

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**Brena Marques Ribeiro**

**Monitoramento da condição da ferramenta no processo de  
dressagem com base em índices de danos e sinais de  
vibração**

**São Carlos**

**2023**



**Brena Marques Ribeiro**

**Monitoramento da condição da ferramenta no processo de  
dressagem com base em índices de danos e sinais de  
vibração**

Monografia apresentada ao Curso de Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Pedro de Oliveira  
Conceição Junior

**São Carlos  
2023**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Mm Marques Ribeiro, Brena  
Monitoramento da condição da ferramenta no processo de dressagem com base em índices de danos e sinais de vibração / Brena Marques Ribeiro; orientador Pedro de Oliveira Conceição Junior. São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Sinais de Vibração. 2. Dressagem. 3. Manutenção Preditiva. 4. Processo de Retificação. 5. Processamento de Sinais. 6. Monitoramento. 7. Desgaste da Ferramenta. 8. Automação Industrial. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Brena Marques Ribeiro

Título: “Monitoramento da condição da ferramenta no processo de retificação com base em índices de danos e sinais de vibração.”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em  
13/12/2023,

com NOTA 9 (nove), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior - Orientador -  
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Augusto Matheus dos Santos Alonso - SEL/EESC/USP

Mestre Gabriel Augusto David - Doutorando EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior



*Dedico este trabalho*  
*aos meus pais que me ensinaram a importância dos estudos,*  
*à minha avó que me mostrou o que é ter força*  
*e aos meus amigos que me ajudaram a permanecer.*  
*Que eu seja a primeira, mas não a última.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida, por me dar forças para trilhar esse caminho sempre me abençoando e por permitir que meus sonhos se tornassem realidade.

Agradeço aos professores Dr<sup>o</sup> José Carlos Melo Vieira Júnior e Dr<sup>a</sup> Maria Luíza Coda, pelo suporte em toda trajetória da minha graduação. Ao meu orientador pela paciência e pelas correções que me ajudaram no meu desenvolvimento.

A Ivanir da Silva Marques Ribeiro professora de apoio na FATEC de Franca e minha mãe, que me deu suporte em todos os momentos que pensei que não conseguiria concluir. Ao meu pai Paulo Sergio Borasqui Ribeiro e minha irmã Bruna Marques Ribeiro, que são minha base para chegar até aqui.

Aos meus amigos, mas em especial Diego Oliveira Bomfim e Luan Felipe da Silva Andrioti, que trilharam esse caminho comigo, deixando ele mais leve e Vinicius de Souza Caffeu que me deu suporte, auxílio e me acolheu sempre que precisei, me dando forças para chegar até aqui.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.



## RESUMO

RIBEIRO, B. **Monitoramento da condição da ferramenta no processo de retificação com base em índices de danos e sinais de vibração.** 2023. 46p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

A análise de sinais de vibração desempenha um papel cada vez mais importante na manutenção preditiva na indústria de manufatura. Essa análise possibilita a identificação da eficiência operacional das máquinas e monitoramento da condição de ferramentas, com enfoque especial no processo de dressagem, que é responsável por restaurar a capacidade de corte de rebolos, tendo como base uma ferramenta de diamante, que sofre desgaste ao longo da operação, levando a perda de qualidade do processo de retificação. Dessa forma, o presente estudo apresenta uma abordagem para monitoramento da vida útil de ferramentas de dressagem com base na extração de características do sinal de vibração. O propósito é minimizar o custo computacional associado à análise de grandes conjuntos de dados, optando pelo método Welch como alternativa à análise de FFT, e índices estatísticos de danos baseados em coeficiente de correlação e distância euclidiana. Experimentos de dressagem de ponta única foram realizados em uma máquina retificadora com um sensor de vibração do tipo acelerômetro piezolétrico acoplado ao suporte da ferramenta. Os sinais de vibração foram coletados por um sistema de aquisição de dados e cada passe da ferramenta de dressagem pela superfície do rebolo. A análise de sinais foi realizada em três momentos: início, após 50 passadas, depois de 150 passadas, empregando-se análises tanto no domínio do tempo quanto da frequência, utilizando a densidade espectral de potência com base no método Welch. Foi possível identificar por meio de índices de danos propostos no presente estudo que as faixas de frequências que melhor mostram o desgaste do dressador que implica diretamente na vibração do equipamento é de 5 kHz a 7 kHz, onde a amplitude aumenta conforme o desgaste da ferramenta de diamante. Os resultados indicam a possibilidade de monitoramento em tempo real da máquina com o uso de filtros digitais, nessa faixa de frequência para acompanhar o desgaste da ferramenta..

**Palavras-chave:** Sinais de vibração; Manutenção preditiva; Processo de retificação; Automação industrial; Monitoramento; Desgaste da ferramenta; Processamento de sinais.



## ABSTRACT

RIBEIRO, B. **Tool condition monitoring in the grinding process based on damage indices and vibration signals.** 2023. 46p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Vibration signal analysis plays an increasingly important role in predictive maintenance in the manufacturing industry. This analysis allows for the identification of the operational efficiency of machines and monitoring of tool conditions, with a special focus on the dressing process, responsible for restoring the cutting capacity of grinding wheels using a diamond tool that wears out during operation, leading to a loss of grinding process quality. Therefore, this study presents an approach for monitoring the dressing tool's lifespan based on feature extraction from vibration signals. The purpose is to minimize the computational cost associated with analyzing large datasets by opting for the Welch method as an alternative to FFT analysis, along with damage index based on correlation coefficient and Euclidean distance. Single-point dressing experiments were performed on a grinding machine with a piezoelectric accelerometer vibration sensor attached to the tool holder. Vibration signals were collected through a data acquisition system during each pass of the dressing tool on the grinding wheel surface. Signal analysis was conducted at three moments: the beginning, after 50 passes, and after 150 passes, using both time-domain and frequency-domain analyses, with spectral power density based on the Welch method. It was possible to identify, through the proposed damage indices in this study, that the frequency range of 5 kHz to 7 kHz best represents the dressing tool wear, directly affecting equipment vibration. The amplitude increases as the diamond tool wears out. The results indicate the possibility of real-time machine monitoring using digital filters in this frequency range to track tool wear.

**Keywords:** Vibration signals; Predictive maintenance; Grinding process; Industrial automation; monitoring; Tool wear; Signal processing.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ferramenta de Ponta Única Passando no Rebolo. . . . .	16
Figura 2 – Decomposição do Processo de Retificação . . . . .	20
Figura 3 – Mecanismos Relacionados ao Processo de Retificação Superficial. . . . .	21
Figura 4 – Tipos de Desgaste. . . . .	22
Figura 5 – Energia Térmica na Retificação. . . . .	23
Figura 6 – Dressagem de ponto único: (a) dressagem de rodas convencionais; (b) geração de topografia de roda. . . . .	24
Figura 7 – Ferramenta de Dressagem de Ponto Único. . . . .	25
Figura 8 – Técnicas comuns de detecção e coleta de dados no monitoramento de condições de ferramentas . . . . .	26
Figura 9 – Exemplo de Aplicação de Utilização do Sensor de Vibração. . . . .	27
Figura 10 – Diagrama Esquemático do Sistema de Monitoramento da condição da ferramenta baseado no processamento de sinais. . . . .	27
Figura 11 – Monitoramento do Processo de Usinagem. . . . .	29
Figura 12 – Arquitetura típica de um sistema TCM. . . . .	30
Figura 13 – Retifica com o Sensor Equipado. . . . .	31
Figura 14 – Sinal de Vibração Puro . . . . .	32
Figura 15 – Análise Espectral do Sinal de Vibração Puro . . . . .	32
Figura 16 – Método Welch para análise do espectro de frequência. . . . .	33
Figura 17 – Método Welch - Frequência Seleccionada. . . . .	34
Figura 18 – Média com e sem filtro - RMS. . . . .	34
Figura 19 – CCDM entre 5 kHz e 7 kHz. . . . .	37
Figura 20 – RMSD entre 5 kHz e 7 kHz. . . . .	37
Figura 21 – CCDM entre 7 kHz e 9 kHz. . . . .	38
Figura 22 – RMSD entre 12 kHz e 14 kHz. . . . .	39



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.0.1	O processo de Retificação	20
2.0.2	Utilização do Rebolo	21
2.0.3	A Técnica da Dressagem	22
2.0.4	Ferramentas Diamantadas	24
2.0.4.1	Ponto Única	25
2.0.5	Sensores Para Monitoramento	25
2.0.6	Processamento de Sinais	27
2.0.7	Monitoramento da Condição da ferramenta	29
2.0.8	Índices de Danos	30
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>43</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento em tempo real das condições dos equipamentos desempenha um papel crucial na tomada de decisões para a manutenção e otimização das operações industriais. Nesse contexto, a análise de sinais de vibração emerge como uma ferramenta cada vez mais predominante, desempenhando um papel de destaque na indústria. Esse destaque é particularmente notável no processo de retificação, uma etapa de usinagem aplicada comumente em setores automotivos e aeronáuticos.

Embora seja um processo relativamente recente quando comparado a outras práticas industriais (DENKENA; GROVE; GÖTTSCHING, 2015), a retificação finaliza a cadeia produtiva, conferindo-lhe uma importância substancial. Essa modalidade de usinagem de acabamento tem como objetivo reduzir as irregularidades nas peças, resultando em um acabamento que atenda aos padrões de qualidade superficial exigidos (LI *et al.*, 2013). Por conseguinte, sua relevância é incontestável, como destacado por (BIANCHI *et al.*, 2018).

No processo de retificação, o rebolo desempenha o papel de ferramenta de corte (RODRIGUEZ *et al.*, 2020), com o intuito de reduzir as irregularidades na peça que passa por esse acabamento (ROWE, 2013). Composto por grãos abrasivos, o rebolo é notável pela sua alta demanda energética durante a usinagem (HADAD *et al.*, 2012). De acordo com (SOUZA, 2023), os grãos do rebolo apresentam múltiplas arestas cortantes e características de corte variadas, exercendo influência sobre o desempenho e a produtividade do processo (LI *et al.*, 2013).

Um processo crucial no aprimoramento dessa etapa é a dressagem, que restaura a capacidade de corte dos rebolos (ROWE, 2014). A dressagem condiciona a superfície do rebolo, visando remodelá-lo quando ocorre desgaste e perda de sua forma original (SOUZA, 2009), como representado na Figura 1. A aplicação da dressagem desempenha um papel crucial na redução dos danos térmicos associados à retificação (BADGER; TORRANCE, 2000).

Figura 1 – Ferramenta de Ponta Única Passando no Rebolo.



Fonte: Autor

Nesse contexto, para garantir a eficácia desse processo, é crucial desenvolver mecanismos para avaliar a eficiência do dressador. A implementação dessa avaliação tem o potencial de elevar a confiabilidade da retificação, aprimorar a qualidade do produto e reduzir custos operacionais. A abordagem proposta para esse monitoramento, conforme mencionada anteriormente, é a análise dos sinais de vibração. Para obter esses sinais, é essencial o uso de sensores. O método mais comum baseado em sensores atualmente é o método indireto, que se utiliza de sinais do sensor, como força de corte, assinatura de vibração, emissão acústica (AE) e temperatura da ferramenta, para identificar o desgaste da ferramenta, como destacado por (BHUIYAN; CHOUDHURY, 2014), sendo considerado método direto a análise do desgaste da ferramenta por meio da observação do operador.

Conforme a orientação de (GARCÍA-PLAZA *et al.*, 2013), a otimização desse sistema de monitoramento requer três elementos essenciais: a seleção adequada dos sensores para registrar o sinal no sistema de monitoramento, o processamento e a caracterização precisos do sinal, além de modelos preditivos confiáveis, que incluam previsões de erros. Esse processo de processamento e caracterização de sinais pode ser realizado aplicando técnicas no domínio do tempo, como o cálculo do RMS (Root Mean Square), média e energia do sinal, ou empregando técnicas no domínio da frequência, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Densidade Espectral de Potência (PSD).

Dessa forma, esta pesquisa se concentrará no monitoramento da condição da ferramenta no processo de retificação, com o objetivo de apresentar uma abordagem para o monitoramento da vida útil das ferramentas de dressagem, baseada na extração de características dos sinais de vibração. Visando também minimizar o custo computacional associado à análise de grandes conjuntos de dados, optando pelo método Welch como

alternativa à análise de FFT, juntamente com a exploração de índices estatísticos de danos, como o valor médio quadrático (RMS) e o uso de filtros digitais.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme destacado por (CUI *et al.*, 2023), a retificação é um processo de vital importância nas tecnologias de ponta, sendo responsável por produzir peças de alta qualidade e com significativo valor agregado. De fato, aproximadamente 70% de todos os processos de precisão são relacionados à retificação (DOTTO *et al.*, 2019). Essa operação, como apontado por (MALKIN; GUO, 2008), serve como etapa final de usinagem, proporcionando acabamento e texturas mais refinadas. Geralmente, é aplicada em componentes de alto valor agregado (ROWE, 2013), aproveitando sua notável precisão e capacidade de usinar materiais frágeis e resistentes (MARINESCU *et al.*, 2006).

É relevante ressaltar que o processo de retificação é considerado crítico e complexo (DOTTO *et al.*, 2019), visto que o acabamento é obtido por meio de diversas arestas de corte distribuídas aleatoriamente. Portanto, a busca pela eficiência e qualidade nesse processo se torna essencial, e a automação se apresenta como uma aliada para alcançar esses objetivos. À medida que as empresas se adaptam para buscar as melhores soluções de mercado (DOMINGOS, 2023), o sistema de monitoramento em tempo real demonstra ser eficaz para assegurar a qualidade do processo, fornecendo informações para otimizá-lo, identificando problemas em tempo real e contribuindo para a definição dos parâmetros de usinagem (INASAKI, 1999).

Um dos parâmetros cruciais para o acompanhamento da retificação é a avaliação da eficiência do processo de dressagem (MARINESCU *et al.*, 2006), que consiste na remodelação da superfície do rebolo, responsável pelos cortes no acabamento. Atualmente, esse processo requer intervenção humana para determinar quando é necessário ajustar as condições de corte, e o intervalo entre as dressagens geralmente é estabelecido com base na experiência do operador, carecendo de padronização (YOSHIDA *et al.*, 2021). Portanto, torna-se essencial o monitoramento em tempo real e online para aumentar a precisão da qualidade da superfície do rebolo e tomar decisões baseadas em dados, tornando o processo mais objetivo (XUE; NAGHDY; COOK, 2002).

Segundo (ROWE, 2013), a dressagem corrige distorções no formato especificado do rebolo, afia as arestas de corte, mantém sua distribuição uniforme e remove o ligante ao redor dos grãos abrasivos, assim como a camada de empastamento do rebolo. (MARINESCU; GUO; WEI, 2013) também destacam a capacidade desse processo em criar o formato e a topografia desejados no rebolo. Para avaliar o desgaste do rebolo e determinar a necessidade de uma nova dressagem, foram desenvolvidos métodos de acompanhamento, incluindo o uso de sensores para monitorar a pressão da barreira de ar ao redor do rebolo, a análise da emissão acústica e o uso de redes neurais (YOSHIDA *et al.*, 2021).

### 2.0.1 O processo de Retificação

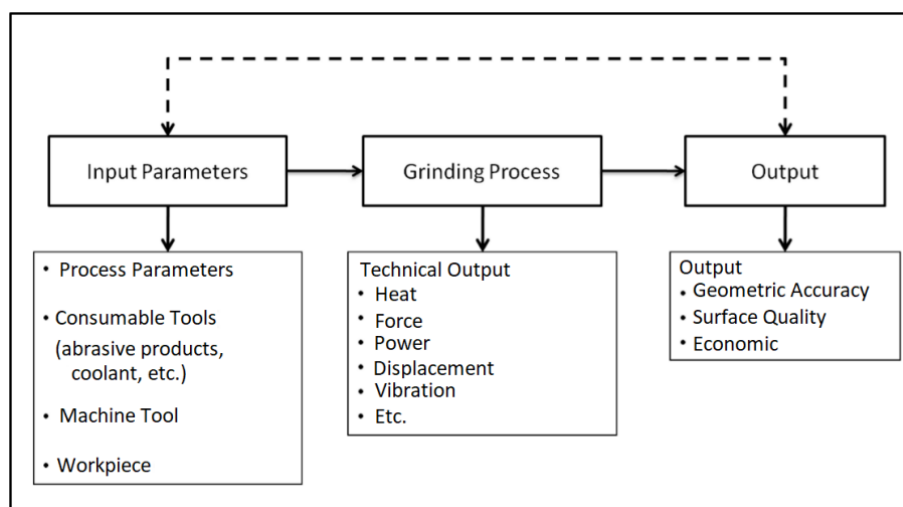
Embora o processo de usinagem de metais com remoção de cavaco tenha uma longa trajetória de desenvolvimento, como evidenciado por (KONIG, 1990), foi somente na era moderna da usinagem com ferramentas de geometria de corte não definida que começou a descoberta de ferramentas artificiais. A síntese dos primeiros rebolos com abrasivos naturais, um marco significativo, teve início na Europa por volta da metade do século XIX, conforme apontado por (SEVERIANO *et al.*, 2002).

Vale ressaltar que, ao longo de muitas décadas, o desenvolvimento desse processo de fabricação esteve profundamente vinculado à experiência do operador, como destacado por (SOUZA, 2009). Apesar dos notáveis avanços nas áreas de física, química e construção de máquinas, até os dias atuais, a usinagem pode ser considerada com pouco domínio tecnológico (SOUZA, 2009).

No contexto da produção de superfícies específicas, existem diversos tipos de retificação, como a retificação superficial, cilíndrica, interna e sem centros, que são aplicadas de acordo com a peça em processo, sua forma e os requisitos técnicos envolvidos, como ressaltado por (JUNIOR, 2020). O objetivo primordial é sempre aprimorar o acabamento das peças, alcançando níveis elevados de precisão, especialmente quando se trabalha com materiais de alto valor agregado, conforme observado por (SOARES; OLIVEIRA, 2002).

Uma das complexidades na implementação de tecnologia para o acompanhamento da eficiência na retificação é a falta de correlação simples entre os parâmetros de entrada e saída, como evidenciado por (TIAN, 2009). Essa complexidade é ilustrada na Figura 2, que demonstra quais são os parâmetros interagem de forma intrincada no processo de retificação.

Figura 2 – Decomposição do Processo de Retificação



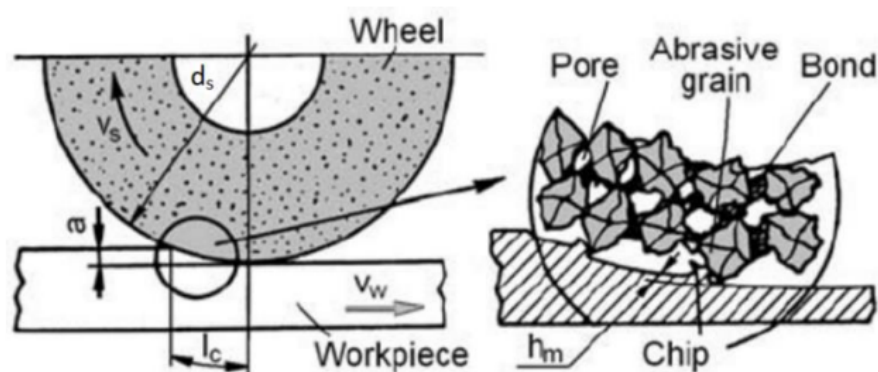
Fonte: (TIAN, 2009)

## 2.0.2 Utilização do Rebolo

No mercado de abrasivos, cerca de 10 bilhões de euros anualmente estão relacionados aos rebolos, como documentado por (LINKE, 2015). Os rebolos desempenham um papel essencial na obtenção de um acabamento superior nas peças, conforme destacado por (MALKIN; GUO, 2008). Essas ferramentas abrasivas podem ser classificadas em três categorias principais: materiais abrasivos convencionais, superabrasivos e diamante. Os dois últimos, superabrasivos e diamante, se destacam por sua notável resistência mecânica e térmica, como ressaltado por (RODRIGUEZ *et al.*, 2020). Além disso, eles podem ser diferenciados com base em seu método de ligação, resultando em rebolos cerâmicos, resinóides e metálicos.

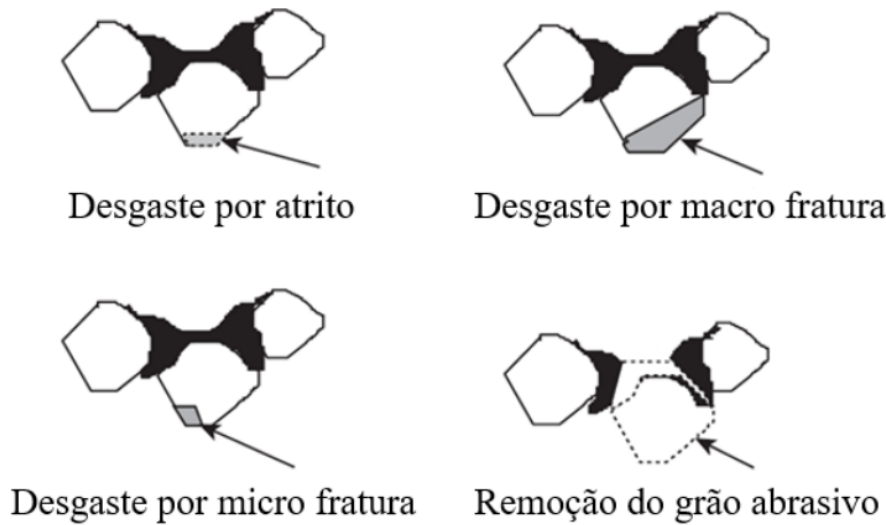
No processo de retificação, o rebolo é exposto a uma série de variações, incluindo forças mecânicas, reações químicas, e flutuações térmicas, devido ao contato direto com a peça, como ilustrado na Figura 3. Isso resulta em diferentes tipos de desgaste, incluindo desgaste macro (geometria), microdesgaste (grão), desgaste da ligação e arrancamento do grão (grão completamente removido), como documentado por (WEGENER *et al.*, 2011) e representado na Figura 4. Esses desgastes comprometem a eficiência das arestas de corte do rebolo, exigindo mais potência e consumindo maior energia para executar sua função. Além disso, durante esse processo, o atrito gera uma quantidade considerável de calor. Para dissipar esse calor e evitar danos térmicos à peça, é comum utilizar um fluido de corte, geralmente uma emulsão de água e óleo, como destacado por (BRINKSMEIER *et al.*, 2015).

Figura 3 – Mecanismos Relacionados ao Processo de Retificação Superficial.



Fonte: (GOSTIMIROVIĆ *et al.*, 2015)

Figura 4 – Tipos de Desgaste.



Fonte: (ROWE, 2014)

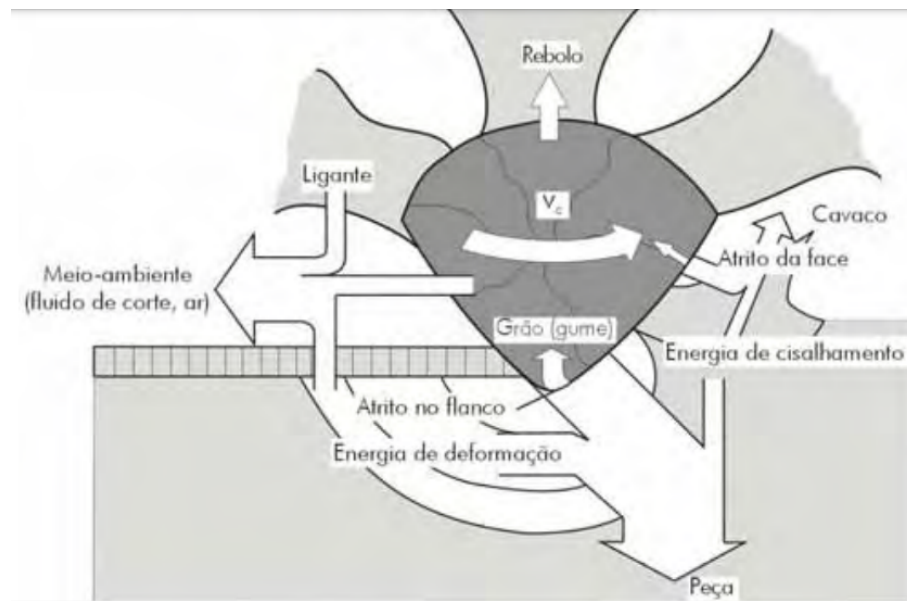
O fluido de corte desempenha um papel crucial na dissipação do calor, como ilustrado na Figura 5, além de reduzir o desgaste dos grãos abrasivos, como observado por König apud (SEVERIANO *et al.*, 2002). No entanto, é importante ressaltar que esses fluidos são conhecidos por serem extremamente prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, devido às substâncias em sua composição. Eles podem causar problemas de saúde, como dermatite, distúrbios respiratórios e até câncer.

Além disso, o descarte adequado desses fluidos é dispendioso, e as compensações por condições insalubres e os custos de tratamento de saúde para os funcionários expostos a esses produtos acabam tornando sua utilização onerosa, como mencionado por (DEBNATH; REDDY; YI, 2016; JABBAR *et al.*, 2017; KURAM *et al.*, 2013; SHEN *et al.*, 2015), há diversos estudos em andamento que buscam atender essa demanda por alternativas ao fluido de corte, no entanto, essa questão ainda está sendo explorada como uma linha de pesquisa em evolução.

### 2.0.3 A Técnica da Dressagem

A dressagem é uma operação essencial na retificação, como explicado por (FILHO; COELHO; OLIVEIRA, 1998). Essa operação compreende duas etapas fundamentais: o perfilamento e a afiação dos rebolos, sendo o perfilamento responsável pela remoção de grãos abrasivos e ligante para atingir as dimensões e geometria desejadas para o rebole, como detalhado por (SATO, 2023). Para realizar essa operação, uma variedade de ferramentas é empregada, incluindo cortadores metálicos, bastões, rodas retificadoras, e pontas simples ou múltiplas de diamante, entre outras opções. O principal objetivo da dressagem é corrigir distorções no formato do rebole, criar afiação, manter ou modificar a distribuição das arestas, remover o ligante em torno dos grãos abrasivos e eliminar a

Figura 5 – Energia Térmica na Retificação.



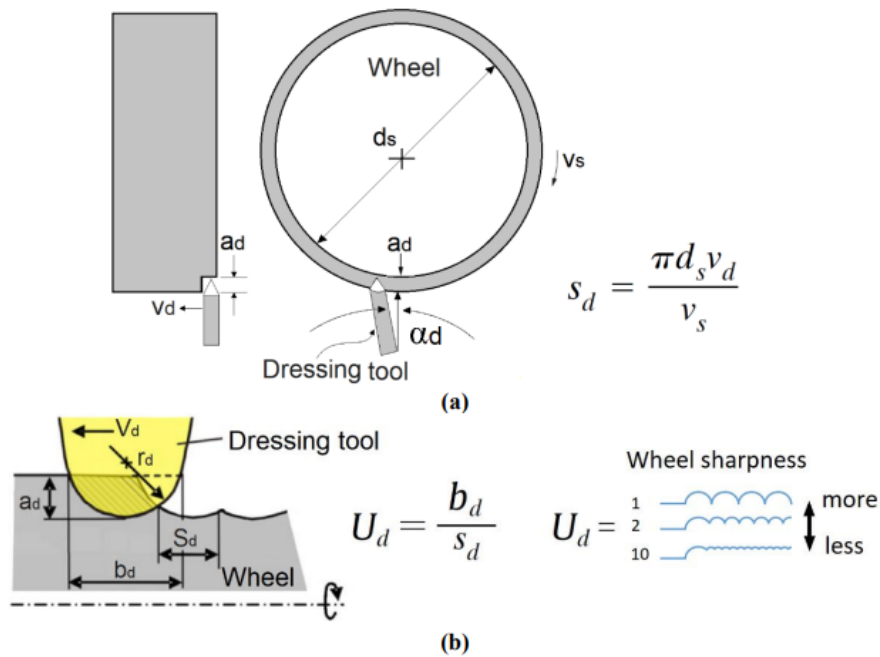
Fonte: König apud (SEVERIANO *et al.*, 2002)

camada de empastamento do rebolo, como documentado por (MARINESCU *et al.*, 2006; ROWE, 2014). Isso, por sua vez, restaura os padrões de corte do rebolo, como mencionado por (DOTTO *et al.*, 2019).

Dessa forma, a dressagem aprimora a afiação e o perfilamento dos grãos abrasivos, assegurando a precisão dimensional e a geometria desejada das peças retificadas. De acordo com (SOUZA, 2009), a dressagem pode ser categorizada em três tipos: dressagem mecânica (utilizando dressadores conglomerados, paralelos, eletrolíticos e rebolos copo), dressagens especiais (envolvendo descarga elétrica, eletrolítica e pulso laser) e combinações de diferentes tipos de dressagem (como laser e mecânica, ou química e mecânica).

Conforme ilustrado na Figura 6, dentro da categoria de ponta única diamantada é possível dividir em dois tipos a dressagem de rodas convencionais e de geração topografia de roda, na figura também é ilustrado as equações que representam cada tipo, nessa pesquisa o foco é na dressagem ponta única de rodas convencionais.

Figura 6 – Dressagem de ponto único: (a) dressagem de rodas convencionais; (b) geração de topografia de roda.



Fonte: (MALKIN; GUO, 2008; WEGENER *et al.*, 2011)

Para otimizar a eficiência da dressagem, é essencial avaliar diversas condições, como a temperatura, que pode afetar a forma da ferramenta, como identificado por alguns autores (POMBO, 2017), bem como a escolha do momento adequado para a dressagem, de modo a não comprometer a qualidade das peças a serem retificadas. Além disso, é importante garantir que a ferramenta de dressagem não esteja excessivamente desgastada. Os fenômenos relacionados ao desgaste das ferramentas de dressagem têm sido um ponto central na literatura, na busca pelo parâmetro mais influente no controle do processo, conforme citado por (JUNIOR, 2020).

#### 2.0.4 Ferramentas Diamantadas

Conforme mencionado anteriormente, um dos tipos de dressagem é a dressagem mecânica, que pode ser realizada com ferramentas diamantadas estacionárias, incluindo pontas multiponto e de ponto único. A dressagem mecânica com diamante natural é a abordagem mais comum, devido à sua notável dureza e à mais alta condutividade térmica conhecida na natureza. No entanto, a vida útil dos dressadores de diamantes naturais está relacionada às suas irregularidades cristalográficas, forma, pureza e tamanhos, como discutido por (JUNIOR, 2020). Com os diamantes sintéticos, por outro lado, a estrutura cristalina resistente ao desgaste oferece uma alternativa para substituir os diamantes naturais, proporcionando maior qualidade e vida útil.

#### 2.0.4.1 Ponto Única

Conforme indicado por (ROWE, 2014), a ferramenta diamantada de ponta única é amplamente empregada no processo de dressagem mecânica de discos abrasivos convencionais, e pode oferecer um desempenho excepcional quando devidamente ajustada. De acordo com a definição de (JUNIOR, 2020), o dressador de ponta única é composto por um único diamante montado em um aglutinante de metal, projetado para realizar um vestimento replicável e deve formar um ângulo de arrasto preciso, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Ferramenta de Dressagem de Ponto Único.



Fonte: WIRZ-DIAMANT, 2014 apud (JUNIOR, 2020)

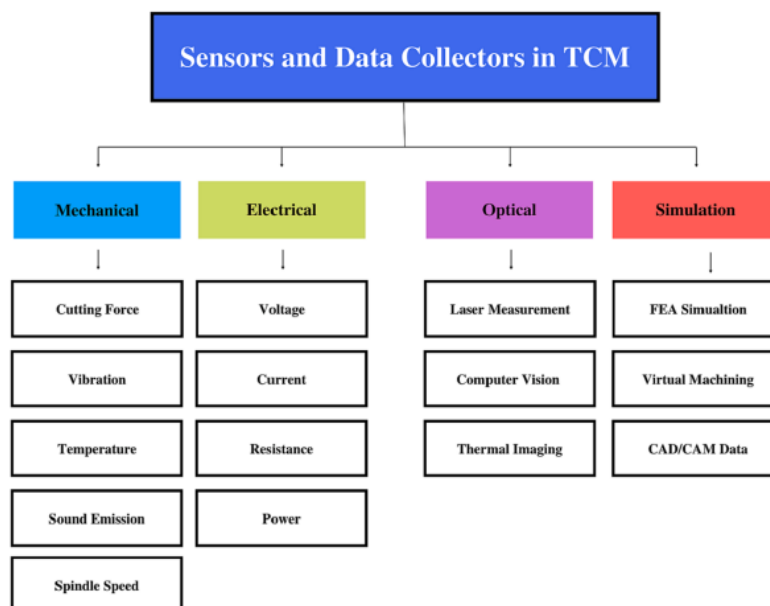
#### 2.0.5 Sensores Para Monitoramento

A utilização de sensores para monitorar a condição de ferramentas dentro de um sistema, ou seja, como uma ferramenta de apoio para a realização de manutenção preventiva e preditiva, com base na detecção e análise das informações do processo, é conhecida como TCM (Tool Condition Monitoring System), conforme explicado por (JUNIOR, 2020). Esse sistema é composto por sensores, condicionadores, amplificadores de sinal e um módulo supervisor, cujo objetivo principal é fornecer informações confiáveis para a detecção de falhas nas ferramentas e auxiliar na tomada de decisões, como documentado por Borelli (2000) (BORELLI, 2000).

Um dos sensores frequentemente empregados para analisar a condição de ferramentas é o sensor de vibração. Como mencionado por (JUNIOR; OLIVEIRA, 2016), todas

as máquinas geram algum nível de vibração durante seu funcionamento, e na maioria dos casos, essas vibrações não são desejadas, exigindo esforços para minimizá-las. De acordo com (DIMLA SNR, 2002), os sinais de vibração têm uma resposta rápida no tempo, tornando-os ideais para monitorar em tempo real as mudanças nas condições da ferramenta. Além disso, eles são considerados mais confiáveis, robustos e aplicáveis do que a análise por meio da emissão acústica. (DIMLA SNR, 2002) conseguiu distinguir diferentes modos de desgaste com base nas tendências nos sinais de vibração, destacando que as características no domínio do tempo são particularmente eficazes na análise do desgaste da ferramenta. Além desse sensor, existem outras técnicas que podem ser empregados como ilustrado na Figura 8.

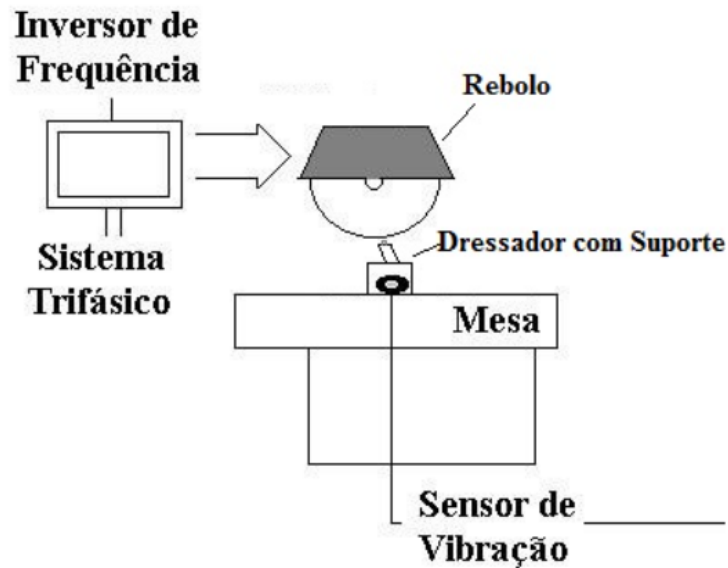
Figura 8 – Técnicas comuns de detecção e coleta de dados no monitoramento de condições de ferramentas



Fonte: (RMILI *et al.*, 2009)

Dentre essas técnicas possíveis (LAURO *et al.*, 2014) o sensor de vibração é normalmente utilizado devido ao seu baixo custo e fácil instalação. (ZHONG; ZHAO; WANG, 2010) utilizaram a vibração no processo de fresamento de ligas de alumínio com corte a seco e quantidade mínima de lubrificação, observando que o fluido de corte pode acelerar a atenuação da vibração de corte. Portanto, é apropriado aplicar a menor quantidade possível de fluido durante o acabamento, reduzindo assim o consumo do fluido e mantendo alta qualidade nas peças. Um exemplo de aplicação pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de Aplicação de Utilização do Sensor de Vibração.



Fonte: (JUNIOR, 2020)

No estudo de (BISU *et al.*, 2012), foram realizadas investigações na decomposição das fontes de vibração, e foi possível estabelecer uma relação direta com o grau de falha de componentes mecânicos. Como observado por (RAO; MURTHY; RAO, 2013), as amplitudes de vibração geralmente aumentam à medida que o desgaste da ferramenta avança. Segundo (TRAN *et al.*, 2022) é possível visualizar um esquemático de como o sensor atua no sistema de monitoramento baseando no processamento de sinais como mostra na Figura 13.

Figura 10 – Diagrama Esquemático do Sistema de Monitoramento da condição da ferramenta baseado no processamento de sinais.



Fonte: (TRAN *et al.*, 2022)

## 2.0.6 Processamento de Sinais

A análise dos sinais de vibração é um método eficaz para monitorar o desgaste de ferramentas, permitindo a identificação de possíveis desgastes, como mencionado por (TRAN *et al.*, 2022). De acordo com (JUNIOR, 2020), os sinais do sensor analógico passam por um pré-processamento que envolve amplificação, filtragem, supressão de polarização/offset e conversão de analógico para digital (A/D) para obter sinais digitais

no domínio do tempo. Além disso, pesquisas conduzidas por autores como (LAURO *et al.*, 2014; LEE *et al.*, 2020; TETI *et al.*, 2010) demonstram que é possível extrair e selecionar características dos sinais, tais como:

- Representações do sinal no domínio da frequência;
- Representações do sinal no domínio tempo-frequência.

(TRAN *et al.*, 2022) também destaca a importância de características como frequência e amplitude de pico, fator de crista e outros valores estatísticos. O autor sugere que essas representações podem ser obtidas por meio de diversas técnicas, incluindo a transformada Wavelet contínua, transformada Wavelet discreta, transformada de Fourier, entre outras.

As análises que serão utilizadas nesse trabalho são as RMS (Root Mean Square) e PSD (Densidade Espectral de Potência). Segundo (HASSUI *et al.*, 1998) o valor RMS consegue correlacionar melhor com o desgaste do rebolo por meio do sinal de vibração, do que pelo sinal de emissão acústica. O valor RMS (de um sinal puro ou bruto S pode ser expresso pelas Equações 2.1 e 2.2, que apresentam as formas contínua e discreta respectivamente (NILSSON *et al.*, 2003)

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t+T} s^2(t) dt} \quad (2.1)$$

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s^2(i)} \quad (2.2)$$

Sendo

- T: intervalo do tempo para o cálculo do valor RMS;
- $t_0$ : ponto de início de análise no tempo para cálculo do RMS;
- N: número discreto de dados do sinal S no intervalo de tempo T;
- $s(t)$ : sinal puro ou bruto;
- $s_{RMS}$ : valor RMS.

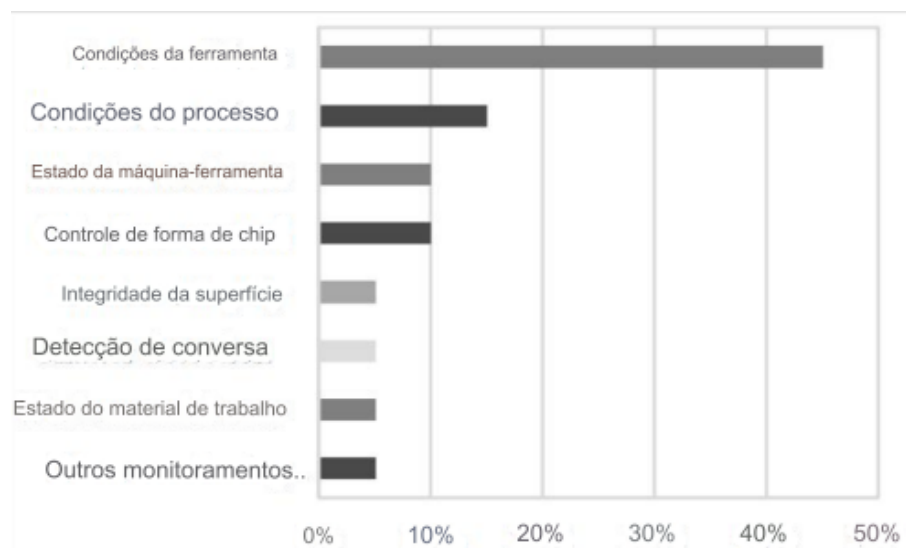
A transformada de Fourier (FFT) consegue fornecer informação detalhada sobre a condição de sinais que não podem ser obtida no domínio do tempo (JUNIOR, 2020). Uma possível aplicação é a partir da seleção de faixas de frequência que caracterizem o fenômeno que deseja estimar no processo (ZENG; FORSSBERG, 1994). A partir da FFT é possível aplicar a Densidade Espectral de Potência é responsável por mostrar a potência da transformada de Fourier ao longo de todas as componentes de frequência.

Segundo (JUNIOR, 2020) a estimação por meio do PSD clássico apresentam em alguns casos inconsistência na relação entre a quantidade de amostras e o resultado estimado e como alternativa surgiu o método Welch, que permite a sobreposição dos segmentos de dados e passa cada segmento por uma janela (SEMMLOW; ALVAREZ; PEDRONO, 2004). Assim para seguir esse método é necessário dividir em quadros como 64, 128 e 256 (potências de dois). (SEMMLOW; ALVAREZ; PEDRONO, 2004) este método separa os dados em vários segmentos sobrepostos, calcula um espectro de potência por FFT em cada segmento e, em seguida, as médias destes espectros.

### 2.0.7 Monitoramento da Condição da ferramenta

Monitoramento da Condição de Ferramenta auxilia nas manutenções preditivas e preventivas, com base das informações em tempo real da máquina e análise das mesmas é possível diagnosticar o estado da ferramenta. Em 2015, (TETI, 2015) quase 50% dos monitoramentos foram feitas de maneira regular para acompanhar o rendimento da máquina, este tipo de monitoramento é denominado TCM (Figura 11), tendo como objetivo maximizar o intervalo entre as manutenções corretivas.

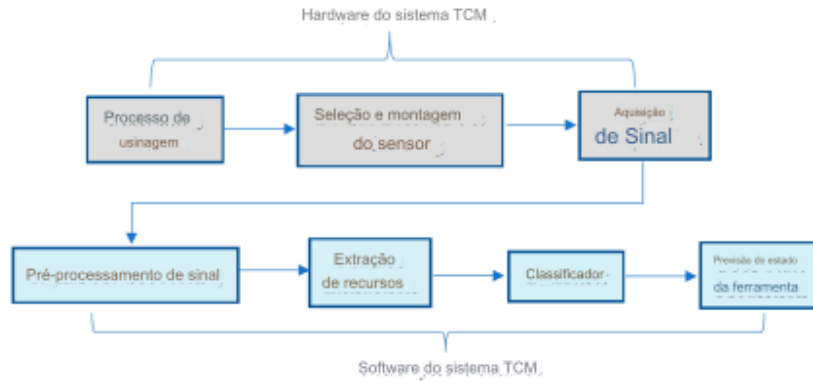
Figura 11 – Monitoramento do Processo de Usinagem.



Fonte: (TETI, 2015)

Utilizar sensores para o monitoramento da condição da ferramenta segundo (TETI, 2015) pode ser definido com o fato de que os recursos mais relevantes relacionados à condição da ferramenta pode ser detectada, processada e selecionada sequencialmente através da percepção sensorial com o auxílio do processamento dos sinais e algoritmos de aprendizado de máquina. Uma arquitetura típica deste tipo de processamento pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 – Arquitetura típica de um sistema TCM.



Fonte: (KOTHURU; NOOKA; LIU, 2017)

### 2.0.8 Índices de Danos

Segundo (FARRAR *et al.*, 2023), os índices RMSD e CCDM são frequentemente utilizados para monitorar a integridade de estruturas (SHM - *structural health monitoring*) em determinada banda de sinal, conforme dado nas equações (2.3) e (2.4):

$$RMSD = \sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[X_D(k) - X_H(k)]^2}{X_H(k)}} \quad (2.3)$$

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [X_H(k) - \bar{X}_H][X_D(k) - \bar{X}_D]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [X_H(k) - \bar{X}_H]^2} \sqrt{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [X_D(k) - \bar{X}_D]^2}} \quad (2.4)$$

Sendo:

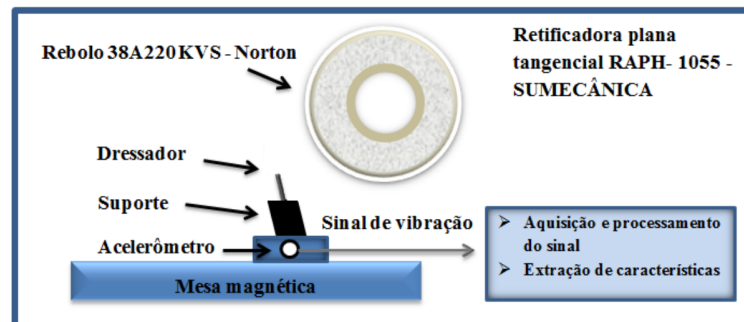
- H: corresponde aos dados de referência (sem danos);
- D: corresponde aos dados da estrutura com dano;
- $X_H(k)$ : espectro de frequência da estrutura sem dano;
- $X_D(k)$ : espectro de frequência da estrutura com dano;
- $\bar{X}_H(k)$ : média do espectro de frequência da estrutura sem dano;
- $\bar{X}_D(k)$ : média do espectro de frequência da estrutura com dano;

Esses dados são medidos em uma frequência  $k$  variando de  $\omega_l$  (frequência inicial) até  $\omega_F$  (frequência final). Tendo como característica o RMSD ser mais sensível a variações de amplitude e o CCDM a frequência entre dois estados da condição da ferramenta.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo, foram conduzidos testes experimentais de dressagem de ponta única em uma retificadora com um sensor de vibração do tipo acelerômetro piezelétrico, que foi acoplado ao suporte da ferramenta (Figura 13). Os sensores piezelétricos funcionam com base no efeito piezelétrico, que é a capacidade de certos materiais, como o cristal de quartzo, gerarem uma carga elétrica quando submetidos a tensão mecânica. Quando uma vibração é aplicada ao sensor piezelétrico, ele gera uma corrente elétrica proporcional à intensidade da vibração, convertendo, assim, as informações vibracionais em sinais elétricos mensuráveis.

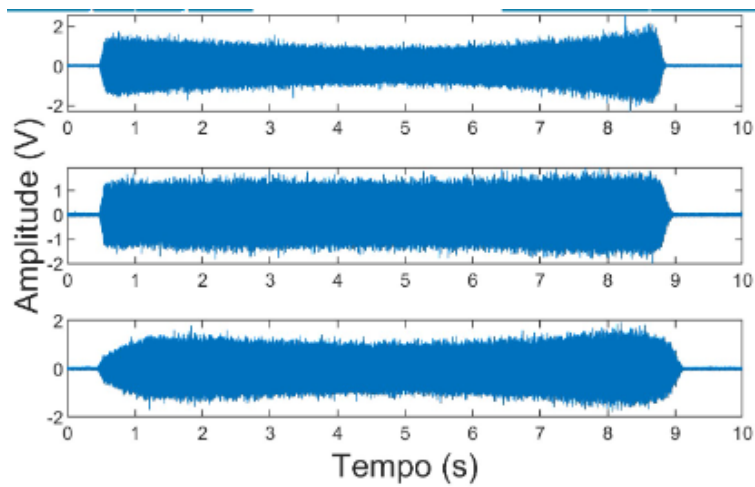
Figura 13 – Retifica com o Sensor Equipado.



Fonte: (JUNIOR *et al.*, 2016)

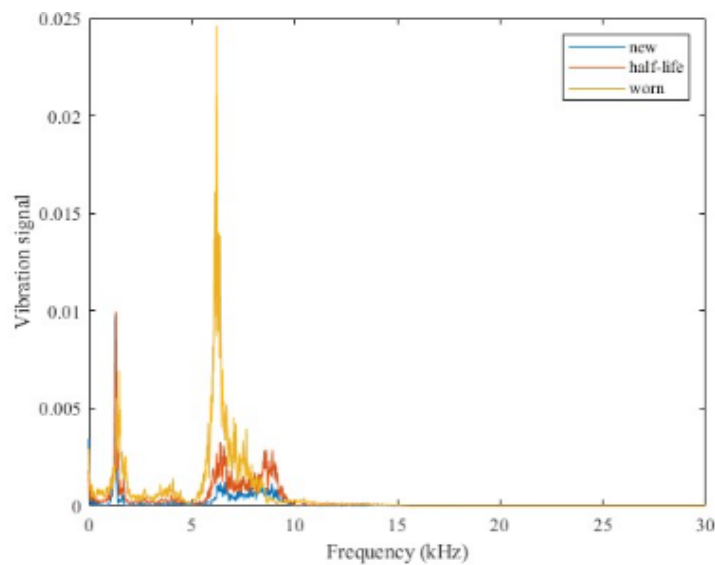
A coleta dos sinais de vibração foi realizada por meio de um sistema de aquisição de dados, que registrou cada passada da ferramenta de dressagem sobre a superfície do rebolo. Essas passadas representam o movimento da ferramenta de dressagem à medida que ela interage com o rebolo como representado na Figura 1. A análise dos sinais de vibração durante as passadas da ferramenta de dressagem no sistema de medição do rebolo permitiu examinar o desgaste da ferramenta em três momentos distintos: início do processo, após 50 passadas e após 100 passadas da ferramenta de dressagem sobre o rebolo. Assim, os dados iniciais para análise da aquisição de dados obtidos estão representados nas figuras 14 e 15, sendo a primeira o sinal puro e a segunda uma análise espectral desse sinal.

Figura 14 – Sinal de Vibração Puro



Fonte: Autor

Figura 15 – Análise Espectral do Sinal de Vibração Puro

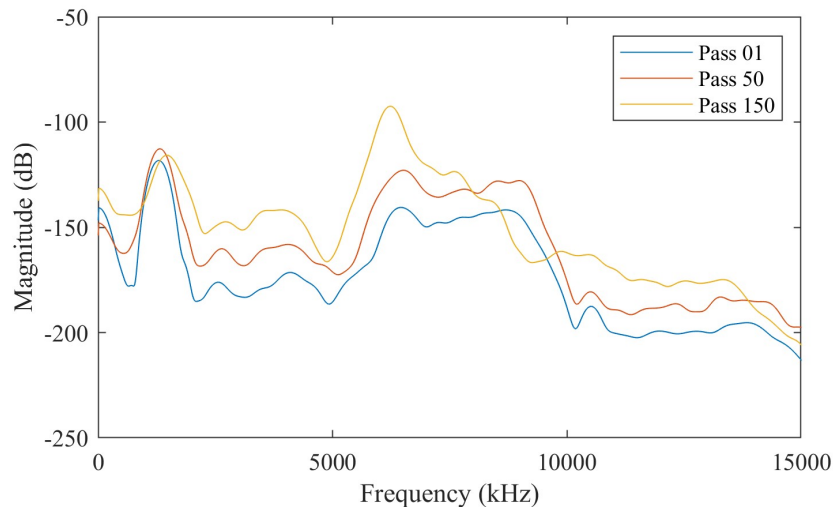


Fonte: Autor

Durante a análise, foi possível perceber que à medida que o número de passadas aumentava, a magnitude das vibrações (expressa em dB) também aumentava, conforme ilustrado na Figura 16. Para gerar os gráficos e realizar a análise, foi utilizado o software MATLAB. Essa análise permitiu monitorar de forma precisa o desgaste da ferramenta ao longo do processo de dressagem, fornecendo informações valiosas para a manutenção preventiva e aprimoramento da eficiência do sistema de retificação. Inicialmente foram aplicadas duas técnicas de análise de sinais: o método RMS (Root Mean Square) e o método Welch. O método Welch (Figura 19) é uma técnica de análise espectral que divide o sinal em segmentos menores e calcula o espectro de potência em cada segmento. Isso

permite examinar as características de frequência das vibrações e identificar padrões ou tendências ao longo do tempo.

Figura 16 – Método Welch para análise do espectro de frequência.



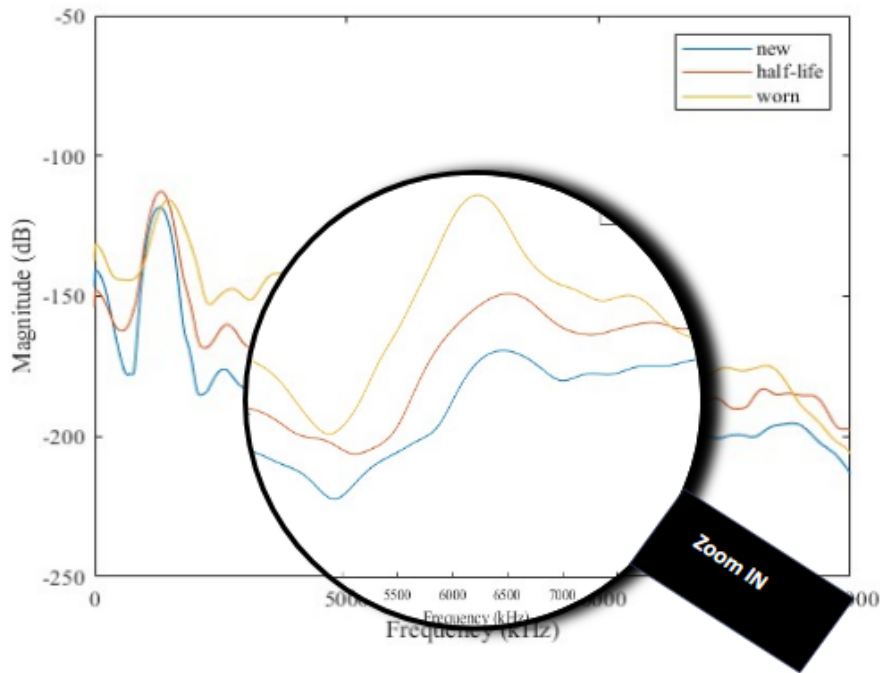
Fonte: Autor

Para fazer a seleção da banda que melhor representava o fenômeno estudado, foi analisado qual banda representava três características:

- Curva Crescente: Dressador Novo;
- Curva Uniforme: Dressador Meia Vida;
- Curva Instável: Dressador Desgastado.

Com isso definido foi possível selecionar as frequências de 5 a 7  $kHz$ , pois foi a banda que melhor representou o desgaste da máquina, conforme esse parâmetro definido (Figura 17).

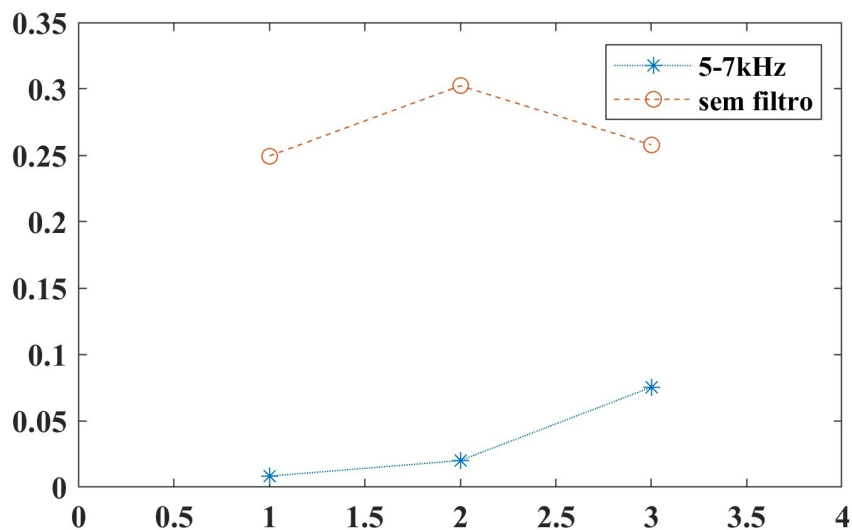
Figura 17 – Método Welch - Frequência Seleccionada.



Fonte: Autor

O método RMS é uma medida estatística que calcula a raiz quadrada da média dos quadrados dos valores do sinal ao longo do tempo. Ele fornece uma medida da amplitude média do sinal, permitindo avaliar as variações na magnitude das vibrações, representado na Figura 18, auxiliando na identificação da tendência, eventos e comportamento do sinal no tempo da banda selecionada.

Figura 18 – Média com e sem filtro - RMS.



Fonte: Autor

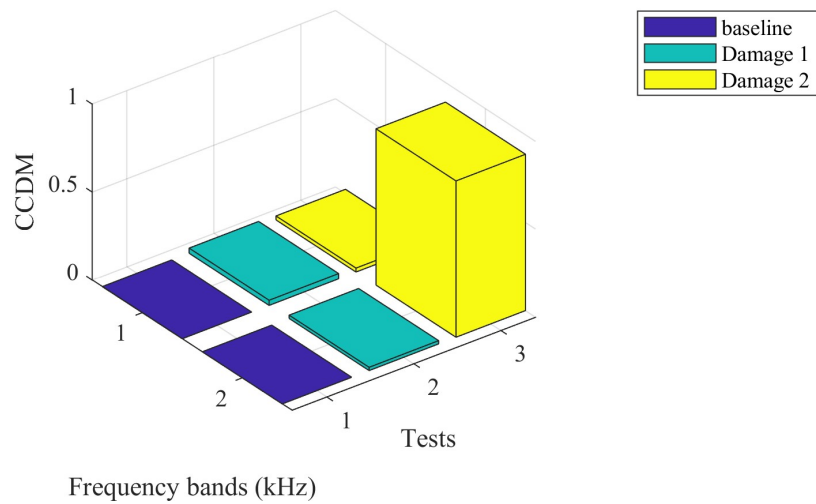
Após essa análise inicial, foram aplicados índices de danos RMSD e CCDM, que são métricas que quantificam o desvio dos sinais, da ferramenta após 50 passadas e 150, tendo como referência a primeira condição da ferramenta que seria o de 0 passadas. O espectro de frequências será obtido por meio do cálculo da PSD aplicando inicialmente na faixa selecionada anteriormente (desenvolvimento na próxima seção).



## 4 RESULTADOS

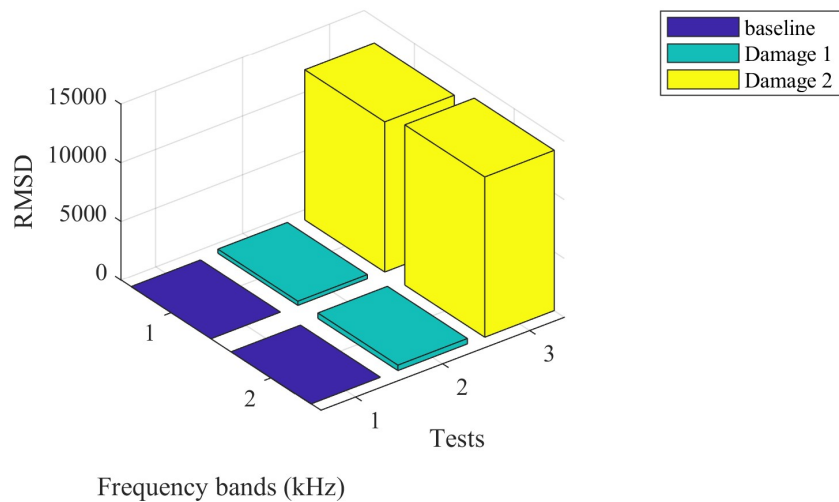
Com base nas análises RMS e PSD, é possível perceber que existe uma correlação entre o monitoramento da condição da ferramenta de dressagem e da análise de sinais de vibração. Com essa análise a faixa de frequências que melhor representou o desgaste do dressador foi entre 5 kHz e 7 kHz. Para validar essa escolha foi aplicado os índices RMSD e CCDM (Figura 19 e 20).

Figura 19 – CCDM entre 5 kHz e 7 kHz.



Fonte: Autor

Figura 20 – RMSD entre 5 kHz e 7 kHz.



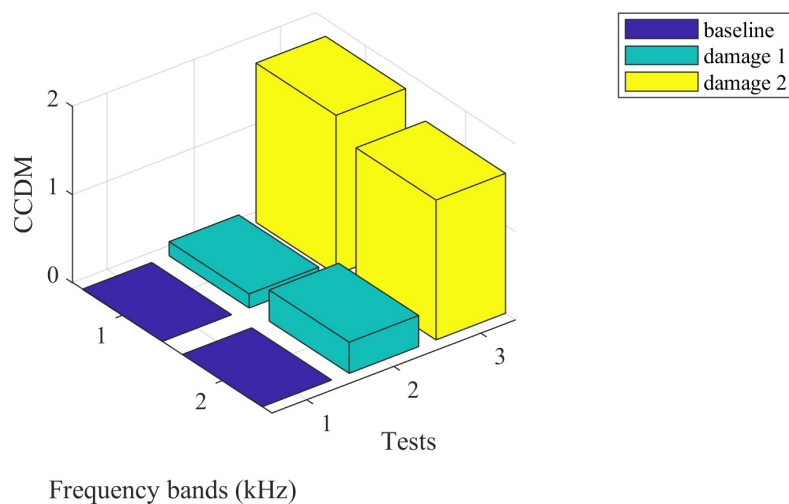
Fonte: Autor

Como pode ser observado, a banda selecionada não teve uma representação satisfatória para o fenômeno que está sendo estudado, dessa maneira foi necessário uma reavaliar a banda selecionada, para encontrar uma que tivesse as seguintes características:

- Barra Menor: Dressador Novo;
- Barra Média: Dressador Meia Vida;
- Barra Maior: Dressador Desgastado.

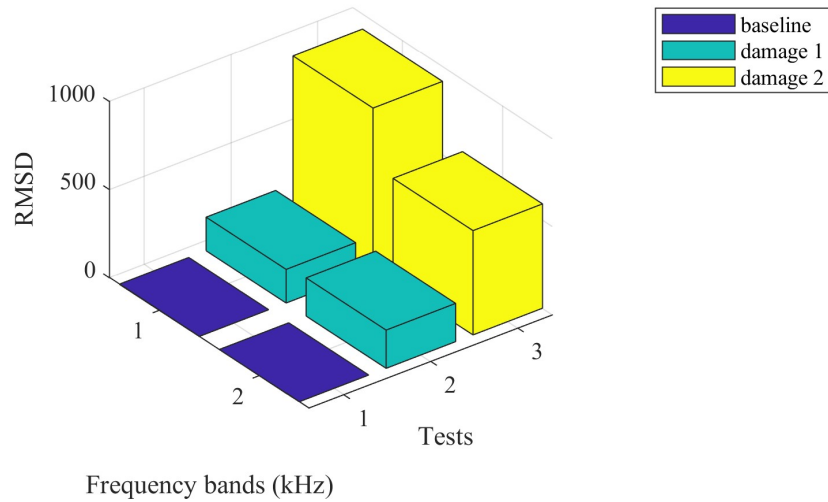
Mediante a observação das características de cada banda de frequência e por meio de repetições de análises em diferentes frequências, foi possível encontrar que a melhor faixa de frequência que representa esse fenômeno segundo o índice RMSD é de 12 kHz a 14 kHz e para o CCDM é de 7 kHz a 9 kHz (Figura 21 e 22).

Figura 21 – CCDM entre 7 kHz e 9 kHz.



Fonte: Autor

Figura 22 – RMSD entre 12 kHz e 14 kHz.



Fonte: Autor

A diferença da banda selecionada para análise RMS e PSD pode ser justificada pois essa análise é feita por meio da observação das características encontradas quando aplicado o PSD (16). Assim é possível perceber que a análise feita pelos índices RMSD e CCDM tem uma maior confiabilidade para conseguir determinar a melhor banda para estudo do desgaste da peça por meio do sinal de vibração. Pode-se observar, entretanto, que existe uma relação entre o sinal de vibração do processo de dressagem com o desgaste da ferramenta.



## 5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, foi investigado minuciosamente o monitoramento da condição da ferramenta no contexto do processo de retificação, compreendendo seu funcionamento essencial, e aprofundando no estudo da ferramenta central desse processo, a ferramenta de ponta única diamantada da dressagem.

Foi revelado a capacidade significativa de monitorar continuamente a condição da ferramenta durante a retificação, o que oferece benefícios substanciais à indústria de usinagem. Para isso, foi necessário realizar processamento dos sinais obtidos por sensor de vibração. Utilizando inicialmente RMS e PSD para análise sinal e seleção de banda que melhor representasse o fenômeno estudado encontrando a faixa 5 kHz a 7 kHz, conseguimos correlacionar o aumento da amplitude das vibrações com o desgaste da ferramenta. Na segunda parte da pesquisa foi aplicado os índices de danos RMSD e CCDM para poder representar a integridade da ferramenta em uma banda de frequência.

A primeira banda de frequência que foi aplicada foi de 5 kHz a 7 kHz, encontrando um resultado não satisfatório para representar o desgaste da ferramenta. Dessa maneira, através de testes foi encontrado que a melhor banda para ser representada pelo índice RMSD é de 12 kHz a 14 kHz e para o CCDM é de 7 kHz a 9 kHz. Essa mudança se deve pelo fato de que para a primeira análise a banda selecionada foi feito por meio da observação do gráfico obtido, já na segunda avaliação é feito por tentativa e erro.

Assim, é possível observar que os dois métodos conseguem relacionar o desgaste com o sinal de vibração recebido, o que muda é a precisão de cada método. Essa evidência permiti aplicar um monitoramento em tempo real por meio de sinais de vibração para que seja feita uma substituição ou manutenção oportuna da ferramenta, evitando interrupções não planejadas no processo de retificação.



## REFERÊNCIAS

- BADGER, J.; TORRANCE, A. A comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 40, n. 8, p. 1099–1120, 2000.
- BHUIYAN, M.; CHOUDHURY, I. 13.22—review of sensor applications in tool condition monitoring in machining. **Comprehensive Materials Processing**, Oxford: Elsevier, v. 13, p. 539–569, 2014.
- BIANCHI, E. C. *et al.* Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the aisi 4340 steel with cbn and mql with water. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 95, p. 2855–2864, 2018.
- BISU, C. F. *et al.* Envelope dynamic analysis: a new approach for milling process monitoring. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 62, p. 471–486, 2012.
- BORELLI, J. E. **Diagnóstico do estado de desgaste de ferramentas para o monitoramento de condições de usinagem de alto desempenho**. 2000. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2000.
- BRINKSMEIER, E. *et al.* Metalworking fluids—mechanisms and performance. **CIRP Annals**, Elsevier, v. 64, n. 2, p. 605–628, 2015.
- CUI, X. *et al.* Comparative assessment of force, temperature, and wheel wear in sustainable grinding aerospace alloy using biolubricant. **Frontiers of Mechanical Engineering**, Springer, v. 18, n. 1, p. 3, 2023.
- DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using taguchi method. **Measurement**, Elsevier, v. 78, p. 111–119, 2016.
- DENKENA, B.; GROVE, T.; GÖTTSCHING, T. Grinding with patterned grinding wheels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Elsevier, v. 8, p. 12–21, 2015.
- DIMLA SNR, D. The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 19, p. 705–713, 2002.
- DOMINGOS, D. H. C. A tecnologia como aliada essencial para alavancagem da gestão no varejo. 2023.
- DOTTO, F. R. *et al.* Acoustic image-based damage identification of oxide aluminum grinding wheel during the dressing operation. **Procedia CIRP**, Elsevier, v. 79, p. 298–302, 2019.
- FARRAR, A. D. *et al.* A model for the lithospheric architecture of the central andes and the localization of giant porphyry copper deposit clusters. **Economic Geology**, Society of Economic Geologists, v. 118, n. 6, p. 1235–1259, 2023.

FILHO, N. M.; COELHO, R. T.; OLIVEIRA, J. F. G. d. Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina. **Máquinas e Metais**, n. 388, p. 56–73, 1998.

GARCÍA-PLAZA, E. *et al.* Surface finish monitoring in taper turning cnc using artificial neural network and multiple regression methods. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 599–607, 2013. ISSN 1877-7058. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813014586>.

GOSTIMIROVIĆ, M. *et al.* Investigation of the cutting forces in creep-feed surface grinding process. **Journal of Production Engineering**, v. 18, n. 1, p. 21–24, 2015.

HADAD, M. J. *et al.* Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-mql grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Elsevier, v. 54, p. 10–17, 2012.

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

INASAKI, I. Sensor fusion for monitoring and controlling grinding processes. **The International journal of advanced manufacturing technology**, Springer Nature BV, v. 15, n. 10, p. 730–736, 1999.

JABBAR, M. A. *et al.* Respiratory health effects of metalworking fluid among metal machining workers. **Asia Pacific Environmental and Occupational Health Journal**, v. 3, n. 2, 2017.

JUNIOR, C.; OLIVEIRA, P. de. Sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2016.

JUNIOR, P. d. O. C. Tool condition monitoring in the dressing process through electromechanical impedance and machine learning. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2020.

JUNIOR, P. d. O. C. *et al.* Spectral estimation of vibration signal for monitoring the wear of single-point dresser. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 21, p. 827–840, 2016.

KONIG, W. Ae in grinding and dressing-accuracy and process reliability. **SME Technical Paper**, p. MR90–526, 1990.

KOTHURU, A.; NOOKA, S. P.; LIU, R. Cutting process monitoring system using audible sound signals and machine learning techniques: An application to end milling. *In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. International Manufacturing Science and Engineering Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 50749, p. V003T04A050.

KURAM, E. *et al.* Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using d-optimal design of experiments. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 42, p. 159–166, 2013.

LAURO, C. *et al.* Monitoring and processing signal applied in machining processes—a review. **Measurement**, Elsevier, v. 58, p. 73–86, 2014.

- LEE, W. J. *et al.* Monitoring of a machining process using kernel principal component analysis and kernel density estimation. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 31, p. 1175–1189, 2020.
- LI, C. *et al.* Modeling and numerical simulation of the grinding temperature field with nanoparticle jet of mql. **Advances in Mechanical Engineering**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 5, p. 986984, 2013.
- LINKE, B. S. Review on grinding tool wear with regard to sustainability. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, American Society of Mechanical Engineers, v. 137, n. 6, p. 060801, 2015.
- MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. [*S.l.: s.n.*]: Industrial Press Inc., 2008.
- MARINESCU, I.; GUO, L.; WEI, P. Basic research for the uv fixed abrasive lapping plate. **Applied Mechanics and Materials**, Trans Tech Publ, v. 371, p. 95–100, 2013.
- MARINESCU, I. D. *et al.* **Handbook of machining with grinding wheels**. [*S.l.: s.n.*]: Crc Press, 2006.
- NILSSON, M. *et al.* Factors influencing the compressive strength of an injectable calcium sulfate–hydroxyapatite cement. **Journal of Materials Science: materials in medicine**, Springer, v. 14, p. 399–404, 2003.
- RAO, K. V.; MURTHY, B.; RAO, N. M. Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for aisi 1040 steel in boring. **Measurement**, Elsevier, v. 46, n. 10, p. 4075–4084, 2013.
- RMILI, W. *et al.* Tool wear monitoring in turning processes using vibratory analysis. **International Journal of Acoustics and Vibration**, v. 14, n. 1, p. 4–11, 2009.
- RODRIGUEZ, R. L. *et al.* Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using cbn wheel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 107, p. 1265–1275, 2020.
- ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. [*S.l.: s.n.*]: William Andrew, 2013.
- ROWE, W. B. Basic material removal. **Principles of modern grinding technology**, Elsevier, p. 15–33, 2014.
- SATO, B. K. Comparação entre diferentes rebolos aplicados no processo de retificação utilizando lubrificação sustentável. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023.
- SEMMLOW, J.; ALVAREZ, T.; PEDRONO, C. Divergence responses to smoothly moving targets. **Investigative Ophthalmology & Visual Science**, The Association for Research in Vision and Ophthalmology, v. 45, n. 13, p. 2539–2539, 2004.
- SEVERIANO, A. C. *et al.* Retificação de aços com rebolos de cbn ligado galvanicamente sobre corpo de alumínio. Florianópolis, SC, 2002.
- SHEN, J. *et al.* Study on wear of diamond wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding ceramic. **Wear**, Elsevier, v. 332, p. 788–793, 2015.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J. F. G. d. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. **Máquinas e Metais**, v. 38, n. 436, p. 140–157, 2002.

SOUZA, A. G. O. Monitoramento da dressagem do processo de retificação. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2009.

SOUZA, R. R. d. Efeito da retificação com diferentes grãos abrasivos aplicado no ferro fundido nodular austemperado atrelado a qualidade e custo industrial. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023.

TETI, R. Advanced it methods of signal processing and decision making for zero defect manufacturing in machining. **Procedia Cirp**, Elsevier, v. 28, p. 3–15, 2015.

TETI, R. *et al.* Advanced monitoring of machining operations. **CIRP annals**, Elsevier, v. 59, n. 2, p. 717–739, 2010.

TIAN, W. **Signature analysis of OD grinding processes with applications in monitoring and diagnosis**. 2009. Tese (Doutorado) — Worcester Polytechnic Institute, 2009.

TRAN, M.-Q. *et al.* Machine learning and iot-based approach for tool condition monitoring: A review and future prospects. **Measurement**, Elsevier, p. 112351, 2022.

WEGENER, K. *et al.* Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP annals**, Elsevier, v. 60, n. 2, p. 757–777, 2011.

XUE, L.; NAGHDY, F.; COOK, C. Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding. *In*: IEEE. **2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT'02**. [*S.l.: s.n.*], 2002. v. 2, p. 1296–1299.

YOSHIDA, T. *et al.* Analysis of chip size distribution using image processing technology to estimate wear state of cylindrical grinding wheel. **Tribology International**, Elsevier, v. 153, p. 106600, 2021.

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. Monitoring grinding parameters by vibration signal measurement-a primary application. **Minerals Engineering**, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 495–501, 1994.

ZHONG, W.; ZHAO, D.; WANG, X. A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on vibration signals. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 12, p. 1057–1064, 2010. ISSN 0890-6955. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695510001513>.