



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Diafragma Piezelétrico e Processamento Digital de Sinais na
Estimação da Rugosidade de Componentes Cerâmicos no
Processo de Retificação Plana**

Martin Antonio Aulestia Viera

Bauru

2021



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Diafragma Piezelétrico e Processamento Digital de Sinais na
Estimação da Rugosidade de Componentes Cerâmicos no
Processo de Retificação Plana”

MARTIN ANTONIO AULESTIA VIERA

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Bauru,
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica.

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

**Coorientador: Prof. Dr. Rosemar Batista
da Silva**

Bauru

2021

Aulestia Viera, Martin Antonio.

Diafragma Piezelétrico e Processamento Digital de Sinais na Estimação da Rugosidade de Componentes Cerâmicos no Processo de Retificação Plana, 2021

80 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Processo de retificação. 2. monitoramento do processo de retificação. 3. estimação da rugosidade. 4. transdutor piezelétrico em processo de usinagem. 5. processamento digital de sinais. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenha. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARTIN ANTONIO AULESTIA VIERA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 02 dias do mês de julho do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de MARTIN ANTONIO AULESTIA VIERA, intitulada **DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS NA ESTIMAÇÃO DA RUGOSIDADE DE COMPONENTES CERÂMICOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PLANA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. RODRIGO DE SOUZA RUZZI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Centro Universitário Ingá - UNINGÁ, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS, Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pelo doutorando 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

De modo especial, dedico este trabalho aos meus pais, Angel e Patricia, que sempre me apoiaram e me motivaram para alcançar meus objetivos, às minhas avós, Amanda e Marina, e ao meu amigo Felipe, que de onde estiverem sei que estão torcendo pelo meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Roberto de Aguiar, pela orientação nesse trabalho e pelos seis anos de dedicação e paciência, que, certamente, me tornaram um melhor acadêmico e ser humano.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Rosemar Batista da Silva da Universidade Federal de Uberlândia, pelo aprendizado e pelas valiosas contribuições na área de engenharia mecânica.

Ao apoio dado pelos meus pais, Angel e Patricia, e minha irmã, Patricia. Agradeço o apoio de todos os meus familiares.

Ao apoio da minha namorada, Isabella.

Aos Professores Eduardo Bianchi, André Luiz Andreoli, José Alfredo Ulson e Fabricio Guimarães Baptista pelos trabalhos realizados em conjunto e por toda a ajuda fornecida durante esse período.

Aos meus amigos de laboratório Felipe Aparecido Alexandre, Carine Távora, Wenderson Nascimento Lopes, Pedro Oliveira, Ana Balarin, Cristiano Soares, Zaqueu Antônio, Thiago Glisoi, Fábio Dotto, Breno Ortega e Bruno Albuquerque.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e apoiaram essa etapa na minha vida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de mestrado (Processo nº 2018/07292-0) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

“Somewhere, something incredible is waiting to be known.”

Carl Sagan

RESUMO

O processo de retificação é amplamente utilizado no acabamento superficial de cerâmicas e corresponde a uma das últimas etapas no processo de fabricação. Deste modo, é imprescindível um monitoramento confiável deste processo. Assim, um sistema de monitoramento em tempo real é necessário para auxiliar o operador na tomada de decisão de modo a otimizar e reduzir os custos do processo. O objetivo do presente trabalho é propor uma nova técnica para estimar a rugosidade média aritmética de peças de cerâmica alumina no processo de retificação plana usando diafragma piezelétrico e técnicas avançadas de processamento digital de sinais. No decorrer dos ensaios foram coletados os sinais do diafragma piezelétrico, sensor de emissão acústica e potência. Em outros estudos, o sensor de emissão acústica de baixo custo (diafragma piezelétrico) foi utilizado em sistemas de monitoramento da integridade estrutural e no monitoramento da integridade da ferramenta de corte durante o processo de retificação de metais com resultados satisfatórios. Assim, o presente trabalho apresenta uma nova aplicação do diafragma piezelétrico no monitoramento do processo de retificação de componentes cerâmicos por meio do processamento digital de sinais no domínio do tempo e da frequência, visando-se a obtenção de um sistema de monitoramento de baixo custo. Um sensor comercial de emissão acústica, já consolidado em sistemas de monitoramento de processos de usinagem, foi utilizado para efeitos de comparação. O sensor de corrente, responsável pela medida indireta da potência de retificação, foi usado para dar suporte aos fenômenos do processo. A combinação das informações dos sensores também foi realizada, visando-se extrair características para a estimação da rugosidade média aritmética. Como resultado foi possível obter uma técnica não destrutiva para a estimação da rugosidade de peças cerâmicas retificadas por meio de diafragma piezelétrico de baixo custo e fusão dos referidos sensores, e com características que proporcionem confiabilidade e robustez e, conseqüentemente, contribuindo para o monitoramento, automação, controle e otimização do processo.

Palavras chave: Processo de retificação; monitoramento do processo de retificação; estimação da rugosidade; transdutor piezelétrico em processo de usinagem; processamento digital de sinais.

ABSTRACT

The grinding process is widely used in the surface finishing of ceramics and corresponds to one of the last steps in the manufacturing process. Thus, reliable monitoring of this process is essential. Therefore, a real-time monitoring system is necessary to assist the operator in decision making in order to optimize and reduce the costs of the process. This work aims to propose a new technique to estimate the roughness of ceramic alumina workpieces in the surface grinding process using piezoelectric diaphragms and advanced digital signal processing techniques. During the tests, the signals from the piezoelectric diaphragm, acoustic emission sensor, and power were collected. The comparison of the results of the piezoelectric diaphragm with those of the acoustic emission sensor was performed, which is already consolidated in systems for monitoring machining processes. The combination of information from the sensors was also performed, aiming to extract characteristics for the roughness estimation. As a result, it was possible to obtain a non-destructive technique for estimating the roughness of ground ceramic workpieces by means of a low-cost piezoelectric diaphragm and fusion of the referred sensors, and with characteristics that provide reliability and robustness and, consequently, contributing to the monitoring, automation, control, and optimization of the process.

Keywords: Grinding process; monitoring of the grinding process; roughness estimation; piezoelectric transducer in machining process; digital signal processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O processo de retificação plana.....	25
Figura 2. Elementos básicos do processo de retificação.	25
Figura 3. Parâmetros de retificação.	27
Figura 4. Influência do tempo de contato na força tangencial em um grão abrasivo para uma velocidade da peça baixa (a) e elevada (b).....	28
Figura 5. Ilustração da textura da superfície.....	30
Figura 6. Classificação de sensores com base na profundidade de corte e atividade acústica.	33
Figura 7. Representação do efeito piezelétrico (a) sem estímulo, (b) direto e (c) reverso.	36
Figura 8. Ilustração esquemática do diafragma piezelétrico Murata 7BB-35-3 utilizado nos testes.	37
Figura 9. Configuração experimental do banco de ensaios.	42
Figura 10. Esquemático das atividades experimentais.	43
Figura 11. Sensores utilizados neste estudo: a) sensor de EA convencional e b) diafragma PZT de baixo-custo.	44
Figura 12. Banco de ensaios e aquisição de dados.	45
Figura 13. Esquemático do processamento de sinais do domínio do tempo e da frequência.	47
Figura 14. Exemplos de sobreposição de uma figura janelada.....	48
Figura 15. Esquemático do processamento de sinais no domínio tempo-frequência....	50
Figura 16. Rugosidade.....	51
Figura 17. Microscopia confocal: (a) 25 μm ; (b) 35 μm ; (c) 50 μm ; (d) 105 μm ; (e) 150 μm ; (f) 210 μm e (g) 350 μm	53
Figura 18. RMS não filtrado.....	54
Figura 19. Potência de retificação.	55
Figura 20. DPO não filtrado.	55
Figura 21. Espectro de frequência e banda de frequência do sensor de EA.....	56
Figura 22. Espectro de frequência e banda de frequência do sensor PZT.....	57
Figura 23. RMS filtrado.	58
Figura 24. DPO filtrado.	59

Figura 25. Correlação entre o diafragma PZT e o sensor de EA.....	59
Figura 26. Correlação entre (a) RMS e rugosidade e (b) DPO e rugosidade para ambos os sensores.	60
Figura 27. Espectrogramas da transformada de tempo curto de Fourier (STFT).....	62
Figura 28. Taxa de potência (ROP) referente ao sensor de (a) emissão acústica (EA) e (b) diafragma piezelétrico (PZT).	65
Figura 29. Magnitude quadrática de coerência (MSC) entre o sensor de EA e o diafragma PZT para três condições de corte.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros de retificação e especificações do fluído de lubrificação.	43
Tabela 2. Especificações do fluído de lubrificação.	43

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFAR	Constante de falso alarme
DAQ	Dispositivo de aquisição de dados
DFT	Transformada discreta de Fourier
DPO	Desvio de potência
EA	Emissão acústica
FFT	Transformada rápida de Fourier
MQL	Retificação por meio da aplicação de mínima quantidade de lubrificante.
MSC	Magnitude quadrática de coerência
PLB	Teste da quebra do grafite
PW	Sinal de potência
PZT	Titanato zirconato de chumbo
RMS	Valor médio quadrático
RNA	Rede neural artificial
ROP	Taxa de potência
SHM	Monitoramento de integridade estrutural
STFT	Transformada de tempo-curto de Fourier

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
D_i	<i>Deslocamento elétrico</i>	C / m^2
E_k	<i>Campo elétrico</i>	N / C
F_s	<i>Taxa de amostragem</i>	Hz
$P_{xx}(f)$	<i>Densidade espectral de potência cruzada</i>	W / Hz
$P_{xy}(f)$	<i>Densidade espectral de potência</i>	W / Hz
R_a	<i>Rugosidade média aritmética</i>	μm
S_{ij}	<i>Deformação mecânica</i>	<i>Adimensional</i>
T_{kl}	<i>Componente de tração</i>	N
T_s	<i>Período de amostragem</i>	s
ε_{ik}^T	<i>Permissividade dielétrica</i>	F / m
$h(u)$	<i>Função de janela temporal</i>	Hz
heq	<i>Espessura equivalente de corte</i>	μm
$Max(PW)$	<i>Valor máximo de potência</i>	W
N	<i>Tamanho da janela</i>	<i>Amostras</i>
$Q`w$	<i>Taxa específica de remoção de material</i>	mm^2 / s
Qw	<i>Taxa de remoção de material</i>	mm^3 / s
R	<i>Coeficiente de determinação</i>	<i>Adimensional</i>
T	<i>Período</i>	s
V_s	<i>Velocidade de corte</i>	m / s
V_w	<i>Velocidade da peça</i>	mm / s
a	<i>Profundidade de corte</i>	μm
f	<i>Frequência</i>	Hz
t	<i>Tempo</i>	s
$x[n]$	<i>Sinal discreto</i>	V
ΔF	<i>Resolução na frequência</i>	Hz
Δt	<i>Resolução no tempo</i>	s
$\sigma(EA)$	<i>Desvio padrão do sinal de EA</i>	<i>Adimensional</i>
$\sigma(PZT)$	<i>Desvio padrão do sinal PZT</i>	<i>Adimensional</i>
ω	<i>Frequência angular</i>	rad / s

Símbolo	Descrição	Unidade
d_{kij}	<i>Constante piezelétrica</i>	m / V
m	<i>Coeficiente da janela da STFT</i>	<i>Adimensional</i>
SiC	<i>Carboneto de silício</i>	<i>Adimensional</i>
Al_2O_3	<i>Alumina</i>	<i>Adimensional</i>

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	18
1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	18
1.2. OBJETIVO	21
1.3. PUBLICAÇÕES OBTIDAS	21
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1. CERÂMICAS AVANÇADAS.....	23
2.2. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA	24
2.3. PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO	26
2.3.1. Velocidade de Corte (V_s) e Velocidade da Peça (V_w).....	27
2.3.2. Profundidade de Corte (a)	28
2.3.3. Taxa de Remoção de Material (Q_w).....	28
2.3.4. Espessura Equivalente de Corte (heq).....	29
2.4. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO ...	29
2.4.1. Monitoramento Direto	30
2.4.2. Monitoramento Indireto	32
2.4.3. Diafragma Piezelétrico	35
2.5. AQUISIÇÃO DE DADOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	37
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL.....	42
3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS	44
3.3. AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DAS PEÇAS	46
3.4. PROCESSAMENTO DE SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA	46

3.5. PROCESSAMENTO DE SINAIS NO DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA	48
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA PEÇA	51
4.2. RESULTADOS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA	54
4.3. RESULTADOS NO DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA	61
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS	69

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os processos de manufatura ocupam um lugar importante na economia global. Nos últimos anos, os esforços internacionais concentraram-se no estudo da eficiência dos processos e na utilização de recursos. Os resultados auxiliam no entendimento dos processos e assim possibilitam a melhora do seu desempenho, da redução dos custos de fabricação e o menor impacto ambiental (WANG; YANG, 2020). A usinagem de precisão consiste no uso de peças com tolerâncias geométricas e dimensionais controladas e elevado acabamento superficial. Simultaneamente, o processo deve fornecer produção máxima a um custo mínimo (TAO et al., 2020).

A usinagem por abrasão é considerada um processo consolidado, especialmente no processamento de materiais complexos em diferentes fases, desde a sua remoção até o acabamento. A retificação é o processo mais desenvolvido e conhecido nesta categoria, onde a remoção do material é feita por uma infinidade de grãos abrasivos posicionados aleatoriamente e mantidos juntos por meio de um ligante. É um processo complexo e dinâmico comumente utilizado nas indústrias, onde produtos com tolerâncias mínimas e alta qualidade superficial são necessários (HUANG et al., 2021; PAN et al., 2021).

Existe um crescente interesse no estudo e na aplicação do processo de retificação plana tangencial, devido ao fato desse processo ser o mais utilizado no acabamento de peças usinadas com melhor qualidade de superfície e tolerâncias mínimas. O processo de retificação plana tangencial está situado na fase final da cadeia de fabricação, razão pela qual oferece um alto valor agregado ao produto. Os danos causados na peça são de alto custo, uma vez que todos os processos anteriores, além da própria retificação, são perdidos quando uma peça é danificada nesta fase. A necessidade de redução efetiva de custos, além do aumento da qualidade das peças produzidas, requer a implementação de sistemas mais inteligentes em ambientes industriais. Portanto, o controle dos danos reais no processo de retificação plana tangencial é de grande interesse para todas as indústrias dependentes desse processo (FERREIRA et al., 2020; HÜBNER; DUARTE; DA SILVA, 2020; LOPES et al., 2021a).

O interesse pela retificação plana tangencial de cerâmicas avançadas tem crescido substancialmente com o uso generalizado de componentes cerâmicos em várias aplicações de engenharia, como ferramentas de corte, válvulas de automóveis, elementos

de vedação, rolamentos, pistões, rotores etc. Os componentes cerâmicos oferecem muitas vantagens sobre as peças metálicas em termos de melhor desempenho e melhor eficiência. No entanto, as características favoráveis são acompanhadas por dificuldades associadas à usinagem, principalmente à retificação, devido à alta dureza, fragilidade e rigidez dessas cerâmicas avançadas (GUO; LIU; LI, 2020; KHODAI et al., 2021).

Na fabricação de componentes cerâmicos, a retificação é a fase mais significativa do custo total, chegando a compreender até 80%. Para atender à crescente demanda por cerâmicas de alto desempenho, são necessários processos de retificação econômicos. Além do custo de retificação, um processo confiável é relevante para manter a integridade superficial requerida (CHOUDHARY; PAUL, 2020). Um problema crítico que precisa ser abordado é como monitorar o processo de retificação de modo a aumentar a economia no processo de usinagem de cerâmica. O monitoramento do processo de retificação plana tangencial serve para detectar problemas, aprimorar o controle do processo e, por último, contribuir para o estabelecimento de parâmetros necessários para determinar as melhores condições de usinagem (KHAZI et al., 2020).

Os sistemas de monitoramento in situ que podem ser usados para caracterizar, controlar e melhorar a usinagem das peças são, portanto, necessários para atender às crescentes demandas de precisão e qualidade. O monitoramento baseado em sensores fornece informações valiosas sobre o processo de fabricação que podem servir para o duplo propósito de controle de processo e monitoramento da qualidade e, em última instância, serão parte de qualquer ambiente de fabricação totalmente automatizado (TÁVORA et al., 2021).

Os métodos diretos e indiretos para o monitoramento do processo de retificação plana tangencial são usados para avaliar o desgaste da superfície da peça durante a retificação. Os métodos diretos avaliam diretamente a condição da peça usando algum sensor óptico e exigem a interrupção das operações de usinagem. Os métodos indiretos, por outro lado, dependem de sinais advindos de sensores, como força (dinamômetro), energia (potência), vibração (acelerômetro) e emissão acústica (EA) que se correlacionam com as condições do processo. Esse monitoramento é mais comum porque não é necessária nenhuma interrupção no processo de manufatura (MAHATA; SHAKYA; BABU, 2021).

No que diz respeito a qualidade da superfície das peças, a rugosidade é um dos parâmetros mais utilizados para descrevê-la. A qualidade da superfície gerada pela retificação determina muitas características da peça de trabalho, tais como as tolerâncias

mínimas, a eficácia da lubrificação, a vida do componente, entre outros. Uma superfície típica é caracterizada por ranhuras uniformes ao longo da superfície da peça. No entanto, muitas outras características podem ser encontradas, tais como fissuras produzidas por impacto térmico, material residual e trincas produzidas pela fratura do grão abrasivo (GUO et al., 2021).

Em relação aos sensores empregados no monitoramento do processo de retificação plana tangencial, o sensor de emissão acústica tem sido um dos mais usados. O uso da EA é reconhecido como uma das técnicas mais promissoras para o monitoramento do processo de retificação. A principal vantagem de usar a EA para monitorar o processo de retificação é que a faixa de frequência do sinal é muito maior que a faixa de frequências das vibrações e dos ruídos do ambiente (DOU et al., 2020; HÜBNER et al., 2020).

Por outro lado, os diafragmas piezelétricos têm sido empregados no monitoramento do processo de retificação plana tangencial, como nos trabalhos de ALEXANDRE et al., (2020) e LOPES et al., (2021b). Esses transdutores são componentes de baixo custo, compactos e leves fabricados por várias empresas e amplamente utilizados em uma variedade de dispositivos eletrônicos. Os diafragmas piezelétricos são o elemento principal de componentes acústicos, informalmente conhecidos como "buzzers". A principal aplicação desses componentes acústicos é a geração de som, como alarmes sonoros, toques telefônicos e alto falantes. Os materiais piezelétricos são cada vez mais populares e podem ser utilizados como sensores e atuadores (LUCAS et al., 2020).

Desta forma, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma técnica inovadora para a estimativa da rugosidade de peças de cerâmica alumina no processo de retificação plana tangencial por meio de diafragmas piezelétricos e ferramentas de processamento digital de sinais. Os sensores de emissão acústica e corrente elétrica foram usados para verificação dos resultados e suporte das correlações obtidas com a rugosidade, bem como nas extrações de novas características a partir da fusão das informações dos sensores empregados neste trabalho.

Uma das principais motivações do presente trabalho, além do estudo realizado em Viera et al., (2017), é o trabalho realizado por Ribeiro et al., (2017), no qual se fez o monitoramento da condição da superfície da peça de aço com ambos os sensores, diafragma piezelétrico e emissão acústica na forma passiva. De acordo com os autores, o estudo foi pioneiro na aplicação do diafragma piezelétrico na forma passiva no processo

de retificação, possibilitando uma nova abordagem com sensor de baixo custo, além da obtenção de resultados expressivos a partir da seleção de bandas de frequências dos sinais.

1.2. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo principal desenvolver uma técnica inovadora de estimação da rugosidade de peças de cerâmica alumina, no processo de retificação plana tangencial, por meio de diafragmas piezelétricos e ferramentas de processamento digital de sinais. Como objetivo secundário, estudou-se a viabilidade da aplicação do diafragma piezelétrico como sensor passivo de emissão acústica. Um sensor de emissão acústica, tradicional no monitoramento dos processos de usinagem, foi empregado para efeitos de comparação, e o sensor de corrente elétrica, responsável pela medida indireta da potência de corte, foi usado para dar suporte aos fenômenos do processo e correlações obtidas com a rugosidade. Os sinais foram coletados durante o processo de retificação plana e analisados no domínio do tempo, frequência e tempo-frequência. Os sinais do sensor piezelétrico de baixo custo foram comparados aos sinais do sensor de emissão acústica comercial. As estatísticas calculadas foram correlacionadas com o resultado da avaliação da superfície das peças usinadas.

1.3. PUBLICAÇÕES OBTIDAS

A seguir são apresentados os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Análise e Processamento de Sinais (LADAPS) da UNESP – Bauru, que estão diretamente relacionados a técnica proposta nesse trabalho.

- **VIERA, MARTIN A. AULESTIA; GOTZ, REINALDO; DE AGUIAR, PAULO R.; ALEXANDRE, FELIPE A.; FERNANDEZ, BRENO O.; OLIVEIRA JUNIOR, PEDRO.** A Low-Cost Acoustic Emission Sensor based on Piezoelectric Diaphragm. *IEEE Sensors Journal*, v. 11 (16), p. 9377-9384, 2020.
- **VIERA, MARTIN A. AULESTIA; DE AGUIAR, PAULO R.; JUNIOR, PEDRO O. C.; DA SILVA, ROSEMAR B.; JACKSON, MARK; ALEXANDRE, FELIPE A.; BIANCHI, EDUARDO.** Low-cost piezoelectric transducer for ceramic grinding monitoring. *IEEE Sensors Journal*, v. 19 (17), p. 7605-7612, 2019.

- **AULESTIA VIERA, MARTIN A.**; AGUIAR, PAULO R.; OLIVEIRA JUNIOR, PEDRO; ALEXANDRE, FELIPE A.; LOPES, WENDERSON N.; BIANCHI, EDUARDO C.; DA SILVA, ROSEMAR BATISTA; D`ADDONA, DORIANA; ANDREOLI, ANDRE. A Time-Frequency Acoustic Emission-Based Technique to Assess Workpiece Surface Quality in Ceramic Grinding with PZT Transducer. SENSORS, v. 19, p. 3913, 2019.

- **AULESTIA VIERA, M A**; ALEXANDRE, F A; AGUIAR, P R; SILVA, R B; BIANCHI, E C. Correlation between surface roughness and AE signals in ceramic grinding based on spectral analysis. MATEC WEB OF CONFERENCES, v. 249, p. 03003, 2018.

- **VIERA, MARTIN**; ALEXANDRE, FELIPE; LOPES, WENDERSON; AGUIAR, PAULO; DA SILVA, ROSEMAR; D'ADDONA, DORIANA; ANDREOLI, ANDRE; BIANCHI, EDUARDO. A contribution to the monitoring of ceramic surface quality using a low-cost piezoelectric transducer in the grinding operation. In: 5th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 2018, Sciforum.net. Proceedings of 5th International Electronic Conference on Sensors and Applications. Basel: MDPI, 2018. p. 5733.

- **AULESTIA, MARTIN**; OLIVEIRA, PEDRO; ALEXANDRE, FELIPE; TAVORA, CARINE; AGUIAR, PAULO; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. Análise tempo-frequência de sinais de Emissão Acústica no monitoramento do processo de retificação de cerâmicas avançadas. In: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018, Salvador. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre temas pertinentes ao trabalho. O processo de retificação, bem como, seus principais parâmetros são apresentados. Em seguida são apresentados os testes comumente utilizados para avaliação da qualidade superficial da peça. O transdutor piezelétrico de baixo custo (buzzer) é estudado quanto a suas propriedades e aplicações no monitoramento de processos de manufatura. Por fim, o processamento de sinais e as estatísticas utilizadas são discutidas com maior profundidade.

2.1. CERÂMICAS AVANÇADAS

As cerâmicas avançadas, como o carboneto de silício (SiC) e a alumina (Al_2O_3), estão sendo cada vez mais usadas em várias aplicações de engenharia, como válvulas, rolamentos, rotores, pistões e outras aplicações, onde é necessária uma tolerância dimensional estreita. Os componentes cerâmicos oferecem muitas vantagens em relação às contrapartes metálicas em termos de melhor desempenho e melhor eficiência (AGARWAL; RAO, 2013). As vantagens da cerâmica avançada sobre outros materiais incluem alto ponto de fusão, baixa densidade, boa resistência a choques térmicos, resistência a reações de oxidação, alta dureza, resistência a temperaturas elevadas, estabilidade química, baixa condutividade térmica e elétrica, baixo atrito e alta resistência ao desgaste (DAMBATTA et al., 2017).

O processo de fabricação de componentes cerâmicos consiste essencialmente na compactação da matéria prima, seguida da usinagem a verde, sinterização e acabamento por um processo de usinagem abrasiva. Esta última etapa de acabamento envolve retificação, lapidação e polimento com ferramentas de corte diamantadas (BIANCHI; AGUIAR, 2001). Segundo Ramesh et al., (2001), durante a sinterização, ocorre o encolhimento do material, o que torna necessária a usinagem da cerâmica para obter a forma e precisão necessária. As cerâmicas são geralmente divididas em dois grupos principais, cerâmicas de óxido e de não-óxido. Os átomos presentes, a sua ligação e a estrutura cristalina governam as propriedades das cerâmicas. Os cristais cerâmicos têm uma estrutura simétrica baixa em comparação com a estrutura altamente simétrica dos metais.

A utilização de cerâmicas avançadas em processos de usinagem é relatada em inúmeros trabalhos. Em Do Nascimento et al., (2016) foi efetuado o estudo da viabilidade

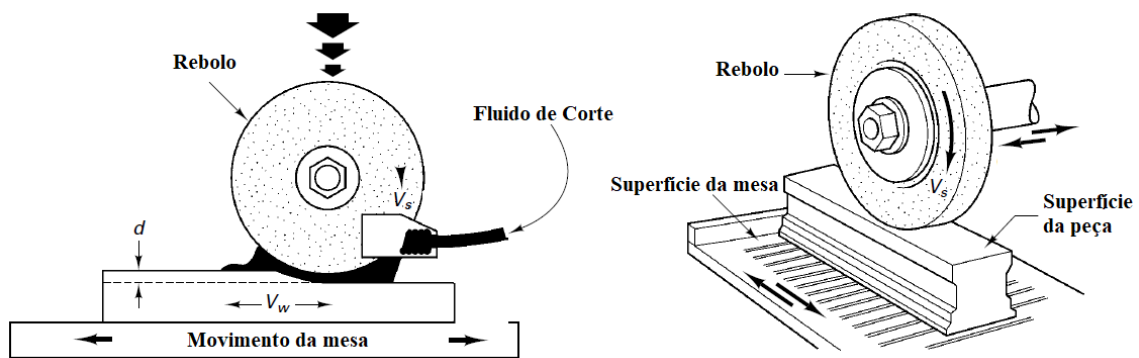
do processo de retificação de cerâmica por meio da aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Em total foram realizados 45 ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizando 3 velocidades de mergulho e 5 tipos de fluido de lubrificação, incluindo fluido convencional. Diferentes concentrações de água e óleo foram testadas. Como resultado, a técnica MQL 1:1 (óleo/água) apresentou resultados próximos de rugosidade superficial aos apresentados pela retificação com fluido convencional, já os ensaios efetuados com a técnica MQL 1:5 apresentaram coeficientes de erro maiores. Com base nos resultados, o autor conclui que o fluido de lubrificação convencional pode ser substituído pela mistura óleo-água 1:1 ou 1:3. Em Yin; Huang, (2004) foram estudados os efeitos do processo de retificação em diversos corpos de prova. Peças de cerâmica alumina, carboneto de silício, nitreto de silício e zircona foram retificadas por meio de um rebolo de diamante a diferentes velocidades de corte. A influência da velocidade de corte na rugosidade superficial, força de corte e remoção de material foi estudada para cada corpo de prova. Os resultados demonstraram que a velocidades de corte elevadas, as forças de corte e rugosidade superficial diminuiram para todos os corpos de prova. Outros processos de usinagem de cerâmicas avançadas podem ser encontrados na literatura específica (GAO; WANG; WU, 2018; HAO et al., 2018; PAWAR; KUMAR; BALLAV, 2018).

2.2. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICA

Retificação é o nome coletivo comum para os processos de usinagem que utilizam partículas abrasivas duras como meio de corte. Enquanto nos processos de corte o número de arestas de corte é pequeno e o tamanho das arestas de corte é bem definido, na retificação as partículas abrasivas são relativamente grandes em número e posicionadas de forma aleatória (JAHANMIR; RAMULU; KOSHY, 1998; KING; HAHN, 1987). O processo de retificação plana é ilustrado na Figura 1.

Segundo King; Hahn, (1987), todos os processos de retificação se comportam de forma semelhante. Existem dois fatores presentes em todo processo de retificação, o desgaste do rebolo e a remoção de material da superfície da peça. A taxa de remoção do material e o desgaste do rebolo dependem da força de retificação.

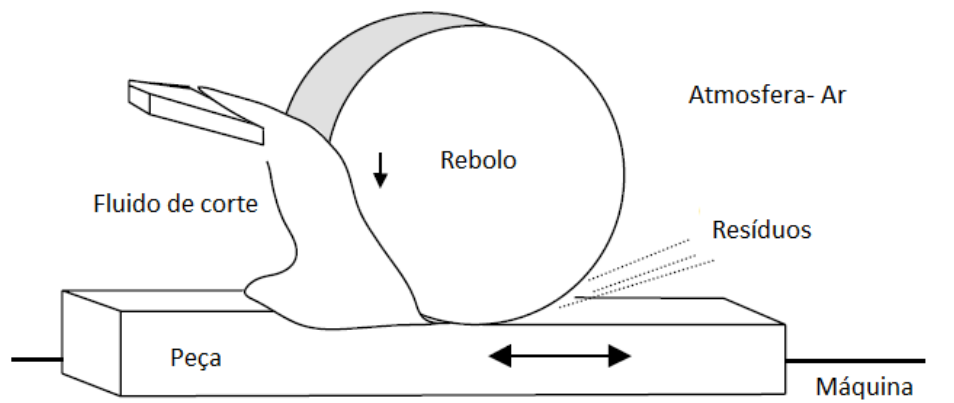
Figura 1. O processo de retificação plana.



Fonte: Black; Kohser, (2008)

O processo de retificação plana é composto por seis elementos básicos: rebolo, peça, máquina retificadora, resíduos, fluido de corte (lubrificante) e atmosfera. Adicionalmente, existe a necessidade de uma ferramenta de dressagem para aumentar o potencial de corte do rebolo. O rebolo realiza a usinagem da peça. O fluido de corte é utilizado para lubrificar o processo, reduzir a fricção entre o rebolo e a peça, prevenir queima e retirar os resíduos da região de retificação. Os resíduos do processo consistem na mistura de fluido de corte e cavaco. A atmosfera desempenha um papel importante na retificação de metais, levando a óxidos que ajudam a reduzir o atrito (MARINESCU; HITCHINER; UHLMANN, 2006). A Figura 2 ilustra os seis elementos do processo de retificação.

Figura 2. Elementos básicos do processo de retificação.



Fonte: Marinescu; Hitchiner; Uhlmann, (2006)

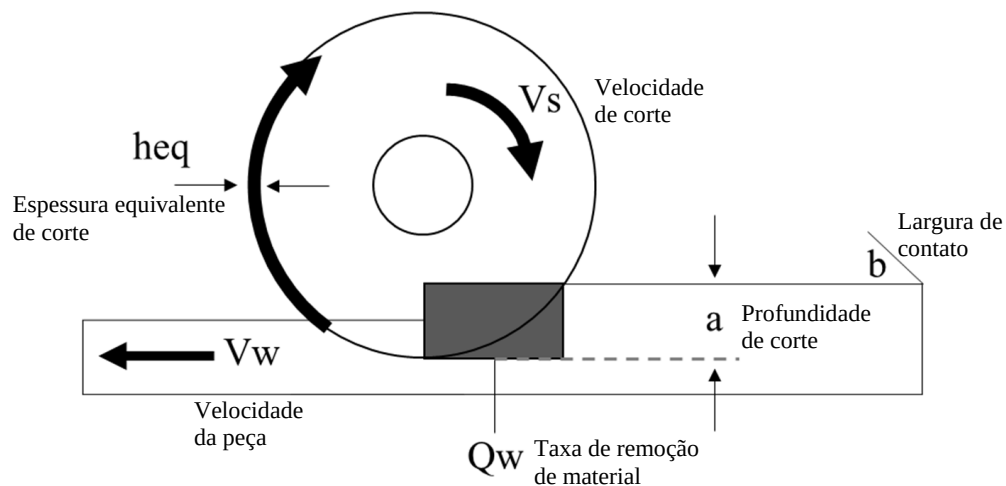
As cerâmicas avançadas permitem aos engenheiros ir além dos limites de desempenho dos metais, superando as limitações tecnológicas impostas pelos metais em diferentes campos da engenharia. No entanto, as propriedades favoráveis das cerâmicas, embora significativas do ponto de vista da aplicação, tornam o processamento e a fabricação dos componentes cerâmicos muito difíceis e, portanto, resultam em um uso muito limitado desses materiais. Para a modelagem de cerâmicas avançadas, são desenvolvidos processos de usinagem tradicionais e avançados. Um dos requisitos principais da usinagem de materiais cerâmicos é a geração de componentes sem microfissuras (AGARWAL; RAO, 2005; PACHAURY; TANDON, 2017).

A retificação é um dos processos mais importantes no acabamento de cerâmicas. Devido à sua extrema dureza e alta fragilidade, as cerâmicas avançadas sofrem frequentemente de danos, como rachaduras, trincas, camadas de pulverização e tensão residual, que podem afetar as propriedades da superfície do material e causar degradação de resistência ou mesmo falhas catastróficas dos componentes cerâmicos (ZHANG; ZENG; ZHANG, 2017). A usinagem de cerâmica utilizando ferramentas de corte de diamante é a principal técnica para alcançar dimensões especificadas e acabamento superficial aceitável. Dependendo do tamanho da peça, do material, da forma e da qualidade da superfície, a usinagem da cerâmica sintetizada pode chegar a mais de 50% dos custos de produção, em comparação com 5% a 15% para os componentes metálicos. Entre os processos de usinagem, a retificação representa mais de 80% de toda a usinagem de cerâmica (SANCHEZ et al., 2018).

2.3. PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO

A retificação eficiente de componentes cerâmicos requer uma seleção criteriosa dos parâmetros operacionais em função de maximizar a taxa de remoção de material e, ao mesmo tempo, controlar a integridade da superfície (AGARWAL; RAO, 2010). Com o objetivo de facilitar o entendimento das condições de retificação, serão apresentadas algumas considerações teóricas sobre os principais parâmetros de retificação e a sua influência sobre o processo. A Figura 3 mostra os principais parâmetros de retificação.

Figura 3. Parâmetros de retificação.

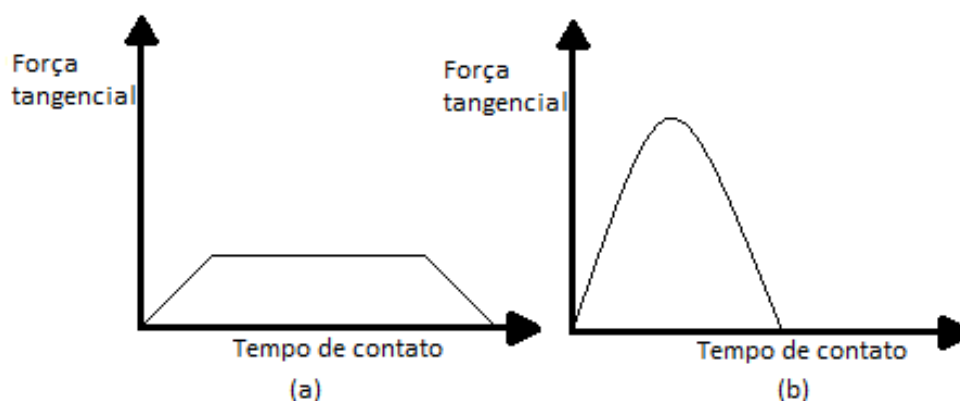


Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.1. Velocidade de Corte (V_s) e Velocidade da Peça (V_w)

A velocidade de corte (V_s) é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta. Uma V_s elevada aumenta o número de grãos abrasivos ativos, cada grão passa a remover um menor volume de material da superfície da peça. Portanto a espessura dos cavacos é menor, diminuído a força de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebole. A velocidade da peça (V_w) coincide com a velocidade da mesa da máquina retificadora. A Figura 4 mostra a influência da velocidade da peça no processo de retificação. A Figura 4a representa uma V_w baixa, onde os impactos dos grãos abrasivos sobre a peça são pequenos e os cavacos são alongados. O contato prolongado grão/peça provoca um desgaste maior em cada grão abrasivo, no entanto, o desgaste do rebole é menor devido a que a perda de grãos abrasivos é menor. A Figura 4b representa uma V_w elevada, onde os impactos entre os grãos abrasivos sobre a peça são grandes e os cavacos são curtos. A geração de uma força tangencial grande e de curta duração tende a fraturar e desprender os grãos abrasivos da superfície do rebole, assim, o desgaste do rebole tende a ser maior quando comparado com o caso anterior (BIANCHI et al., 1997; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Figura 4. Influência do tempo de contato na força tangencial em um grão abrasivo para uma velocidade da peça baixa (a) e elevada (b).



Fonte: Bianchi et al., (1997)

2.3.2. Profundidade de Corte (a)

A profundidade de corte (a) é a profundidade de material removido da superfície da peça em cada passada de retificação, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço. Um aumento na profundidade de corte causa um aumento de temperatura na superfície da peça, as temperaturas elevadas são ocasionadas pelo aumento de grãos ativos e tempo de contato, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de material. Desta forma, o aumento da profundidade de corte tem como consequência a elevação da rugosidade superficial, atividade acústica e forças de corte (BIANCHI et al., 1997; MARINESCU; HITCHINER; UHLMANN, 2006).

2.3.3. Taxa de Remoção de Material (Q_w)

A taxa de remoção de material (Q_w) no processo retificação é geralmente expressa em termos da taxa específica de remoção de material (Q'_w). O parâmetro Q'_w é definido como a taxa de remoção de material da peça por unidade de largura de contato (b) rebolo/peça. O uso do parâmetro Q'_w reduz o número de variáveis e permite a comparação direta da eficiência de remoção em uma ampla gama de operações. Para valores baixos de Q'_w , a energia total consumida é constituída apenas pela fricção dos grãos abrasivos, mas à medida que Q'_w aumenta, também aumenta a porção de energia consumida pelo corte dos grãos abrasivos e a formação de cavaco (ROWE, 2016). A taxa de remoção de material pode ser definida como

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

$$Q'w = a \cdot V_w \quad (2)$$

2.3.4. Espessura Equivalente de Corte (*heq*)

De acordo com Malkin; Guo, (2008), a espessura equivalente de corte (*heq*) representa a espessura da camada de material que é removido da superfície da peça numa revolução completa do rebolo. O parâmetro *heq* permite quantificar uma condição de trabalho a partir dos parâmetros de entrada, como a velocidade da peça, velocidade de corte e profundidade de corte. A espessura equivalente de corte é definida como

$$heq = a \frac{V_w}{V_s} = \frac{Q'w}{V_s} \quad (3)$$

2.4. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Apesar dos avanços feitos na prevenção de problemas que afetam o funcionamento normal das máquinas retificadoras, que muitas vezes causam interrupções e exigem que um operador experiente execute as correções, muitos problemas ainda precisam ser estudados e resolvidos. Isto é principalmente devido à alta complexidade do processo, que resulta das muitas variáveis envolvidas (MIRANDA et al., 2015). Assim, o monitoramento do processo de retificação é extremamente importante, pois permite que o processo seja controlado e otimizado (MOIA et al., 2015). Nos últimos anos, o monitoramento de defeitos no processo de retificação, como a qualidade superficial da peça, rugosidade e dureza com padrões inaceitáveis, tornou-se fundamental para a indústria e de grande interesse para os pesquisadores. As técnicas de avaliação para o monitoramento de processos de manufatura são tradicionalmente divididas em duas abordagens: direta e indireta (ALEXANDRE et al., 2018a).

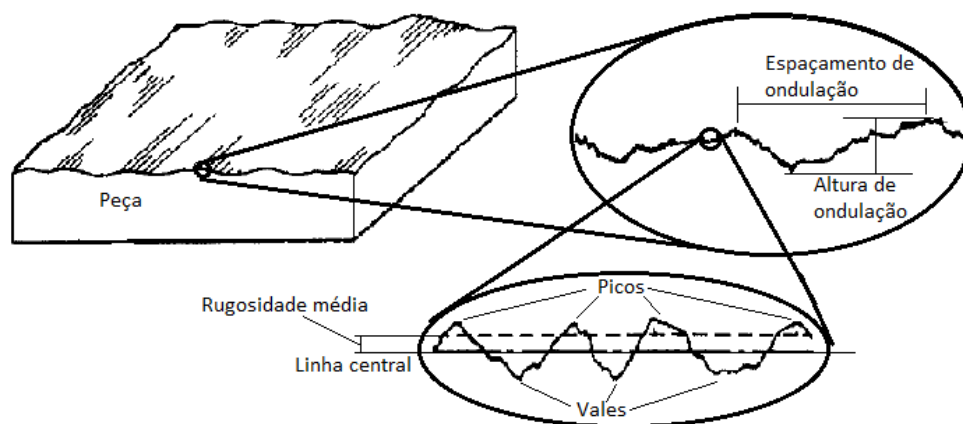
O monitoramento do processo de retificação é de grande interesse para a ciência, atualmente existe uma grande quantidade de pesquisas relacionadas ao monitoramento da retificação, tais como, (DUMSTORFF et al., 2016; LIPÍŃSKI; BAŁASZ; RYPINA, 2018; MADOPOTHULA; NIMMAGADDA; LAKSHMANAN, 2018; ALBERRO et al., 2019; NESLUŠAN et al., 2017; TANAKA; KOSHY, 2019; TANGJITSITCHAROEN; SENJUNTICHA, 2015), dentre outros.

2.4.1. Monitoramento Direto

Na abordagem direta, a quantidade real da variável de interesse, e.g. rugosidade da superfície da peça, é medida. Medições diretas são comumente realizadas através técnicas óticas e de contato, como câmeras, microscópios, isótopos radioativos, feixes laser e resistência elétrica. As limitações práticas causadas por problemas de acesso durante a usinagem, como iluminação, vibração, ruído e fluido de corte, exigem que o processo seja interrompido e a peça removida (e posteriormente colocada de volta) para inspeção direta, resultando em tempo de inatividade e altos custos. No entanto, a medição direta possui um alto grau de precisão e é geralmente realizada em laboratórios. A qualidade da superfície da peça é a principal variável utilizada no monitoramento do processo de retificação (VIERA et al., 2018; CONCEIÇÃO JUNIOR et al., 2017; TETI et al., 2010).

A rugosidade superficial e a tolerância estão fortemente relacionadas, já que é necessário especificar um acabamento mais suave para manter uma tolerância mais fina na produção. Pode-se considerar que a qualidade da superfície consiste em dois aspectos: integridade da superfície e topografia da superfície. A integridade da superfície está associada a alterações mecânicas na camada superficial induzida pela usinagem. Para retificação, os aspectos mais importantes da integridade da superfície estão associados a danos térmicos. A topografia da superfície refere-se à geometria das superfícies usinadas, que geralmente é caracterizada pela rugosidade. Os padrões característicos de picos e vales na peça acabada são conhecidos como textura da superfície (KALPAKJIAN; SCHMID; SEKAR, 2014; MALKIN; GUO, 2008).

Figura 5. Ilustração da textura da superfície.



Fonte: Malkin; Guo, (2008)

A rugosidade da superfície da peça é geralmente o indicador mais importante na avaliação da qualidade das superfícies retificadas. A avaliação da competitividade do sistema pode ser realizada através da estimativa da rugosidade superficial, permitindo melhorias na produtividade e reduzindo custos (WU et al., 2017; YU; WANG; LU, 2015). A Figura 5 mostra uma ilustração da rugosidade superficial de uma peça retificada.

A rugosidade média (R_a) é definida como a média aritmética dos valores absolutos dos desvios de altura do perfil de superfície da linha central dentro do comprimento de amostragem l . R_a pode ser definida como

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y - y_{cl}| dl \quad (4)$$

em que y_{cl} indica a linha central desenhada de tal maneira que as áreas acima e abaixo sejam iguais (KHARE; AGARWAL, 2015).

Thomas; David; Manu, (2015) propuseram um novo modelo matemático para estimar a rugosidade superficial de cerâmicas retificadas. A eficácia deste modelo foi comprovada pela comparação dos resultados experimentais com os resultados previstos. Os autores concluíram que a otimização da rugosidade superficial pode ser feita pelo controle dos parâmetros de retificação. Liu et al., (2017) estudaram os efeitos dos parâmetros de retificação na retificação de cerâmica de nitrato de silício. A influência dos parâmetros de retificação, como o tamanho dos grãos abrasivos, velocidade de corte, velocidade da peça e profundidade de corte, foi analisada em relação aos seus efeitos na força de retificação, rugosidade superficial e dano subsuperficial. Os trabalhos mencionados utilizaram a rugosidade superficial como variável principal na avaliação da qualidade da superfície da peça.

Outra importante ferramenta utilizada para avaliar as características da superfície da peça é a microscopia confocal. Assim, as mudanças na superfície podem ser avaliadas através da reconstrução da topografia da superfície a partir de seções ópticas e reflexão da luz (PARK; JEON; KO, 2015). Segundo Yio et al., (2015) e Pawley, (2006), a microscopia confocal consiste, fundamentalmente, de um feixe laser altamente focalizado e de um orifício. O laser é usado como uma fonte de luz e o orifício é usado para remover a luz fora de foco do plano focal, de modo a fornecer um volume focal muito pequeno. Ao escanear a fonte de luz através da amostra, levantando ou abaixando a lente objetiva,

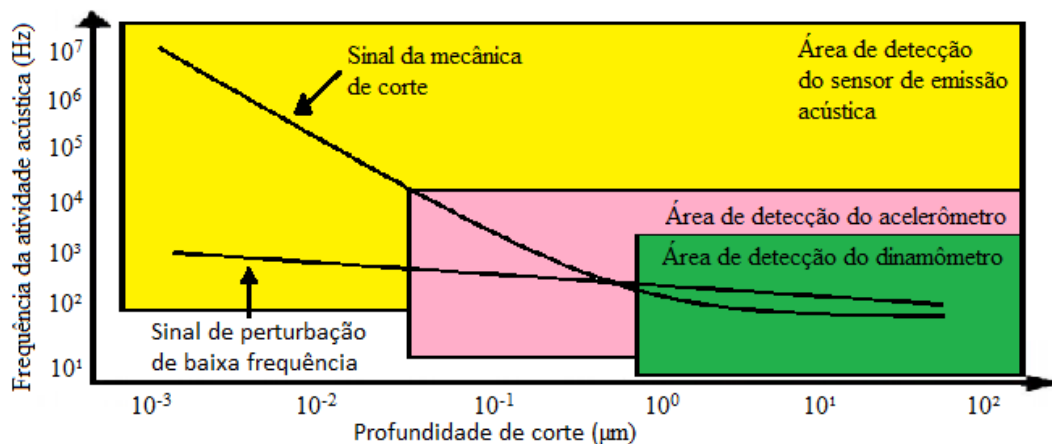
uma série de imagens bidimensionais são obtidas em várias profundidades. Um conjunto de imagens de planos focais sucessivos é conhecido como *z-stack* e é usado para gerar uma imagem 3D de alta resolução. No processo de retificação de cerâmica, a microscopia confocal pode ser encontrada no estudo da modelagem das ferramentas de corte (LIAO et al., 2018), modelagem da força de retificação (ASLAN; BUDAK, 2015) e na estimativa da profundidade máxima de corte durante a retificação MQL (ANAND; ARUNACHALAM; VIJAYARAGHAVAN, 2018).

2.4.2. Monitoramento Indireto

Por meio da abordagem indireta de medição, quantidades auxiliares, como força de corte e energia específica, podem ser medidas. A quantidade real é subsequentemente deduzida através de correlações determinadas empiricamente. Os métodos indiretos não requerem da interrupção do processo e são baseados na aplicação de sensores, como emissão acústica, força (dinamômetro), vibração (acelerômetro), temperatura e potência, juntamente com técnicas de processamento de sinais para extrair características de interesse do processo monitorado. A abordagem indireta de monitoramento é menos precisa que a direta, mas também é menos complexa e mais adequada para aplicações práticas (TETI et al., 2010; TIAN et al., 2017; VAIRAMUTHU et al., 2016). A Figura 6 mostra a classificação de três sensores comumente usados no monitoramento indireto do processo de retificação e a sua classificação com base na profundidade de corte e nível de atividade acústica. As características dos sensores usados neste trabalho (emissão acústica, piezelétrico e potência) são apresentadas a partir da Seção 2.4.3 com mais detalhes.

Dentre todos os sinais dos sensores mencionados, a emissão acústica (EA) é considerada o sinal mais sensível, pois sua faixa de frequência está além das vibrações mecânicas e ruídos elétricos e, portanto, esses ruídos podem ser facilmente filtrados (KIM et al., 2001). Segundo Lopes et al., (2017), o sinal de emissão acústica é definido como as ondas elásticas transientes geradas pela liberação rápida de energia dentro de um material. A aplicação de estímulos externos, como carga, pressão e temperatura, localizados na estrutura, desencadeiam a liberação de energia, na forma de ondas de estresse, que se propagam por toda a estrutura até a superfície e são detectadas por cerâmicas piezelétricas responsáveis pela conversão de energia mecânica em sinais elétricos.

Figura 6. Classificação de sensores com base na profundidade de corte e atividade acústica.



Fonte: Lee et al., (2006)

Em He et al., (2019), o método da emissão acústica para detecção de queima em peças metálicas é apresentado como um método de monitoramento não destrutivo. O autor descreve o método como simples e altamente sensível às mudanças do processo. O uso da EA pode ser combinado com a fusão de sensores, estatísticas e a aplicação de redes neurais. Lopes et al., (2018) estudaram a influência da temperatura na resposta em frequência de um sensor de EA convencional. A resposta do sensor, a seis diferentes temperaturas, foi analisada pelo teste da quebra do grafite (PLB) e o processamento digital de sinais. A transformada rápida de Fourier (FFT) foi calculada em função de obter o espectro de frequência. O autor conclui que mudanças de temperatura causam variações de amplitude e mudança de fase, o que pode levar a falsos diagnósticos e medições errôneas. Em D'addona et al., (2018), os sinais de EA foram empregados no monitoramento da operação de dressagem com dressador de ponta única. Redes neurais artificiais foram utilizadas com o objetivo de classificar e prever o melhor instante para interromper a operação de dressagem. Redes neurais supervisionadas e não supervisionadas foram testadas em conjunto com duas estatísticas, os resultados apresentaram um percentual de sucesso de entre 80% e 94,1%. As relações fundamentais entre o sinal de EA e as variáveis de dressagem foram propostas por Badger; Murphy; O'donnell, (2018). Os conceitos fundamentais da operação de dressagem foram explicados em detalhe pelo autor. Um novo parâmetro é apresentado, a energia específica de revestimento de emissão acústica, com o objetivo de avaliar a eficiência do processo e o desgaste do rebolo. Finalmente, o uso da intensidade do sinal de EA na avaliação do

desgaste do diamante foi analisado, permitindo que o operador saiba quando são necessárias mudanças para evitar a queima da peça de trabalho.

O monitoramento do processo de retificação por meio de sensores de potência tem se apresentado como uma técnica simples e conveniente de obter informações úteis referentes ao processo a um custo relativamente baixo (TIAN et al., 2017). Os sinais podem ser monitorados pela corrente do motor elétrico ou pelo produto entre os sinais de tensão e corrente. Assim, uma estimativa da potência de corte pode ser facilmente obtida se um modelo do motor elétrico estiver disponível. Além disso, um sistema de medição de potência mais preciso pode ser usado, no qual normalmente é possível medir a potência de cada um dos três eixos (NAKAI et al., 2015b).

O monitoramento do processo de retificação de cerâmica por meio de sensores tem sido pouco estudado, apenas alguns estudos foram publicados. Nakai et al., (2015a) estimaram a rugosidade superficial de componentes cerâmicos através de redes neurais artificiais (RNA). Quatro modelos artificiais foram testados com estatísticas de entrada derivadas dos sinais de EA e potência. Os resultados obtiveram uma precisão de mais de 90 %, contribuindo na automação do processo de retificação de cerâmica. Bianchi et al., (2003) avaliaram o mecanismo de remoção de material e a qualidade da superfície da peça retificada. Durante o processo de retificação, um oscilógrafo coletou os sinais de EA e potência. Os autores observaram que o mecanismo de remoção de material é uma das principais causas de fratura e a severidade do processo aumenta com a espessura equivalente do corte e a velocidade da peça. O sinal de EA foi mais sensível às variações do processo, os resultados do processamento digital de sinais foram correlacionados com as medições do microscópio eletrônico de varredura. Feng et al., (2009) monitoraram o desgaste da ferramenta de corte durante a retificação usando sinais de EA, vibração e força. Verificou-se que o monitoramento do desgaste da ferramenta de corte durante a retificação de cerâmicas sem conhecer as características de usinagem é viável. Conceição Junior et al., (2016) e Conceição Junior et al., (2019) realizaram uma extração de características usando o espectro de frequência e análise no domínio do tempo de sinais de vibração para monitorar o processo de retificação de cerâmica. As estatísticas calculadas pela aplicação de filtros digitais nas bandas de frequência escolhidas foram correlacionadas com a rugosidade da superfície da peça. Por fim, a análise estatística indicou similaridade e confiabilidade entre os resultados apresentados.

2.4.3. Diafragma Piezelétrico

Os diafragmas piezelétricos, comumente conhecidos como *buzzers*, têm sido tradicionalmente usados em componentes acústicos e implementados em dispositivos eletrônicos para produzir som, como em alarmes, bipes e campainhas. Atualmente, além de produzir som, o uso de diafragmas piezelétricos está sendo estudado em diferentes aplicações industriais, principalmente como sensores utilizados no monitoramento de processos de fabricação e controle de qualidade de alimentos. Nas últimas décadas, o uso dos sinais de transdutores piezelétricos para controle de vibração e ruído, bem como na detecção de danos para aplicações de monitoramento estrutural (SHM) vem ganhando mais atenção dos setores acadêmicos e industriais devido às suas diversas vantagens, que incluem baixo custo e alta disponibilidade no mercado (DE FREITAS; BAPTISTA, 2016).

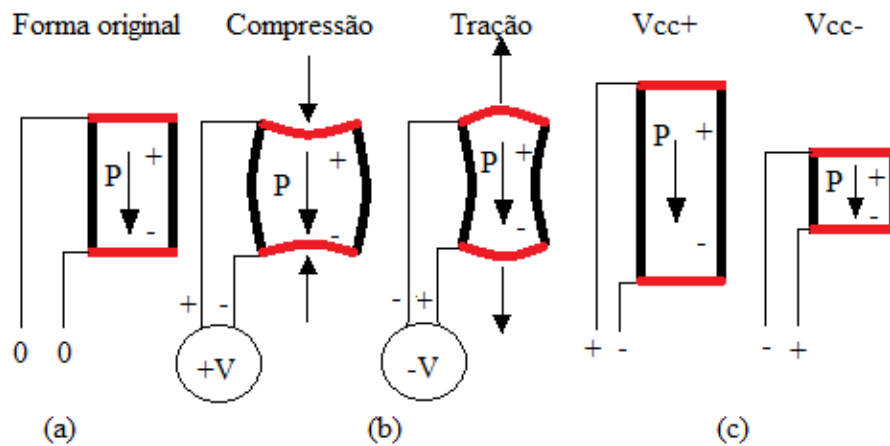
Os transdutores piezelétricos podem operar como sensores e atuadores devido ao efeito piezelétrico (DOS SANTOS JUNIOR et al., 2018). O efeito piezelétrico ocorre em materiais que, quando submetidos a um estresse mecânico, produzem uma tensão elétrica de saída através da formação de um dipolo elétrico no material. A polarização produzida pela tensão cria cargas e, portanto, um campo elétrico. No efeito inverso, a aplicação de uma tensão elétrica no material piezelétrico provoca uma deformação mecânica (CASTRO et al., 2016a). As equações constitutivas para os efeitos piezelétricos diretos e reversos são dadas pelo Padrão IEEE sobre Piezeletricidade (IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY, 1987).

$$D_i = d_{ikl}T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (5)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (6)$$

em que D_i é a componente de deslocamento elétrico; d_{ikl} e d_{kij} são as constantes piezelétricas; E_k é a componente do campo elétrico; T_{kl} é a componente de estresse mecânico; ε_{ik}^T é a componente de permissividade em uma tensão constante; s_{ijkl}^E é a complacência elástica sob um campo elétrico constante; S_{ij} é a componente de tensão mecânica e os subscritos $i, j, k, l = 1, 2, 3$. A Figura 7 mostra um material piezelétrico na forma original, assim como uma representação do efeito piezelétrico direto e reverso.

Figura 7. Representação do efeito piezelétrico (a) sem estímulo, (b) direto e (c) reverso.

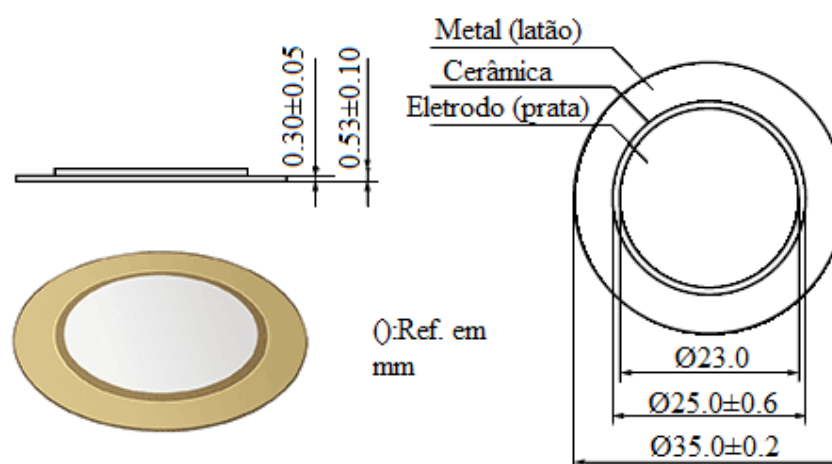


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os diafragmas piezelétricos têm uma construção muito simples e estão disponíveis em diferentes tamanhos. Este tipo de transdutor consiste em uma cerâmica circular piezelétrica (elemento ativo tipicamente de titanato de bário ou titanato zirconato de chumbo - PZT), geralmente variando de 0,1 a 2 mm de espessura, montada em uma placa de metal circular (diafragma disponível em latão, liga de níquel ou aço inoxidável). A cerâmica é revestida com uma fina película metálica (normalmente prata) que serve como eletrodo. A Figura 8 mostra um típico diafragma PZT e suas partes (DE FREITAS; BAPTISTA, 2016).

Segundo Castro et al., (2016b), os materiais piezelétricos possuem um acoplamento eletromecânico, ou seja, existe uma carga elétrica devido a tensões mecânicas e uma deformação devido a um campo elétrico. Portanto, os sensores piezelétricos têm a propriedade de gerar uma tensão quando excitados por uma deformação mecânica que é gerada por uma onda acústica. A aplicação de sensores piezelétricos para diferentes finalidades pode ser encontrada na literatura específica (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015; CASTRO et al., 2017; FERREIRA JUNIOR et al., 2018; LUCAS et al., 2018; SARKER et al., 2013).

Figura 8. Ilustração esquemática do diafragma piezelétrico Murata 7BB-35-3 utilizado nos testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5. AQUISIÇÃO DE DADOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

O processamento de sinais está relacionado à modelagem, detecção, identificação e controle de padrões e estruturas em um processo. A teoria do processamento digital de sinais desempenha um papel central no desenvolvimento de sistemas de automação, fornecendo as bases para modelar a distribuição de sinais aleatórios e os ambientes nos quais os sinais se propagam. Modelos estatísticos são aplicados no processamento de sinais e em sistemas de controle para extrair informações de um sinal, o qual pode ser ruidoso, distorcido ou incompleto. Os métodos de processamento de sinais evoluíram em complexidade algorítmica visando a utilização ideal das informações para obter o melhor desempenho. Em geral, o requisito computacional dos métodos de processamento de sinais aumenta, muitas vezes exponencialmente, com a complexidade algorítmica. No entanto, o custo de implementação de métodos avançados de processamento de sinais foi compensado e tornado acessível pela tendência consistente nos últimos anos de um aumento contínuo no desempenho, junto com uma diminuição no custo dos hardwares de processamento de sinais (NALON, 2014; PROAKIS; MANOLAKIS, 2006; VASEGHI, 2005).

Os sinais coletados do processo de retificação podem ser analisados no domínio do tempo, da frequência e no domínio tempo-frequência. Em relação às análises no domínio da frequência, o processo de retificação apresenta um amplo conteúdo harmônico relacionado com as vibrações, ruídos e com o próprio processo de corte, nesse

sentido, muitas características são mais fáceis de ver, entender e calcular no domínio da frequência. A análise do conteúdo espectral por meio de transformações tempo-frequência, como a transformada rápida de Fourier (VIERA et al., 2018), wavelet (YANG; YU, 2012) e a transformada de tempo curto de Fourier (VIERA et al., 2018) são as ferramentas mais utilizadas no processamento de sinais.

Segundo Orallo et al., (2014), a transformada discreta de Fourier (DFT) é a técnica mais utilizada para a medição harmônica. A DFT é implementada por meio do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) devido à sua simplicidade e eficiência. Ao transformar o sinal medido do domínio do tempo para o domínio da frequência, a FFT pode separar com precisão as componentes harmônicas. Neste trabalho, a DFT foi utilizada para determinar o espectro de frequência resultante do processo de retificação para ambos os sensores (EA e PZT) e na seleção de bandas de frequência. A DFT pode ser expressa pela Equação 7:

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi jnk}{N}} \quad (7)$$

em que N é o número de amostras, $x[n]$ é o sinal discreto no domínio do tempo para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, k é o índice do sinal discreto no domínio da frequência e j é a unidade imaginária (CHEN; CHEN, 2014).

A seleção de bandas de frequência relacionadas às condições do processo e posterior filtragem por filtros digitais tem sido extensivamente estudada na detecção do fenômeno de queima em superfícies retificadas (GAO et al., 2017), no monitoramento da rugosidade da superfície da peça (RIBEIRO et al., 2015), na avaliação da superfície do rebolo (ALEXANDRE et al., 2018b) e na previsão do desgaste do dressador de ponta única (MIRANDA et al., 2015).

A FFT é uma ferramenta utilizada na análise de espectros de frequência de sinais advindos do processo de retificação. No entanto, a FFT é inadequada para identificar informações sobre transitórios não estacionários já que não possui resolução no domínio do tempo (YANG; YU, 2012). Nesse contexto, uma abordagem alternativa é segmentar a sequência em um conjunto de subsequências curtas, com cada subsequência centrada em intervalos de tempo uniformes e a sua DFT calculada separadamente, obtendo assim a transformada de tempo curto de Fourier (STFT) (ZHANG; YU; SHENG, 2006). Neste trabalho, a STFT foi utilizada para avaliar as componentes de frequência ao longo do

tempo de retificação e na escolha de bandas de frequência. Assim, a STFT é definida por Kim et al., (2007) como

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u)f(t + u)e^{-j\omega u} du \quad (8)$$

em que t é o tempo, ω a frequência e $h(u)$ a função da janela temporal, como retangular, Gaussiana, Blackman, Hanning, Hamming, Kaiser etc.

O resultado obtido pela STFT é uma representação bidimensional do sinal no tempo e na frequência. No entanto, a limitação imposta pelo princípio da incerteza de Heisenberg requer uma relação entre as resoluções (tempo-frequência). A precisão no tempo e na frequência é determinada principalmente pelo comprimento da janela, que é constante para todas as frequências. Dessa forma, uma janela maior resulta em uma melhor resolução no domínio da frequência. No entanto, para obter uma resolução de tempo mais precisa, é utilizada uma janela de menor comprimento. Portanto, é necessário conhecer a resolução no tempo e na frequência para obter todas as informações relevantes em ambos os domínios (BACCAR; SÖFFKER, 2015; LIMA et al., 2016). A resolução no tempo e na frequência pode ser definida pela Equação 9 e Equação 10, respectivamente.

$$\Delta t = N * T_s \quad (9)$$

$$\Delta F = m \frac{F_s}{N} \quad (10)$$

em que N é o tamanho da janela; T_s o período de amostragem; F_s a frequência de amostragem e m o coeficiente de janela. O período de amostragem é igual ao inverso da frequência de amostragem e o coeficiente de janela depende do tipo de janela utilizada, por exemplo, $m = 2$ para uma janela retangular.

Muitos parâmetros estatísticos são aplicados aos sinais coletados durante o monitoramento dos processos de fabricação. A estatística mais utilizada é o valor médio quadrático (RMS) (ALEXANDRE et al., 2018a; MARTINS et al., 2014), entretanto, outras estatísticas também são aplicadas a esses sinais e são capazes de diagnosticar eventos que ocorrem nos processos monitorados. Neste contexto, destaca-se a aplicação

das estatísticas *counts* (LOPES et al., 2017), DPO (AGUIAR; BIANCHI; OLIVEIRA, 2002), CFAR (AGUIAR et al., 2006) e ROP (ALEXANDRE et al., 2018b).

Conceição Junior et al., (2019) empregaram a estatística do valor médio quadrático (RMS) aplicada em sinais de vibração para monitorar a qualidade das superfícies de corpos de prova de cerâmica, correlacionando os sinais de vibração RMS com a rugosidade superficial (R_a). Neste trabalho, o valor médio da estatística RMS foi utilizado para fins de comparação entre os sinais dos dois sensores de emissão acústica e a rugosidade medida. A estatística RMS pode ser expressa pela Equação 11:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x^2(i)} \quad (11)$$

em que N é o tamanho dos dados do vetor e $x(i)$ é o i -ésimo elemento do sinal x .

Aguiar; Dotto; Bianchi, (2005) empregaram com sucesso a estatística desvio de potência (DPO – *power deviation*) para detectar o limiar de queima na superfície da peça de trabalho no processo de retificação. Neste trabalho, a DPO foi utilizada para avaliar a rugosidade superficial das peças retificadas através da combinação dos sinais de potência e emissão acústica dos dois sensores. A estatística DPO pode ser expressa pela Equação 12:

$$DPO = \sigma(EA)Max(PW) \quad (12)$$

em que $\sigma(EA)$ é o desvio padrão da emissão acústica ou sensor alternativo, como o transdutor piezelétrico usado neste trabalho, e $Max(PW)$ é a potência máxima. Dotto et al., (2006) desenvolveram um sistema inteligente dedicado à detecção do fenômeno de queima na superfície da peça no processo de retificação através do monitoramento constante do processo por EA e sinais de potência, os autores relataram uma excelente eficiência da estatística DPO, demonstrando que a estatística pode ser aplicada em situações práticas. Spadotto et al., (2008) empregaram a estatística DPO extraída dos sinais de potência e emissão acústica como entradas para redes neurais artificiais para classificar os graus de queima durante a retificação.

De acordo com Lin; Wu; Chen, (2018), a taxa de potência (ROP – *ratio of power*) é um método estatístico utilizado para analisar a potência de uma determinada banda de frequência com relação ao espectro total de potência. Neste trabalho, a ROP foi utilizada

no domínio do tempo em função de analisar a potência de uma determinada banda de frequência ao longo do tempo de retificação. A estatística ROP pode ser definida como

$$ROP = \frac{\sum_{k=n1}^{n2} |x_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |x_k|^2} \quad (13)$$

em que N é o tamanho dos dados do vetor; $n1$ e $n2$ definem a faixa de frequência para a análise e x_k é a k -ésima transformada discreta de Fourier (AGUIAR et al., 2004).

O estudo da similaridade entre dois ou mais sinais de sensores, estatísticas ou parâmetros é de vital importância na validação de novas técnicas. O estudo de correlação entre uma variável amplamente conhecida em relação a uma nova variável na fase de teste é feito através de várias estatísticas e índices. Nesse sentido, destaca-se a aplicação da autocorrelação (ZHOU; DAGLE, 2015), coeficiente de correlação (GUO et al., 2017), correlação cruzada (ZHANG et al., 2017), coerência wavelet (LIU et al., 2016) e magnitude quadrática de coerência (GISH; COCHRAN, 1988). Neste trabalho, uma regressão linear foi utilizada para calcular a correlação entre as estatísticas RMS e DPO de ambos os sensores através do coeficiente de determinação.

Segundo Scannell; Carter, (1978), a magnitude quadrática de coerência (MSC) relaciona frequências comuns entre dois sinais e avalia sua similaridade. A MSC entre dois sinais (x e y) no domínio do tempo pode ser calculada pela Equação 14. Os resultados, no intervalo entre 0 e 1, indicam o nível de similaridade espectral entre os dois sinais no domínio do tempo. Neste trabalho, a MSC foi utilizada para avaliar a correlação entre os dois sensores de emissão acústica ao longo de todo o espectro de frequência.

$$C_{xy} = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f) P_{yy}(f)} \quad (14)$$

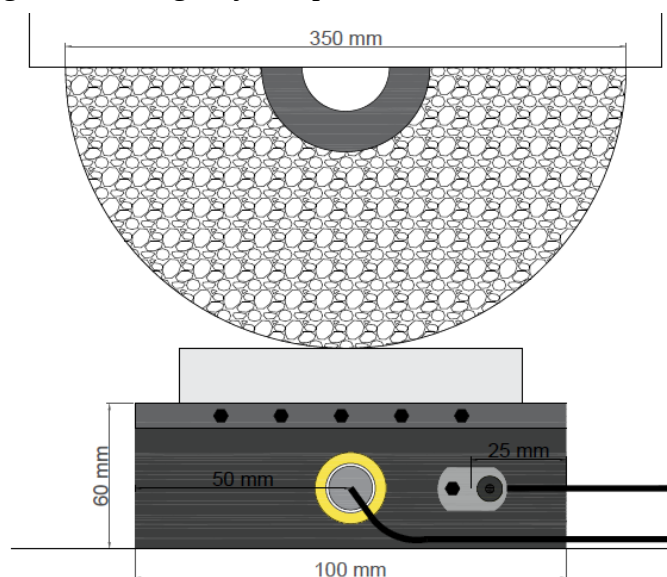
em que C_{xy} é a magnitude quadrática de coerência, $P_{xx}(f)$ e $P_{yy}(f)$ são as densidades espectrais de potência de x e y e $P_{xy}(f)$ é a densidade espectral de potência cruzada na frequência f .

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Ensaaios de retificação foram realizados em uma máquina retificadora plana tangencial, modelo RAPH 1055, da marca Sulmecanica. Um rebolo diamantado resinoide, modelo SD126MN50B2, da marca Dinser, com diâmetro externo de 350 mm e espessura de 15,5, foi utilizado nos ensaios. A Figura 9 mostra a configuração experimental do banco de ensaios.

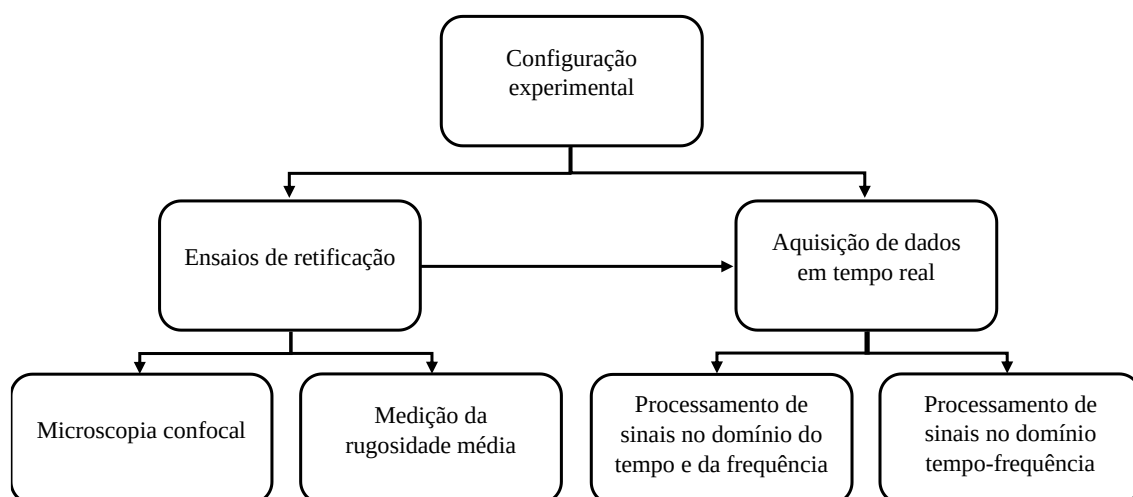
Figura 9. Configuração experimental do banco de ensaios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Sete peças de cerâmica alumina (Al_2O_3 - 96% óxido de alumínio e 4% de outros óxidos) com 35 mm comprimento x 8 mm espessura x 20 mm altura e micro dureza Vickers de 1339 ± 47 HV1 (JIS R1610-1991 standard) foram retificadas sob sete profundidades de corte diferentes, representando processos de retificação leves, médios e severos. As peças foram fixadas por meio de parafusos a um suporte metálico com 100 mm comprimento x 35 mm espessura x 60 mm altura. A Figura 10 mostra o esquemático das atividades experimentais.

Figura 10. Esquemático das atividades experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada teste consistiu em uma única passada do rebolo através da superfície da peça em uma determinada condição de retificação. Antes dos testes, um dressador conglomerado foi usado para dressar o rebolo, garantindo seu melhor desempenho durante a retificação. Foram realizados 10 passes com 20 μm de avanço para cada um dos passes. Cada teste foi realizado na presença de fluido lubrificante. Os parâmetros de retificação utilizados neste trabalho e as especificações do fluido de lubrificação são mostrados na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros de retificação e especificações do fluido de lubrificação.

Condições de corte	
Velocidade de corte (V_s)	33 m/s
Velocidade da peça (V_w)	58 mm/s
Profundidade de corte (μm)	25 – 35 – 50 – 105 – 150 – 210 – 350

Tabela 2. Especificações do fluido de lubrificação.

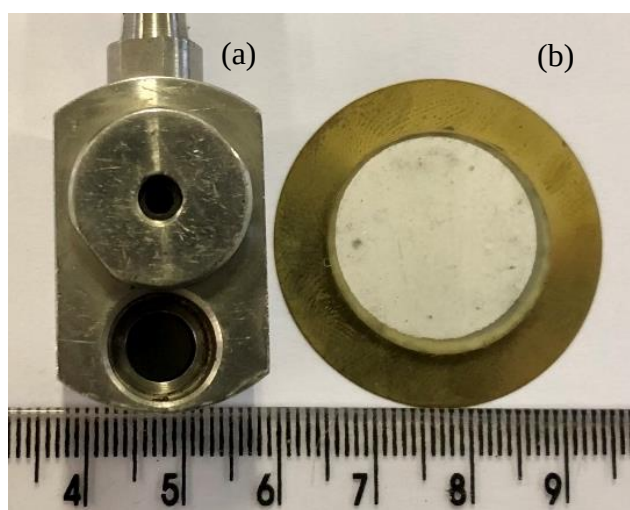
Especificações de lubrificação/refrigeração	
Fluido de lubrificação	Óleo solúvel semissintético – Shell - DMS 3200 F-1
Vazão	27,5 l/min
Pressão	<0,7 MPa
Concentração	4% de óleo em água
Geometria do bocal	Retangular 49 mm x 3 mm

3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

Um diafragma PZT de baixo-custo (Figura 11b), configurado como um sensor passivo, modelo 7BB-35-3, da marca Murata Electronics North America, foi fixado ao suporte da peça. O diafragma PZT consiste em uma placa de latão circular de 35 mm de diâmetro e 0,3 mm de espessura, e de uma cerâmica piezelétrica (elemento ativo) de 25 mm de diâmetro e 0,23 mm de espessura.

Este tipo de diafragma foi escolhido principalmente devido à sua maior robustez em comparação com os outros diafragmas disponíveis da Murata. Adicionalmente, De Freitas; Baptista, (2016) determinaram que as respostas em frequência desses diafragmas são muito semelhantes. No entanto, outros diafragmas com diferentes tamanhos e espessuras podem ser testados em estudos futuros. O diafragma PZT foi fixado a uma distância de 50 mm x 18,5 mm do centro do diafragma e o canto superior direito do suporte, posicionando o sensor o mais próximo possível da fonte de atividade acústica (superfície da peça). A fixação do sensor foi realizada ao igual que nos estudos de Baptista et al., 2014; Baptista; Filho, (2010), onde uma cola de cianoacrilato de viscosidade média, da marca Tekbond, foi usada. Foi tomado cuidado para aplicar a mesma quantidade de cola, de modo que o acoplamento suporte-diafragma fosse o mesmo em toda a superfície de contato, mantendo sempre uma espessura de cola inferior a 1 mm.

Figura 11. Sensores utilizados neste estudo: a) sensor de EA convencional e b) diafragma PZT de baixo-custo.



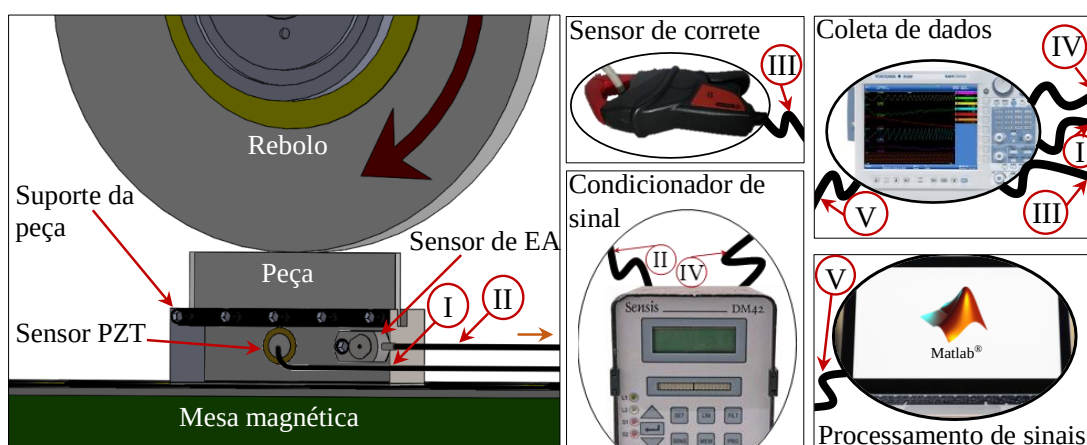
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fins comparativos, um sensor de emissão acústica (Figura 11a), equipado com um condicionador de sinal, modelo DM-42, da marca Sensis, foi parafusado ao suporte da peça. O condicionador de sinal foi configurado com os seguintes parâmetros: ganho de entrada e saída = 3, redução de ruído = 10 e aquisição de dados = puros. Esse sensor se encontra contido em um invólucro de metal de 30 mm de comprimento x 20 mm de largura x 20 mm de altura, o qual minimiza as interferências. O sensor de EA foi fixado a uma distância de 25 mm x 20 mm do centro do invólucro de metal e o canto superior direito do suporte.

Em função de medir a corrente elétrica, uma garra amperimétrica, modelo A621, da marca Tektronics, foi instalada nos cabos de alimentação do motor trifásico. A garra foi configurada na escala de dez amperes por volt medido. Posteriormente, a potência de corte foi calculada por meio da curva de calibração do motor, a qual relaciona os valores medidos de corrente elétrica com a potência do motor.

Antes dos testes, os sensores foram calibrados em função de obter uma boa sensibilidade e saturação. Os sinais puros de EA, PZT e PW foram coletados usando um oscilógrafo, modelo DL850, da marca Yokogawa, a uma frequência de amostragem de 2 MHz. Como pode ser observado na Figura 12, a saída dos sensores PZT e PW foram ligadas diretamente ao oscilógrafo. No caso da EA, o sinal puro passou por um condicionador de sinal, o qual melhora as condições do sinal, antes de ser coletado pelo oscilógrafo. O efeito de aliasing foi evitado por um filtro anti-aliasing, embutido na placa de aquisição de dados do oscilógrafo, com corte de 65 dB centrado em 80% da frequência de amostragem.

Figura 12. Banco de ensaios e aquisição de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DAS PEÇAS

Após os testes de retificação, a qualidade da superfície das peças foi avaliada em termos da rugosidade média (R_a), a qual foi medida usando um rugosímetro portátil da marca Taylor Hobson 3+. Um comprimento de amostragem de 4 mm e cut-off de 0,8 mm foram utilizados. A superfície de cada peça foi dividida em quatro pontos equidistantes e três medições foram realizadas em cada ponto. O valor de rugosidade média foi calculado para cada peça, permitindo a avaliação da peça retificada. Adicionalmente, todas as peças foram submetidas à análise microscópica para avaliar a integridade da subsuperfície. As medidas de microscopia confocal foram realizadas utilizando um microscópio confocal tridimensional (3D) DCM fabricado pela empresa LEICA, com ampliação de 800x.

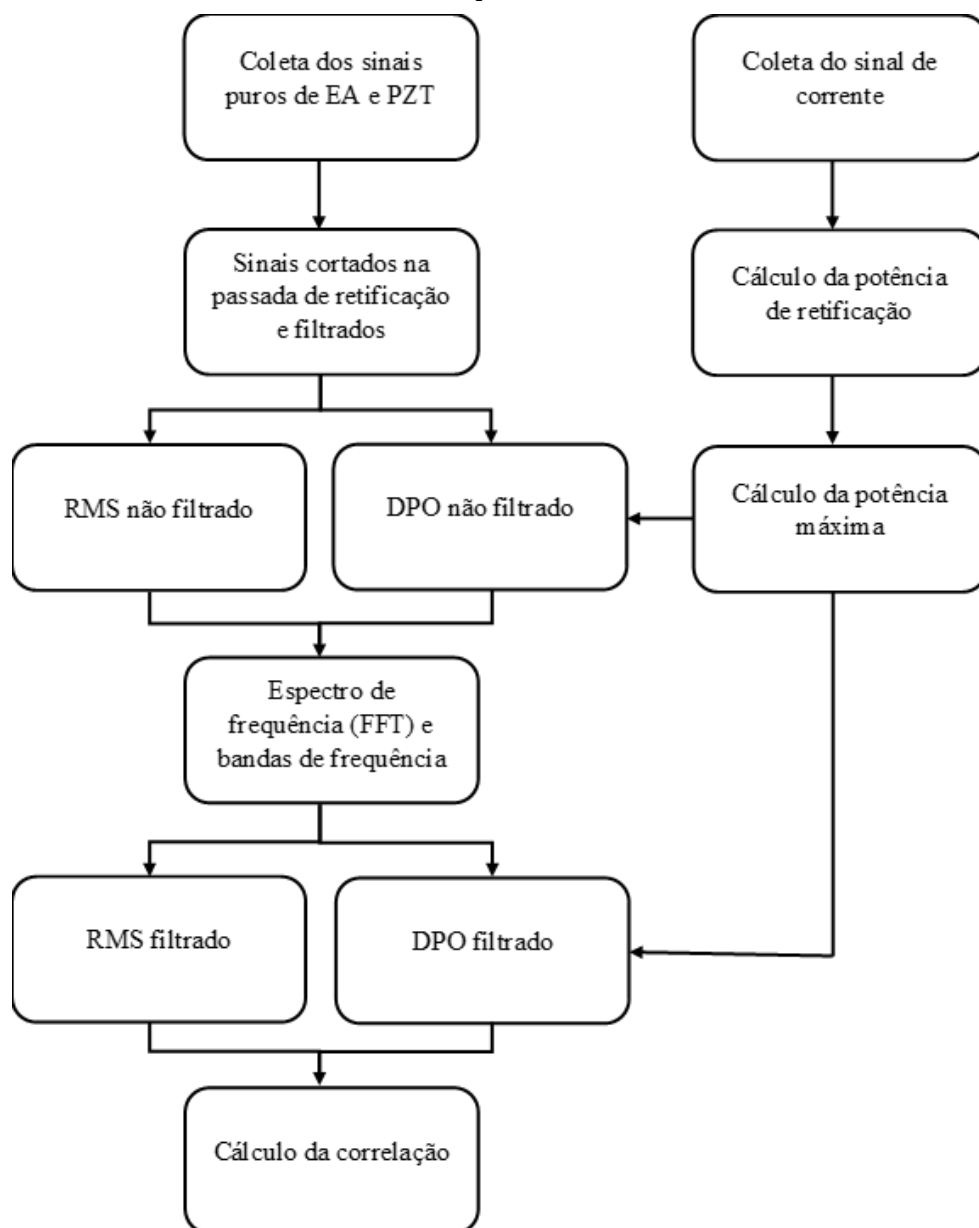
3.4. PROCESSAMENTO DE SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Os sinais coletados foram processados digitalmente no programa MATLAB, versão 2017b. A potência máxima de retificação foi calculada para cada teste. Os sinais puros dos sensores (EA e PZT) foram filtrados em sua banda operacional de frequência (2 kHz a 400 kHz). A análise dos espectros dos sinais foi realizada para identificar bandas de frequência fortemente relacionadas com a condição da superfície das peças. O espectro de frequência de três condições de retificação (representando condições leves, médias e severas) foi obtido por meio da transformada rápida de Fourier (FFT) de blocos de 8192 valores e janela de *Hanning* em três pontos centrais equidistantes ao longo da superfície da peça de trabalho. O valor médio dos três espectros foi considerado para análise. Os blocos de 8192 pontos correspondem a intervalos de aproximadamente 4,1 ms, os quais demonstraram ser satisfatório para o cálculo da FFT sem os níveis de ruído presentes no começo e fim do processo. O critério utilizado para a seleção das bandas de frequência foi baseado na busca por janelas de frequência que apresentem diferenças significativas de magnitude relacionadas às condições da superfície da peça. Um mínimo de sobreposição entre os três espectros foi procurado. Posteriormente, os sinais foram filtrados nas bandas de frequência escolhidas e um filtro *Butterworth*, ordem 10, também foi aplicado, gerando novos vetores. As estatísticas do valor médio quadrático (RMS) e DPO foram calculadas para os sinais não filtrados e filtrados em janelas de 2048 pontos, o que corresponde a intervalos de aproximadamente 1 ms.

Finalmente, a correlação entre o diafragma piezelétrico e o sensor de emissão acústica foi realizada através de uma regressão linear, permitindo inferir a similaridade

entre os sensores. Além disso, análises de correlação entre cada sensor e o parâmetro medido de rugosidade superficial foram realizados como em Conceição Junior et al., (2019). Todos os sinais foram normalizados antes da aplicação da regressão linear, a fim de eliminar as diferenças de amplitude produzidas pela sensibilidade de cada sensor e o condicionador de sinal de EA. A Figura 13 mostra o esquemático do processamento de sinais no domínio do tempo e da frequência.

Figura 13. Esquemático do processamento de sinais do domínio do tempo e da frequência.



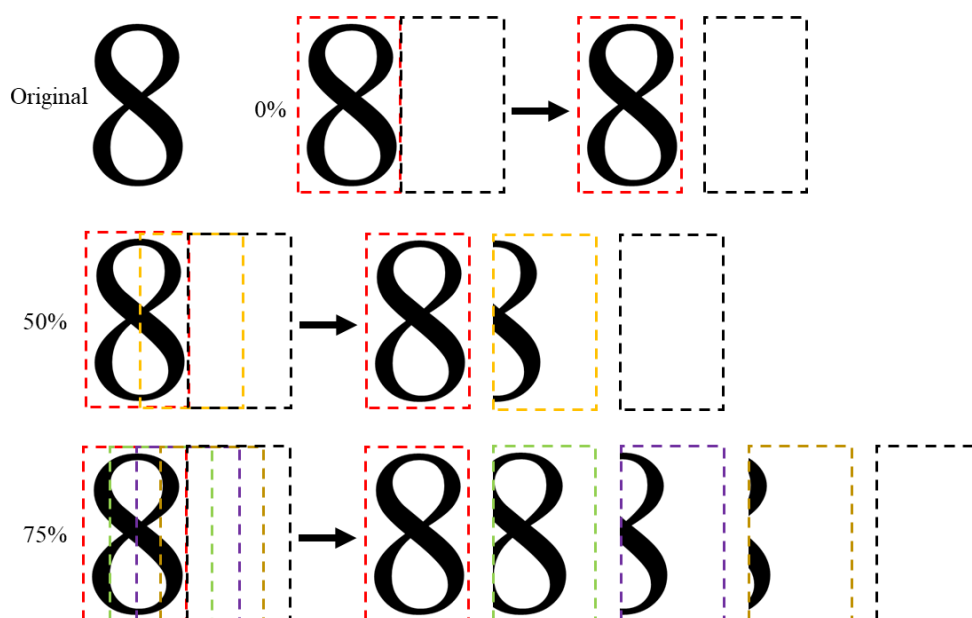
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5. PROCESSAMENTO DE SINAIS NO DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA

Segundo Ribeiro et al., (2017), o sensor de EA usado nos testes tem uma resposta de frequência de até 400 kHz. No entanto, como verificado no estudo anterior dos mesmos testes (VIERA et al., 2018), o sensor apresentou frequências significativas em até 250 kHz. Como mostrado por De Freitas; Baptista, (2016), o sensor PZT possui uma resposta eficiente de até 200 kHz, o sinal observado após essa frequência tem atenuações que podem levar a resultados errôneos.

A fim de reduzir a quantidade de dados a serem processados, e respeitando o teorema de amostragem de Nyquist, as amostras foram reamostradas a uma taxa de 1 MHz. É importante mencionar que a função de reamostragem (*resample*) do MATLAB aplica um filtro passa-baixa anti-aliasing aos sinais e compensa o atraso introduzido pelo filtro. Antes da reamostragem, e respeitando as bandas de frequência operacionais dos sensores, foi aplicado um filtro passa-faixa digital (2 kHz a 300 kHz) com o objetivo de evitar o efeito de aliasing e eliminar ruídos. A STFT de cada teste foi então calculada usando uma janela retangular de 5000 pontos de comprimento e 90% de sobreposição. A Figura 14 mostra três exemplos de sobreposição de uma figura janelada.

Figura 14. Exemplos de sobreposição de uma figura janelada.



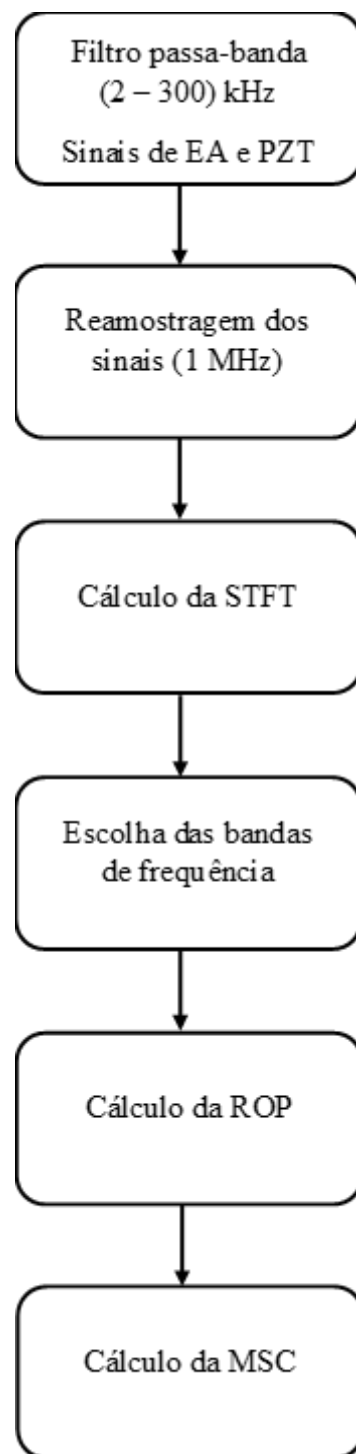
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, através da Equação 9 e Equação 10, foi obtida uma resolução de tempo-frequência de 5 ms e 400 Hz, respectivamente. Em função das análises preliminares, realizadas com diferentes janelas (Hanning, Hamming, retangular e Blackman), a janela retangular foi definida como a mais adequada para o cálculo da STFT dos sinais de EA e PZT. A partir de análises visuais, foi determinado que a janela retangular proporcionou uma atenuação satisfatório ao ruído de fundo. A sobreposição de 90% permitiu melhorar a resolução no domínio do tempo sem afetar a resolução na frequência, esse parâmetro também foi determinado por meio das análises preliminares. A escolha do tamanho da janela permite considerar que o sinal apresenta um comportamento estacionário para cada intervalo janelado.

Uma banda de frequência foi escolhida para cada sensor. O valor absoluto da STFT foi considerado para a escolha das bandas de frequência. Assim, o critério utilizado na seleção de bandas de frequências foi baseado na busca de intervalos de frequência que apresentam valor semelhante ao longo do tempo e diferenças de magnitude (barra de cores) relacionadas às condições do processo (leve, moderada e severa). Os valores absolutos da STFT e a resolução de tempo-frequência foram utilizados para calcular o parâmetro ROP, aplicado nas bandas de frequência escolhidas.

A magnitude quadrática de coerência (MSC) foi calculada para três ensaios de retificação: 25 μm , 105 μm e 350 μm , representando condições de corte leves, moderadas e severas, respectivamente. Finalmente, o envelope superior de cada resultado foi obtido para representar mais claramente os resultados da MSC; o envelope foi calculado dividindo os resultados da MSC em janelas de 2048 pontos, que correspondem a intervalos de tempo de aproximadamente 1 ms da seção total de retificação. A Figura 15 mostra o esquemático do processamento de sinais no domínio tempo-frequência.

Figura 15. Esquemático do processamento de sinais no domínio tempo-frequência.



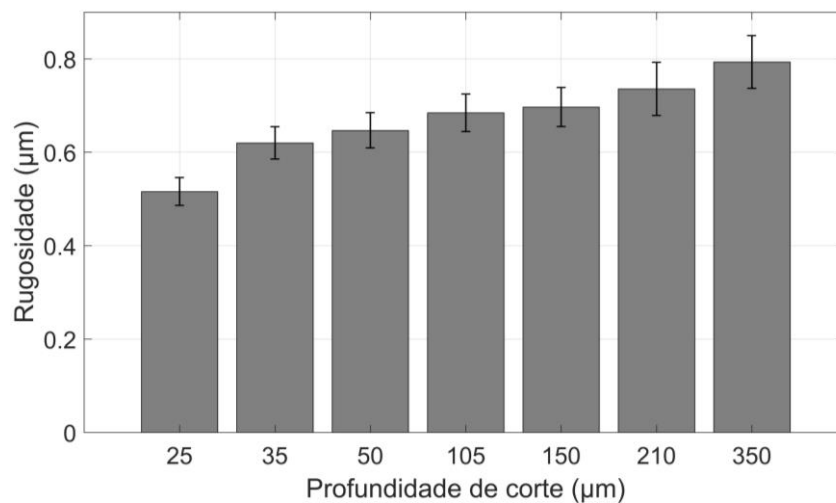
Fonte: Elaborado pelo autor.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA PEÇA

Na Figura 16, os valores de rugosidade superficial aumentaram com a profundidade de corte devido a uma condição severa de usinagem. Isso pode ser explicado pelo fato de que um aumento da área de contato entre a peça de trabalho e os grãos abrasivos do rebolo gera um aumento proporcional na taxa de remoção de material. Como consequência, as forças de corte do rebolo na superfície da peça também aumentam, levando a um possível aumento na temperatura de corte e afetando adversamente a qualidade da superfície da peça. Além disso, altos valores de desvio padrão podem ser observados na Figura 16, que são geralmente usuais para medições de rugosidade superficial devido a variações nos picos e vales resultantes da usinagem. Todos os valores de rugosidade superficial (parâmetro R_a) coletados neste trabalho foram inferiores a $0,8 \mu\text{m}$, abaixo do limite de rejeição estipulado de $1,6 \mu\text{m}$ para o processo de retificação relatado na literatura (MARINESCU et al., 2012).

Figura 16. Rugosidade R_a .



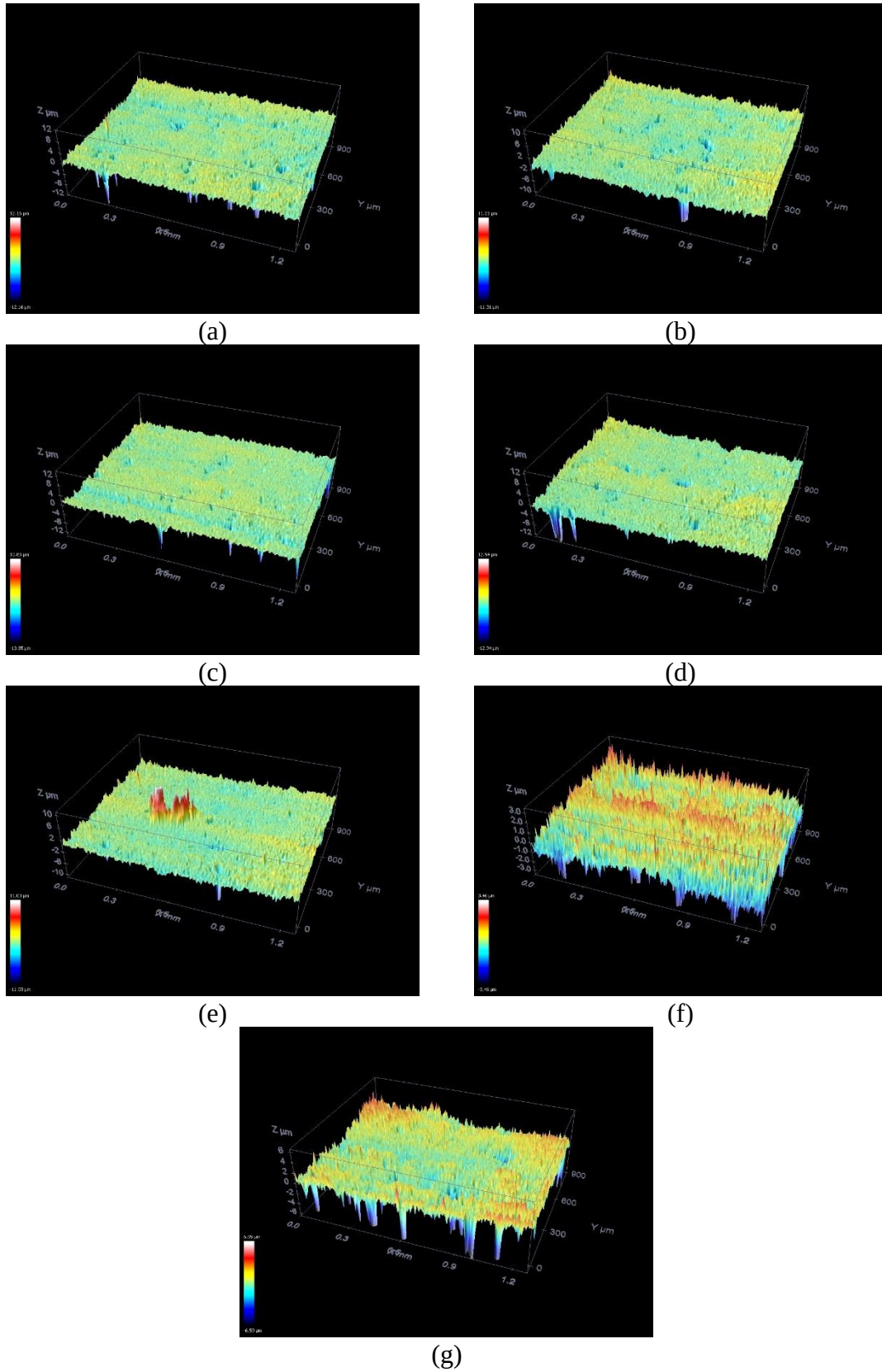
Fonte: Elaborado pelo autor.

As medidas foram realizadas na região central da peça para cada profundidade de corte, a fim de detectar micro defeitos na superfície da peça. Pode ser observado na Figura 17 que as condições de corte leves (Figura 17a, Figura 17b e Figura 17c) não mostraram defeitos significativos causados pelo processo de retificação. Entretanto, algumas

irregularidades na superfície da cerâmica, como trincas e porosidade, podem ser observadas.

A influência do processo de retificação na superfície da peça aumenta com a profundidade de corte. O aumento da área de contato entre a superfície da peça de trabalho e os grãos abrasivos do rebolo gera um aumento na taxa de remoção do material, o que levou a uma diminuição da qualidade superficial, aumentando o número de trincas superficiais. Nas condições de corte moderadas (Figura 17d e Figura 17e), há um aumento de irregularidades na superfície da peça devido ao aumento das forças de corte, que causam um aumento na temperatura da superfície, desgaste do rebolo e evidentemente afetando a qualidade da superfície da peça. A Figura 17e mostra uma irregularidade predominante na parte central esquerda da peça, isto foi causado por uma trinca originada durante o processo de fabricação da peça, que foi ampliada pelo processo de retificação. As outras regiões da peça apresentaram irregularidades uniformes, consistentes com a severidade do processo. Os efeitos mais significativos na superfície da peça foram observados nas condições severas de corte (Figura 17f e Figura 17g); as irregularidades e diferenças de cor nas imagens estão relacionadas à adjacência dos vales formados e à distância entre os picos e vales na superfície da cerâmica usinada. Os efeitos de retificação mencionados acima no processo leve e moderado tornam-se mais severos nas duas últimas profundidades de corte, onde as mudanças de cor podem ser observadas em toda a superfície da peça. As imagens 3D indicam claramente a crescente distância pico a vale, isto é, maior rugosidade superficial.

Figura 17. Microscopia confocal: (a) 25 μm ; (b) 35 μm ; (c) 50 μm ; (d) 105 μm ; (e) 150 μm ; (f) 210 μm e (g) 350 μm .

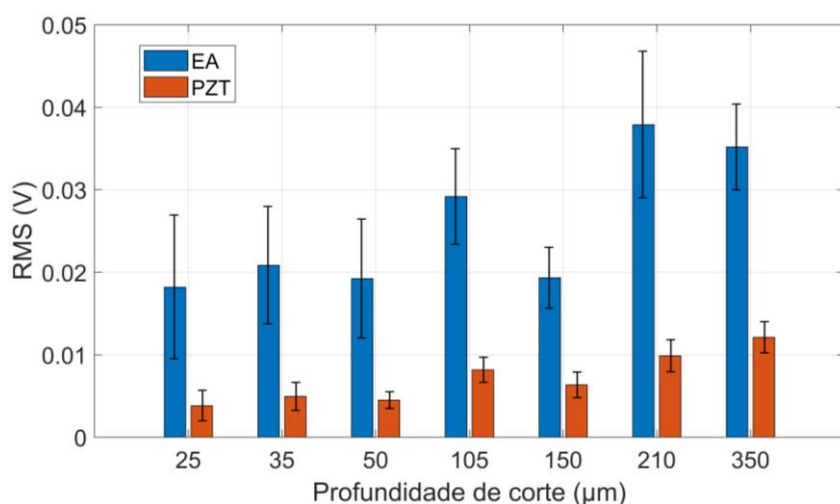


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. RESULTADOS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

A Figura 18 mostra os valores médios de RMS dos sensores (EA e PZT) em cada profundidade de corte. Ambos os resultados apresentam comportamento semelhante, aumentam com a profundidade de corte, apesar dos altos valores de desvio padrão para o sinal de EA. Este comportamento está de acordo com a literatura, já que a usinagem sob condições mais severas significa maior taxa de remoção de material. Além disso, as grandes variações de desvio padrão se devem à alta atividade acústica do processo, que é uma função dos parâmetros de retificação, como profundidade de corte, velocidade de corte, material da peça, rebolo e fluido de corte. Comparando os resultados dos sinais de EA e PZT com os valores de rugosidade superficial (Figura 16), é possível inferir que eles têm uma tendência similar. Um aspecto importante que deve ser considerado na análise desses testes é que os sinais sempre seguem as tendências do processo e têm relação direta com as condições de retificação.

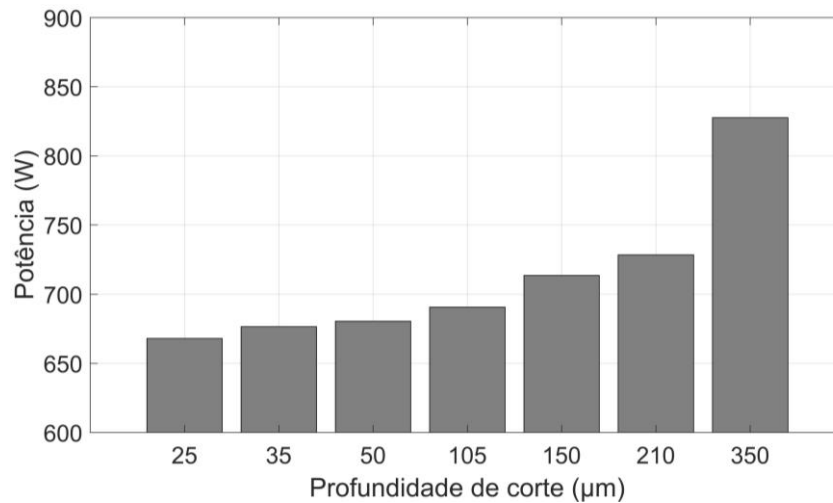
Figura 18. RMS não filtrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 19 mostra a potência de retificação em função da profundidade de corte. Um comportamento crescente de potência pode ser observado devido ao aumento do valor da profundidade de corte, que conseqüentemente aumenta a taxa de remoção de material, isto ocorreu principalmente na profundidade de corte de 350 μm , já que é necessário um maior esforço para remover um certo volume de material.

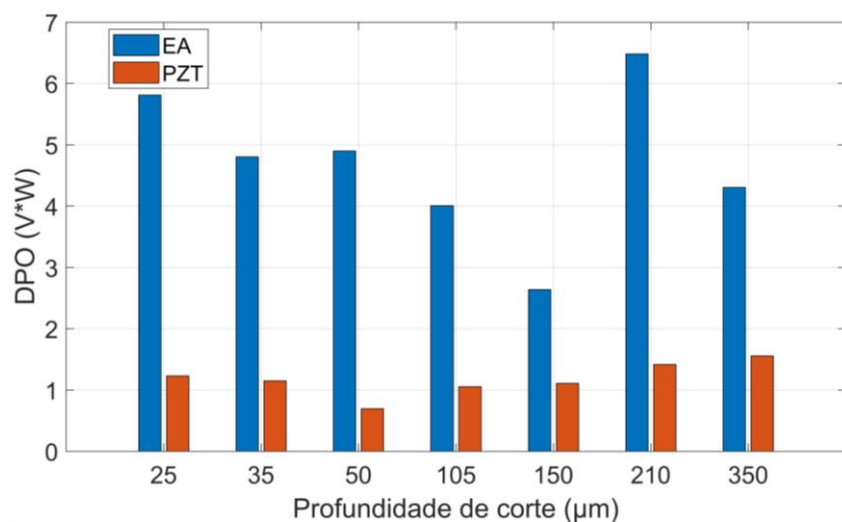
Figura 19. Potência de retificação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da estatística DPO considerando todo o espectro de frequência (não filtrado) são mostrados na Figura 20. Pode ser observado que não há correlação evidente entre os valores medidos de rugosidade e a estatística DPO, isto se deve às diferenças entre cada desvio padrão. Quando não filtrado, o sinal contém uma alta incidência de ruído e vibrações do sistema, o que leva a grandes diferenças na atividade acústica, sendo detectado pelos sensores. Em baixas profundidades de corte, nem todos os grãos abrasivos do rebolo entram em contato com a peça, gerando uma intermitência no nível de energia, que aumenta nas regiões de maior contato.

Figura 20. DPO não filtrado.



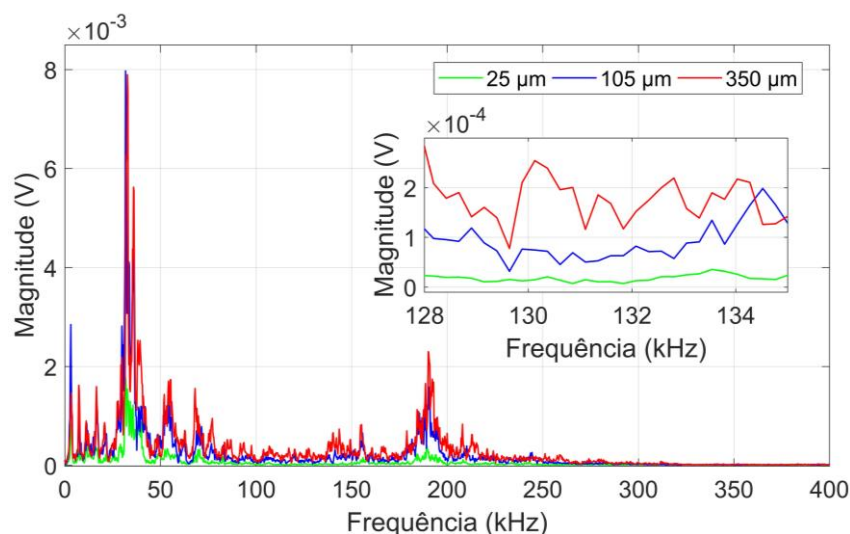
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 e Figura 22 mostra o espectro de frequência (FFT) dos sensores de (a) EA e (b) PZT, respectivamente, para três valores de profundidade de corte, representando condições leves (25 μm), médias (105 μm) e severas (350 μm) de retificação. A amplitude dos sinais apresentou diferentes características no domínio da frequência de acordo com a condição de retificação, um processo de retificação severa gera maior atividade de emissão acústica. A diferença de magnitude espectral entre os dois sensores deve-se à sensibilidade de cada sensor e ao uso do condicionador de sinal do sensor de EA, que elimina ruído e amplifica o sinal.

Uma banda de frequência foi escolhida para cada sensor (EA e PZT). Conforme estabelecido por Ribeiro et al., (2017), o critério utilizado na seleção de bandas de frequência baseou-se na busca de janelas de frequência nas quais diferenças significativas de magnitude do sinal para cada condição de superfície foram observadas. Além disso, foi procurado um mínimo de sobreposição entre os três sinais.

O sensor de emissão acústica utilizado nos testes tem uma resposta em frequência de até 400 kHz, entretanto na Figura 21 apenas frequências de até aproximadamente 250 kHz foram observadas com um nível significativo. A maior atividade no espectro pode ser observada em aproximadamente 40 kHz. O conteúdo harmônico do sinal adquirido dependerá do processo monitorado e de seus parâmetros. A banda escolhida para a análise de frequência do sensor de EA foi de 129-134 kHz. A Figura 21 também mostra uma ampliação da banda de frequência escolhida, onde não há sobreposição de sinal para as condições de retificação.

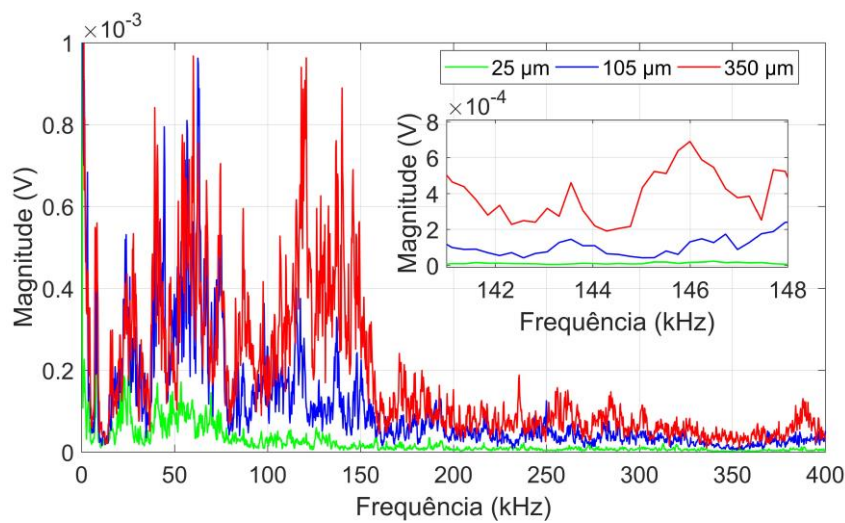
Figura 21. Espectro de frequência e banda de frequência do sensor de EA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser observado na Figura 22 que a maior atividade espectral para o diafragma PZT está na faixa de 1-160 kHz. Como mostrado por De Freitas; Baptista, (2016), o diafragma PZT possui uma resposta em frequência eficiente em até 200 kHz, pois o sinal observado após essa frequência possui uma atenuação que pode levar a resultados errôneos. A banda escolhida para o diafragma PZT foi de 142-147 kHz, dentro da faixa operacional do sensor. Uma ampliação da banda de frequência é mostrada na Figura 22, onde as diferenças nas magnitudes dos sinais são evidentes e nenhuma sobreposição é observada para as condições de retificação.

Figura 22. Espectro de frequência e banda de frequência do sensor PZT.

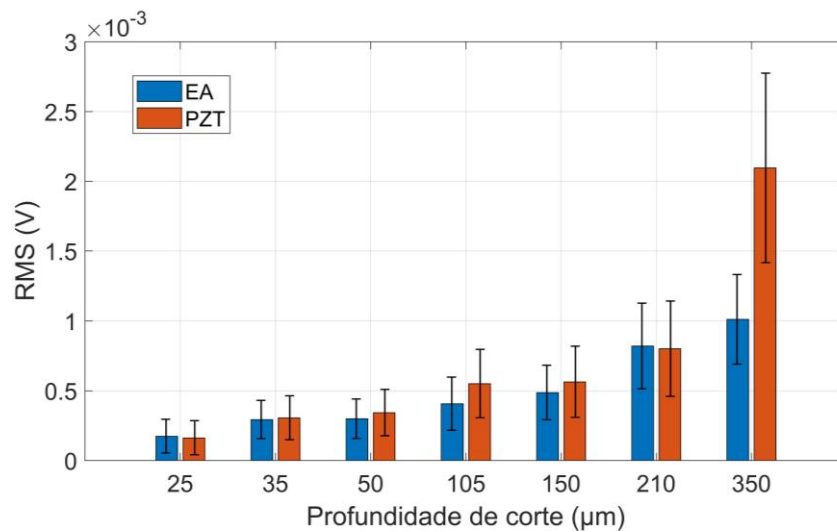


Fonte: Elaborado pelo autor.

Depois de selecionar as bandas de frequência, os sinais de EA e PZT foram filtrados por um filtro passa-banda digital. Os valores médios e desvios padrão dos novos vetores são mostrados na Figura 23. Um comportamento crescente, que não era tão evidente na Figura 18 (não filtrado), pode ser claramente observado. Ao considerar a banda de frequência, é possível estabelecer uma correlação entre os sinais RMS e a rugosidade da superfície da peça; os dois resultados mostraram o mesmo comportamento crescente.

Um processo de retificação mais severo resulta em maior rugosidade superficial e atividade acústica. A diferença de amplitude entre os dois sensores é causada pela amplitude das bandas de frequência selecionadas; neste caso, a faixa de frequência (142-147 kHz) aplicada ao sinal PZT possui uma amplitude maior quando comparada à faixa de frequência (129-134 kHz) escolhida para o sinal de EA.

Figura 23. RMS filtrado.



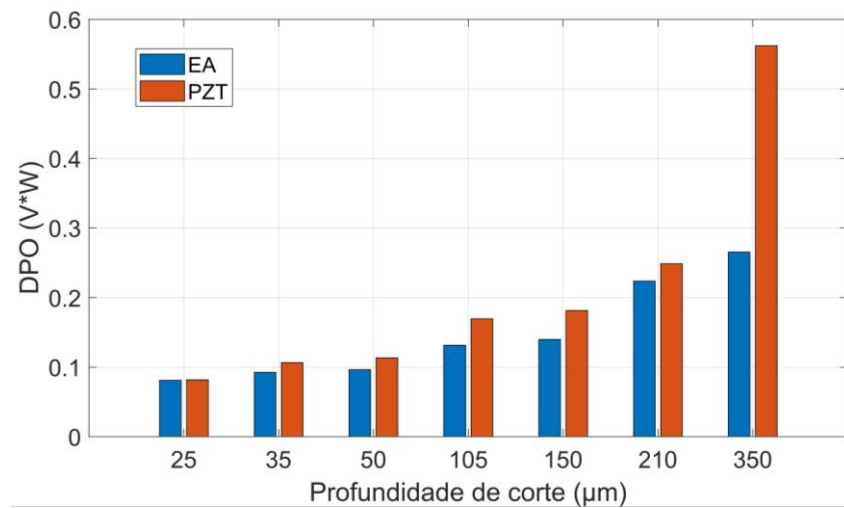
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de desvio padrão aumentam à medida que a condição do processo se torna mais severa. Os resultados RMS não filtrados não representaram totalmente a qualidade da superfície da peça; em contraste, os sinais filtrados mostraram uma melhoria significativa para as duas bandas escolhidas.

A Figura 24 mostra a estatística DPO filtrada para os dois sensores. Pode ser observado que há uma grande similaridade entre a rugosidade superficial e a estatística DPO, um limiar pode ser facilmente estabelecido para diferenciar as condições da superfície da peça. O resultado filtrado corrigiu o comportamento da Figura 20 e permitiu uma melhor análise do processo. O diafragma PZT de baixo custo foi sensível a mudanças na atividade acústica durante o processo; ambos os sensores apresentaram resultados semelhantes.

Com base nas observações, os resultados apresentaram o mesmo comportamento que a rugosidade superficial quando filtrados em bandas de frequência, o que os torna mais atrativos para o monitoramento das condições da superfície da peça. Assim, as características dos sensores demonstraram a importância de encontrar bandas de frequência que melhor representem cada condição de retificação.

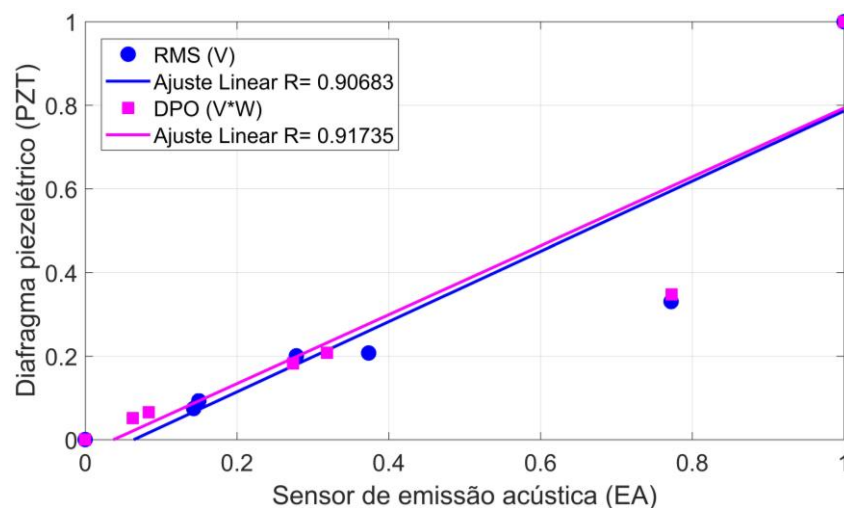
Figura 24. DPO filtrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 25 mostra o resultado da correlação entre os dois sensores (PZT e EA). A relação de similaridade entre o sensor de baixo custo (PZT), estudado neste trabalho, e o sensor consolidado (EA), utilizado como comparação, foi obtida através do coeficiente de determinação (R), com $R = 1$ representando um ajuste linear ideal de correlação, e 0 representando a completa falta de correlação entre os sinais.

Figura 25. Correlação entre o diafragma PZT e o sensor de EA.



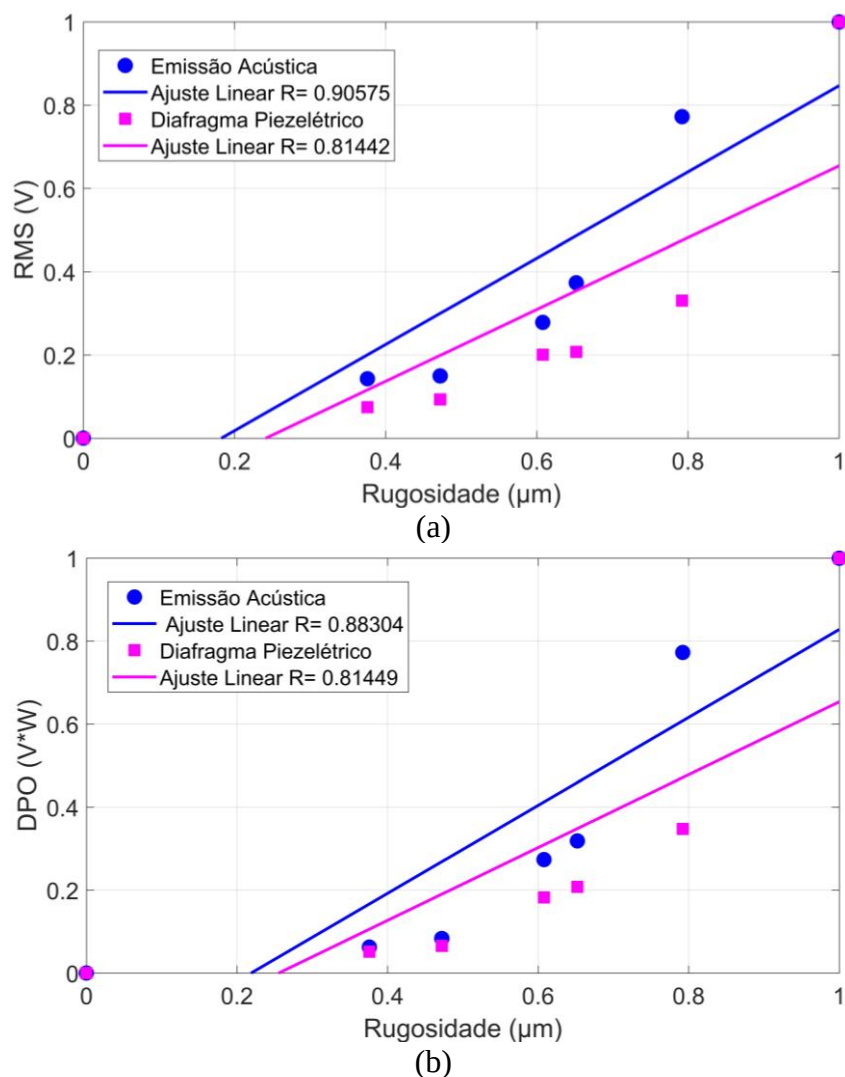
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 25, duas regressões lineares, correspondentes às estatísticas RMS e DPO, podem ser observadas, onde cada ponto corresponde a uma profundidade específica

de corte. Em ambos os casos, observou-se um comportamento crescente, como na Figura 23 e Figura 24. O sensor de EA consolidado foi considerado como o parâmetro base para o cálculo da correlação. A correlação apresentou resultados satisfatórios, com uma similaridade de 0,90683 e 0,91735 para as estatísticas RMS e DPO, respectivamente. Esses resultados (próximos de 1) confirmam a viabilidade de empregar o diafragma PZT de baixo custo no monitoramento do processo em relação à sua atividade acústica e variáveis estudadas.

A Figura 26 mostra a correlação entre as estatísticas (a) RMS, (b) DPO e a rugosidade superficial média (R_a) para cada peça retificada em diferentes profundidades de corte. Os valores de rugosidade medidos diretamente com o rugosímetro portátil foram considerados como base para o cálculo da correlação.

Figura 26. Correlação entre (a) RMS e rugosidade e (b) DPO e rugosidade para ambos os sensores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

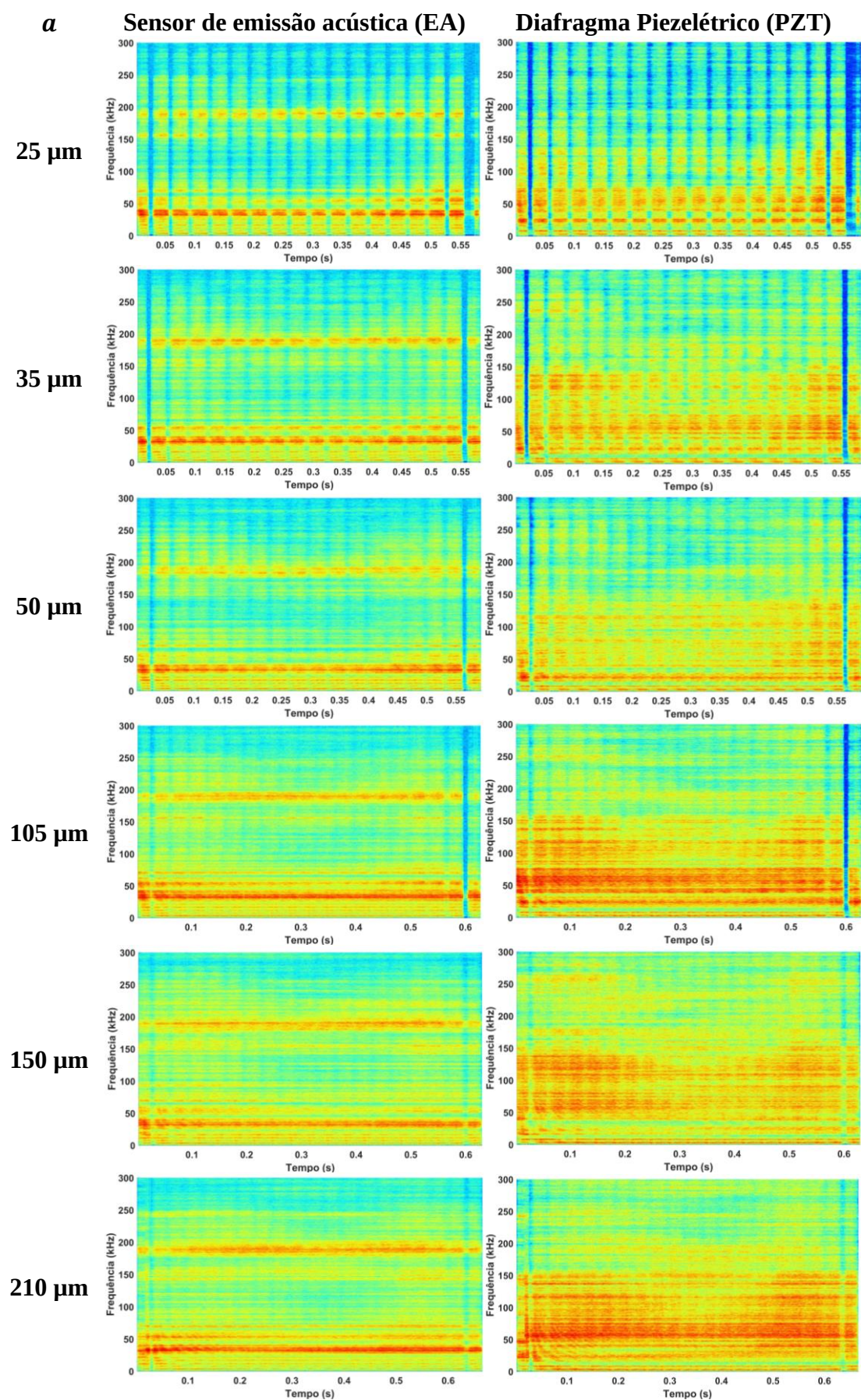
Os resultados mostraram que as duas estatísticas apresentaram resultados semelhantes para o diafragma PZT, com aproximadamente 81,44% de similaridade entre a rugosidade e a estatística RMS (Figura 26a), e entre a rugosidade e a estatística DPO (Figura 26b), que é uma alta porcentagem de similaridade entre os resultados do sensor proposto e o parâmetro monitorado (rugosidade). O sensor de EA consolidado apresentou resultados semelhantes aos apresentados pelo diafragma PZT, com coeficientes de determinação de 0,90575 e 0,88304 para as estatísticas RMS e DPO, respectivamente. Desta forma, é possível comprovar que o diafragma PZT de baixo custo tem a capacidade de detectar mudanças na retificação de componentes cerâmicos, que estão diretamente relacionadas à qualidade superficial das peças.

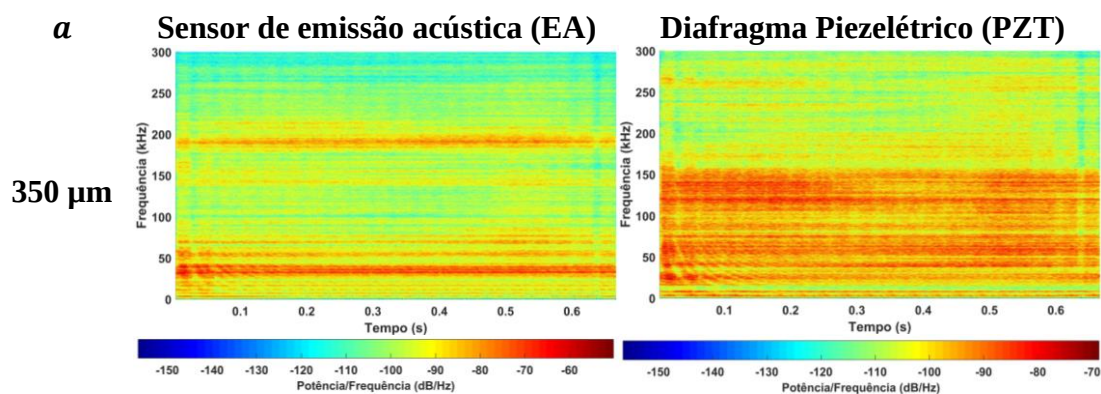
4.3. RESULTADOS NO DOMÍNIO TEMPO-FREQUÊNCIA

Os espectrogramas obtidos através da STFT dos sensores de EA e PZT para as condições de retificação leves, moderadas e severas são mostrados na Figura 27. A escala de cores nos espectrogramas representa a magnitude de uma frequência em um determinado intervalo de tempo, as frequências características do processo, bem como as frequências mais influentes são mostradas em diferentes tons de vermelho. Por outro lado, frequências pouco sensíveis ao processo de retificação são apresentadas em tons de azul. As cores verde, amarela e laranja, localizadas no meio da escala de cores, representam frequências sensíveis ao processo, mas com menor influência em relação às vermelhas.

Nos espectrogramas correspondentes às três condições de retificação leves (25 μm , 35 μm e 50 μm), variações de magnitude podem ser observadas ao longo do tempo. Essas variações foram relacionadas ao contato entre a superfície da peça e os grãos abrasivos do rebolo, que apresentaram um comportamento não uniforme, uma vez que muitos dos grãos abrasivos não tiveram contato com a superfície da peça, gerando baixos níveis de energia. Assim, pouca atividade acústica foi gerada, refletindo diretamente no conteúdo harmônico dos sinais amostrados durante o processo. Deve ser lembrado que o sensor PZT tem uma resposta em frequência de até 200 kHz, no entanto, é possível observar a presença de frequências mais altas em vários tons de amarelo que são atenuações e não representam o valor real da frequência. Portanto, eles não devem ser considerados neste estudo. Por outro lado, o sensor de EA apresentou, para estes testes específicos, frequências com um nível considerável de até 250 kHz.

Figura 27. Espectrogramas da transformada de tempo curto de Fourier (STFT).





Fonte: Elaborado pelo autor.

As duas condições moderadas de retificação (105 μm e 150 μm) apresentaram maiores magnitudes quando comparadas às condições leves. Um aumento nos tons vermelhos pode ser observado em todo o espectro de frequência, o que é causado principalmente pelo desgaste do rebolo, aumento da temperatura e severidade do processo. O padrão de cores mostrou-se mais uniforme devido ao aumento do contato entre os grãos abrasivos do rebolo e a superfície da peça. Os espectrogramas representando os processos severos de retificação (210 μm e 350 μm) apresentaram conteúdo harmônico uniforme ao longo do tempo. Isso foi causado pelo contato contínuo e severo entre os grãos abrasivos e a peça, gerando mais atividade acústica. Nas três condições de retificação foi observada uma frequência característica, com um valor aproximado de 35 kHz, distribuída continuamente ao longo do tempo. No entanto, para a condição de retificação mais severa, o conteúdo harmônico assumiu maiores níveis de magnitude. Os resultados obtidos na Figura 27 estão de acordo com os resultados das medidas diretas da Figura 16 e Figura 17. Ao igual que na Figura 17, é possível observar as mudanças de cor à medida que a severidade do processo aumenta, o que está diretamente relacionado à rugosidade superficial e qualidade da superfície da peça retificada.

Através dos espectrogramas gerados pela STFT, é possível diferenciar as condições de corte do processo de retificação. Nos resultados da Figura 27 foi possível observar as mudanças de magnitude através das diferentes condições de corte e da continuidade ao longo do tempo. Os dois sensores apresentaram resultados semelhantes, demonstrando uma boa sensibilidade à atividade acústica gerada pelo processo de retificação de cerâmica. O diafragma PZT de baixo custo apresentou cores mais fortes, o que representa uma maior sensibilidade aos estímulos do processo. No entanto, o sensor

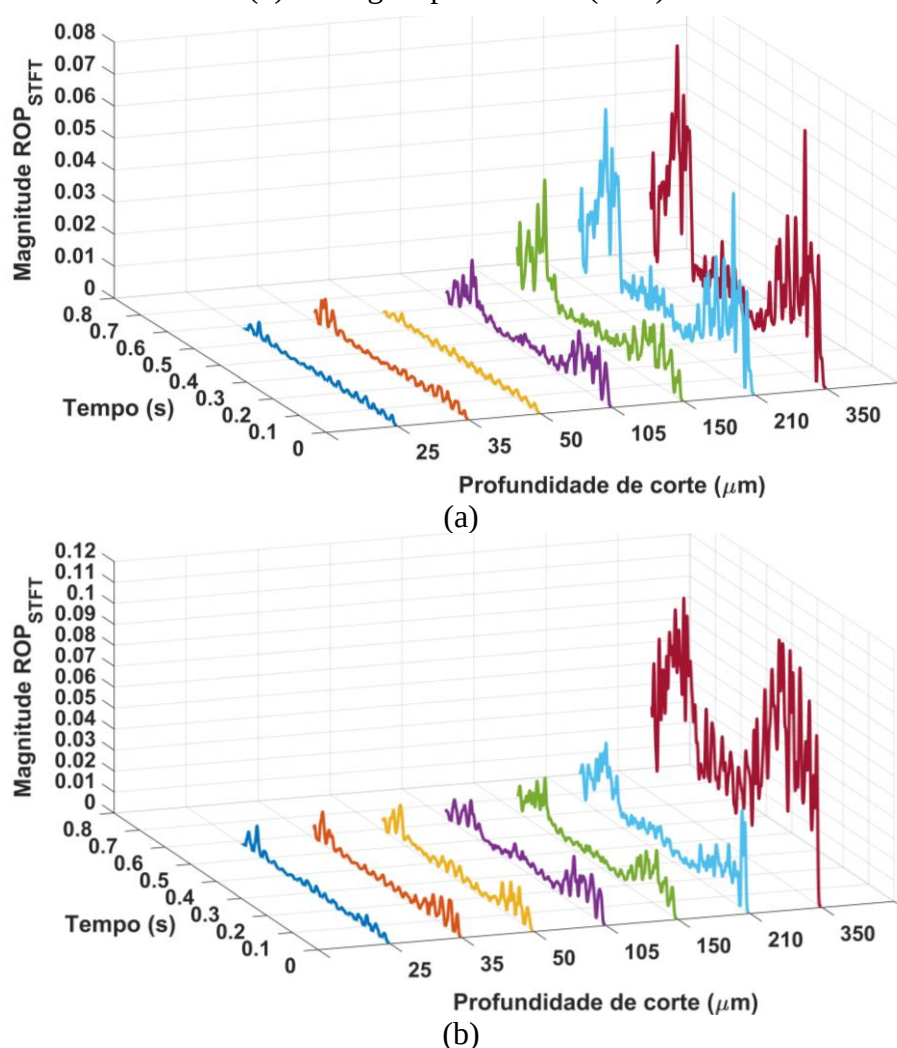
de EA possui uma maior banda de resposta de frequência e um condicionador de sinal que filtra e estabelece ganhos para os sinais puros, o que torna o sinal mais confiável e preciso ao longo do tempo.

As bandas de frequência foram escolhidas por meio dos espectrogramas mostrados na Figura 27, as mudanças de cor e a continuidade ao longo do tempo foram consideradas na análise. Como resultado, uma banda de frequência foi escolhida para cada sensor. As bandas de frequência escolhidas para o cálculo do parâmetro ROP foram (138 - 143) kHz para o sensor de EA e (142 - 147) kHz para o diafragma PZT de baixo custo. As duas bandas de frequência apresentaram características relacionadas às condições do processo.

Os resultados da ROP para ambos os sensores são mostrados na Figura 28. Pode ser observado que conforme a profundidade de corte aumenta, os valores de ROP aumentam proporcionalmente. Os resultados das três condições de corte leves apresentaram baixas magnitudes, enquanto condições moderadas e severas apresentaram maior magnitude e maior distância pico - vale. Isso ocorreu devido ao acúmulo de cavaco na região de corte, resultando em uma maior força de corte e, consequentemente, maior atividade de emissão acústica e rugosidade superficial. Portanto, a usinagem de cerâmica com um rebolo diamantado e uma profundidade de corte de 350 μm gerou os maiores valores de ROP, STFT e R_a .

Na Figura 28 pode ser claramente observado que existe um aumento de energia no início e no final do processo de retificação, todas as condições de corte apresentaram as mesmas características. Este é um comportamento típico do processo, uma vez que representa o primeiro contato dos grãos abrasivos do rebolo com a superfície da peça de trabalho, bem como o último contato. A área de contato rebolo-peça é menor no início e no final do processo de usinagem. Essa característica pode ser observada na Figura 17, de 0,0 a 0,2 e de 1,0 a 1,2 no eixo x, com mudanças de cor representando leves aumentos na rugosidade da superfície. Na região central das peças, a rugosidade superficial apresentou valores mais uniformes, essas mudanças tornam-se mais nítidas nas profundidades de corte que representam condições de corte severas.

Figura 28. Taxa de potência (ROP) referente ao sensor de (a) emissão acústica (EA) e (b) diafragma piezelétrico (PZT).

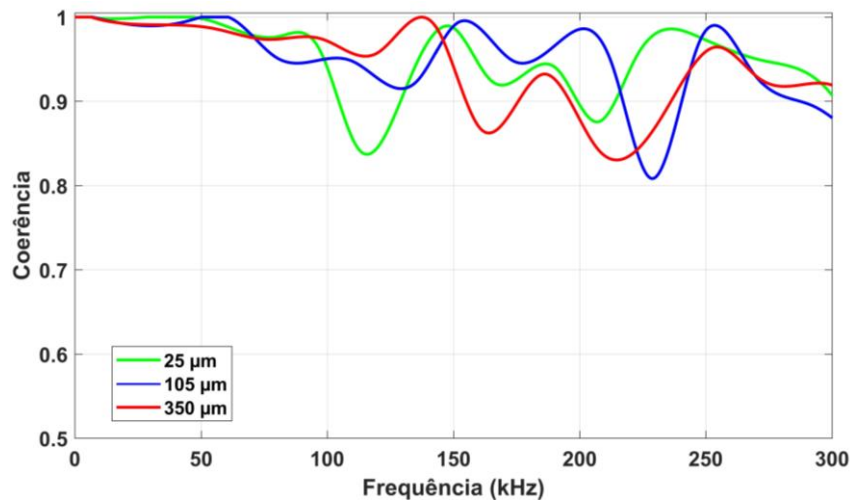


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da magnitude quadrática de coerência (MSC) para três condições de retificação podem ser observados na Figura 29. A coerência foi obtida a partir dos sinais puros de emissão acústica e piezelétrico no domínio do tempo. Cada um dos valores MSC indica quão bem o sinal PZT corresponde ao sinal de EA para cada frequência, com 1 representando um parâmetro de coerência ideal e 0 representando a completa falta de relação entre os sinais. Pode ser observado que, mesmo nas condições severas de corte, onde se espera maior atividade acústica e conteúdo espectral, os valores de MSC foram superiores a 80%. Os resultados apresentados na Figura 29 foram bem sucedidos e diretamente relacionados aos sinais de ambos os sensores sob várias condições de retificação, reforçando a aplicação do diafragma piezelétrico de baixo custo no monitoramento do processo de retificação de cerâmicas avançadas. Os menores valores

de MSC foram observados na faixa de frequência de entre (200 e 300) kHz, devido à atenuação do sensor PZT, que aumenta a diferença entre os sinais. O diafragma PZT de baixo custo demonstrou uma resposta similar ao sensor de EA, sendo sensível aos estímulos causados pelos processos de retificação testados no banco de ensaios proposto.

Figura 29. Magnitude quadrática de coerência (MSC) entre o sensor de EA e o diafragma PZT para três condições de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

O processo de retificação corresponde a uma das últimas etapas do processo de usinagem. Perdas na fase final da fabricação são consideradas inadmissíveis devido ao alto valor agregado ao produto. Assim, sistemas de monitoramento confiáveis e de baixo custo são necessários em função de auxiliar o operador na tomada de decisões. Tanto a ciência quanto a indústria têm buscado desenvolver sistemas de monitoramento capazes de fornecer um diagnóstico confiável da qualidade superficial da peça, a fim de promover melhor acabamento da peça e redução de custos. Baseado neste fato, o estudo realizado neste trabalho teve como foco a obtenção de um novo sistema de monitoramento confiável e de baixo custo. Embora o uso do transdutor piezelétrico tenha sido estudado no monitoramento do processo de retificação, muitas questões práticas têm limitado seu uso em aplicações reais, principalmente quando referida à retificação de componentes cerâmicos, os quais possuem uma alta dureza e fragilidade.

Tomando como base essa problemática, essa tese teve como objetivo desenvolver uma técnica inovadora de estimação da rugosidade de peças cerâmicas de alumina, no processo de retificação plana, por meio de diafragmas piezelétricos de baixo custo e ferramentas de processamento digital de sinais. Deste modo, a partir dos ensaios realizados, este trabalho exemplificou diferentes condições de corte, as quais simularam processos leves, médios e severos de corte. Técnicas tradicionais, como o uso das estatísticas RMS e FFT, foram utilizadas e comparadas com as estatísticas proposta neste trabalho, como a DPO, STFT, ROP e MSC.

O diafragma PZT foi comparado a um sensor de EA comercial, que é amplamente utilizado para monitoramento em vários campos de usinagem. Portanto, as seguintes conclusões podem ser tiradas deste trabalho:

- O aumento da atividade acústica foi proporcional ao aumento da rugosidade superficial;
- O diafragma PZT de baixo custo respondeu satisfatoriamente aos estímulos do processo, apresentando o mesmo comportamento do sensor de EA consolidado e seguindo a tendência de rugosidade da superfície da peça;

- Os valores dos desvios padrão para ambos os sensores estão mais relacionados às condições do processo e, conseqüentemente, à rugosidade da superfície, quando filtrados em bandas de frequência;
- As duas estatísticas (RMS e DPO) mostraram uma correlação com a qualidade da superfície da peça, especialmente quando os sinais foram filtrados;
- É importante mencionar que existem outras bandas de frequência para o diafragma PZT que poderiam ter sido investigadas, no entanto, elas podem ser consideradas para estudos futuros;
- Os resultados demonstram a confiabilidade de usar uma abordagem inovadora de monitoramento de sensores baseada em diafragmas PZT para o banco de ensaios proposto, que pode ser estendida a outros materiais e condições do processo;
- A análise de coerência entre as respostas do diafragma PZT de baixo custo e do sensor de EA convencional reforçaram os resultados obtidos, comprovando a viabilidade da utilização do diafragma PZT no monitoramento do processo de retificação, todos os valores de coerência foram superiores a 80%;

Assim, a aplicação prática consistirá na fixação do sensor PZT de baixo custo no suporte da peça, o qual pode ser ligado a um condicionador de sinal em função de aplicar filtros e diminuir ruído. Posteriormente, uma placa de aquisição de dados realizará a coleta do sinal a uma taxa de amostragem de pelo menos duas vezes a frequência máxima do sensor. Finalmente, por meio do valor médio das estatísticas será possível estabelecer o ponto de parada da máquina para troca ou afiação da ferramenta de corte.

O uso do diafragma PZT para o monitoramento da qualidade da superfície no processo de retificação é novo e há várias possibilidades para futuras aplicações e estudos. Um estudo futuro pode ser feito com novos métodos de análise de sinais e parâmetros de retificação. Também poderiam ser consideradas outras bandas de frequência e outros sensores piezelétricos de baixo custo. O uso de redes neurais de classificação ou mesmo de estimação pode ser mais estudado.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S.; RAO, P. V. A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 6, p. 609–616, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.10.005>

AGARWAL, S.; RAO, P. V. Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 65, p. 68–78, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.10.006>

AGARWAL, S.; RAO, P. Grinding characteristics, material removal and damage formation mechanisms in high removal rate grinding of silicon carbide. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 50, n. 12, p. 1077–1087, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.08.008>

AGUIAR, P. R. et al. In-process grinding monitoring by acoustic emission. In: 2004, **IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**. IEEE, 2004. p. V-405-8. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1327133>

AGUIAR, P. R. et al. In-process grinding monitoring through acoustic emission. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000100014>

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

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 Science & Engineering**, v. XXVII, n. 2, p. 150–156, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782005000200007>

ALBERRO, A. et al. Model Based on an Effective Material-Removal Rate to Evaluate Specific Energy Consumption in Grinding. **Materials**, v. 12, n. 6, p. 939, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12060939>

ALEXANDRE, F. A. et al. Depth of dressing optimization in CBN wheels of different friabilities using acoustic emission (AE) technique. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 11–12, p. 5225–5240, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04994-8>

ALEXANDRE, F. et al. Damage detection in grinding of steel workpieces through ultrasonic waves. **MATEC Web of Conferences**, v. 249, p. 2002, 2018 a. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824902002>

ALEXANDRE, F. A. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1–4, p. 67–79, 2018 b. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1582-0>

ANAND, P. S. P.; ARUNACHALAM, N.; VIJAYARAGHAVAN, L. Study on grinding of pre-sintered zirconia using diamond wheel. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 6, p. 634–643, 2018. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364761>

ASLAN, D.; BUDAK, E. Surface roughness and thermo-mechanical force modeling for grinding operations with regular and circumferentially grooved wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 223, p. 75–90, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.023>

BACCAR, D.; SÖFFKER, D. Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 60–61, p. 198–207, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.02.012>

BADGER, J.; MURPHY, S.; O'DONNELL, G. E. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.11.007>

BAPTISTA, F. et al. An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Sensors**, v. 14, n. 1, p. 1208–1227, 2014. <https://doi.org/10.3390/s140101208>

BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V. Transducer loading effect on the performance of PZT-based SHM systems. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 57, n. 4, p. 933–941, 2010. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1497>

BIANCHI, E. et al. Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis e Dúcteis. **Jornal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 19, n. 3, p. 410–425, 1997.

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Advanced ceramics: evaluation of the mechanism of stock removal and ground surface quality. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 23, n. 1, p. 9–22, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-73862001000100002>

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 10. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008. E-book.

CASTRO, B. et al. A low-cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by Piezoelectric Sensor. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 7, p. 3225–3231, 2016a. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7587624>

CASTRO, B. A. et al. Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1266, 2016b. <https://doi.org/10.3390/s16081266>

CASTRO, B. A. et al. Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 18, p. 6090–6099, 2017. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2735858>

CHEN, M.-Y.; CHEN, B.-T. Online fuzzy time series analysis based on entropy discretization and a Fast Fourier Transform. **Applied Soft Computing**, v. 14, p. 156–166, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.07.024>

CHOUDHARY, A.; PAUL, S. The wear mechanisms of diamond grits in grinding of alumina and yttria-stabilized zirconia under different cooling-lubrication schemes. **Wear**, v. 454–455, p. 203315, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203315>

CONCEIÇÃO JUNIOR, P. O. C. et al. The correlation of vibration signal features in grinding of advanced ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 9, p. 4006–4012, 2016. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7785926>

CONCEIÇÃO JUNIOR, P. O. C. et al. Wear Monitoring of Single-Point Dresser in Dry Dressing Operation Based on Neural Models. **Modelling, Identification and Control**. Calgary, AB, Canada: ACTAPRESS, 2017. <https://doi.org/10.2316/P.2017.848-054>

CONCEIÇÃO JUNIOR, P. O. C. et al. Feature extraction using frequency spectrum and time domain analysis of vibration signals to monitoring advanced ceramic in grinding process. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 1, p. 1–8, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5178>

D’ADDONA, D. M. et al. Tool Condition Monitoring of Single-point Dressing Operation by Digital Signal Processing of AE and AI. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 307–312, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.218>

DAMBATTA, Y. S. et al. Ultrasonic assisted grinding of advanced materials for biomedical and aerospace applications—a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9–12, p. 3825–3858, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0316-z>

DE ALMEIDA, V. A. D.; BAPTISTA, F. G.; DE AGUIAR, P. R. Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 2, p. 693–702, 2015. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2352171>

DE FREITAS, E.; BAPTISTA, F. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 238, p. 220–228, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031>

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4a ed. Campinas, SP, 2003. E-book.

DO NASCIMENTO, W. R. et al. A study on the viability of minimum quantity lubrication with water in grinding of ceramics using a hybrid-bonded diamond wheel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 9, p. 1630–1638, 2016. <https://doi.org/10.1177/0954405415579016>

DOS SANTOS JUNIOR, M. M. dos S. et al. Analysis of Piezoelectric Sensors in Adulteration of Bovine Milk Using the Chromatic Technique. **Proceedings**, v. 4, n. 1, p. 38, 2018. <https://doi.org/10.3390/ecsa-5-05728>

DOTTO, F. R. L. et al. Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 2, p. 153–160, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000200004>

DOU, J. et al. An unsupervised online monitoring method for tool wear using a sparse auto-encoder. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 5–6, p. 2493–2507, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04788-7>

DUMSTORFF, G. et al. Steel integrated thin film sensors for characterizing grinding processes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 242, p. 203–209, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.03.014>

FENG, J. et al. Tool wear monitoring for micro-end grinding of ceramic materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 11, p. 5110–5116, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.02.009>

FERREIRA, F. I. et al. Electromechanical impedance (EMI) measurements to infer features from the grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 5–6, p. 2035–2048, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04733-8>

FERREIRA JUNIOR, P. A. F. et al. Low-Cost Piezoelectric Sensor Characterization for Energy Harvesting Applications. **Proceedings**, v. 4, n. 1, p. 25, 2018. <https://doi.org/10.3390/ecsa-5-05749>

GAO, C.; WANG, S.; WU, G. Study of milling on Al₂O₃ ceramic/GFRP component using sintering diamond tools. **Australian Journal of Mechanical Engineering**, v. 16, n. 1, p. 65–73, 2018. <https://doi.org/10.1080/14484846.2017.1325153>

GAO, Z. et al. Online evaluation of metal burn degrees based on acoustic emission and variational mode decomposition. **Measurement**, v. 103, p. 302–310, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.049>

GISH, H.; COCHRAN, D. Generalized coherence (signal detection). In: 1988, ICASSP-88., **International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**. IEEE, 1988. p. 2745–2748. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1988.197218>

GUO, W. et al. Prediction of surface roughness based on a hybrid feature selection method and long short-term memory network in grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 112, n. 9–10, p. 2853–2871, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06523-z>

GUO, S. et al. Experimental evaluation of the lubrication performance of mixtures of castor oil with other vegetable oils in MQL grinding of nickel-based alloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1060–1076, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.073>

GUO, Y.; LIU, M.; LI, C. Modeling and experimental investigation on grinding force for advanced ceramics with different removal modes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 11–12, p. 5483–5495, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05013-6>

HAO, X. et al. Experimental research on pulse laser assisted micro turning of ZrO₂ ceramic. **International Journal of Nanomanufacturing**, v. 14, n. 2, p. 165, 2018. <https://doi.org/10.1504/IJNM.2018.091582>

HE, B. et al. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**, v. 134, p. 426–439, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.093>

HUANG, H. et al. Science and art of ductile grinding of brittle solids. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 161, p. 103675, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103675>

HÜBNER, H. B.; DUARTE, M. A. V.; DA SILVA, R. B. Automatic grinding burn recognition based on time-frequency analysis and convolutional neural networks. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 110, n. 7–8, p. 1833–1849, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05902-w>

HÜBNER, H. B. et al. A comparative study of two indirect methods to monitor surface integrity of ground components. **Structural Health Monitoring**, v. 19, n. 6, p. 1856–1870, 2020. <https://doi.org/10.1177/1475921720903442>

IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY. **An American National Standard**. New York, 1987.

JAHANMIR, S.; RAMULU, M.; KOSHY, P. **Machining of Ceramics and Composites**. 9. ed. New York, NY, USA: Marcel Dekker Inc., 1998. E-book.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R.; SEKAR, K. S. V. **Manufacturing engineering and technology**. E-book. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

KHARE, S. K.; AGARWAL, S. Predictive Modeling of Surface Roughness in Grinding. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 375–380, 2015: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.092>

KIM, B. S. S. et al. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187–188, p. 30–36, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.222>

KIM, H. et al. Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 111, n. 1–3, p. 273–278, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00533-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00533-7)

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of Modern Grinding Technology**. Boston, MA: Springer US, 1987. E-book. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1965-8>

KHAZI, I. et al. Real time In-Situ Quality Monitoring of Grinding Process using Microtechnology based Sensor Fusion. **2020 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)**, p. 180–184, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSE49846.2020.9166898>

KHODAILI, J. et al. Investigation of the surface integrity, flexural strength on the grinding of alumina for biomedical applications. **Precision Engineering**, v. 67, p. 110–122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.09.019>

LEE, D. E. E. et al. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 176–188, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001>

LIAO, D. et al. Numerical generation of grinding wheel surfaces based on time series method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 1–4, p. 561–569, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0868-y>

LIMA, É. et al. Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection. **17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. IEEE, 2016. p. 350–355. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783465>

LIN, Y.-K.; WU, B.-F.; CHEN, C.-M. Characterization of Grinding Wheel Condition by Acoustic Emission Signals. **2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)**. IEEE, 2018. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2018.8520249>

LIPIŃSKI, D.; BAŁASZ, B.; RYPINA, Ł. Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generalisation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 1–4, p. 1335–1347, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0949-y>

LIU, W. et al. Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 1571–1577, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.10.135>

LIU, Y. et al. Correlation analysis of motor current and chatter vibration in grinding using complex continuous wavelet coherence. **Measurement Science and Technology**, v. 27, n. 11, p. 115106, 2016. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/11/115106>

LOPES, B. G. et al. Study on the effect of the temperature in Acoustic Emission Sensor by the Pencil Lead Break Test. **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. IEEE, 2018. p. 1226–1229. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627213>

LOPES, W. et al. An efficient short-time Fourier transform algorithm for grinding wheel condition monitoring through acoustic emission. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 1–2, p. 585–603, 2021 a. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06476-3>

LOPES, W. et al. Method for Fault Detection of Aluminum Oxide Grinding Wheel Cutting Surfaces Using a Piezoelectric Diaphragm and Digital Signal Processing Techniques. **Measurement**, p. 109503, 2021 b. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109503>

LOPES, W. et al. Digital signal processing of acoustic emission signals using power spectral density and counts statistic applied to single-point dressing operation. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 11, n. 5, p. 631–636, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0317>

LUCAS, G. B. et al. Three-phase induction motor loading estimation based on Wavelet Transform and low-cost piezoelectric sensors. **Measurement**, v. 164, p. 107956, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107956>

LUCAS, G. B. et al. Study of a Three Phase Induction Motor Load Estimation System by Low-Cost Piezoelectric Sensor. **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. IEEE, 2018. p. 599–605. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627075>

MADOPOTHULA, U.; NIMMAGADDA, R. B.; LAKSHMANAN, V. Assessment of white layer in hardened AISI 52100 steel and its prediction using grinding power. **Machining Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 299–319, 2018. <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1365891>

MAHATA, S.; SHAKYA, P.; BABU, N. R. A robust condition monitoring methodology for grinding wheel wear identification using Hilbert Huang transform. **Precision Engineering**, v. 70, p. 77–91, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.01.009>

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2nd ed. ed. New York, NY, USA: Industrial Press, 2008. E-book.

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. E-book. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67070-2>

MARINESCU, I.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E. **Handbook of machining with grinding wheels**. E-book. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

MARTINS, C. H. R. et al. Tool condition monitoring of single-point dresser using acoustic emission and neural networks models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 3, p. 667–679, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2281576>

MIRANDA, H. I. et al. Monitoring single-point dressers using fuzzy models. In: 2015, **Procedia CIRP**. p. 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.050>

MOIA, D. F. G. G. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 2, p. 627–640, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0191-6>

NAKAI, M. E. et al. Evaluation of neural models to estimate the roughness of advanced ceramics in surface grinding. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 17, n. 5, p. 454–479, 2015 a.

NAKAI, M. E. et al. Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 20, p. 7026–7035, 2015 b. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.008>

NALON, J. A. **Introdução ao processamento digital de sinais**. 1 ed. ed. Rio de Janeiro, 2014. E-book.

NESLUŠAN, M. et al. Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 240, p. 104–117, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.015>

ORALLO, C. M. et al. Harmonics Measurement with a Modulated Sliding Discrete Fourier Transform Algorithm. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 4, p. 781–793, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2287801>

PACHAURY, Y.; TANDON, P. An overview of electric discharge machining of ceramics and ceramic based composites. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 369–390, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.010>

PAN, Y. et al. New insights into the methods for predicting ground surface roughness in the age of digitalisation. **Precision Engineering**, v. 67, p. 393–418, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.11.001>

PARK, J.-B.; JEON, Y.; KO, Y. Effects of titanium brush on machined and sand-blasted/acid-etched titanium disc using confocal microscopy and contact profilometry. **Clinical Oral Implants Research**, v. 26, n. 2, p. 130–136, 2015. <https://doi.org/10.1111/clr.12302>

PAWAR, P.; KUMAR, A.; BALLAV, R. Parametric study of electrochemical discharge drilling on ceramic material using Taguchi method. **Journal of Mechanical and Energy Engineering**, v. 2, n. 3, p. 193–200, 2018. <https://doi.org/10.30464/jmee.2018.2.3.193>

PAWLEY, J. B. **Handbook of biological confocal microscopy**: Third edition. E-book. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45524-2>

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing**. Fourth Edition. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2006. E-book.

RAMESH, K. et al. Experimental Evaluation of Super High-Speed Grinding of Advanced Ceramics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 17, n. 2, p. 87–92, 2001. <https://doi.org/10.1007/s001700170196>

RIBEIRO, D. M. S. et al. Study of Surface Roughness of Ground Ceramics By Vibration Signal Analysis. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, v. 23, p. 1–10, 2015.

RIBEIRO, D. M. S. et al. Spectra Measurements Using Piezoelectric Diaphragms to Detect Burn in Grinding Process. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 11, p. 3052–3063, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2731038>

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. Massachusetts: William Andrew, 2016. E-book. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-06952-6>

SANCHEZ, L. E. A. et al. Allowance removal from green pieces as a method for improvement surface quality of advanced ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 10–21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.072>

SARKER, M. R. et al. Designing a Battery-Less Piezoelectric based Energy Harvesting Interface Circuit with 300 mV Startup Voltage. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 431, n. 1, 2013.

SCANNELL, E.; CARTER, G. Confidence bounds for magnitude-squared coherence estimates. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 26, n. 5, p. 475–477, 1978. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1978.1163131>

SPADOTTO, M. et al. Neural Networks Applied to Thermal Damage Classification in Grinding Process. **Frontiers in Robotics, Automation and Control: InTech**, 2008. E-book. <https://doi.org/10.5772/6331>

TANAKA, K.; KOSHY, P. A pneumatic sensor for grinding wheel condition monitoring. **Precision Engineering**, v. 56, p. 62–68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.09.005>

TANGJITSITCHAROEN, S.; SENJUNTICHA, A. In-Process Chatter Detection in Surface Grinding. **MATEC Web of Conferences**, v. 28, p. 2001, 2015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152802001>

TAO, H. et al. A new approach to identify geometric errors directly from the surface topography of workpiece in ultra-precision machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 11–12, p. 5159–5173, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04661-7>

TÁVORA, C. G. et al. Hinkley criterion applied to detection and location of burn in grinding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 11–12, p. 3177–3188, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06828-7>

TETI, R. et al. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 717–739, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>

THOMAS, B.; DAVID, E.; MANU, R. Empirical modelling and parametric optimisation of surface roughness of silicon carbide advanced ceramics in surface grinding. **International Journal of Precision Technology**, v. 5, n. 3/4, p. 277, 2015. <https://doi.org/10.1504/IJPTECH.2015.073832>

TIAN, Y. B. et al. Development of portable power monitoring system and grinding analytical tool. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 188–197, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.002>

VAIRAMUTHU, R. et al. Performance Enhancement of Cylindrical Grinding Process with a Portable Diagnostic System. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 1320–1336, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.103>

VASEGHI, S. **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction**. v. 9E-book. <https://doi.org/10.1002/0470094966>

VIERA, M. A. et al. A contribution to the monitoring of ceramic surface quality using a low-cost piezoelectric transducer in the grinding operation. **Proceedings of 5th International Electronic Conference on Sensors and Applications**. Basel, Switzerland, Switzerland: MDPI, 2018. p. 16. <https://doi.org/10.3390/ecsa-5-05733>

VIERA, M. A. et al. Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas usando transdutores piezelétricos de baixo custo e redes neurais artificiais. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2017.

VIERA, M. A. et al. Correlation between surface roughness and AE signals in ceramic grinding based on spectral analysis. **MATEC Web of Conferences**, v. 249, p. 3003, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824903003>

WANG, Q.; YANG, H. Sensor-Based Recurrence Analysis of Energy Efficiency in Machining Processes. **IEEE Access**, v. 8, p. 18326–18336, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968172>

WU, C. et al. Surface roughness modeling for grinding of Silicon Carbide ceramics considering co-existence of brittleness and ductility. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 133, p. 167–177, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.07.061>

YANG, Z.; YU, Z. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1–4, p. 107–121, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3797-1>

YIN, L.; HUANG, H. Ceramic Response to High Speed Grinding. **Machining Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 21–37, 2004. <https://doi.org/10.1081/MST-120034240>

YIO, M. H. N. et al. 3D imaging of cement-based materials at submicron resolution by combining laser scanning confocal microscopy with serial sectioning. **Journal of Microscopy**, v. 258, n. 2, p. 151–169, 2015. <https://doi.org/10.1111/jmi.12228>

YU, H.; WANG, J.; LU, Y. Simulation of grinding surface roughness using the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7722-x>

ZHANG, G.; ZENG, Y.; ZHANG, W. Scratching of SiC ceramics at two dimensional pre-stressing. **International Journal of Nanomanufacturing**, v. 13, n. 3, p. 270, 2017. <https://doi.org/10.1504/IJNM.2017.085117>

ZHANG, S.; YU, D.; SHENG, S. A discrete STFT processor for real-time spectrum analysis. **IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings, APCCAS**, n. 3, p. 1943–1946, 2006. <https://doi.org/10.1109/APCCAS.2006.342241>

ZHANG, X. et al. Lubricating property of MQL grinding of Al₂O₃/SiC mixed nanofluid with different particle sizes and microtopography analysis by cross-correlation. **Precision Engineering**, v. 47, p. 532–545, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.09.016>

ZHOU, N.; DAGLE, J. Initial Results in Using a Self-Coherence Method for Detecting Sustained Oscillations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 1, p. 522–530, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2321225>