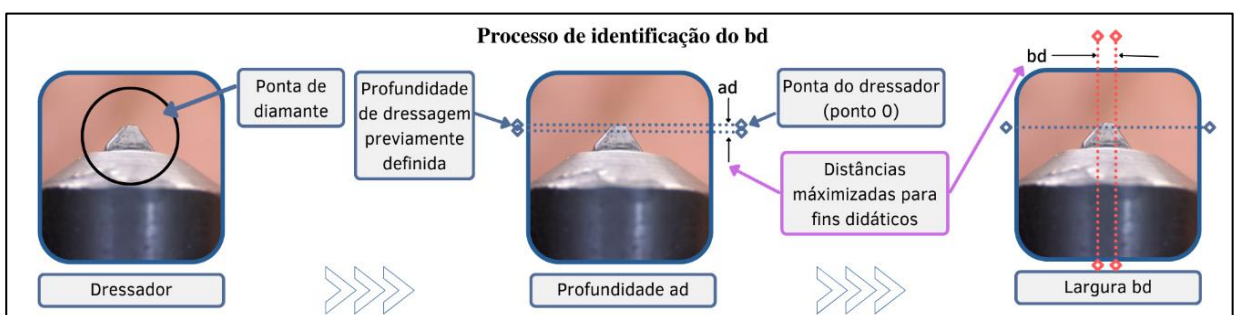


Figura 16 Aferição da largura de atuação do dressador

Primeiro uma linha foi projetada identificando a ponta do dressador e considerando-a o ponto 0. A partir deste ponto, foi projetada nova linha paralela a anterior em sentido do corpo do dressador utilizando o dado previamente definido como profundidade de dressagem (linha azul). Após a definição desta linha foram identificados os pontos de intersecção entre as extremidades do dressador com a linha de profundidade, projetando nestes pontos novas linhas perpendiculares a linha de profundidade de dressagem (linha vermelha). A distância entre as duas linhas vermelhas projetadas foi considerada o b_d do projeto.

3.2 ENSAIOS DEFINITIVOS: EMPASTAMENTO E DRESSAGEM DOS REBOLOS

No intuito de gerar as condições de dressagem desejadas foram idealizadas três condições específicas do rebolo sendo a primeira com um rebolo sem capacidade de corte e desgastado caracterizado aqui como rebolo não dressado, a segunda condição com um rebolo com capacidade de corte e uniformidade mediana, definido aqui como condição intermediária, e por fim uma terceira condição com o rebolo totalmente dressado com capacidade de corte reestabelecida, condição a qual iremos denominar aqui como rebolo dressado.

Em seu estudo apresentado, (DE OLIVEIRA *et al.*, 1992) preconiza como uma retificação grosseira a partir de uma dressagem empregando 1,0 a 2,5 de grau de recobrimento, valores esses atendidos no presente trabalho. Vale ressaltar também que o rebolo atinge sua máxima agressividade ao passar por uma operação de dressagem com um grau de recobrimento de 1,0, sendo assim, o rebolo consegue a máxima taxa possível de remoção de material.

3.2.1 EMPASTAMENTO DA SUPERFÍCIE DE CORTE

Antes do ensaio de dressagem ser realizado, a superfície de corte do rebolo foi intencionalmente desgastada para inserção de falhas. Foi utilizada uma retificação não usual com peças de aço ABNT 1020, em condição severa de usinagem, a retificação foi realizada sem a presença de fluido de corte até a queima da peça usinada, conseqüentemente provocando o empastamento de material na superfície de corte do rebolo. A escolha do aço ABNT 1020 se deu por ter características de ductibilidade, facilitando assim a queima da peça e empastamento do rebolo. A velocidade da peça foi de 0,048 m/s e em todas os ensaios a agressividade do rebolo foi medida logo no primeiro passe de dressagem.

3.2.2 DRESSAGEM DO REBOLO

No que tange a operação de dressagem, o presente trabalho se utilizou de dois ensaios definitivos. Aqui iremos denominar o primeiro ensaio como o ensaio de demonstração do método, que tem por objetivo apresentar e demonstrar o processo aqui proposto, juntamente com os resultados obtidos, já o segundo ensaio será denominado como ensaio de validação do método, que tem por finalidade ratificar o processo anterior alterando algumas de suas variáveis e assim dar maior robustez ao trabalho. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados no ensaio de demonstração do método.

Tabela 1 Parâmetros do ensaio de demonstração do método

Parâmetros Envolvidos no Ensaio de dressagem							
N_s [RPM]	D_s [mm]	V_s [m/s]	b_a [μ m]	t_a [s]	S_d [mm]	U_d	P_d
1800	351,6	33,14	522	5,675	0,1491	3,5	30

Os parâmetros apresentados são:

- (N_s) que representa a rotação do eixo em que o rebolo está acoplado;

- (d_s) representando o diâmetro equivalente do rebolo;
- (V_s) que é a velocidade de corte do rebolo identificada;
- (a_d) que é a profundidade de dressagem;
- (b_d) sendo a largura de atuação do dressador;
- (t_d) o tempo de dressagem;
- (U_d) o grau derecobrimento;
- (S_d) que é o avanço axial do dressador por revolução do rebolo ou conhecido também como passo de dressagem; e por último,
- o número de passes de dressagem (P_d).

Os ensaios de dressagem definitivos, foram realizados com o rebolo modelo 38A.100.LHV da fabricante NORTON, com porosidade (estrutura) fechada e igual a 0 (zero), e dimensões de 355,6 x 25,4 x 127 mm. Os ensaios constituíram em 25 (vinte e cinco) passes de dressagem utilizando um dressador de ponta única em um rebolo não dressado, rebolo este já previamente preparado pelo processo de empastamento anteriormente explanado.

Estes ensaios seguiram a seguinte sequência:

- Com o rebolo já retificado no processo de empastamento, foram capturadas imagens da condição da superfície de corte com um microscópio digital USB da marca DW, modelo 1600X e um smartphone modelo Galaxy J2 da empresa Samsung, equipado com uma câmera de 5MP e qualidade de resolução em 2592x1944 pixels.
- Medição da agressividade do rebolo utilizando o método de disco retificado evidenciando três pontos distintos na superfície de corte do rebolo.
- Com as falhas na superfície de corte do rebolo devidamente inseridas e mensuradas deu-se início a operação de dressagem. Após os passes 05 (cinco), 10 (dez) e 25 (vinte cinco) os ensaios foram interrompidos e a agressividade do rebolo novamente medida para fins de comparação de evolução do processo.
- Terminada a última medição, foram novamente evidenciadas imagens utilizando os mesmos equipamentos acima mencionados, para comparações de início e fim de processo.

É importante ressaltar que para cada passe de dressagem aplicado no rebolo, foram adquiridos, de forma simultânea, os sinais gerados pelo processo, tanto pelo sensor de EA tanto pelo diafragma piezelétrico. Vale lembrar que foram utilizados em todos os ensaios o fluido de corte do tipo emulsão com uma concentração controlada em torno de 4% de volume de água,

uma pressão de 0,5 MPa e uma vazão de 24 l/min. Todas variáveis e parâmetros apresentados foram controlados para assegurar a qualidade de aquisição de dados do projeto.

3.2.3 VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO DO REBOLO

Para realizar a medição do volume de material removido durante os ensaios definitivos, foi utilizada a técnica de diferença de diâmetro, conforme apresentado em (LOPES *et al.*, 2017). O resultado da conta é aproximado devido alguns fatores que não são levados em consideração como desgaste ocasionado na superfície de corte dos rebolos e a ondulação teórica, ambos efeitos ocasionados pela operação de dressagem. Contudo o valor dá uma referência significativa para o total do volume removido, sendo assim foi optado a utilizar a técnica, sendo sua expressão representada pela equação (6)

$$VMR = \pi L_R [r^2 - (P_d \cdot a_d)^2] \quad (6)$$

Onde L_R representa a largura do rebole, P_d representa a quantidade de passes de dressagem, a_d é a profundidade de dressagem e por fim r , que é o raio do rebole.

3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Será abordado aqui a sequência do tratamento de dados adquiridos pelo diafragma piezométrico e EA, utilizada para o monitoramento da operação de dressagem. Os dados dos sinais obtidos nos ensaios de dressagem foram computados e processados no software MATLAB® usando as etapas apresentadas na Figura 17.

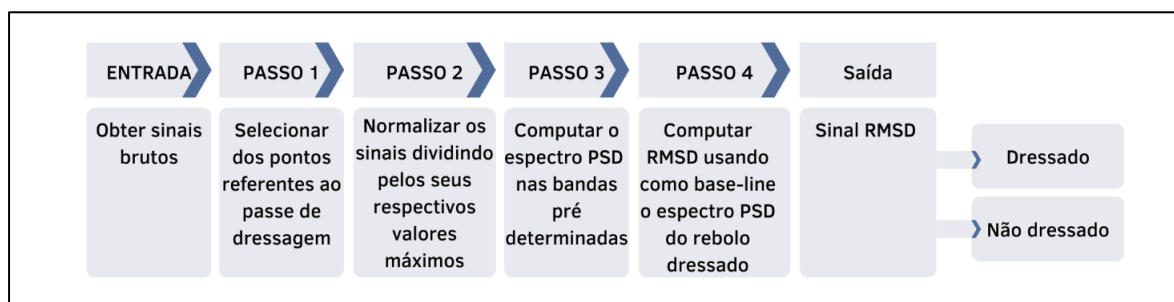


Figura 17 Sequência do tratamento de dados

A sequência tem início na captação dos sinais originados pela ação de dressagem, sinais esse adquiridos pelo sensor EA e o diafragma piezométrico, que são inseridos no software MATLAB®. Esses sinais, que ainda não passaram por nenhum tipo de tratamento, são definidos como sinais brutos.

Do sinal bruto de cada passada dos ensaios definitivos são extraídos apenas os dados relativos ao passe de dressagem, definindo como ruído todos os dados que ocorrem antes e todos os dados que ocorrem depois do passe do dressador. Para realizar essa retirada de ruído, foi

considerado como ponto inicial da passada o ponto mais alto da borda de subida do sinal da passada. Já o ponto final foi definido pela posição do primeiro ponto acrescido de 6 milhões de pontos. O objetivo de acrescentar um número de pontos ao invés de escolher um ponto na borda de descida, similar ao feito no ponto de início, é que todos os sinais tenham o mesmo tamanho em número de pontos e não ocorram distorções nos dados finais.

Após a retirada dos ruídos, o sinal é normalizado dividindo o dado de cada ponto pelo valor máximo presente no sinal. Esta normalização faz com que todos os sinais adquiridos tenham suas amplitudes variando de 1 até -1 (menos um). Com o sinal já normalizado, é aplicada a PSD por meio do método *Welch*, usando uma janela de *Hanning* com uma sobreposição de 50%.

Com intuito de avaliar quais as melhores bandas para demonstração do método, foram definidos parâmetros de banda, num primeiro momento foi definido quais as bandas serão avaliadas, seguindo sequência conforme Figura 18.

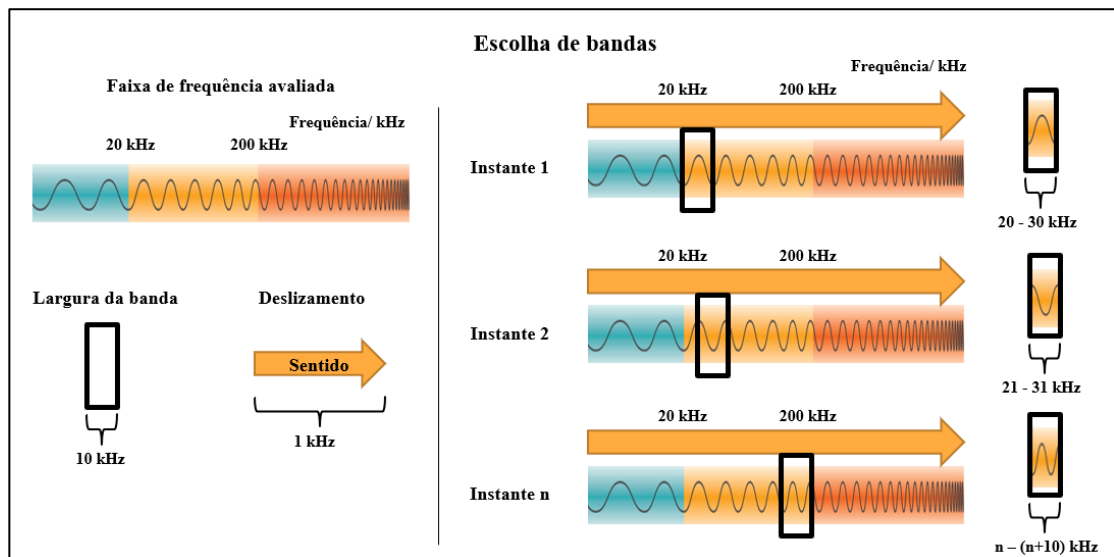


Figura 18 Processo de escolha de bandas

Uma janela de largura de banda de 10 kHz foi aplicada ao sinal com o seu ponto de partida sendo o de 20 kHz, formando assim a primeira banda a ser avaliada de valor 20 a 30 kHz. Após isso, a janela sofre um deslizamento no sentido crescente no valor de 1 kHz, formando assim a segunda banda a ser avaliada, a banda de 21 a 31 kHz. Este processo seguiu até a borda da janela de largura de bandas chegar na frequência de 190 – 200 kHz.

Para cada banda definida por este processo, foi aplicada o recorte desta janela em todos os sinais adquiridos nas passadas dos ensaios, por exemplo, esta mesma banda, de 20 a 30 kHz é aplicada em todas as passadas do ensaio de demonstração do método, configurando assim em 25 sinais, formando assim uma nova matriz de sinais x passadas. De posse desta matriz, foi aplicado o índice RMSD, tendo como *baseline* o sinal da última passada, sinal este que configura o rebolo dressado. A Figura 19 ilustra as etapas que foram executadas para a

determinação da banda de frequências que melhor caracterizou o estado de corte do rebolo.

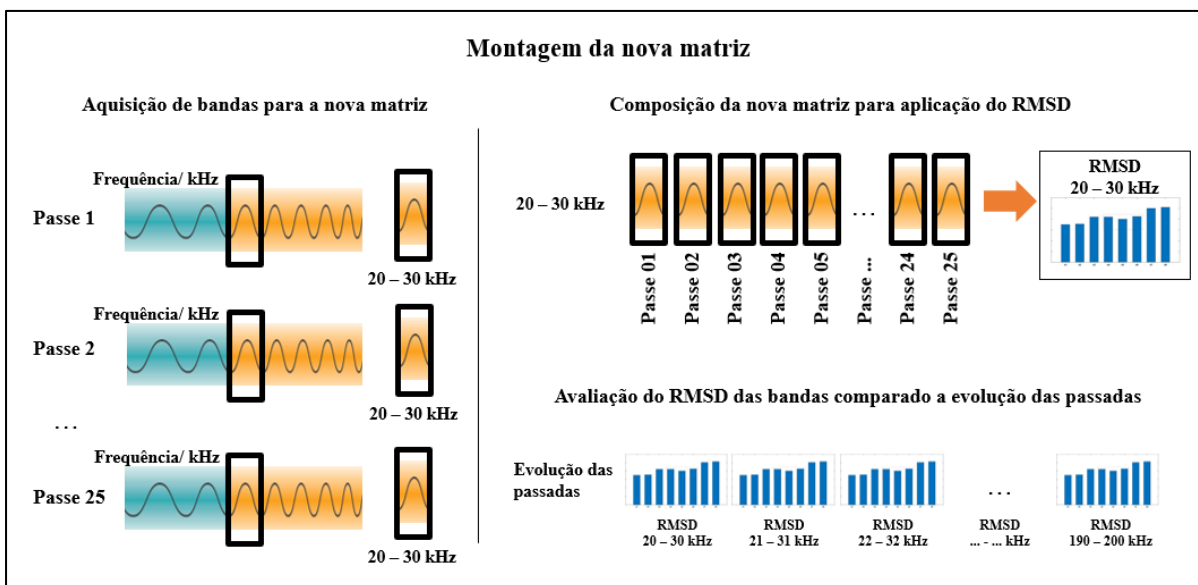


Figura 19 Montagem da nova matriz e aplicação do RMSD

Ao estabelecer todas as matrizes e aplicar o índice RMSD em todas as passadas, foi comparado todas as respostas com as características dos ensaios de dressagem desenvolvidos. Com isso foi possível identificar quais as bandas que melhor representaram o processo de dressagem com o evoluir dos passes.

3.4 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DO MÉTODO

A verificação do método se deu em um novo conjunto de ensaios para a ação de dressagem, utilizando o mesmo rebolo e alterando os parâmetros de dressagem podendo assim aferir a confiabilidade do método, conforme dados compilados e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros do Ensaio de Dressagem para a Verificação do Método

Parâmetros Envolvidos no Ensaio de dressagem							
N_s [RPM]	D_s [mm]	V_s [m/s]	b_a [μ m]	t_d [s]	S_d [mm]	U_d	P_d
1800	351,2	33,1	684	6,81	0,1244	5,5	30

Os sinais foram captados pelo diafragma piezelétrico e sensor de EA simultaneamente, da mesma maneira que feito no ensaio de demonstração do método. Vale ressaltar que foram realizadas ações de retificação para deixar o rebolo com sua superfície não dressada e logo depois de evidenciada a inserção das falhas na superfície de corte do rebolo, foram iniciadas as atividades de dressagem e efetuados vinte e cinco passes pelo dressador de ponta única, utilizou-se o mesmo rebolo usado no ensaio de demonstração do método, onde só foi trocado o grau de recobrimento U_d do ensaio.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo é dividido em três tópicos principais: 4.1 onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o ensaio de demonstração do método; 4.2 onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos para o ensaio de verificação do método; e por fim, 4.3 onde os resultados obtidos para ambos os ensaios de dressagem são compilados e discutidos.

4.1 Resultados obtidos do ensaio de dressagem para a Demonstração do Método

A fim de demonstrar as condições do rebolo, a Figura 20(a) expõe a superfície de corte do rebolo em sua condição não dressada, isto é, antes de iniciar o processo de dressagem. A Figura 20(b) apresenta a superfície de corte do rebolo após a finalização da operação de dressagem.

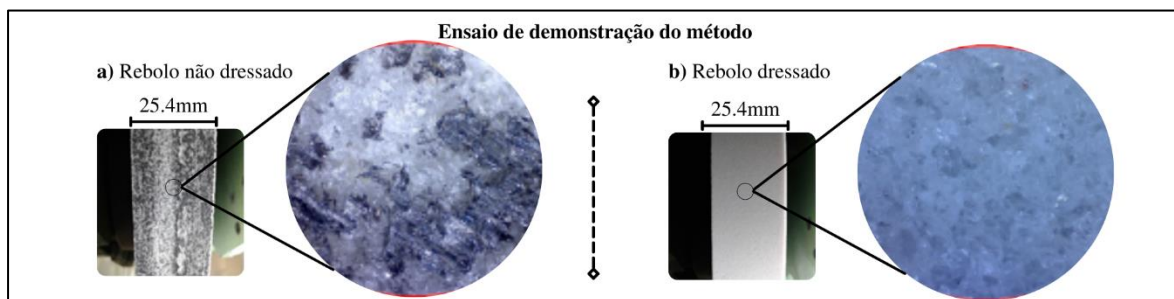


Figura 20 Superfície de corte do rebolo (resolução em 2592x1944 pixels e Zoom 4x)

A superfície de corte do rebolo apresentada na Figura 20 (a) contém resíduos e empastamento de outros materiais cobrindo os grãos abrasivos do rebolo, o que interfere significativamente em sua agressividade. Ao contrário do que traz a Figura 20 (b), onde é possível verificar uma distribuição uniforme de grãos abrasivos, poros e ligantes, tornando a superfície de corte do rebolo mais homogênea e agressiva. Na Figura 21, ao mensurar a relação de agressividade da superfície de corte do rebolo, com quantidade de material removido do rebolo no decorrer dos passes de dressagem, é possível perceber que há uma tendência de normalização na agressividade.

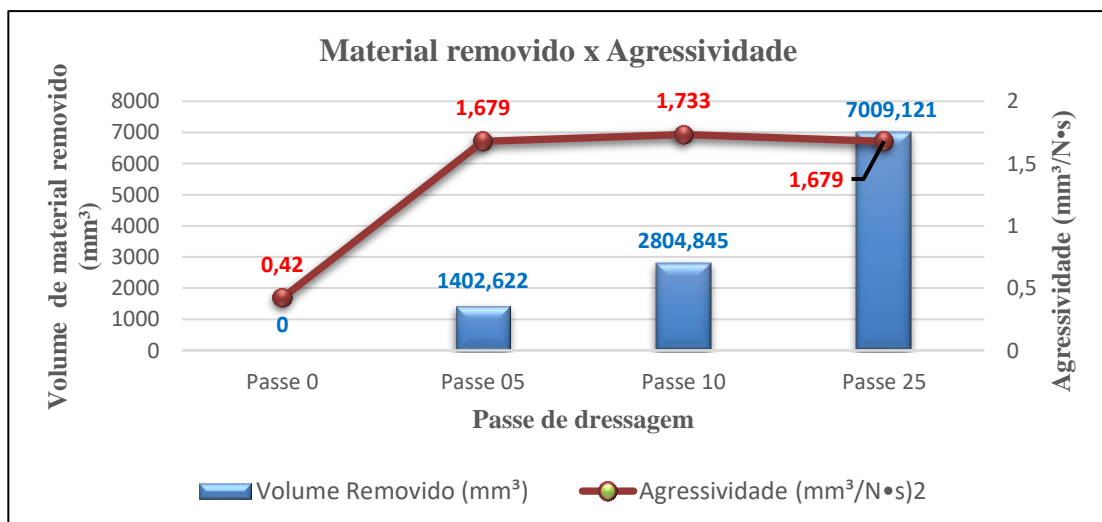


Figura 21 Agressividade versus volume de material removido do ensaio de demonstração do método

Essa normalização que pode ser observada a partir de 1400 mm³ de material removido da superfície de corte do rebolo, quer dizer que mesmo removendo mais camadas abrasivas do rebolo, a agressividade da sua superfície de corte não se altera de forma significativa. Isso caracteriza que após 1400 mm³ a operação de dressagem já atingiu sua finalidade, produzindo uma superfície de corte regular e agressiva, podendo assim inferir que o rebolo se encontra dressado. Estes resultados foram similares aos resultados obtidos por (LOPES, 2018).

Ao longo do ensaio de dressagem, a atividade acústica foi captada por sensores piezelétricos, e pode-se observar uma significativa diferença entre os sinais gerados para as condições de rebolo dressado e não dressado. Na Figura 22 são representados os sinais originais captados no ensaio de demonstração do método. Esses sinais foram normalizados em amplitude e são relacionados com a condição de rebolo dressado e não dressado. A Figura 22(a) refere-se aos sinais coletados com o sensor EA, e a Figura 22(b) refere-se aos sinais coletados com o diafragma piezelétrico. Os sinais apresentados nas Figura 22(a) e Figura 22(b), respectivamente, nas cores azul e preta, referem-se à condição de rebolo não dressado, isto é, ao primeiro passe de dressagem. Por outro lado, os sinais apresentados nas cores vermelha e amarela, respectivamente, nas Figura 22(a) e Figura 22(b), estão relacionados com a condição de rebolo dressado. Nos sinais que representam a condição de rebolo não dressado é possível identificar que as amplitudes se comportam de forma oscilatória ao longo do passe de dressagem. Isso caracteriza que a superfície de corte do rebolo se encontra degradada e não uniforme.

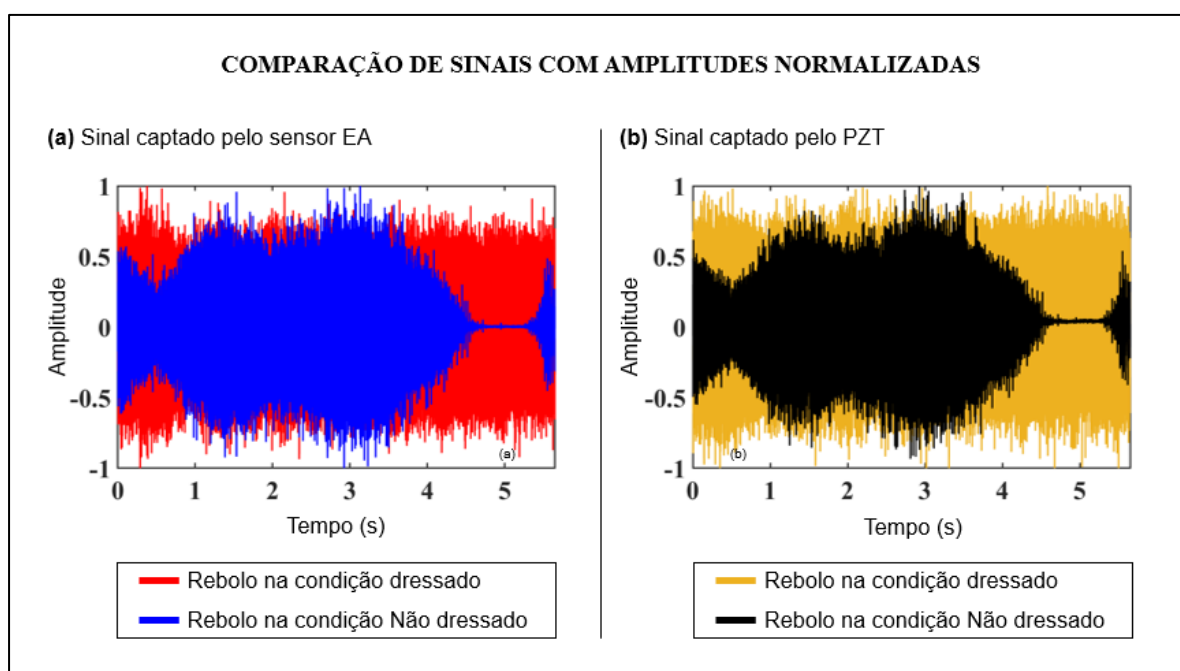


Figura 22 Sinais originais referente ao ensaio de demonstração do método: (a) sensor EA e (b) Diafragma piezelétrico

Em contrapartida, em relação aos sinais apresentados nas cores vermelha e amarela, respectivamente, nas Figura 22(a) e (b), ao longo do passe de dressagem, é perceptível que há

uniformidade na amplitude dos sinais, configurando que nesse momento a superfície de corte do rebolo se encontra mais regular e proporciona um contato mais uniforme entre o rebolo e o dressador. Entretanto, essa transição não é facilmente notada pelo operador, visto que na atualidade, esse monitoramento é feito de forma visual e audível, e necessita de uma certa experiência, bem como de habilidades humanas. E, em muitos casos, as frequências ideais para o monitoramento da operação de dressagem se encontram acima da faixa de frequências que os humanos são capazes de ouvir. Como é o caso desse estudo, ao obter as curvas de frequência via PSD, observa-se na Figura 23 que tanto para o sensor de EA quanto para o diafragma piezométrico a faixa de frequências que apresentou o melhor resultado se encontra significativamente acima de 20 kHz. Observa-se na Figura 23(a) que a faixa de frequências que se estende de 182 kHz a 192 kHz, selecionada para o sensor EA, possui amplitudes divergentes da faixa de frequência selecionada para o diafragma piezométrico, a qual se estende de 168 kHz a 178 kHz, que é apresentada na Figura 23(b). Ainda na Figura 23, ao comparar a curva de frequência obtida para o rebolo não dressado com a curva de frequência obtida para o rebolo dressado, para ambos os sensores, nota-se que há uma diferença significativa entre amplitudes dessas curvas de frequências. Desta forma, para ambos os sensores, ao analisar as curvas de frequências de forma visual é possível classificar o rebolo como dressado e não dressado, pois as curvas de frequências obtidas para o rebolo dressado apresentam amplitudes com significativa diferença quando comparadas com as amplitudes das curvas de frequências obtidas para o rebolo na condição não dressado.

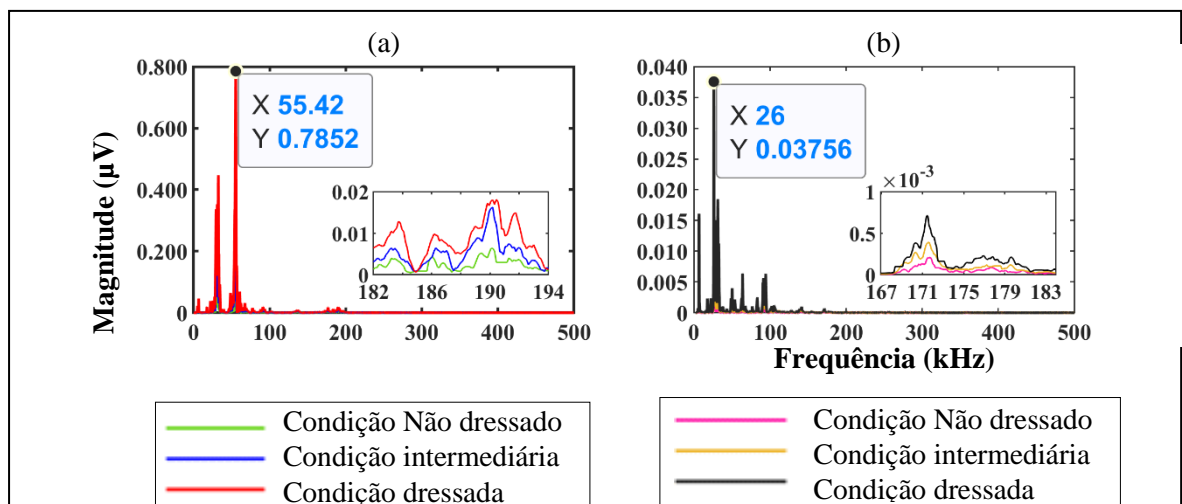


Figura 23 Espectros do Ensaio 1 EA e Diafragma Piezométrico

Essa diferença entre as amplitudes das curvas de frequências obtidas para distintas condições da superfície de corte do rebolo é ainda mais visível ao obter os valores de índice de dano por meio da métrica RMSD. Nota-se na Figura 24 que, para ambos os sensores, o índice RMSD é sensível a variações de amplitude das frequências que melhor caracterizam as condições de corte do rebolo. Constata-se também na Figura 24 que, para o sensor EA, o índice de dano

obtido para o rebolo na condição dressado é 274 % menor que o índice de dano obtido para a condição de rebolo não dressado. Já para o diafragma piezelétrico, o índice de dano obtido para o rebolo na condição dressado é 245 % menor que o índice de dano obtido para a condição de rebolo não dressado. Observa-se ainda na Figura 24 que para a condição de rebolo não dressado tanto para o sensor EA quanto para o diafragma piezelétrico os índices de dano se encontram muito acima de zero.

Por outro lado, para a condição de rebolo dressado, para ambos os sensores, o índice de dano se aproxima de zero. Se o valor do índice RMSD for igual a zero, ao se definir como baseline a curva de frequências que representa o rebolo dressado, significa que a curva de frequência obtida é exatamente igual a baseline selecionada para a condição de rebolo dressado. Entretanto, para essa metodologia, os índices de danos se aproximam de zero, mas dificilmente serão exatamente zero, visto que durante a operação de dressagem é impossível coletar dois sinais exatamente iguais, pois o processo tem natureza estocástica e possui muitas variáveis que influenciam significativamente nos sinais gerados durante a dressagem. Assim, ao definir como baseline a curva de frequências relacionada com a condição de rebolo dressado, é possível obter valores de índice de dano que possibilitam classificar o rebolo como dressado e não dressado.

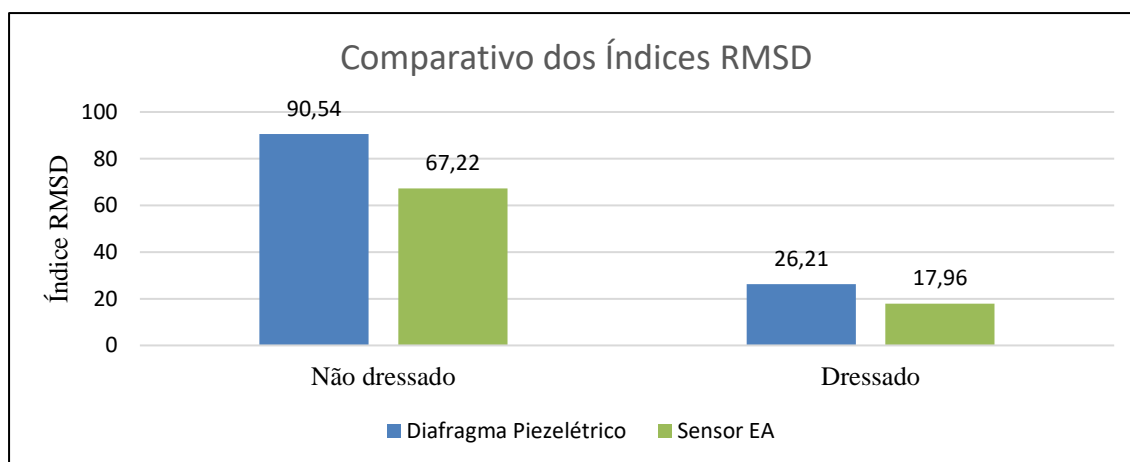


Figura 24 Índice RMSD para rebolo dressado e não dressado

4.2 Resultados obtidos do ensaio de dressagem para a Verificação do método

Em relação ao ensaio de verificação do método, de maneira equivalente ao primeiro conjunto, foram captadas as imagens do rebolo nas condições dressado e não dressado. A superfície de corte do rebolo apresentada na imagem da Figura 25(a) contém resíduos e empastamento de outros materiais cobrindo os grãos abrasivos do rebolo, o que interfere na agressividade do rebolo. Ao contrário do que traz a Figura 25(b) onde é possível ver uma distribuição uniforme de grãos abrasivos, poros e ligantes, tornando a superfície de corte mais homogênea e agressiva.

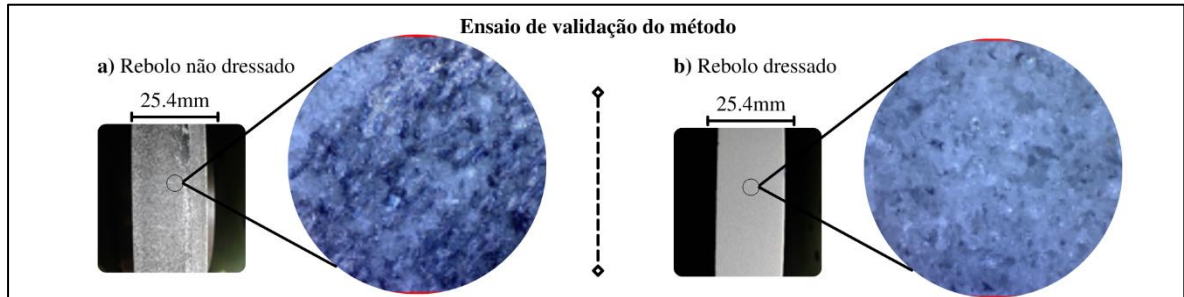


Figura 25 Superfície de corte do rebolo usado para validação do método (resolução em 2592x1944 pixels e Zoom 4x)

Devido a degradação ocasionada na superfície de corte do rebolo, Figura 25(a), sua agressividade foi significativamente reduzida a um valor aproximado de $0.20 \text{ mm}^3/\text{Ns}$, conforme apresentado na Figura 26. Nessas condições, caso o rebolo seja usado no processo de retificação, ele pode ocasionar danos irreparáveis a superfície da peça. Ao ser submetido a uma operação de dressagem com vista a restabelecer as suas condições adequadas de corte e de uso, observa-se na Figura 26 que após se remover 1400 mm^3 de material abrasivo da superfície de corte do rebolo, sua agressividade aumentou em aproximadamente 770 %. Isso significa que a capacidade de corte dos grãos abrasivos foi restabelecida. Esse aumento significativo na agressividade do rebolo também atesta que foi removido de sua superfície o material que estava obstruindo os poros e contribuindo com a redução da agressividade.

Observa-se ainda na Figura 26 que após 1400 mm^3 de material removido, não há uma diferença tão significativa na agressividade do rebolo, a qual sofre pouca variação. Isso significa que se o rebolo estiver com sua superfície de corte regular após 1400 mm^3 de material removido, a operação de dressagem alcançou a sua finalidade e pode ser interrompida. Por fim, em relação a condição de rebolo dressado, nota-se que para U_d igual a 5,5 a agressividade do rebolo é menor quando comparada com os valores obtidos para U_d igual a 3,5 usado no ensaio de demonstração do método.

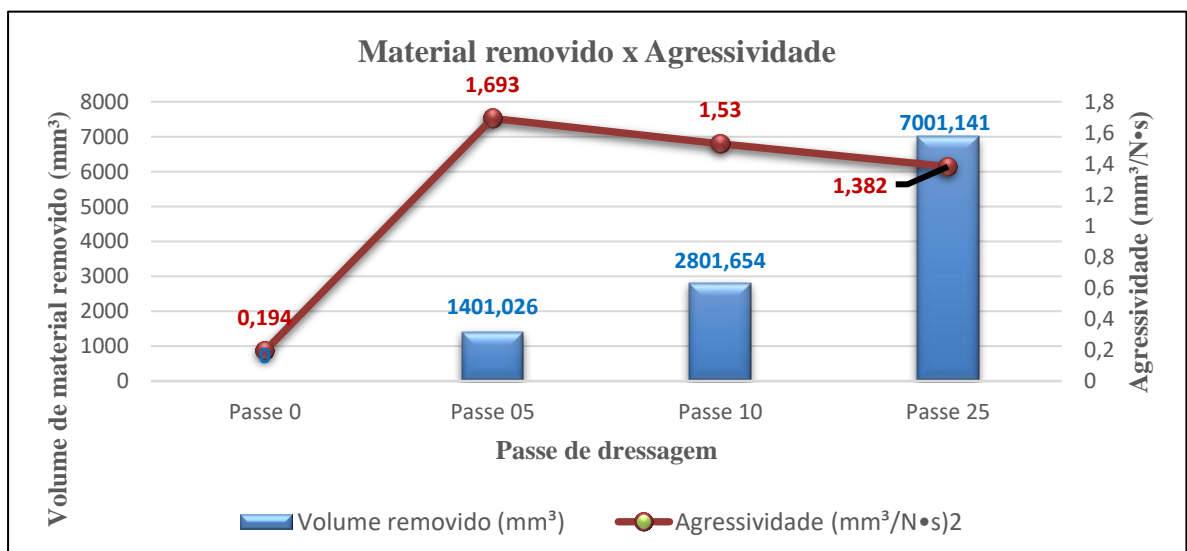


Figura 26 Agressividade versus volume de material removido do ensaio de verificação do método

Assim como ocorreu para o ensaio de demonstração do método, na Figura 27 são representados os sinais originais, normalizados em amplitude, que estão relacionados com a condição do rebolo dressado e não dressado. A Figura 27(a) refere-se aos sinais coletados com o sensor EA, e a Figura 27(b) aos sinais coletados com o diafragma piezolétrico. Os sinais apresentados nas Figura 27(a) e Figura 27(b), respectivamente, nas cores azul e amarela, referem-se à condição de rebolo não dressado, isto é, ao primeiro passe de dressagem. Por outro lado, os sinais apresentados nas cores vermelha e preta, respectivamente, nas Figura 27(a) e Figura 27(b), estão relacionados com a condição de rebolo dressado.

Observa-se na Figura 27 o mesmo comportamento relatado para os sinais coletados no ensaio de demonstração do método. Nota-se também que ao longo do passe de dressagem que representam a condição de rebolo não dressado, para ambos os sensores, as amplitudes dos sinais se comportam de forma irregular ao longo do tempo. Em contrapartida, percebe-se claramente que há maior uniformidade nas amplitudes dos sinais relacionados com a condições de rebolo dressado, os quais são apresentados nas cores vermelha e preta, nas Figura 27(a) e (b), respectivamente.

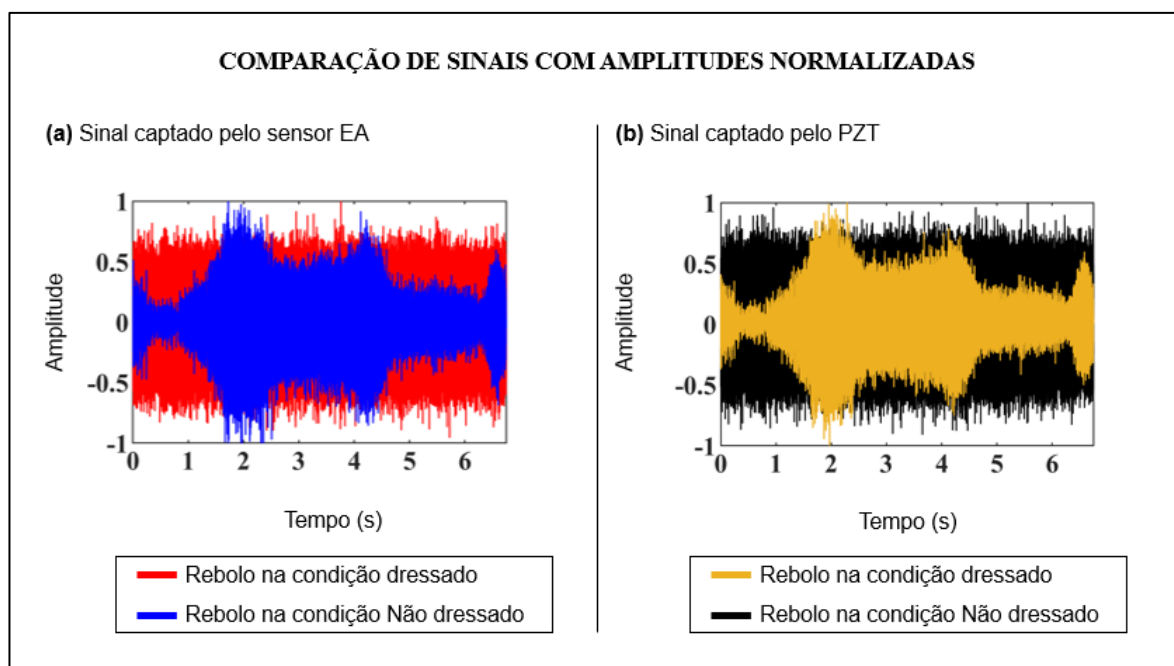


Figura 27 Sinais originais referente ao ensaio de verificação do método: (a) sensor EA e (b) Diafragma piezolétrico

Ao analisar esses sinais no domínio da frequência, observa-se na Figura 28 que tanto para o sensor de EA quanto para o diafragma piezolétrico o conteúdo harmônico mais significativo da operação de dressagem se encontra abaixo de 200 kHz. Assim como observado nas curvas de frequências obtidas para o ensaio de demonstração do método, nota-se na Figura 28(a) que a faixa de frequências que se estende de 182 kHz a 192 kHz selecionada para o sensor EA possui amplitudes divergentes da faixa de frequência selecionada para o diafragma piezolétrico, a qual se estende de 168 kHz a 178 kHz e é apresentada na Figura 28(b). Ainda na Figura 28, ao

comparar a curva de frequência obtida para o rebolo não dressado com a curva de frequência obtida para o rebolo dressado, para ambos os sensores, nota-se que há uma diferença significativa entre as amplitudes das curvas de frequências. Isso significa que apesar da variação dos parâmetros de dressagem, as bandas de frequências selecionadas estão diretamente relacionadas com as condições de corte do rebolo. Essa relação é salientada por meio da obtenção dos índices de dano computados via métrica RMSD.

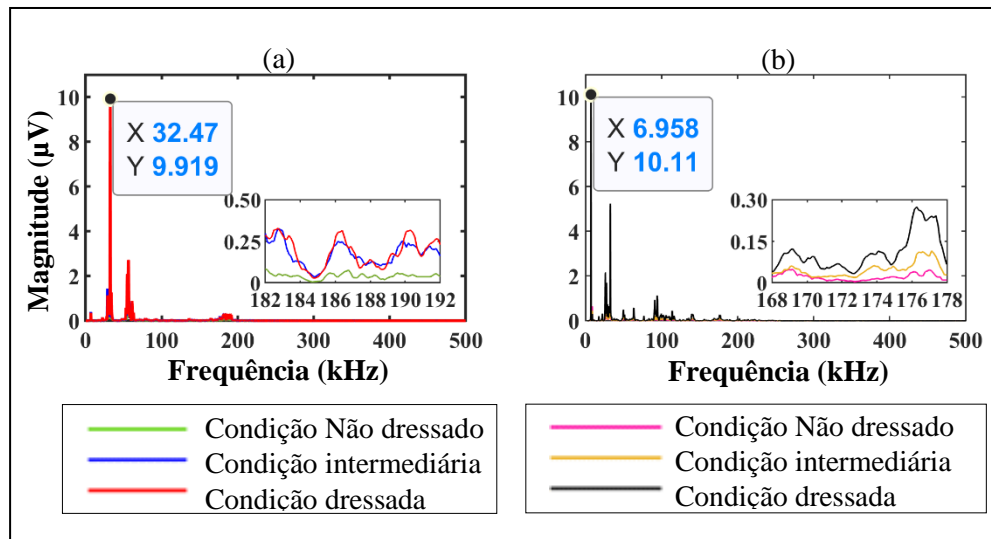


Figura 28 - Espectros PSD dos sinais originais referente ao ensaio de verificação do método: (a) sensor EA e (b) Diafragma piezométrico.

Assim como ocorreu para o ensaio de demonstração do método, em relação ao sensor EA, nota-se na Figura 29 que o índice de dano obtido para o rebolo na condição dressado é 244 % menor que o índice de dano obtido para a condição de rebolo não dressado. Já para o diafragma piezométrico o índice de dano obtido para o rebolo na condição dressado é 366 % menor que o índice de dano obtido para a condição de rebolo não dressado. Neste trabalho não foi levantado dados estatísticos de repetibilidade.

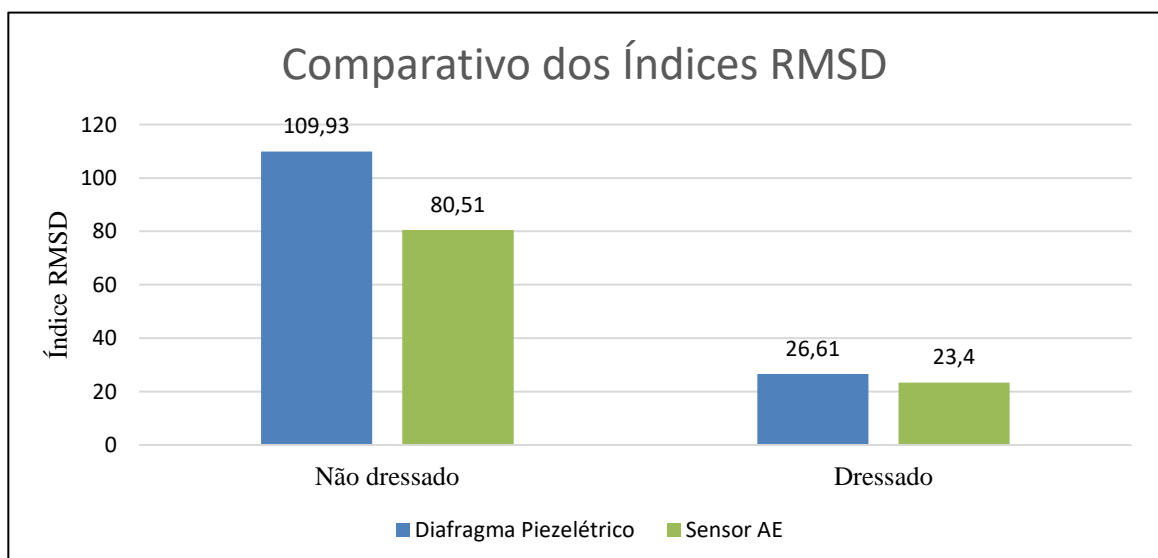


Figura 29 Índice RMSD para rebolo dressado e não dressado na verificação do método

Ainda na Figura 29, assim como foi observado para o ensaio de demonstração do método, constata-se que para a condição de rebolo não dressado, tanto em relação ao sensor de EA quanto em relação ao diafragma piezométrico, os índices de dano se encontram muito acima de zero. Observa-se que tanto para o ensaio de demonstração do método quanto para o ensaio de verificação do método, a faixa de frequências que se estende de 182 kHz a 192 kHz selecionada para o sensor EA apresentou resultados consistentes que possibilitam classificar o rebolo como dressado e não dressado. Destaca-se ainda que a mesma análise pode ser realizada para o diafragma piezométrico ao selecionar a faixa de frequências que se estende 168 kHz a 178 kHz. Similares aos resultados obtidos por meio dos sinais captados com o sensor de EA, os resultados computados a partir dos sinais coletados por meio do diafragma piezométrico de baixo custo foram consistentes e, também, possibilita classificar o rebolo como dressado ou não dressado.

Por fim, ao comparar os valores de índice de dano obtido para a condição de rebolo dressado com os índices de dano obtidos para a condição de rebolo não dressado, observa-se uma diferença superior a 200% tanto em relação ao sensor EA quanto em relação ao diafragma piezométrico. Essa diferença pode ser observada tanto no ensaio de demonstração do método quanto no ensaio de verificação do método. Isso atesta que os resultados obtidos para o diafragma piezométrico de baixo custo são tão consistentes e robustos quanto aos resultados obtidos por meio do sensor de EA que é significativamente mais caro.

4.3 Compilação dos resultados

O método proposto nesta pesquisa requer que uma faixa de frequências que melhor caracterize as condições de corte do rebolo seja selecionada e, ainda, que uma baseline seja utilizada para efeito de comparação. Nesse caso, a baseline mais adequada tem que representar o rebolo em suas condições plenas, pronto para ser utilizado no processo de retificação sem que danos sejam ocasionados a peça. Ao logo da pesquisa, observou-se que muitas faixas de frequências não possuem relação direta com as condições de corte do rebolo. Nas Figura 30 e Figura 31 são apresentados os índices de danos obtidos por meio da métrica RMSD tanto para os dados obtidos no ensaio de demonstração do método quanto para os dados coletados no ensaio de verificação do método. Na Figura 30 são apresentados os índices de danos obtidos para o sensor de EA e na Figura 31 os índices de danos computados a partir dos sinais gerados pelo diafragma piezométrico.

Na Figura 30(a) e na Figura 31(a) são apresentados os índices de dano obtidos para faixas de frequências que não possuem relação direta com as condições de corte do rebolo. Para o sensor EA foi selecionada para exposição a faixa de frequências que se estende de 80 a 90 kHz, e para o diafragma piezométrico a faixa de frequências escolhida para exposição que se estende de 40 a 50 kHz. Observa-se que os índices RMSD apresentados nas Figura 30(a) e Figura 31(a) se

comportam de forma aleatória. Esse resultado não possibilita classificar o rebolo como dressado e não dressado. Usando essas faixas de frequências não é possível definir em que momento o rebolo se encontra com sua condição de corte restabelecida, e tão pouco permite determinar um limiar que possa ser usado para determinar o momento adequado para interromper a operação de dressagem.

Por outro lado, na Figura 30(b) e Figura 31(b) são apresentados os índices de dano obtidos para faixas de frequências que possuem relação direta com as condições de corte do rebolo. Para o sensor EA foi selecionada a faixa de frequência que se estende de 182 a 192 kHz, e para o diafragma piezelétrico a faixa de frequência que se estende de 168 a 178 kHz. Observa-se que para ambos os sensores os índices de dano apresentado nas Figura 30(b) e Figura 31(b) possuem uma tendência bem definida, e possibilita identificar claramente os valores que estão relacionados tanto com a condição de rebolo dressado quanto com a condição de rebolo não dressado. Para o primeiro passe de dressagem, nota-se ainda nas Figura 30(b) e Figura 31(b) que os índices de dano computados se encontram significativamente distante de zero, e ao longo da operação de dressagem esses índices de dano se aproximam de zero e tendem a uma estabilidade. Constata-se também que após o décimo passe de dressagem, aproximadamente 2800 mm³ de material removido da superfície de corte do rebolo, os índices de dano não sofrem grandes variações. Essa estabilidade significa que a dressagem atingiu sua finalidade, que o rebolo se encontra com sua superfície de corte uniforme e com sua agressividade restabelecida.

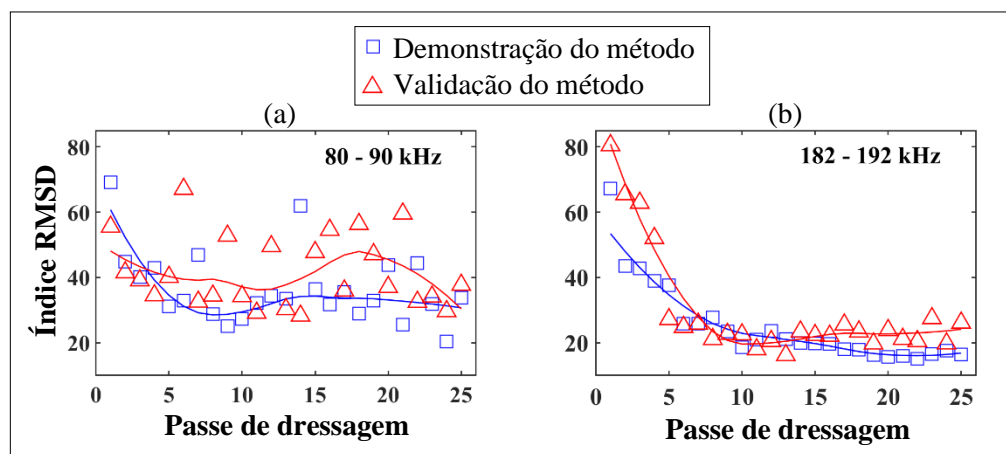


Figura 30 Índice RMSD nos ensaios definitivos para o sensor EA

A Figura 30(a) apresenta a banda de 80 a 90 kHz, banda esta que foi escolhida de forma aleatória e que não correspondeu ao método apresentado, onde é possível ver a dispersão aleatória dos dados obtidos, não podendo inferir qualquer tipo de conclusão. Já na banda 182 a 192 kHz, a resposta do RMSD mostrou a normalização do índice com a evolução das passadas, podendo assim se afirmar que entre as passadas 10 e 15 o rebolo já estaria dressado e com sua superfície de corte reestabelecida.

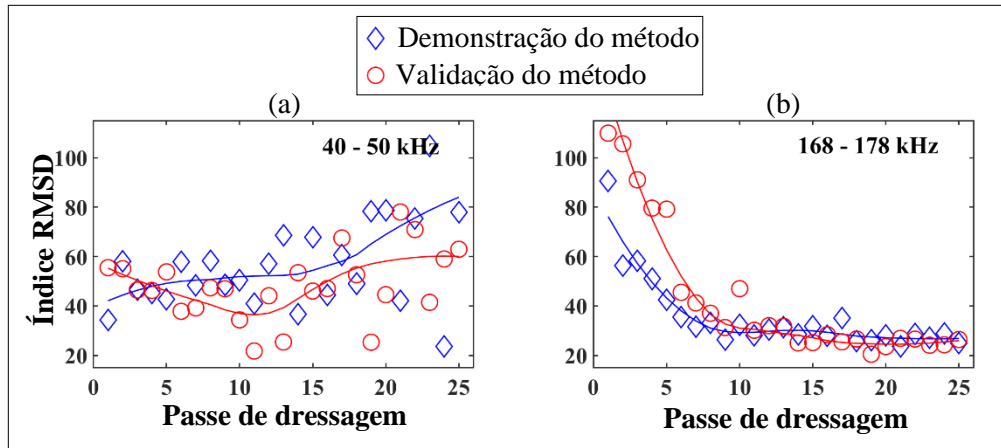


Figura 31 Índice RMSD nos ensaios definitivos para o diafragma piezolétrico PZT

Ao analisar os resultados, para ambas as condições de dressagem, pode se definir um limiar igual 30 com vista a classificar o rebolo como dressado e não dressado. Esse limiar pode ser aplicado tanto para o sensor de EA quanto para o diafragma piezolétrico. Isso significa que os resultados são consistentes e, ainda, que mesmo aplicando a metodologia em faixas de frequências distintas, o diafragma piezolétrico foi tão eficiente quanto o sensor de EA no que se diz respeito a classificação das condições de corte do rebolo ao longo da operação de dressagem.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou um novo método baseado em sensores piezelétricos e índice de dano com vista a monitorar a operação de dressagem de forma indireta, objetivando identificar o momento de transição do estado de corte do rebolo a partir de um limiar pré-determinado. Os resultados apontam que aplicando o índice RMSD em faixas de frequências que possuem relação direta com as condições de corte do rebolo é possível definir um limiar e classificá-lo como dressado e não dressado.

Em ambos os ensaios, para o sensor de EA o melhor resultado foi computado a partir da faixa de frequências que se estende de 182 a 192 kHz. Por outro lado, para o diafragma piezelétrico, o melhor resultado foi calculado na faixa de frequências que se estende de 168 a 178 kHz. Entretanto, apesar de as faixas de frequências, que apresentaram os melhores resultados, serem diferentes, o limiar definido para classificar o rebolo como dressado e não dressado atende ambos os sensores.

Os resultados demonstram a viabilidade de um novo método não invasivo que pode ser usado para otimizar a operação de dressagem de rebolos convencionais, auxiliando o operador e contribuindo, principalmente, para a otimização do processo de retificação. Conclui-se também que os resultados indicam que os sensores de EA tradicionalmente usados em aplicações industriais podem ser substituídos por diafragmas piezelétricos de baixo custo, mantendo a mesma confiabilidade na coleta de informações relacionadas ao processo. Vale ressaltar que com a verificação do método foi possível garantir a confiabilidade e robustez da metodologia desenvolvida ao longo dessa pesquisa, a qual pode ser estendida para outros tipos de rebolos, dressadores e/ou variações dos parâmetros de dressagem. Por fim, destaca-se que a técnica apresentada nesta pesquisa pode ser explorada em aplicações industriais ou de outras formas, abrindo novas possibilidades para o desenvolvimento de pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, Felipe Aparecido *et al.* Chatter Vibration Monitoring in the Surface Grinding Process through Digital Signal Processing of Acceleration Signal. **Proceedings**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ecsa-4-04927>
- ALEXANDRE, Felipe Aparecido. Monitoramento do fenômeno de queima no processo de retificação de aços por meio de sinais de vibração e análise de tempo e frequência. **e-conversion - Proposal for a Cluster of Excellence**, [S. l.], 2018.
- AMERICAN, An; STANDARD, National. An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 8–10, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/T-SU.1984.31464>
- BANERJEE, Simul; GHOSAL, Sujit; DUTTA, Tanmay. Development of a simple technique for improving the efficacy of fluid flow through the grinding zone. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 197, n. 1–3, p. 306–313, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.045>
- BARBÉ, Kurt; PINTELON, Rik; SCHOUKENS, Johan. Welch method revisited: Nonparametric power spectrum estimation via circular overlap. **IEEE Transactions on Signal Processing**, [S. l.], v. 58, n. 2, p. 553–565, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSP.2009.2031724>
- 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 resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, [S. l.], v. 57, n. 344, p. 431–437, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0366-69132011000400010>
- BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials and processes in manufacturing**. 10. ed. [S. l.]: ed. River Street, 2008. *E-book*.
- COELHO, Reginaldo Teixeira. **Estudo experimental da profundidade de dressagem de rebolos na retificação de precisão usando método do disco retificado**. 1991. [s. l.], 1991.
- DE AGUIAR, P. R.; DOTTO, F. R. L.; BIANCHI, E. C. Study of thresholds to burning in surface grinding process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 150–156, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-58782005000200007>
- DE FREITAS, Everaldo S. *et al.* Equivalent Circuit of Piezoelectric Diaphragms for Impedance-Based Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Sensors Journal**, [S. l.], v. 17, n. 17, p. 5537–5546, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2725946>
- DE LIMA, André *et al.* The use of cylindrical grinding to produce a martensitic structure on the surface of 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], v. 33, n. 1, p. 34–40, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-58782011000100005>
- DE OLIVEIRA, J. F. G. *et al.* Grinding Process Dominance by Means of the Dressing Operation. In: ATKINSON, J. *et al.* (org.). **Proceedings of the Twenty-Ninth International Matador Conference: held in Manchester 6th--7th April 1992**. London: Macmillan Education UK, 1992. p. 547–550. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-349-12433-6_72

- DE OLIVEIRA, João F. Gome.; DORNFELD, David A. Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 291–294, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62216-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62216-1)
- DERKX, J. M. *et al.* Form crush dressing of diamond grinding wheels. **CIRP Annals**, [S. l.], v. 57, n. 1, p. 349–352, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2008.03.065>
- INASAKI, I.; OKAMURA, K. Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. **CIRP Annals**, [S. l.], v. 34, n. 1, p. 277–280, 1985. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61772-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61772-7)
- JUNIOR, Pedro *et al.* Dressing tool condition monitoring through impedance-based sensors: Part 1—pzt diaphragm transducer response and emi sensing technique. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], v. 18, n. 12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18124455>
- KALPAKJIAN, SEROPE; SCHMID, Steven R. **Manufactura, ingeniería y tecnología**. 7. ed. [S. l.]: Pearson Educación, 2014. *E-book*.
- KAPHLE, Manindra. Analysis Of Acoustic Emission Data For Accurate Damage Assesment For Structural Health Monitoring. [S. l.], p. 5–21, 2012.
- KARPUSCHEWSKI, B.; WEHMEIER, M.; INASAKI, I. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 49, n. 1, p. 235–240, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62936-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62936-9)
- KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High-performance grinding-A review. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 175, n. 1–3, p. 278–284, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.010>
- KWAK, Jae Seob; HA, Man Kyung. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 147, n. 1, p. 65–71, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.016>
- LEE, D. E. *et al.* Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S. l.], v. 46, n. 2, p. 176–188, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001>
- LIN, Shen Yung; LIU, Y. C.; HUANG, C. W. An Investigation of Surface Grinding Characteristics for Titanium Alloy with CBN Wheel. **Key Engineering Materials**, [S. l.], v. 364–366, p. 237–242, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.364-366.237>. Acesso em: 20 set. 2021.
- LOFRANO DOTTO, Fabio Romano *et al.* In-Dressing Acoustic Map by Low-Cost Piezoelectric Transducer. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S. l.], v. 67, n. 8, p. 6927–6936, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2939958>
- LOPES, Barbara Guedes *et al.* Study on the effect of the temperature in Acoustic Emission Sensor by the Pencil Lead Break Test. *In: 2018, 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. : IEEE, 2018. p. 1226–1229. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627213>

- 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 and Technology**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 631–636, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0317>
- LOPES, Wenderson Nascimento. **Investigação do conteúdo harmônico do sinal de emissão acústica na dressagem de rebolos de óxido de alumínio com dressador de ponta única**. 2018. - UNESP, [S. l.], 2018.
- MALKIN, Stephen; GUO, Changsheng. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2^a ed. New York: Industrial Press Inc, 2008. *E-book*.
- MANCIO, V. G.; SELBITTO, M. A. Sistemas Flexíveis De Manufatura: Definições E Quadro De Trabalho Para Futura Pesquisa. **Revista Gestão Inovação e Tecnologias**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 3760–3773, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.7198/geintec.v7.i2.709>
- MARINESCU, Ioan D. *et al.* Handbook of machining with grinding wheels. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**, [S. l.], p. 1–598, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/b19462>
- MARTINS, Cesar. Classificação de níveis de desgaste de dressadores de ponta única utilizando sinais de emissão acústica e redes neurais artificiais. **Aleph**, [S. l.], 2013.
- MARTINS, Cesar H. R. *et al.* **Neural networks models for wear patterns recognition of single-point dresser**. [S. l.]: IFAC, 2013. v. 46*E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00222>
- MARTINS, Cesar H. R. *et al.* Tool condition monitoring of single-point dresser using acoustic emission and neural networks models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S. l.], v. 63, n. 3, p. 667–679, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2281576>
- MÁTHIS, Kristián; CHMELÍK, František. Exploring plastic deformation of metallic materials by the acoustic emission technique. **Acoustic Emission**, [S. l.], n. 1, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/31660>
- MCMILLAN, Margaret S.; RODRIK, Dani; KENNEDY, John F. NBER working paper series globalization, structural change and productivity growth Globalization, Structural Change and Productivity Growth. **NBER Working Paper**, [S. l.], 2011. Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w17143>
- MENDES, AAA. Estudo De Processo De Retificação Aplicado À Recuperação De Placas De Molde De Máquinas De Lingotamento Contínuo De. [S. l.], 2011. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_5015_Dissertacao - Avelar - completa_rev6.pdf
- MIRANDA, H. I. *et al.* Monitoring single-point dressers using fuzzy models. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 33, p. 281–286, 2015. Disponível em: <https://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**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 627–640, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0191-6>

- NAKAI, M. E. *et al.* Neural tool condition estimation in the grinding of advanced ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 62–68, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7040629>
- NAKAYAMA, Kazuo *et al.* Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Face by the Grinding of Steel Ball. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 29, n. 1, p. 227–231, 1980. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61327-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61327-4)
- NGUYEN, Anh Tuan; BUTLER, David Lee. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], v. 208, n. 1–3, p. 14–23, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.128>
- PATNAIK DURGUMAHANTI, U. S.; SINGH, Vijayender; VENKATESWARA RAO, P. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [S. l.], v. 50, n. 3, p. 231–240, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004>
- RASCALHA, Alessandro; BRANDÃO, Lincoln Cardoso; FILHO, Sergio Luiz Moni Ribeiro. Optimization of the dressing operation using load cells and the Taguchi method in the centerless grinding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 67, n. 5–8, p. 1103–1112, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4551-z>
- SALEH, Tanveer; BISHWAS, Indraneel; RAHMAN, Mustafizur. Efficient dressing of the wheel in ELID grinding by controllable voltage with force feed back. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 46, n. 1–4, p. 123–130, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2076-x>
- SCRUBY, C. B. An introduction to acoustic emission. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, [S. l.], v. 20, n. 8, p. 946–953, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/20/8/001>
- SILVA DE FREITAS, Everaldo; GUIMARÃES BAPTISTA, Fabricio. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators, A: Physical**, [S. l.], v. 238, p. 220–228, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031>
- VENKATA RAO, K.; MURTHY, B. S. N.; MOHAN RAO, N. Prediction of cutting tool wear, surface roughness and vibration of work piece in boring of AISI 316 steel with artificial neural network. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, [S. l.], v. 51, n. 1, p. 63–70, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.01.024>
- WEGENER, K. *et al.* Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.003>
- WELCH, P. D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra. **IEEE Transactions on audio and electroacoustics**, [S. l.], n. 2, p. 70–73, 1976.
- WILLIAN D. CALLISTER, JR.; RETHWISCH, David G. **Ciência dos materiais - Callister - 8ª Ed - Livro - Português**. [S. l.: s. n.]. *E-book*.

XUE, Li; NAGHDY, Fazell; COOK, Chris. Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding. **Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology**, [S. l.], v. 2, n. December, p. 1296–1299, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2002.1189364>

YANG, Zhensheng; YU, Zhonghua. Experimental study of burn classification and prediction using indirect method in surface grinding of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], v. 68, n. 9–12, p. 2439–2449, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4882-4>

ZHANG, Xin *et al.* An analysis of the simulated acoustic emission sources with different propagation distances, types and depths for rail defect detection. **Applied Acoustics**, [S. l.], v. 86, p. 80–88, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.06.004>

Apêndice

PUBLICAÇÕES OBTIDAS

Trabalhos Completos Publicados em Anais de Congressos

- **Erick Luiz Vieira Ruas - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP);** Paulo Roberto de Aguiar - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP); Wenderson Nascimento Lopes - Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal do Pará; Thiago Glisoi Lopes - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP); Cristiano Soares Junior - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP). **MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM POR MEIO DE EMISSÃO ACÚSTICA E ÍNDICE DE DANO.** 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF).
- Thiago Glisoi Lopes - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP); Zaqueu Ricardo Fernando Antonio - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP); Cristiano Soares Junior - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP); **Erick Luiz Vieira Ruas - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP);** Paulo Roberto de Aguiar - Departamento de Engenharia Elétrica, (UNESP). **A PRIMEIRA CAMADA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D,** In: 2020, Bauru, Anais do XXVII SIMPEP