

**Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica**

**PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS  
DE ÁUDIO MEDIDOS ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS MÓVEIS PARA A  
APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO DO TORNEAMENTO DE  
LIGAS DE TITÂNIO**

**Aluno:  
Ana Carolina Porto**

**Orientador:  
Sidney Bruce Shiki**



São Carlos – SP – 2023

**Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica**

Ana Carolina Porto

**PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS  
DE ÁUDIO MEDIDOS ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS MÓVEIS PARA A  
APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO DO TORNEAMENTO DE  
LIGAS DE TITÂNIO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
da Universidade Federal de São Carlos para  
obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Sidney Bruce Shiki



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET  
Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905  
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 26/2023/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANA CAROLINA PORTO

PROCESSAMENTO DIGITAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE SINAIS DE ÁUDIO MEDIDOS ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS MÓVEIS PARA A APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO DO TORNEAMENTO DE LIGAS DE TITÂNIO

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 16 de junho de 2023

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	Armando Ítalo Sette Antonialli
Membro da Banca 2	Adailton Gomes Pereira



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 16/06/2023, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Armando Italo Sette Antonialli, Docente**, em 16/06/2023, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1077227** e o código CRC **9537F413**.

**Referência:** Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.018971/2023-49

SEI nº 1077227

*Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019*



Documento assinado digitalmente  
ADAILTON GOMES PEREIRA  
Data: 16/06/2023 17:34:32-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

A todos aqueles que me trouxeram calma em meio à tempestade.

## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço a meu orientador deste trabalho, Sidney Bruce, que me despertou o interesse pela pesquisa desde a iniciação científica, pelos ensinamentos e pela paciência. A Armando Antonialli, professor que agregou conhecimento a essa pesquisa desde o início.

Aos meus pais, Vânia e Antônio, sem eles não seria quem sou hoje, muito obrigada pelo acolhimento, pelo apoio e pelo carinho ao longo de todo caminho.

À minha irmã Maria Isabela, que cresceu comigo e que agora me pede conselhos de graduação, pela torcida e pelo apoio.

A meu namorado Alexandre, que sempre me acompanha nos meus projetos me dando força, pelo apoio, pelo carinho e pela parceria ao longo da jornada.

A meus avós, Thereza, Avelino e Ida, que sempre torceram por mim. A minha madrinha Helena pelo incentivo e apoio. E aos familiares que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

A meus amigos que conheci na Universidade, que fizeram com que graduação fosse mais leve. A meus amigos de fora da graduação, que me deram apoio para seguir firme.

A Deus, por me ajudar no caminho que me fez chegar até aqui.

## RESUMO

---

Quando os seres humanos começaram a se organizar em sociedade e a estabelecer uma divisão de tarefas, deu início a uma busca por otimização de processos. Esses processos auxiliam na organização social e no crescimento da economia, uma otimização que será abordada neste trabalho é a de monitorar processos de usinagem, visando reduzir perdas econômicas, de tempo e de material. Nesta pesquisa, foi realizado um estudo de cunho experimental para coletar dados obtidos por meio de um microfone de um dispositivo móvel, smartphone, durante um torneamento de uma peça de titânio com o intuito de verificar a aplicabilidade de dispositivos móveis em monitoramento de processos de usinagem. Os sinais sonoros captados foram analisados computacionalmente nos domínios do tempo e da frequência, a análise considerou os valores da *root mean square* (RMS), da Transformada Discreta de Fourier (DFT) e da Densidade Espectral de Potência (PSD) do sinal coletado. Além disso, o estudo também comparou os resultados obtidos por meio do sinal sonoro com resultados de vibração obtidos por meio de um acelerômetro no mesmo experimento, de modo a comprovar ou refutar a eficácia do monitoramento. Os resultados mostraram que apesar de o sensor analisado, o microfone do smartphone, não ser tão robusto como sensores tradicionais, ele foi capaz de realizar o monitoramento do processo, trazendo resultados similares aos obtidos com o acelerômetro.

**Palavras-chave:** Monitoramento de processos de usinagem; torneamento de titânio; dispositivos móveis em aplicações de engenharia; processamento de sinal sonoro.

## ABSTRACT

---

When human beings began to organize themselves into society and establish a tasks division, a search for process optimization began. These processes help in the social organization and in the economic growth, an optimization that will be addressed in this paper is monitoring machining processes, with the intention to reduce economic, time and material losses. In this research, an experimental study was carried out to collect data obtained through a mobile device, smartphone, microphone during the turning of a titanium piece in order to verify the mobile devices applicability in monitoring machining processes. The captured sound signals were computationally analyzed in the time and frequency domains, the analysis considered the root mean square (RMS), Discrete Fourier Transform (DFT) and Power Spectral Density (PSD) values of the collected signal. In addition, the study also compared the results obtained through the sound signal with vibration results obtained through an accelerometer in the same experiment, in order to prove or refute the monitoring effectiveness. The results showed that although the analyzed sensor, the smartphone microphone, is not as robust as traditional sensors, it was able to monitor the process, bringing results similar to those obtained with the accelerometer.

**Keywords:** Machining processes monitoring; titanium turning; mobile devices in engineering applications; sound signal processing.



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Processo de corte: interação do feixe com o material.	11
Figura 2 – Comparação de mapas de ruído (sensores tradicionais e smartphones).	12
Figura 3 – Processo de torneamento.	14
Figura 4 – Propriedades e problemas da usinagem de titânio.	15
Figura 5 – Configuração do experimento de gravação de áudio.	18
Figura 6 – Energia do sinal sonoro analisada entre as frequências de 8 a 16 kHz.	19
Figura 7 – Disposição dos sensores fixados na ponte e sensores do experimento.	22
Figura 8 – Exemplo de Boxplot.	25
Figura 9 – Transformada de Fourier de uma onda senoidal	26
Figura 10 – Leitura de sinal em dois domínios (tempo e frequência).	27
Figura 11 – Auto correlação senoidal e densidade espectral de potência correspondente.	28
Figura 12 – Leitura de sinal em dois domínios (tempo e frequência em PSD).	29
Figura 13 – Setup experimental em um torno CNC.	30
Figura 14 - Setup experimental em um torno CNC.	33
Figura 15 – Sinal sonoro filtrado no domínio do tempo.	34
Figura 16 – Sinal sonoro de background no domínio do tempo.	35
Figura 17 – Boxplot de valores de RMS de acordo com os trechos dos áudios.	36
Figura 18 – Boxplot de valores de RMS dos áudios analisados.	37
Figura 19 – Sinais sonoros no domínio da frequência.	38
Figura 20 – Sinais sonoros de background no domínio da frequência.	38
Figura 21 – Sinais sonoros em função da PSD parametrizada.	40
Figura 22 – Correlação dos picos da PSD com a velocidade de corte.	41
Figura 23 – Correlação dos picos da PSD com o avanço da ferramenta.	42
Figura 24 – Correlação dos picos da PSD com a profundidade de corte.	42
Figura 25 – Correlação dos picos da PSD com a rotação da máquina.	43
Figura 26 – Correlação dos picos da PSD com a velocidade de avanço.	43
Figura 27 – Correlação dos picos da PSD com o tempo de corte.	44
Figura 28 – Valores de RMS de acordo com os testes de vibração.	46
Figura 29 – Valores da PSD no sinal de vibração com mesma escala de grandeza.	47
Figura 30 – Valores da PSD no sinal de vibração com diferentes escalas de grandeza.	48

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem em cada teste.	31
Tabela 2 – Valor do RMS de cada sinal de áudio.	36
Tabela 3 – Picos de frequência em Hz nos sinais de áudio pela DFT.	39
Tabela 4 – Picos de frequência em Hz nos sinais de áudio pela PSD.	40
Tabela 5 – Correlação dos picos da PSD com as variáveis do torneamento.	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

CNC	Controle Numérico Computadorizado
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> ou Transformada Discreta de Fourier
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> ou Transformada Rápida de Fourier
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> ou Laboratório de Matrizes
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> ou Análise do Componente Principal
PSD	<i>Power Spectral Density</i> ou Densidade Espectral de Potência
RMS	<i>Root mean square</i> ou valor eficaz
Ti-6Al-4V	Titânio 6 Alumínio 4 Vanádio

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	5
RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABELAS .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	10
1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo geral .....	14
1.2 Objetivos específicos .....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1 Modos de produção industrial e processos de usinagem .....	16
2.2 Aplicações de ligas de titânio .....	17
2.3 Análise do monitoramento de ferramentas de corte em processos de usinagem.....	19
2.4 Dispositivos móveis em aplicações de engenharia .....	23
3 FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS.....	27
3.1 Análise no domínio do tempo .....	27
3.2 Análise no domínio da frequência .....	28
3.2.1 Transformada Discreta de Fourier (DFT) .....	29
3.2.2 Densidade espectral de potência (PSD) .....	30
4 DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL.....	33
4.1 Testes de cunho experimental.....	33
4.2 Metodologia para análise e processamento de sinais.....	34
5 RESULTADOS .....	37
5.1 Resultados no domínio do tempo.....	37
5.2 Resultados no domínio da frequência .....	40
5.3 Resultados de sinais de áudio comparados os de sinais de vibração .....	48
6 CONCLUSÃO.....	53
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

# 1 INTRODUÇÃO

---

Desde que o ser humano começou a se organizar em sociedade, há um constante desenvolvimento de técnicas para melhoramento de produção, englobando desde bens alimentícios até itens de alta tecnologia, como a espacial, para que se produza mais, com mais qualidade e em menos tempo e com menor custo. Essa necessidade de melhorias também acontece nos processos de usinagem de torneamento, analisando como a ferramenta de corte é afetada pelo desgaste, pode-se aprimorar as técnicas de monitoramento e prever a falha da mesma. Apesar de não ser possível evitar o desgaste, a perda de material e as paradas da máquina podem ser evitadas ou, pelo menos, reduzidas ao realizar um acompanhamento do processo de usinagem. A otimização de um processo de usinagem se relaciona, muitas vezes, à maximização da vida útil da ferramenta e monitorar seu desgaste pode ser fundamental para auxiliar nessa otimização (GAJATE et al., 2010).

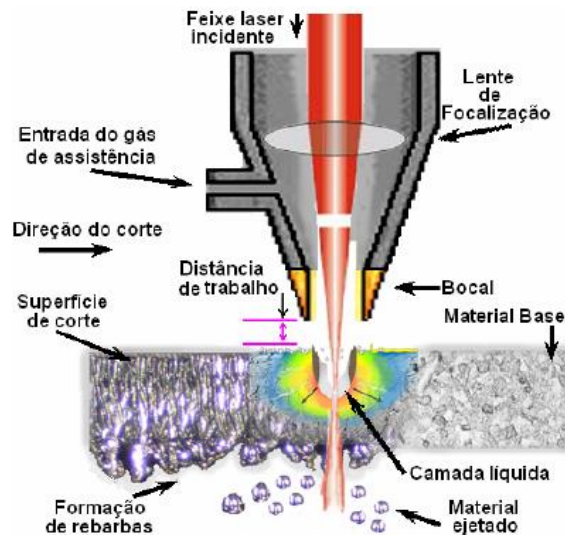
Em um processo de usinagem, que envolve uma variedade de parâmetros de entrada, reduzir perdas de material e de tempo de máquina parada é fundamental para que a produção seja mais eficiente. O monitoramento desse tipo de processo leva em consideração não só a máquina analisada, mas também os parâmetros em que ela trabalha para que seja possível realizar a detecção de falhas, proteger a estabilidade do processo e gerar um sistema de prevenção de danos para a máquina e os demais componentes da usinagem (DIMLA, 2000). De acordo com Machado (2011) há apenas três maneiras de lidar com a complexidade da usinagem. Por experiência ao longo de muitas tentativas e erros, pela experimentação como em um estudo de caso e a partir de modelos teóricos.

Além dos parâmetros de usinagem, há diferentes materiais que podem ser usinados, como ligas de aço, alumínio, cobre, etc, o que também influencia no processo. Um material que está ganhando mais visibilidade e aplicações devido a suas excelentes propriedades mecânicas é o titânio, que geralmente é utilizado na forma de ligas, apesar dessas propriedades, ele possui baixa usinabilidade, o que pode ser evidenciado pelo volume de material que é removido em um torneamento comparado ao tempo de uso da ferramenta de corte (ANTONIALLI, 2009).

Para contornar os problemas com a baixa usinabilidade, pesquisas buscam reduzir o custo de produção na usinagem do titânio, como é possível observar na tese de Almeida (2007), que se utiliza de um laser pulsado de neodímio para otimizar o processo de corte a laser no titânio, o autor relata que apesar de ser um processo complexo, é possível utilizá-lo, mostrando as diferentes aplicabilidades do titânio. O laser pulsado permite o controle da potência de pico, ou seja, sua intensidade depende da energia do pulso, da largura temporal do pulso e também

da área do feixe no ponto focal. Portanto como é possível manipular o feixe do laser por meio de parâmetros do ressonador óptico, durante o processo de usinagem, pode ocorrer um refinamento da ferramenta utilizada, o processo de corte é demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Processo de corte: interação do feixe com o material.



Fonte: Almeida (2007)

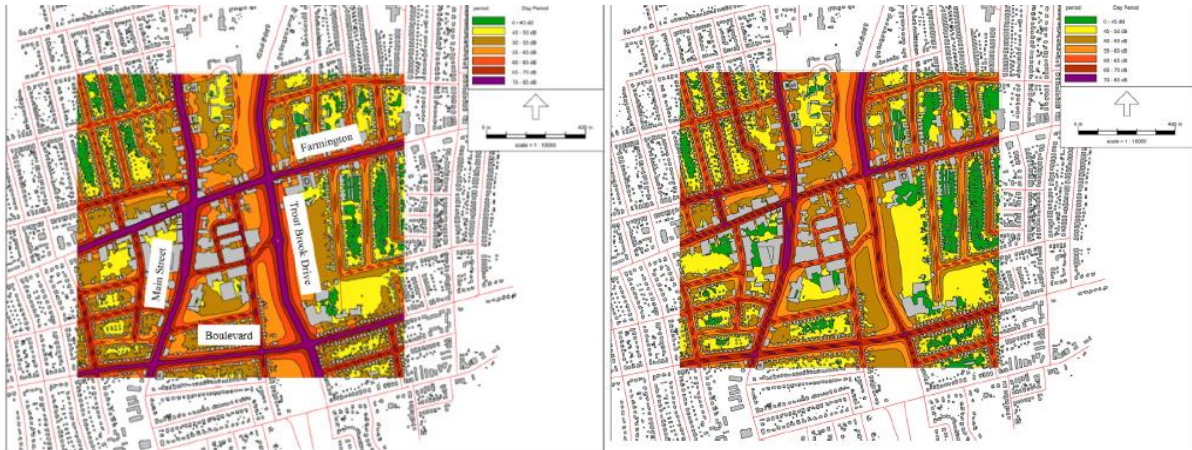
O avanço no desenvolvimento de pesquisas em monitoramento de processos de usinagem pode auxiliar nessa redução de custos, por outro lado, dependendo do tipo de monitoramento e equipamento utilizados, realizá-lo pode ser caro, o que deixa o processo inacessível a pequenos produtores. Considerando este fato, surgem pesquisas envolvendo uma forma de reduzir o custo do monitoramento, sendo mais populares e economicamente viáveis, para que seja possível monitorar o processo de usinagem.

Uma maneira de tornar processos de monitoramento mais viáveis economicamente é realizar a substituição de sensores tradicionais por outros mais populares. Uma substituição que vem sendo recorrente na literatura é a utilização de smartphones na área de engenharia. Um exemplo disso reside na utilização de smartphones para o mapeamento do nível de emissão sonora de uma cidade, Murphy e King (2016) realizaram uma pesquisa integrando os dados obtidos por meio do acelerômetro e GPS do dispositivo móvel aos dados obtidos por sensores tradicionais, utilizados na mesma função, para que, ao compará-los, seja possível definir a possibilidade de utilizar o aparelho para tais mapeamentos.

A Figura 2 mostra a comparação entre esses métodos, sendo que a primeira parte da figura se refere ao método tradicional e a segunda, ao método utilizando o um smartphone.

Como resultado, os autores revelaram que apesar de algumas diferenças entre os mapas, com avanço tecnológico, é possível utilizar o novo método em aplicações futuras.

Figura 2 – Comparação de mapas de ruído (sensores tradicionais e smartphones).



Fonte: Murphy e King (2016)

Outros autores que também analisaram a aplicabilidade de dispositivos móveis na engenharia foram Matarazzo et al. (2018) que monitoraram a vibração de pontes por meio de suas frequências modais, obtendo frequências de ressonância na estrutura e concluindo que, a longo prazo, o dispositivo pode gerar dados para diminuir custos de manutenção da ponte e ao monitorar o fluxo de pessoas que passam por ela, é possível aumentar sua expectativa de vida.

Desse modo, a motivação deste trabalho é gerar uma análise do áudio emitido pelo processo de torneamento, gravado por meio de um microfone de smartphone, correlacionando essas medidas com os parâmetros de usinagem utilizados e os resultados obtidos para verificar a possibilidade de aplicação desses dispositivos para monitoramento de processos.

## 1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é verificar a aplicabilidade de sensores de smartphones, mais especificamente seu microfone, como uma ferramenta para o monitoramento de processos de usinagem como o torneamento, analisando diferentes situações de processo na usinagem de titânio.

## 1.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios experimentais a partir de um torneamento de titânio para obtenção do áudio emitido no processo;
- Analisar os arquivos de áudio coletados no experimento com o auxílio do software para processamento de sinais;
- Analisar os resultados obtidos nas análises de áudio, procurando por padrões que verifiquem a aplicabilidade do smartphone no monitoramento de processos de usinagem;
- Comparar dados de áudio no monitoramento com os dados vibração obtidos no mesmo processo de usinagem e verificar semelhanças.
- Gerar dados sobre a aplicabilidade do smartphone para a realização do monitoramento de processos de usinagem.



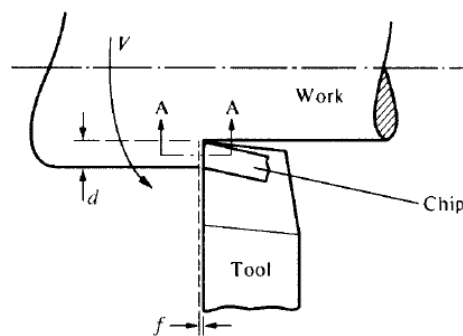
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Modos de produção industrial e processos de usinagem

A partir da década de 1950, após a segunda guerra mundial, a indústria responsável pela produção de máquinas e de ferramentas cresceu dentro diversos setores, como o de segurança aeroespacial e o automotivo, além da indústria de bens e serviços. As máquinas-ferramentas são divididas de acordo com seus processos de produção, sendo eles com produção de cavaco e em processos de conformação. Dentro dos processos de corte, os mais importantes são o torneamento, fresagem, furação e esmerilhamento (ARNOLD, 2001).

Segundo Shaw (2000), o torneamento é um processo de remoção de material indesejado, utilizando-se uma ferramenta de ponta única para produzir uma superfície de revolução. As principais variáveis que podem ser ajustadas pelo operador da máquina são a velocidade de corte, o avanço da ferramenta e a profundidade de corte de usinagem.

Figura 3 – Processo de torneamento.



Fonte: Shaw (2000)

Há três características referentes ao torneamento que não são comuns em outros processos de usinagem, a primeira é que o corte inferido na peça é contínuo, além disso pode ser descrito em coordenadas cilíndricas, indicando a seção da peça e a profundidade  $e$ , a última característica é que tanto a peça quanto a ferramenta movem-se no processo, a peça rotacionando e a ferramenta transladando (AMORIM, 2002).

No mesmo trabalho, Amorim (2002) também define parâmetros de influência no processo de torneamento que não dependem da ferramenta ou do material a ser usinado, são eles: os parâmetros de corte, as mesmas variáveis que podem ser ajustadas pelo operador da

máquina, o que torna possível determinar a taxa de remoção do material que parâmetro utilizado para medir a eficiência da operação, e a geometria da aresta de corte.

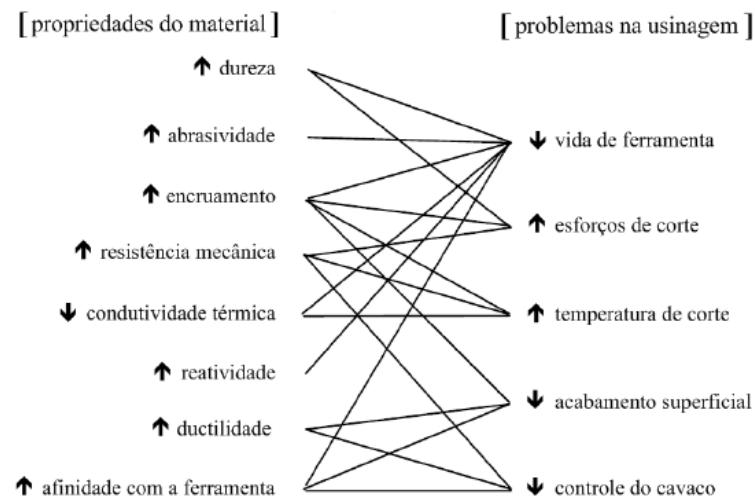
Com o avanço da tecnologia novas formas de usinagem e novos materiais ganham espaço em pesquisas, visando o melhoramento da produção tanto em redução de custos e de desperdício, quanto na tentativa de obter um processo mais rápido e com melhores resultados. Deste modo, pesquisas com o titânio, um material que pode ser utilizado em diferentes aplicações, foram investigadas nesta pesquisa.

## **2.2 Aplicações de ligas de titânio**

O titânio é um material que possui excelentes propriedades mecânicas e, por isso, pesquisas utilizando este metal têm se tornado mais relevantes, o material pode ser usado na fabricação de implantes cirúrgicos, trens de pouso, componentes forjados, entre outros. É geralmente usinado em ligas, como a Ti-6Al-4V composta por titânio, alumínio e vanádio, porém um desafio para sua utilização é a baixa usinabilidade, o que pode ser evidenciado devido ao volume de material removido na usinagem, já que o processo tende a gerar altos níveis de vibração na peça interrompendo o corte, e a limitação do tempo de uso da ferramenta de corte utilizada.

Essa baixa usinabilidade deve-se ao fato de que o titânio possui baixa condutividade térmica, suas propriedades mecânicas são mantidas à elevadas temperaturas, seu módulo de elasticidade é baixo e o material possui afinidade química com os materiais utilizados na composição das ferramentas. Também é possível observar a relação entre essas características e o desgaste da ferramenta de usinagem, tanto de flanco e o de cratera observados em sua superfície de saída, como o de entalhe, visto em sua superfície de folga (ANTONIALLI, 2009).

Figura 4 – Propriedades e problemas da usinagem de titânio.



Fonte: Adaptado de YAMANE et al. (2006)

A vibração gerada pela usinagem do titânio pode ser um fator de dificuldade para a utilização deste metal. De modo a verificar a eficiência do uso do *shunt* piezoelétrico para mitigar o *chatter* regenerativo no torneamento da liga de titânio, que é a auto-excitação ou vibração do material durante o processo devido a alterações na espessura do cavaco removido, Pereira (2022) efetuou uma modelagem dinâmica da ferramenta de corte para a previsão do *chatter*. O autor analisou os dados de vibração, coletados durante o processo de torneamento do titânio com diferentes velocidades de corte e avanços, de acordo com seu nível de RMS (*root mean square*), concluindo que o RMS diminui com o aumento da velocidade de corte, o que também impacta na vibração da peça, que também é reduzida com o aumento da velocidade.

Visando descobrir soluções para melhorar a usinabilidade deste material, Oestreich *et al.* (2011) realizaram um levantamento bibliográfico para encontrar soluções que facilitam a usinagem de ligas de titânio. Em seu trabalho, quatro delas foram citadas: a utilização de fluido refrigerante de alta pressão para auxiliar na redução de cavaco e, consequentemente na redução de forças de usinagem; a aplicação de lubrificante criogênico, diminuindo a temperatura do processo, o que diminui o desgaste da ferramenta que está usinando o titânio; a utilização de ferramentas rotativas, sendo ortogonais, com o eixo da ferramenta paralelo ao avanço, ou oblíquas, seu movimento faz com que o ponto de contato da ferramenta de corte com a peça seja continuamente alterado, o que diminui o desgaste, aumentando a produtividade; e a aplicação de métodos não-convencionais de usinagem que podem ser de vários tipos como químicos, eletroquímicos e por feixe de laser, que também buscam reduzir o calor produzido no processo ou diminuir o desgaste da ferramenta.

Na expectativa de contornar os problemas com a baixa usinabilidade deste metal, além de reduzir os custos de sua produção, pode-se observar na tese de Almeida (2007) um processo de otimização de corte à laser de chapas de titânio, utilizando um laser pulsado de neodímio. O trabalho buscou atender critérios como qualidade na superfície de acabamento, considerando menor número de rebarbas e menor rugosidade, para isso o autor definiu os elementos estabilizadores do titânio.

Quando o material está em uma determinada fase, sua microestrutura não pode ser alterada por tratamentos térmicos, possui alta resistência à deformação e à corrosão, além de excelentes propriedades mecânicas em temperaturas criogênicas, nesta fase o alumínio é um elemento estabilizador. Já em outra, que pode ser obtida por meio da adição de estabilizadores dessa fase, como por exemplo o nióbio, o material possui alta forjabilidade e boa biocompatibilidade, porém os materiais que compõem as ligas, aumentam o custo desse material. Apesar das diferenças, 70% da produção mundial de ligas é uma confecção da junção de ambas fases, como por exemplo a liga Ti-6Al-4V, o que usa de um balanço conveniente de elementos de modo a auxiliar no controle da microestrutura e de suas propriedades. Como conclusão em seu trabalho, foi possível notar que pulsos de alta energia e baixa taxa de repetição são preferíveis para o corte do material, gerando diminuição de rebarba nas chapas.

Por ser um material que gera altos desgastes na ferramenta, dificultando sua usinabilidade, porém com potencial de ser utilizado em diversas aplicações, devido a suas excelentes propriedades, faz-se necessário entender o que gera tais desgastes de modo a prevê-los e de modo a monitorar os processos melhorando sua eficácia.

### **2.3 Análise do monitoramento de ferramentas de corte em processos de usinagem**

Um dos modos de diminuir o custo de produção é monitorar o processo enquanto ele ocorre, com isso é possível estimar quando o processo irá falhar e evitar que a falha ocorra de maneira catastrófica, que pode ocorrer com desgaste excessivo ou até quebra de máquina, gerando desperdício de material. O desgaste da ferramenta de corte é um dos fatores analisados para detectar essas falhas, já que ao ocorrer, elas podem gerar grandes perdas econômicas (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2013).

Segundo Dimla (2000) há quatro tipos de desgaste de ferramenta durante um processo de torneamento: o desgaste adesivo, devido à deformação do material; o desgaste abrasivo, que ocorre pelo contato da ferramenta com partículas duras durante o processo de corte; o desgaste por difusão, quando a temperatura do processo é elevada; e o desgaste por fadiga, que depende

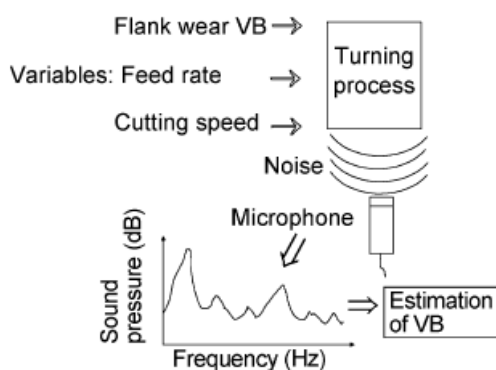
do esforço da ferramenta. Entendendo o como a ferramenta quebra, é possível analisar as variáveis responsáveis por isso durante a usinagem e determinar o que monitorar.

Desse modo, o autor define a importância de possuir um sistema de monitoramento da ferramenta de corte em um processo de torneamento e utiliza como um de seus exemplos o parâmetro da emissão acústica da usinagem, que representa a energia que a peça sendo usinada libera quando seus átomos são perturbados. Ressaltando que os propósitos desse monitoramento são verificação e proteção da estabilidade do processo, a compensação do desgaste da ferramenta definindo os limites aceitáveis de desgaste ao processo e a criação de um sistema que previne danos à máquina, à ferramenta e ao material sendo usinado.

Em seu estudo, Siddhpura e Paurobally (2013) mediram parâmetros de usinagem que se relacionam ao desgaste de flanco em uma ferramenta de corte, correlacionando-os em um programa computacional no domínio do tempo, da frequência ou estatisticamente, verificando suas alterações quando o desgaste é elevado, tais parâmetros podem ser força de corte, vibração, emissão acústica, explorado em Dimla (2000), temperatura e rugosidade da superfície. Os autores definem a emissão acústica como uma energia elástica espontânea que os materiais liberam ao sofrerem deformação ou fratura. A aquisição de sinais, seja ela ótica, por medida de força, vibração ou sonora, pode ser usada para o desenvolvimento de uma abordagem universal, como conclusão sobre as técnicas de monitoramento em ferramenta, as análises no domínio da frequência e no de tempo-frequência mostram-se com mais vantagens para o desenvolvimento de uma abordagem mais ampla e mais robusta, reduzindo o custo de produção e maximizando o tempo de vida da ferramenta de corte.

Utilizando um microfone como técnica de monitoramento, Kopac e Sali (2011) gravaram o som emitido durante um torneamento de uma peça de aço carbono para a criação de um modelo de monitoramento de ferramenta de corte, a configuração do experimento é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Configuração do experimento de gravação de áudio.



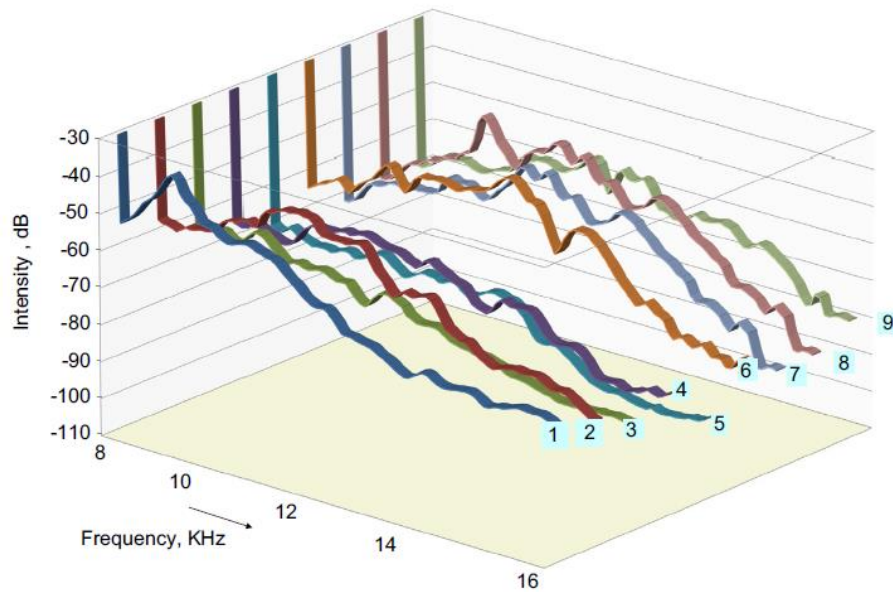
Fonte: Kopac e Sali (2011)

Mantendo os parâmetros de usinagem constantes, os autores analisaram os sinais da pressão sonora obtidos no processo convertidos do domínio do tempo para o domínio da frequência, essa conversão ocorreu computacionalmente por meio da transformação rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform (FFT)*, analisando a amplitude das gravações no espectro da frequência. Os resultados mostraram que quando há maiores variações de velocidade de corte e menos variações no avanço da máquina, o método de monitoramento é favorecido. No geral, apesar de a variação de parâmetros de usinagem também interferir nessa pressão gravada, a amplitude da pressão sonora é amplificada quanto maior o desgaste da ferramenta utilizada no processo.

A relação entre o sinal sonoro emitido pelo processo de torneamento e os parâmetros de usinagem utilizados, revelando o desgaste da ferramenta de corte também foi estudada por outros autores. Frigieri *et al.* (2017) correlacionaram esses fatores em sua pesquisa, percebendo uma variação sonora ao longo do processo. Eles gravaram um torno CNC acoplado um microfone na máquina, usinando uma peça aço e avaliaram a velocidade de corte, o avanço da máquina, a profundidade de corte e a taxa de remoção de material em dez configurações diferentes. Os sinais obtidos no domínio do tempo foram convertidos no domínio da frequência para a realização de uma análise espectral, os autores queriam validar a PCA, do inglês *Principal Component Analysis*, que é uma técnica estatística para diminuir a dimensão dos dados criando componentes principais, ou seja, o método reduz o vetor do espectro, mostrando somente os componentes que contenham mais informações. Os autores concluíram que a energia de corte pode ser transformada em outros tipos de energia, como calor ou som, portanto o sinal sonoro pode trazer informações sobre o processo de torneamento, auxiliando no monitoramento do mesmo.

Há ainda outros estudos baseados na utilização de um microfone para detecção da energia sonora liberada em um processo de usinagem. Downey *et al.* (2014) realizaram a aquisição de sinais sonoros emitidos por um torno CNC, ao mesmo tempo em que mediram o acabamento da superfície usinada durante os ciclos para avaliar o desempenho do processo de corte e, posteriormente, analisaram essa energia em um software.

Figura 6 – Energia do sinal sonoro analisada entre as frequências de 8 a 16 kHz.



Fonte: Downey et al. (2014)

Os autores constataram que os espectros de frequência analisados eram diferentes em fases da usinagem variadas, o que era refletido a fase de vida da ferramenta de corte, ou seja, os espectros alteram-se ao longo do desgaste da ferramenta, logo é possível verificar a mudança de condição da ferramenta de corte antes de a mesma se tornar visível a olho nu.

No monitoramento da condição da ferramenta é possível captar informações sobre o processo por meio de diferentes sinais (DEIAB *et al.*, 2009). Os autores realizaram uma nova abordagem para prever o desgaste de ferramenta de corte, utilizando uma análise estatística do sinal obtido por um sensor de emissão acústica e um dinamômetro. Há quatro principais elementos para essa previsão: a aquisição de sinal, o pré-processamento, a extração de características e a classificação. Em um torneamento, as informações úteis do sinal são captadas do momento que a ferramenta de corte encosta na peça até o momento em que o processo de corte é interrompido, porém o sinal sonoro extraído pode ter ruídos que se resultam da fricção da peça com a ferramenta, por exemplo, sendo assim o sinal é filtrado que ocorra a obtenção de melhores resultados.

Deiab et al. (2009) utilizaram redes neurais e classificação polinomial como base de referência para a predição e classificação, e como dados de entrada foram utilizados: condições de corte, força de corte e emissão acústica. Uma variação foi observada nos sensores conforme as condições de corte eram modificadas, apontando que de baixo custo e fácil montagem pode correlacionar o sinal obtido com o estado de desgaste da ferramenta monitorada.

Com a constatação de que o monitoramento do processo de usinagem auxilia na redução do custo da produção e no melhor aproveitamento da máquina-ferramenta utilizada, pesquisas sobre meios de reduzir o custo do próprio processo de monitoramento ganham notoriedade de maneira que possa ser comprovada a efetividade desses novos meios e que os resultados se mantenham confiáveis.

## **2.4 Dispositivos móveis em aplicações de engenharia**

De modo a reduzir custos de produção sem perder qualidade, ocorrem estudos sobre maneiras de substituir os sensores tradicionais por sensores que advenham de produtos mais popularizados e, conseqüentemente, com menor custo. Uma substituição recorrente na literatura é o uso de smartphones dentro da área de engenharia. Devido à popularização desse dispositivo e ao avanço da tecnologia de seus recursos, a utilização do aparelho para fins de engenharia está se tornando mais comum.

Murphy e King (2016) realizaram um mapeamento de dados de ruídos em uma cidade com o auxílio de um dispositivo móvel para, posteriormente, comparar seus resultados com os mapas obtidos de forma tradicional. Os autores analisaram uma área de aproximadamente um quilômetro quadrado em uma cidade que continha poucos prédios com mais de oito metros de altura. A análise sonora ocorreu captando os sinais sonoros da fonte e analisando como ocorre a propagação do ruído ao se distanciar da fonte, também foi testada a precisão do nível sonoro captado pelo smartphone. Para que ocorresse a comparação entre os dados captados pelo dispositivo móvel e pelo sensor tradicional, foi criado um mapa que demonstrasse as diferenças cartográficas entre os mapas criados pelas diferentes ferramentas, os pontos relevantes foram comparados e o nível de pressão sonora foi calculado em cada ponto. Apesar de críticas quanto ao smartphone ser capaz de medir os ruídos com precisão, ambos mapas mostravam resultados similares nas medidas de ruídos nas mesmas localidades. Portanto, o método tem potencial para ser utilizado conforme a ocorrência de avanços tecnológicos referentes ao aparelho móvel.

Morgenthal and Höpfner (2012) também estudaram a viabilidade da substituição de dispositivos tradicionais por dispositivos móveis no campo de monitoramento de processos

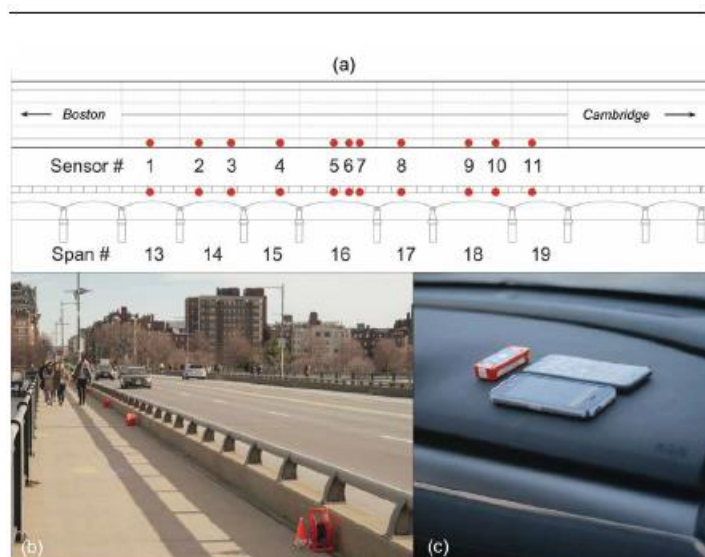


industriais. Considerando que o monitoramento mede continuamente os parâmetros do processo para identificação de mal funcionamento ou defeitos, portanto, coletando dados para posterior análise por meio de softwares, os autores levantaram a hipótese de que, se a forma de comunicação entre os sensores e os softwares de análise é parecida, as aplicações em que os sensores de smartphone podem ser utilizados devem ser similares às dos tradicionais. Assim, utilizando como sensores: o acelerômetro, o microfone e o autofalante de um smartphone para monitoramento de deslocamentos estruturais transitórios, os autores analisaram a medida de tempo em que o som viaja após ser emitido de um objeto até o momento em que ele é reconhecido pelo dispositivo móvel.

O sistema Android instalado no celular utilizado não permitiu um controle da taxa de amostragem, porém quanto mais novo o dispositivo e melhores suas especificações, há um aumento significativo nessa taxa. Logo, os autores concluíram que é esperado que a tecnologia avance e cubra as limitações do smartphone para que esses dispositivos possam ter a precisão similar aos sensores industriais tradicionais e, portanto, ter aplicações em diversas áreas dentro do monitoramento estrutural.

As aplicações dos smartphones também estão sendo estudadas para encontrar maneiras de aprimorar o monitoramento da vibração de pontes, de modo a aumentar sua expectativa de vida e reduzir os custos de manutenção. Matarazzo *et al.* (2018) monitoraram essa vibração com os objetivos de estimar as frequências modais de uma ponte pré-selecionada, demonstrar as capacidades de um acelerômetro contido em um smartphone quando veículos passam sobre a ponte e avaliar as frequências predominantes na ponte por meio dos dados coletados também por um dispositivo móvel dentro do próprio veículo em movimento. Os autores coletaram dados com um sensor tradicional de modo a verificar a veracidade dos dados obtidos pelos dispositivos móveis e revelaram que, ao combinar resultados de dois smartphones, foi possível eliminar falsos positivos e terem resultados similares ao sensor de referência.

Figura 7 – Disposição dos sensores fixados na ponte e sensores do experimento.



Fonte: Matarazzo et al. (2018)

Nos resultados, ocorreram picos aparentes que não se relacionavam à vibração da ponte, porém estes podem representar aspectos da frequência do veículo em movimento, portanto são frequências randômicas que dependem do automóvel e do dispositivo, sendo, portanto, dados que sumiriam ao longo de mais testes o que verifica que um conjunto de smartphones pode gerar informações tão precisas como as de sensores industriais.

Outros autores que também utilizam o acelerômetro como base de estudos sobre a aplicabilidade do smartphone foram Kalim *et al.* (2016). Eles desenvolveram um sistema para estimar as condições de uma estrada, mapeando a posição de buracos e lombadas, de modo com que o único equipamento necessário para a medição era um smartphone com acelerômetro e GPS, sem itens adicionais.

A entrada de dados seria por meio dos próprios motoristas que colocariam o dispositivo móvel acoplado no veículo durante seus deslocamentos e o aplicativo recolheria dados do veículo como vibração e choques, armazenando os dados e mapeando a região, o que criaria uma base de dados de fácil acesso sobre as condições das rodovias.

O método possui benefícios como a facilidade de gerar dados sobre as condições reais das estradas e a não necessidade de instalação e manutenção de dispositivos tradicionais com alto custo. Com esse sistema, os autores demonstraram uma eficiência de 90% na detecção de buracos e de 95% na detecção de lombadas na localidade em que foi testado. Houve um percentual de 5 a 10% de alarmes falsos, porém o sistema se prova eficaz e viável, uma vez que é composto apenas de um aplicativo instalado no smartphone.

Devido à popularização de dispositivos móveis e ao aumento da viabilidade de tais aparelhos ao longo dos anos, torna-se pertinente explorar sua aplicabilidade no monitoramento de um processo de usinagem de modo a viabilizar economicamente tal processo e garantir sua precisão de resultados.

### 3 FERRAMENTAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

---

Para a realização dos cálculos no presente trabalho, foram utilizados dois domínios de referência, o domínio do tempo e o domínio da frequência.

#### 3.1 Análise no domínio do tempo

No domínio temporal, as ondas sonoras podem ser vistas como ondas senoidais que possuem diferentes amplitudes a depender da fonte que as emite, entre outros fatores. Transformar as ondas para o domínio da frequência pode ser útil para coletar informações do sinal, pois as ondas senoidais periódicas geradas no domínio do tempo geram linhas espectrais que correspondem a componentes discretos no domínio da frequência e descrevem o espectro de frequências do sinal analisado (SHIN; HAMMOND, 2008).

Dentro do domínio do tempo, é possível realizar a análise de sinais sonoros obtidos a partir do valor eficaz ou RMS (do inglês, *root mean square*), que é uma medida de energia do sinal. O cálculo é importante para medir sinais oscilatórios, como vibração, áudio, sinais elétricos, etc, e tem como base uma potência quadrática, ou seja, ao somar os valores e retirar a raiz quadrada, os componentes negativos e positivos da soma são considerados equivalentes e de mesma importância para a equação, o que pode ser verificado na Equação 1.

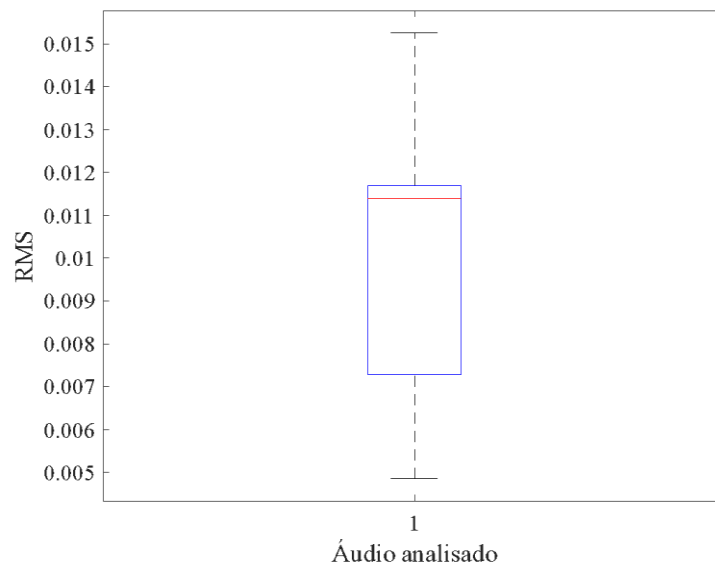
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} x_j^2} \quad (1)$$

sendo  $N$ , o número de pontos em um sinal que pode ser obtido em função do tempo e  $x$  é o próprio sinal obtido em cada gravação.

O cálculo utiliza amostras de tempo de modo a medir a natureza e a energia do sinal, ao somar essas amostras e realizar uma média com auxílio de uma raiz quadrada se reduz a influência do número de amostras, assim é possível encontrar um valor de RMS que melhor represente o sinal analisado (LMS, 2000).

Para entender melhor os resultados do RMS, em que sua equação gera um valor para cada espaço de tempo analisado, a melhor opção para o tratamento do sinal foi dividi-lo em algumas janelas de tempo para então calcular o RMS em cada uma dessas janelas. O motivo da divisão foi para compreender a dispersão dessa métrica ao longo do sinal e, com isso, os resultados puderam ser organizados em *boxplots*, como exemplificado na Figura 8.

Figura 8 – Exemplo de Boxplot.



Fonte: Próprio autor

Esse tipo de representação permite visualizar os dados obtidos relacionando-os em alguns aspectos, de modo a verificar tendências, que podem ser quanto a sua posição, observando a linha central do retângulo; à dispersão, que analisa estatisticamente os pontos entre o valor máximo e o mínimo, representado pelo retângulo em azul; à simetria, de acordo com a posição da linha mediana, demonstrada em vermelho, sendo possível observar a tendência dos dados; às caudas, que são as linhas entre o retângulo e os valores discrepantes; e esses mesmos valores discrepantes ou *outliers*, que são valores longe do retângulo de dados principal, em que ocorre a maior dispersão.

A análise no domínio da frequência é descrita no tópico seguinte.

### 3.2 Análise no domínio da frequência

No domínio da frequência, o sinal foi analisado de acordo com a DFT (do inglês, *Discrete Fourier Transform*) e com a PSD (do inglês, *Power Spectral Density*). Tais análises tem o objetivo de identificar frequências dominantes nos sinais analisados e, como no caso deste estudo, é possível correlacioná-las com valores característicos dos dados coletados em um processo de usinagem (SHIN; HAMMOND, 2008).

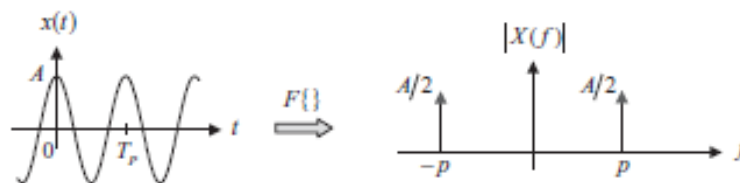
Um sinal no domínio no tempo possui ruídos e não apresenta picos bem definidos, porém é possível notar que, em alguns pontos, a amplitude do sinal é maior que em outros, para

evidenciar algumas características particulares do sinal não visíveis no domínio do tempo, transforma-se o sinal para o domínio da frequência.

### 3.2.1 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

A FFT, Transformada Rápida de Fourier (do inglês *Fast Fourier Transform*) é uma técnica que se utiliza da série de Fourier expandida para sinais não periódicos utilizada para obter o espectro de frequência em um sinal discreto. Ela é um algoritmo que auxilia no cálculo da DFT, traduzida como Transformada Discreta de Fourier (do inglês *Discret Fourier Transform*), que é uma versão discreta da transformada de Fourier. A Figura 9 demonstra como a transformada de Fourier funciona sobre o sinal.

Figura 9 – Transformada de Fourier de uma onda senoidal



Fonte: Shin; Hammond (2008)

Com a equação da DFT é possível calcular valores de pontos discretos e realizar uma integração numérica em um número limitado de amostras dentro de um espaço de tempo pré-determinado. A transformada representa uma soma de comprimento finito de natureza periódica, ou seja, ela soma amostras igualmente espaçadas dentro do domínio da frequência, sendo fundamental para algoritmos em processamento de sinal digital.

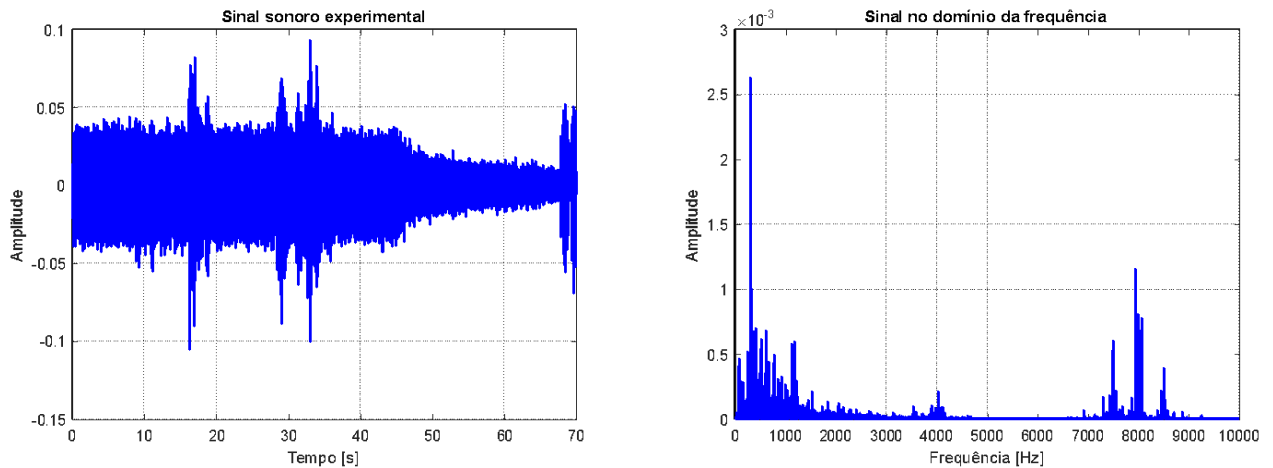
Essa transformada fornece um espectro de frequências de um sinal, mostrando seus componentes, por isso ela permite que seja realizada a análise dos picos de frequência. No caso da análise da DFT, não ocorre uma normalização dos dados, ou seja, cada sinal submetido ao cálculo dessa transformada terá sua própria ordem de grandeza, tal cálculo é descrito na Equação 2.

$$X_k = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} \left( x_n \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k} \right)}$$

(2)

Na equação 2 da DFT,  $X_k$  é o sinal que foi transformado para o domínio da frequência,  $N$  é a quantidade de amostras desse mesmo sinal,  $x_n$  é a sequência de duração finita dentro da amostra e  $k$  é o número da amostra analisada entre 0 e  $N-1$ . A diferença entre a análise de sinais pode ser observada na Figura 10.

Figura 10 – Leitura do sinal em dois domínios (tempo e frequência).



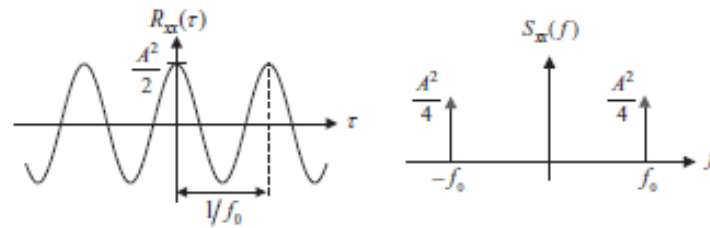
Fonte: Próprio autor

Neste domínio, é possível entender em quais frequências ocorrem picos e descobrir o que ocorre nessas faixas de frequência para que elas sejam mais proeminentes.

### 3.2.2 Densidade espectral de potência (PSD)

A PSD (do inglês *Power Spectral Density*), que pode ser traduzida como densidade espectral de potência, auxilia na interpretação dos dados de uma maneira menos complexa que com a DFT. Como um exemplo, uma função de auto correlação oscilatória ao ser transformada para o domínio da frequência, possui correspondência de picos na PSD como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Auto correlação senoidal e densidade espectral de potência correspondente.



Fonte: Shin; Hammond (2008)

Essa densidade é representada por uma distribuição de componentes da frequência do sinal e pode ser calculada como a média realizada por meio das amplitudes de cada componente dividida pelo número de amostras analisada, desse modo os resultados obtidos pela PSD eliminam possíveis ruídos e revelam resultados mais relevantes para o processo.

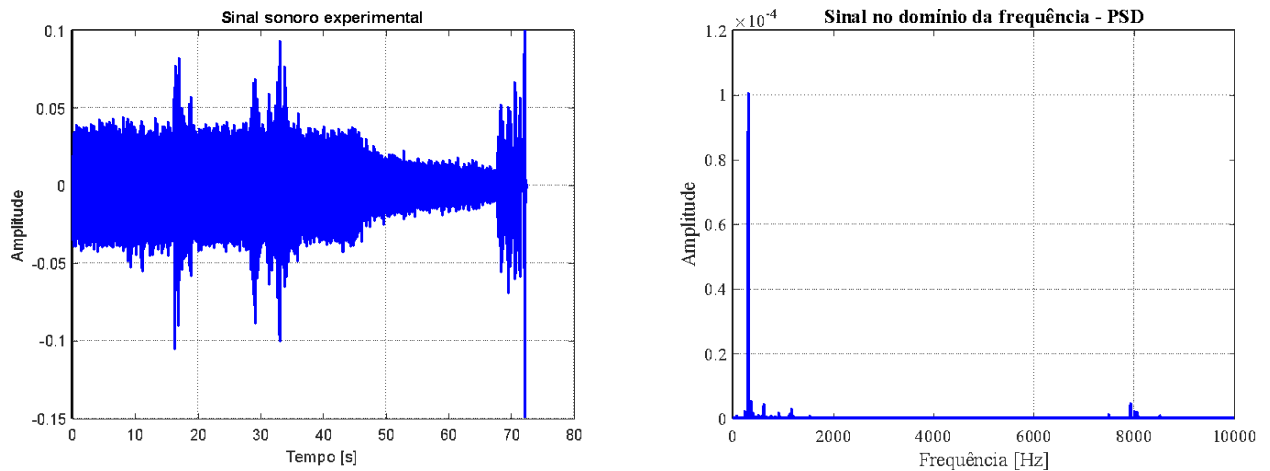
Portanto, a PSD realiza uma análise parecida com a DFT, porém a base do cálculo da densidade espectral assume que a variação do sinal é representada pela área sob a curva de sua função e que o valor médio do sinal é zero, o que ajuda a focar na frequência de maior interesse, esse cálculo é descrito na Equação 3.

$$\phi(\omega) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n \cdot e^{-i\omega n} \right|^2 = \frac{F(\omega) \cdot F^*(\omega)}{2\pi} \quad (3)$$

A equação 3, da PSD, é resultado do produto da DFT pelo seu conjugado complexo dividido por  $2\pi$ . Cada equação gera um gráfico de frequência em que é possível notar onde ocorrem os picos, a Figura 12 demonstra a comparação entre o sinal no domínio no tempo e quando analisado no domínio da frequência com o cálculo da PSD.



Figura 12 – Leitura do sinal em dois domínios (tempo e frequência em PSD).



Fonte: Próprio autor

Pode-se notar que, assim como no caso da DFT, transformar o sinal auxilia na verificação de picos e isso faz com que haja mais dados para que a análise do sinal seja feita de forma mais completa.

Outro ponto relevante, é que o sinal em frequência analisado de acordo com a PSD diminui ruídos em relação ao sinal analisado pela DFT, o que faz com que a análise seja mais clara e não mostre picos de frequência que ocorrem em algumas ocasiões, de modo que pode confundir o sinal, mas não tem verdadeira interferência no processo.

Com os cálculos principais abordados neste capítulo e algumas de suas variações, foi possível realizar a análise de dados para o desenvolvimento desta pesquisa.

## 4 DESCRIÇÃO DO ARRANJO EXPERIMENTAL

---

Neste trabalho, testes experimentais foram realizados com o intuito de validar a aplicabilidade de um sistema de monitoramento cujo principal equipamento era um dispositivo móvel e os dados obtidos foram analisados computacionalmente por meio de análise e processamento de sinais no software MATLAB.

### 4.1 Testes de cunho experimental

Os testes experimentais foram realizados em um torno CNC Romi Centur 30D com 12,5 CV e 4000 RPM no eixo-árvore. Os materiais utilizados nos testes experimentais foram um corpo de prova cilíndrico feito de liga de titânio Ti-6Al-4V ELI com 14 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento; um porta-ferramentas DWLNR 2525M 08, da fabricante Sandvik, que possui seção transversal reduzida com dimensões de 25 por 12,5mm; um inserto de corte, WNMG 08 04 04-SF H13A com raio de ponta de 0,397 mm; e um sensor sonoro, o microfone de um smartphone Motorola Moto G5s Plus por meio do aplicativo "Audio Recorder" para Android. A frequência de amostragem do microfone era de 44 kHz com taxa de 16 bits em formato *wav* Mono. A montagem do ensaio experimental como ser vista na Figura 13.

Figura 13 – Setup experimental em um torno CNC.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Ao todo foram realizados 9 testes, em cada um utilizou-se um inserto novo e o sinal sonoro foi gravado para que fosse possível realizar a comparação dos dados obtidos.

Em cada um deles, os parâmetros de usinagem foram modificados de modo a estudar o impacto dessas modificações no monitoramento do sinal. Os parâmetros modificados são a velocidade de corte ( $v_c$ ), o avanço ( $f$ ), a profundidade de corte ( $a_p$ ), o número de rotações por minuto ( $n$ ), a velocidade de avanço ( $v_f$ ) e o tempo de corte ( $t_c$ ). Na Tabela 1 são detalhados os dados utilizados em cada teste, retirados da dissertação de Pereira (2022).

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem em cada teste.

<i>Teste</i>	$v_c$ ( <i>m/min</i> )	$f$ ( <i>mm</i> )	$a_p$ ( <i>mm</i> )	$n$ ( <i>RPM</i> )	$v_f$ ( <i>mm/min</i> )	$t_c$ ( <i>s</i> )
1	30	0.1	0.2	682	68	88
2	30	0.15	0.4	682	102	59
3	30	0.2	0.8	682	136	44
4	60	0.1	0.4	1364	136	44
5	60	0.15	0.8	1364	205	29
6	60	0.2	0.2	1364	273	22
7	90	0.1	0.8	2046	205	29
8	90	0.15	0.2	2046	307	20
9	90	0.2	0.4	2046	409	15

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Além dos dados sonoros, esse mesmo experimento foi utilizado para a obtenção de dados de vibração do processo, utilizando dois acelerômetros PCB333B30, que foram analisados na dissertação de mestrado de Pereira (2022), sendo utilizada como base de comparação para a presente pesquisa.

Após a realização dos testes experimentais e obtenção dos dados por meio do microfone do smartphone, uma análise computacional foi realizada no software MATLAB.

## 4.2 Metodologia para análise e processamento de sinais

Os sinais de áudio foram analisados tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. Para a análise no domínio do tempo, os nove arquivos de áudio foram analisados por meio do cálculo do RMS, para cada arquivo foi calculado um valor considerando o áudio como um todo, que corresponde ao valor de RMS de cada arquivo.

Para uma análise mais efetiva de cada experimento, o cálculo do RMS também foi realizado em subdivisões de cada um desses áudios, de modo a descobrir se os resultados obtidos na análise dos arquivos de áudio como um todo equivalem às subdivisões dos áudios, evitando discrepâncias de informação, para isso cada sinal foi subdividido em 10 partes de igual tamanho.

Apesar de cada um possuir uma duração, medida em segundos, diferente dos demais, dividir todos os arquivos de áudio em dez partes fez com que fosse possível analisar a dispersão do RMS ao longo de cada áudio em todos os nove experimentos, portanto, de modo a gerar uma análise mais visual, foram gerados *boxplots* dentro do software MATLAB.

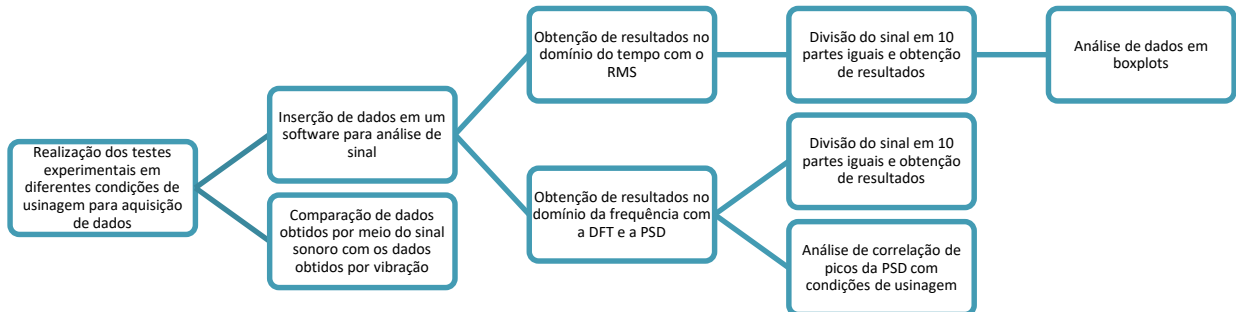
Para a análise no domínio da frequência, foram calculadas a DFT e a PSD para analisar as frequências dominantes e correlacioná-las com as etapas do processo de usinagem. A partir dos dados obtidos no domínio da frequência, foi possível correlacionar os picos observados nos resultados das PSD de cada áudio com os respectivos parâmetros de usinagem utilizados em cada processo gravado.

Foram escolhidos os três maiores picos de cada processo e utilizou-se uma função de correlação no MATLAB para gerar gráficos com uma distribuição de pontos que representam os picos, desse modo foi possível observar se os diferentes parâmetros utilizados interferem na frequência sonora do processo.

Com os dados de RMS e da PSD obtidos por meio dos arquivos de áudio, foi possível realizar uma comparação desses dados com o mesmo conjunto de dados obtidos por meio da vibração com o intuito de revelar se as análises dos dados sonoros e de vibração obtidos durante o processo de torneamento são similares a ponto de existir a possibilidade de usar uma ou outra em um monitoramento e obter os mesmos resultados, já que ambos foram gerados durante o mesmo processo de torneamento.

Comparar ambos pode revelar similaridades e diferenças entre ambos processos de monitoramento de usinagem e auxiliar na ampliação de possibilidades de monitoramento. O fluxograma da Figura 14 demonstra como o método foi aplicado para esta pesquisa.

Figura 14 - Setup experimental em um torno CNC.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

## 5 RESULTADOS

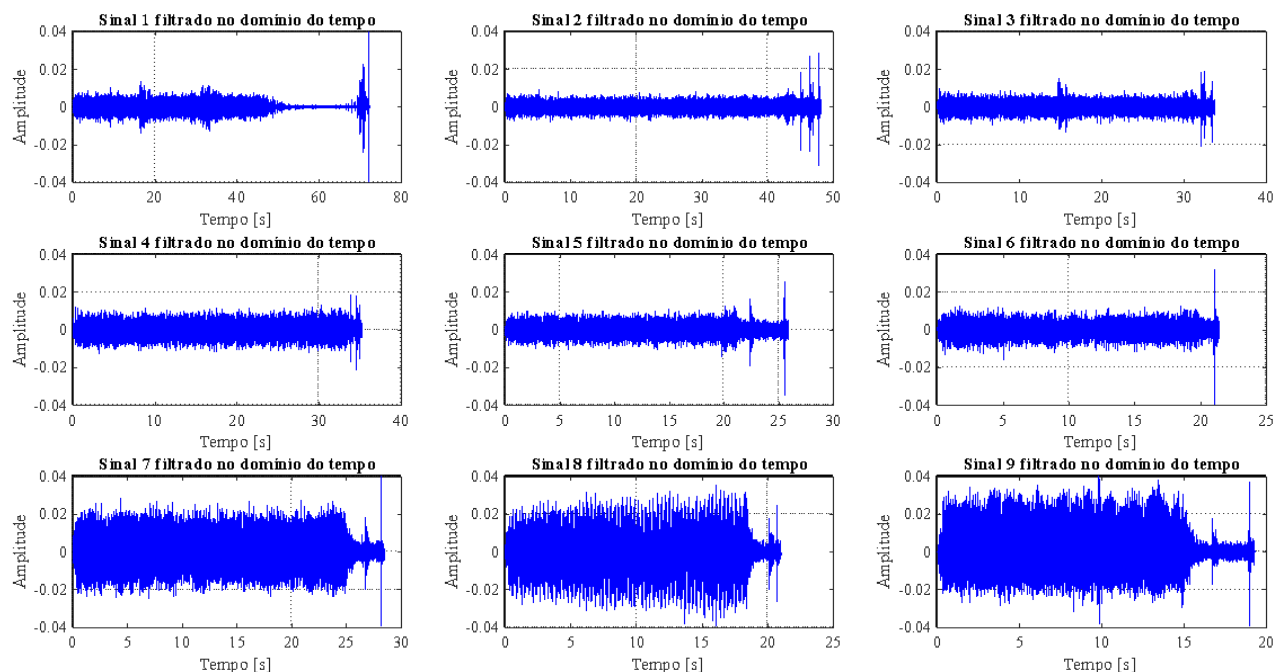
Os arquivos de áudio obtidos ao longo de nove processos de torneamento foram analisados computacionalmente por meio do *software* MATLAB. Cada áudio foi gravado após colocar-se uma pastilha de corte nova na ferramenta até certo ponto do processo de usinagem, portanto cada áudio foi gravado separadamente e são independentes entre si, o intuito foi de entender o processo como um todo e se haveria similaridades entre os sinais sonoros de todas as nove condições gravadas.

Como comentado anteriormente, a análise foi realizada tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência para que pudesse ser feita uma comparação mais ampla de resultados. Além disso, também houve a comparação de resultados obtidos por meio dos sinais de áudio com aqueles obtidos por meio da análise de vibração do mesmo experimento.

### 5.1 Resultados no domínio do tempo

A Figura 15 mostra o sinal sonoro obtido no domínio do tempo para cada uma das nove condições que foram gravadas durante os testes realizados no LPF da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Figura 15 – Sinal sonoro filtrado no domínio do tempo.



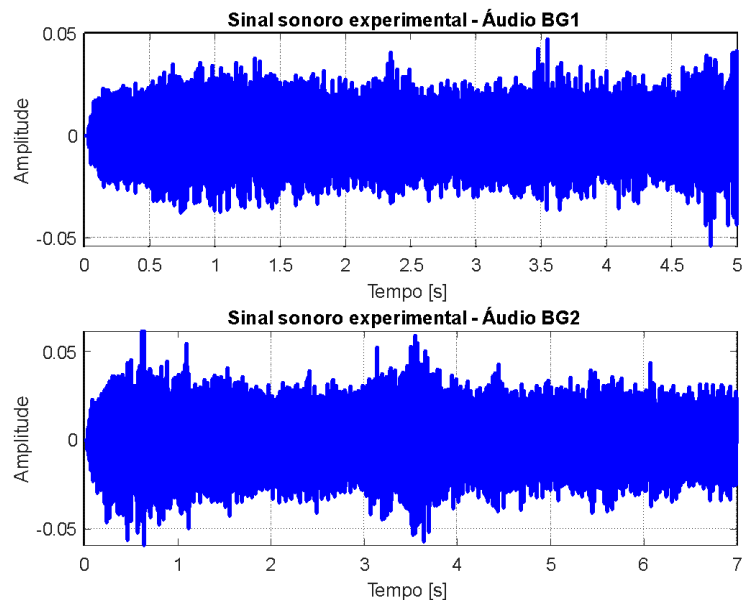
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O sinal cresce até entrar em um certo regime de comportamento e diminui bruscamente quando o processo analisado termina. Esse sinal foi filtrado com um filtro de passa baixa tipo Butterworth de ordem 6 em 200 Hz para melhor nivelar os arquivos. Nessa primeira análise, é possível ver alguns padrões nos sinais como a amplitude aumentando conforme a velocidade de corte aumentava, já que nos três primeiros áudios a velocidade de corte era de 30 m/min, nos outros três, era de 60m/min e nos três últimos passou a ser de 90 m/min.

Para auxiliar no entendimento do comportamento dos sinais, também foi feita a análise no sinal de *background*, dois áudios que foram gravados sem que estivesse ocorrendo o torneamento da peça de titânio para que fossem verificadas possíveis interferências externas nos sinais de áudio captados. Não foram tomadas medidas para silenciar o ambiente em que o experimento foi realizado, desse modo o ruído de pessoas ou outras máquinas podem aparecer no arquivo de áudio gravado.

No domínio do tempo, os sinais de *background* são mostrados na Figura 16, em que BG1 é o primeiro sinal gravado do som ambiente e BG2, o segundo.

Figura 16 – Sinal sonoro de background no domínio do tempo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A partir desses dados, cada áudio, inclusive os sinais de *background*, foram subdivididos em dez partes iguais em cada áudio, respeitando que cada gravação possui um tamanho em segundos, apesar de os tempos serem levemente distintos entre os processos, isso não interferiu na análise já que cada subparte representou um momento do torneamento.

Os valores de RMS para cada arquivo de áudio pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valor do RMS de cada sinal de áudio.

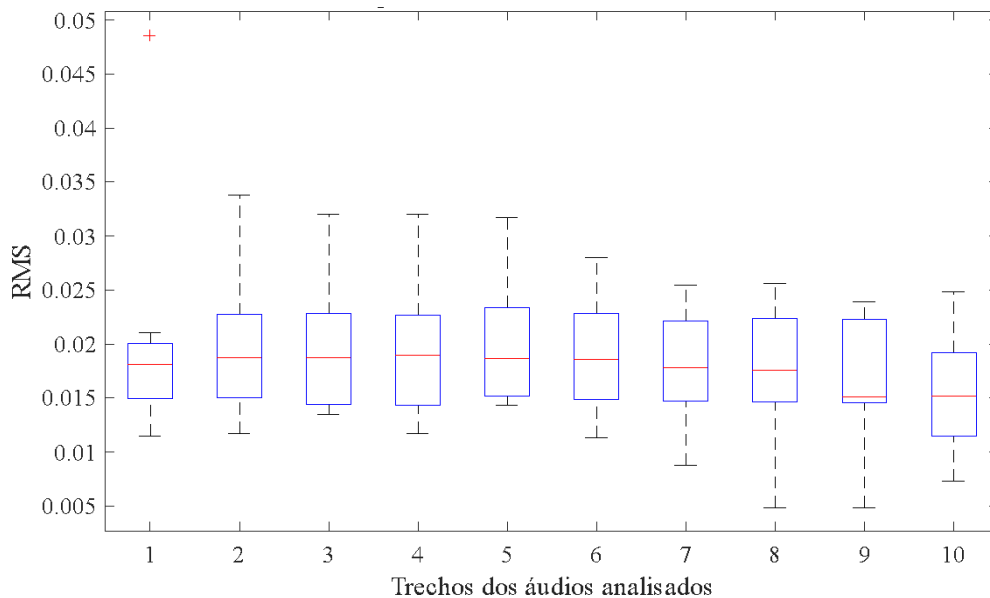
	BG1	BG2	Áudio 1	Áudio 2	Áudio 3	Áudio 4	Áudio 5	Áudio 6	Áudio 7	Áudio 8	Áudio 9
RMS	0,0109	0,0121	0,0106	0,0157	0,0311	0,0143	0,0174	0,0153	0,0215	0,0210	0,0241

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com as subdivisões dos arquivos, foi possível calcular o RMS de cada trecho e verificar variações com o valor do áudio completo. Os arquivos de *background* mantiveram valores de RMS de 0,01 durante todas as dez subpartes.

As maiores discrepâncias entre os valores de RMS aparecem no áudio 1, com trechos que apresentavam RMS menores que 0,01. Os valores das subdivisões dos demais áudios se mantiveram próximas aos valores apresentados na Tabela 2 e constantes, o que pode ser constatado na Figura 17, em que foi plotado um *boxplot* de acordo com os trechos analisados.

Figura 17 – Boxplot de valores de RMS de acordo com os trechos dos áudios.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

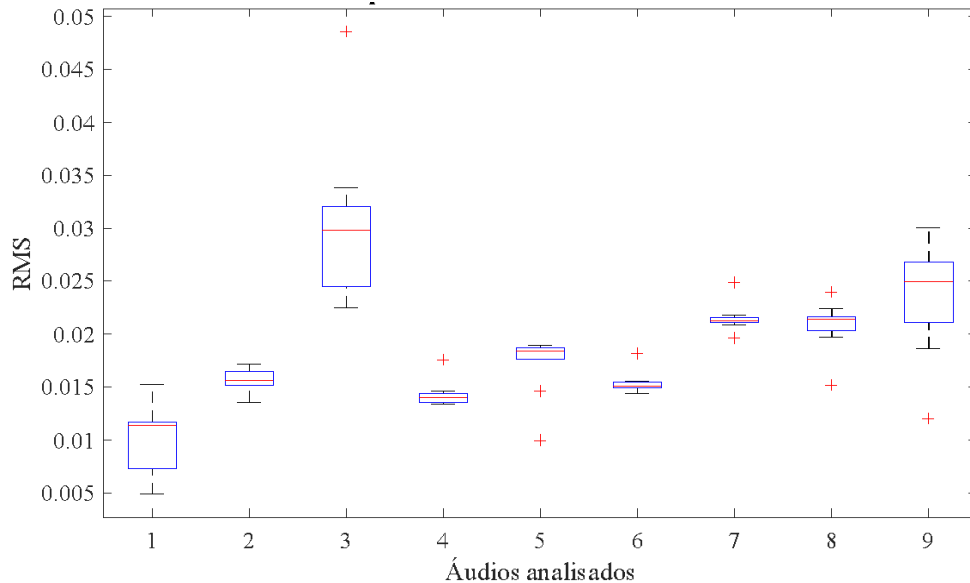
Observando cada trecho e considerando que eles se remetem, respectivamente, a um determinado ponto do processo de usinagem, nota-se uma constância do processo como um todo, porém nos áudios iniciais a dispersão dos valores do RMS possui número mais altos de



até 0,035 e nos últimos trechos, os valores da dispersão decaem até quase 0,005, o que é gerado pelo final do processo em que ocorre o desligamento da máquina e a interrupção do corte.

Quando o *boxplot* foi plotado analisando cada áudio individualmente, é possível notar uma diferença maior entre os valores de RMS, demonstrados na Figura 18.

Figura 18 – Boxplot de valores de RMS dos áudios analisados.



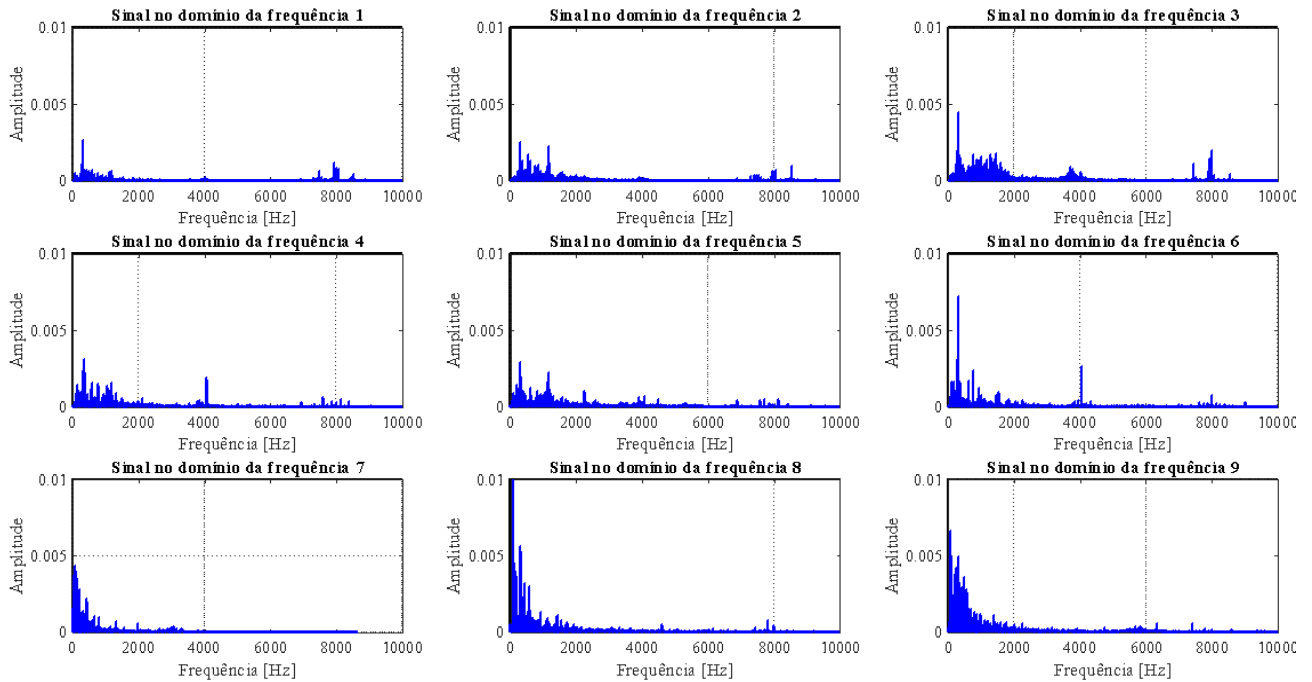
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Analisando os valores de RMS de acordo com os experimentos completos, os áudios 1, 3 e 9, possuem maiores variações entre suas subdivisões, demonstrando uma maior dispersão de valores. Os maiores valores de RMS vistos na Figura 18 são referentes aos arquivos de áudio 3 e 9 e podem corresponder ao avanço que ambos têm em comum de 0,2 mm, o maior avanço utilizado no experimento. Os menores valores são referentes ao para os arquivos 1 e 2, esses possuem em comum a rotação mais baixa da máquina CNC, sendo de 682 RPM.

## 5.2 Resultados no domínio da frequência

Para analisar os sinais de áudio no domínio da frequência, cada gravação passou por uma transformada de Fourier e os resultados são demonstrados na Figura 19.

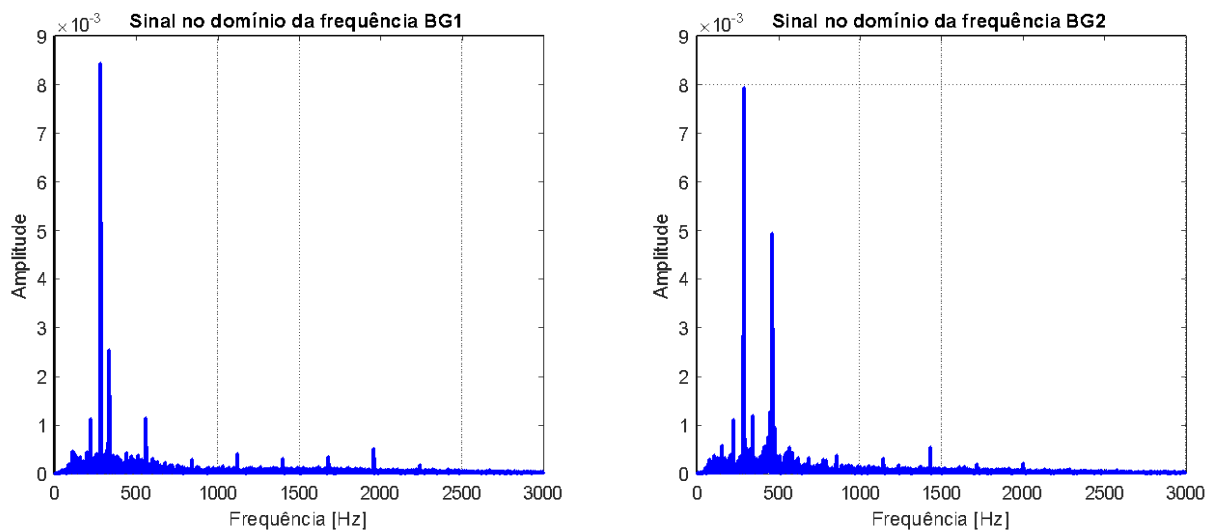
Figura 19 – Sinais sonoros no domínio da frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para uma melhor análise, o sinal foi parametrizado de modo que sua amplitude se restringisse entre 0 e 0,01 e sua frequência de 0 a 10000 Hz. Observando os gráficos, vê-se que as maiores frequências estão abaixo de 2 kHz em todos os áudios e também há pontos de destaque próximo aos 8 kHz, apesar de suas amplitudes variarem. O sinal de frequência nos áudios de *background* também foram obtidos e estão desmonstrados na Figura 20.

Figura 20 – Sinais sonoros de background no domínio da frequência.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Assim como nos áudios do processo, as maiores frequências dos sinais de *background* são abaixo dos 2 kHz, tendo seus picos próximos aos 300 Hz, o que pode ser justificado como uma frequência da máquina de torneamento ou de ruído do ambiente, portanto esse valor de frequência encontrado nos sinais de *background* pode auxiliar a limpar os dados dos processos, de modo a retirar da análise qual é a frequência obtida pelo torno CNC e focar em quais são as frequências emitidas pelo processo de torneamento.

Ao analisar os maiores picos de frequência em cada áudio referentes a cada processo realizado pela máquina de torneamento CNC, foram encontrados esses picos de frequência próximos aos 300 Hz como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Picos de frequência em Hz nos sinais de áudio pela DFT.

	Áudio 1	Áudio 2	Áudio 3	Áudio 4	Áudio 5	Áudio 6	Áudio 7	Áudio 8	Áudio 9
Pico 1	305,5	305,7	306,4	364,9	306,1	306,9	229,2	104,7	71,8
Pico 2	7936,2	1173,5	7999,9	305,9	1171,5	4063,7	76,4	306,4	306,7
Pico 3	7490,3	526,8	1451,7	4065,5	2241,4	764,1	353,3	174,4	502,9

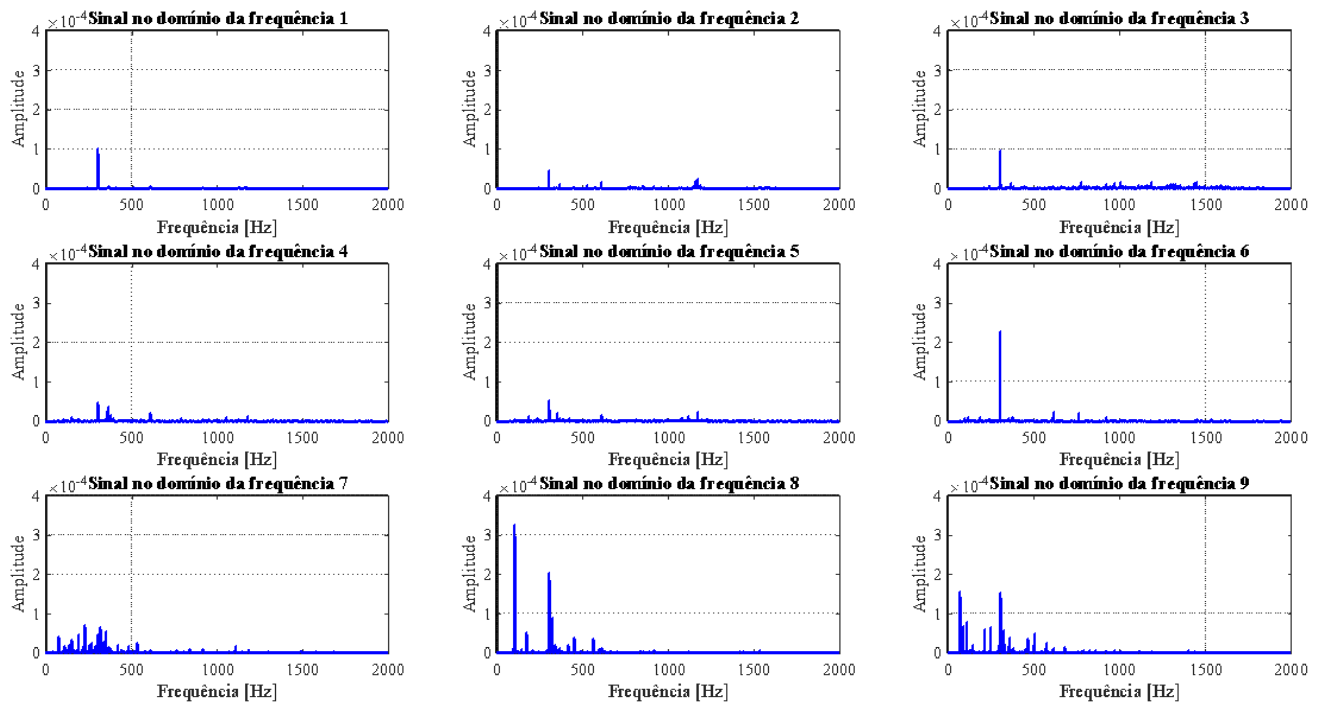
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os picos são os valores que aparecem nos gráficos de frequência apresentando maior amplitude, respectivamente, o Pico 1 possui a maior amplitude, o Pico 2, a segunda maior e o Pico 3, a terceira maior de cada áudio. Considerando os picos de 300 Hz como os picos de frequência da máquina e analisando os demais dados, pode-se notar frequências repetidas em cada teste, como nos áudios 7, 8 e 9, que possuem a maior velocidade de corte utilizada nos testes, apresentando valores próximos a 100 Hz, sendo respectivamente 76,4, 104,7 e 71,8 Hz. Esses testes foram realizados com uma  $v_c$  de 30 m/min. E como nos áudios 1 e 3, que ao contrário do primeiro exemplo, foram gravados na menor velocidade de corte dos testes, neles é possível verificar valores de picos de frequência próximos a 8 kHz, sendo respectivamente 7936,2 e 7999,9 Hz. Esses áudios foram obtidos com uma  $v_c$  de 90 m/min. Outras faixas observadas também repetiram picos em 1 kHz e 2 kHz.

Como o *range* de frequências foi analisado de maneira ampla, não foi possível definir padrões específicos para os resultados de acordo com os picos de frequência encontrados.

Para obter uma média dos dados e sua parametrização, os arquivos foram transformados em PSD, como é demonstrando na Figura 21.

Figura 21 – Sinais sonoros em função da PSD parametrizada.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A parametrização dos dados ocorreu da mesma maneira que com os dados da Transformada de Fourier, a amplitude do sinal variou entre 0 e  $4 \times 10^{-4}$  e a frequência variou entre 0 e 2 kHz. Foi possível notar que os maiores picos de frequência ocorrem abaixo dos 500 Hz, com alguns pontos entre 1 e 1.5 kHz.

A mesma tabela com os principais picos de frequência também foi gerada em relação aos dados da PSD, como é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Picos de frequência em Hz nos sinais de áudio pela PSD.

	Áudio 1	Áudio 2	Áudio 3	Áudio 4	Áudio 5	Áudio 6	Áudio 7	Áudio 8	Áudio 9
Pico 1	305,7	305,8	306,4	305,8	306,1	306,9	229,2	104,6	306,7
Pico 2	611,6	611,3	776,8	364,9	1171,6	613,9	320,2	306,5	71,8
Pico 3	1177,3	1173,5	1451,5	361,2	352,1	764,1	353,3	107,9	107,7

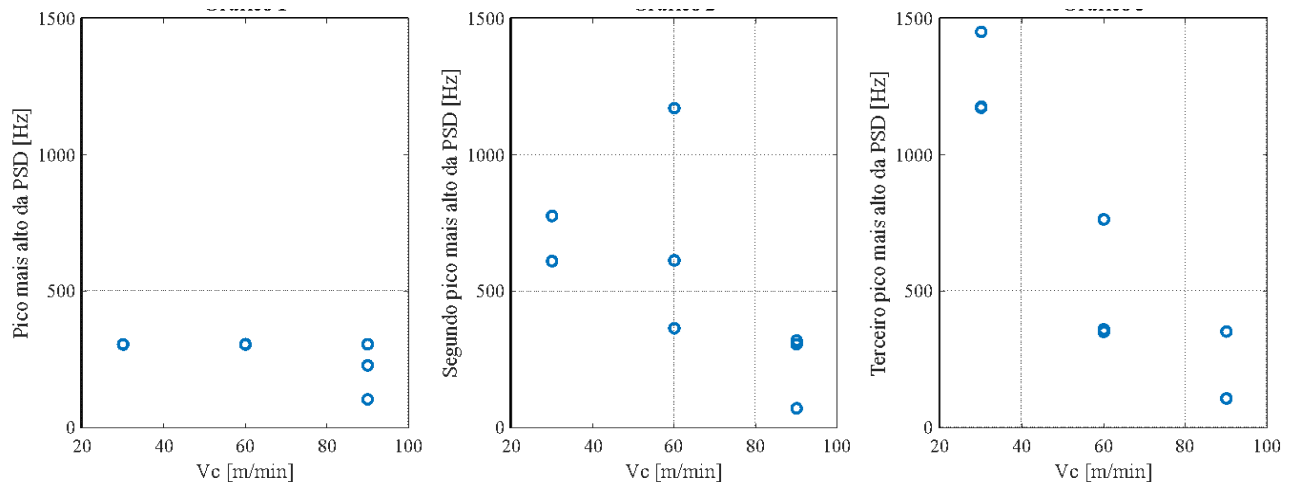
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Além dos picos próximos a 300 Hz que se mantem aparecendo devido à máquina utilizada, no caso da PSD outros picos relevantes se mostram próximos a 600 e 1100 Hz. Para

entender se esses picos têm relação com os parâmetros da máquina utilizada no processo de usinagem, foram realizados testes de correlação no MATLAB.

Cada um dos três picos principais foram analisados em relação aos parâmetros de cada processo de usinagem realizado, com isso foi possível gerar gráficos que demonstrassem o quanto os parâmetros de usinagem interferiram no som captado pelo microfone. As Figuras de 22 a 27 demonstram essas correlações.

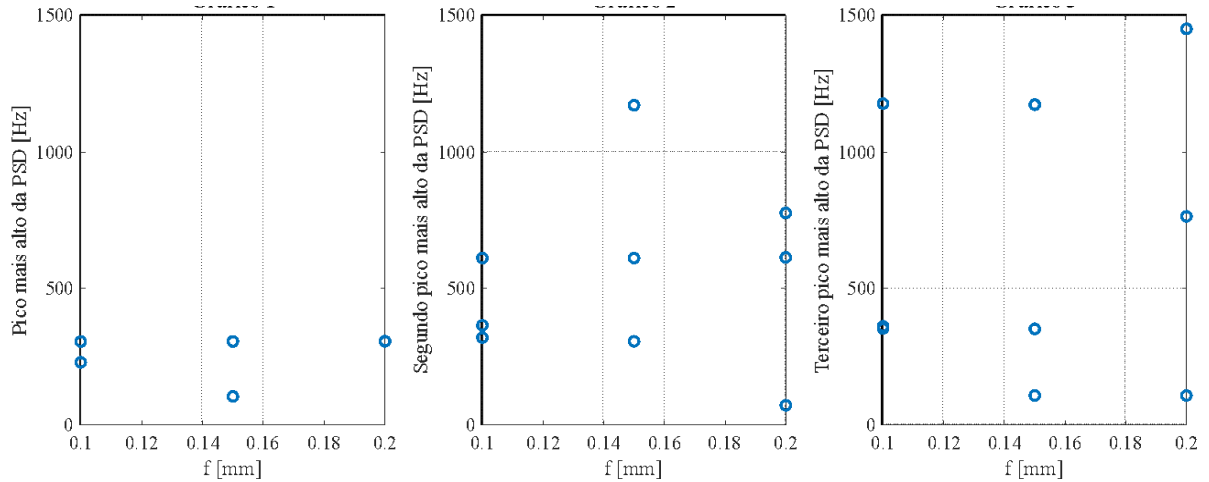
Figura 22 – Correlação dos picos da PSD com a velocidade de corte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Analisando a correlação do parâmetro da velocidade de corte com os picos da PSD, observa-se que para os picos que aproximam-se dos 300 Hz, a maior parte da velocidade de corte aparece em 100 RPM, para picos entre 300 e 700 Hz, a velocidade mostra-se um pouco menor, próxima à linha de 60 RPM, o que também ocorre para picos acima dos 1000 Hz, aparecendo abaixo da velocidade 60 RPM, principalmente próxima aos 30 RPM, desse modo percebe-se que a dispersão demonstra tendências com relação à velocidade de corte.

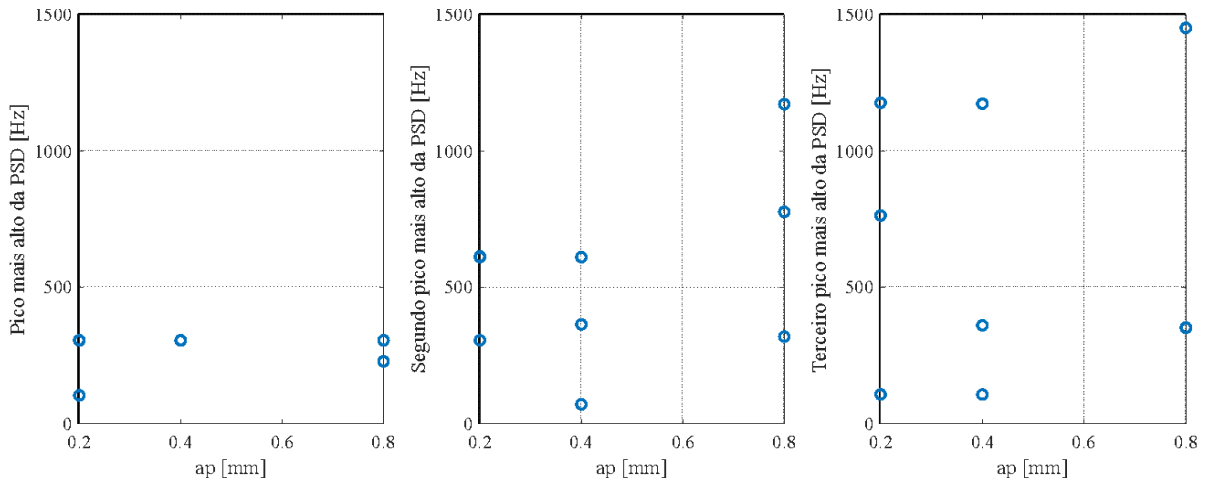
Figura 23 – Correlação dos picos da PSD com o avanço da ferramenta.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Quanto observada a relação do parâmetro de avanço da ferramenta com os picos analisados, vê-se uma dispersão de pontos que não demonstram uma tendência clara. Porém, é possível notar os picos de frequência variam mais quando a profundidade de corte é de 0.2 mm.

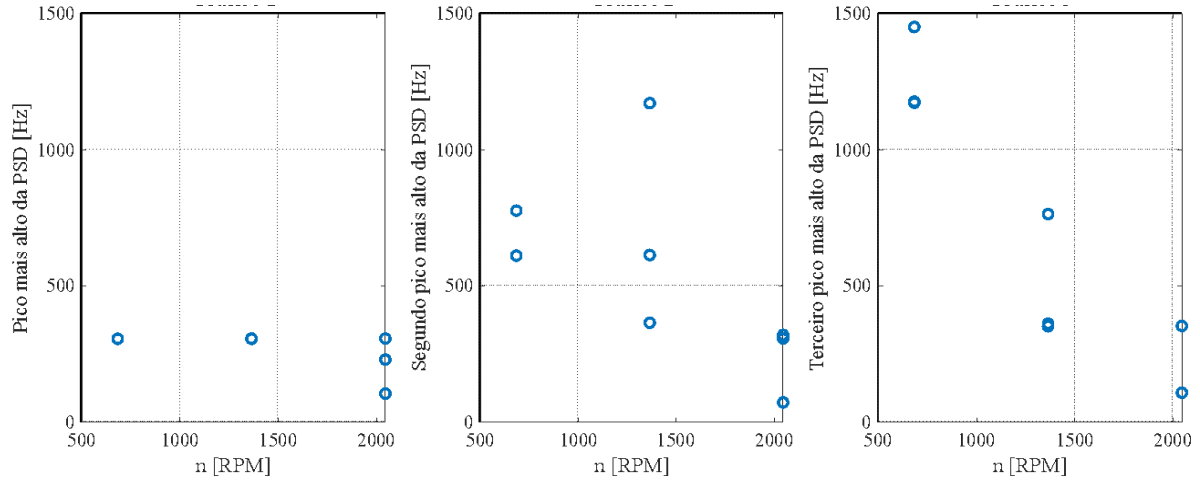
Figura 24 – Correlação dos picos da PSD com a profundidade de corte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os gráficos que relacionam o parâmetro de profundidade possuem pontos dispersos, porém, apesar da dispersão, é possível notar uma tendência similar a dos gráficos de avanço, revelando maiores variações de frequência na profundidade de 0.8 mm.

Figura 25 – Correlação dos picos da PSD com a rotação da máquina.

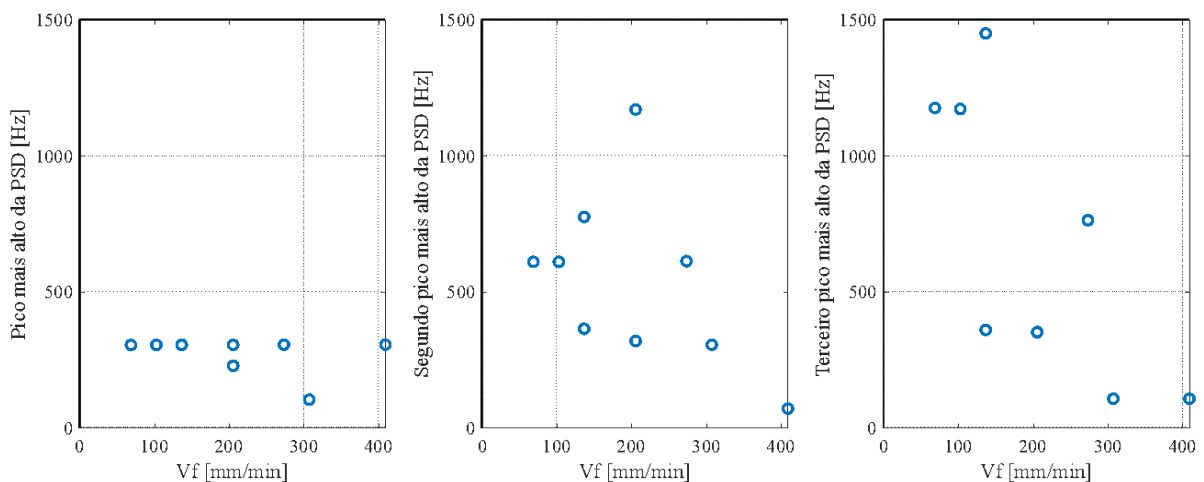


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Quando analisada a relação entre os picos da PSD e a rotação da máquina em RPM, ocorre um padrão mais claro. As menores velocidades em rotações por minuto situam-se em picos de valores mais altos, é possível notar no segundo gráfico que entre 500 e 1000 RPM, as frequências estão acima de 500 Hz e no terceiro, acima de 1000 Hz. Para velocidades entre 1000 e 1500 RPM, as frequências tendem a se aproximar da faixa de 500 Hz. Já para velocidades mais altas, em torno de 2000 RPM, a frequência permanece abaixo dos 500 Hz.

Os dados possuem valores discrepantes, porém nessa relação é possível definir mais claramente a interferência da velocidade de rotação na frequência emitida pelo torneamento.

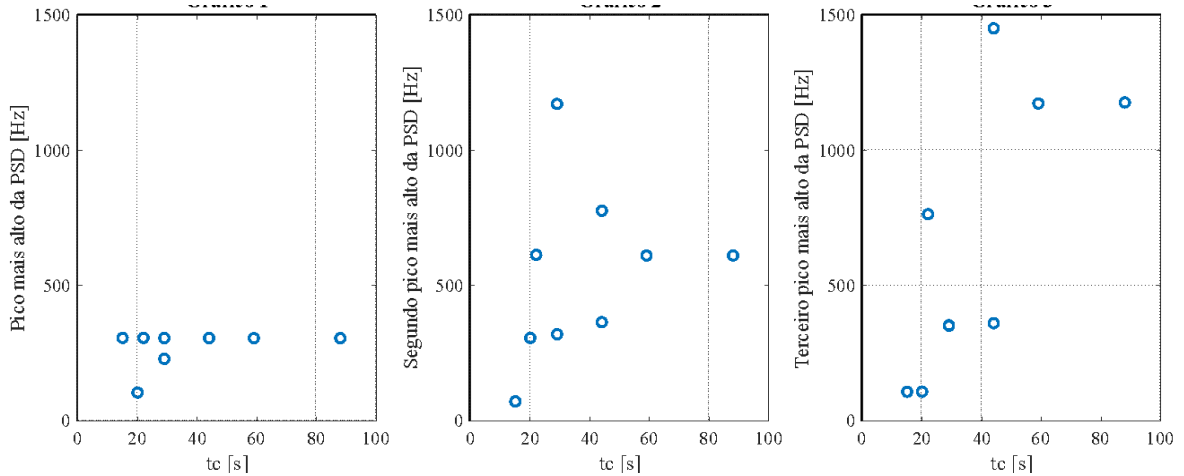
Figura 26 – Correlação dos picos da PSD com a velocidade de avanço.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Analisando a correlação dos picos com a velocidade de avanço, a tendência se mostra mais dispersa. Velocidades entre 300 e 400 mm/min tendem a emitir frequências menores, por volta de 200 Hz. Já as maiores frequências emitidas apareceram em velocidades de avanço próximas a 200 mm/min.

Figura 27 – Correlação dos picos da PSD com o tempo de corte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A última correlação analisada foi a do tempo de corte, em que os valores com as maiores frequências, acima de 1 kHz apareceram geralmente com os maiores tempos de corte, entre 50 e 80 segundos.

Para entender melhor essas relações, foi calculado no software MATLAB o coeficiente de correlação de Pearson das variáveis de modo a buscar compreender o quanto cada variável tem impacto no sinal sonoro emitido pelo processo de torneamento em seus picos mais aparentes de frequência. A Tabela 5 mostra os valores em porcentagem desse cálculo de correlação.

Tabela 5 – Correlação dos picos da PSD com as variáveis do torneamento.

	<i>Pico 1</i>	<i>Pico 2</i>	<i>Pico 3</i>
$v_c$	-58,13 %	-58,55 %	-92,07 %
$f$	16,62 %	7,46 %	12,29 %
$a_p$	19,27 %	40,91 %	5,87 %
$n$	-58,13 %	-58,55 %	-92,07 %
$v_f$	-33,90 %	-48,39 %	-72,14 %
$t_c$	35,42 %	26,19 %	70,59 %

Fonte: Elaborado pelo próprio autor



Considerando que os picos analisados foram os que aparecem com maior amplitude nos gráficos de análise da PSD, sendo respectivamente, o Pico 1 os de maior amplitude em cada arquivo de áudio, em sua maioria referente ao som da máquina, próximo à 300 Hz, o Pico 2, a frequência de segunda maior amplitude e o Pico 3, o de terceira maior amplitude.

Quando a porcentagem é positiva, significa que as variáveis são diretamente proporcionais; quando é negativa, são inversamente proporcionais; quando essa porcentagem é zero, significa que não há relação entre as variáveis. Qualquer outro valor diferente de zero, mostra pouca ou muita interferência de uma variável na outra.

Assim, nota-se que velocidade de corte ( $v_c$ ) possui uma correlação inversamente proporcional aos picos, sendo uma variável de grande influência para os picos de terceira maior amplitude, tendo 92,07% de correlação. Já o avanço ( $f$ ), possui pouca correlação com os picos, o que também é mostrado nos gráficos, em que os dados permaneceram dispersos.

Quando analisada a correlação da profundidade ( $a_p$ ), é possível perceber que o Pico 2 recebe 40,91% de influência direta desta variável. Assim como a velocidade de corte, o número de rotações por minuto ( $n$ ) também possui uma relação inversamente proporcional aos picos, apresentando os mesmos valores percentuais em sua atuação. A relação de  $v_c$  e de  $n$  são equivalentes, pois em termos de correlação a velocidade de corte depende do número de rotação por minuto. A velocidade de avanço ( $v_f$ ), também apresenta uma relação inversamente proporcional aos picos de frequência, e tem sua maior influência nos picos com terceira maior amplitude com 72,14% de resultado para a correlação. Por último, o tempo de corte ( $t_c$ ), possui uma relação direta com os picos de frequência, tendo sua maior influência, também, no terceiro maior pico dos sinais de áudio.

Com esses cálculos, fica mais visível a relação dos parâmetros da usinagem com as frequências emitidas pelo processo. Como esperado, as frequências próximas a 300 Hz dependem principalmente da máquina e não sofrem influência dos parâmetros da máquina como as demais frequências registradas, essas frequências encontram-se entre os Pico 1 e Pico 2, geralmente, esse fato pode ser o motivo de o Pico 3 ser o que sofre mais influência direta ou indireta dos parâmetros utilizados nos experimentos.

### **5.3 Resultados de sinais de áudio comparados os de sinais de vibração**

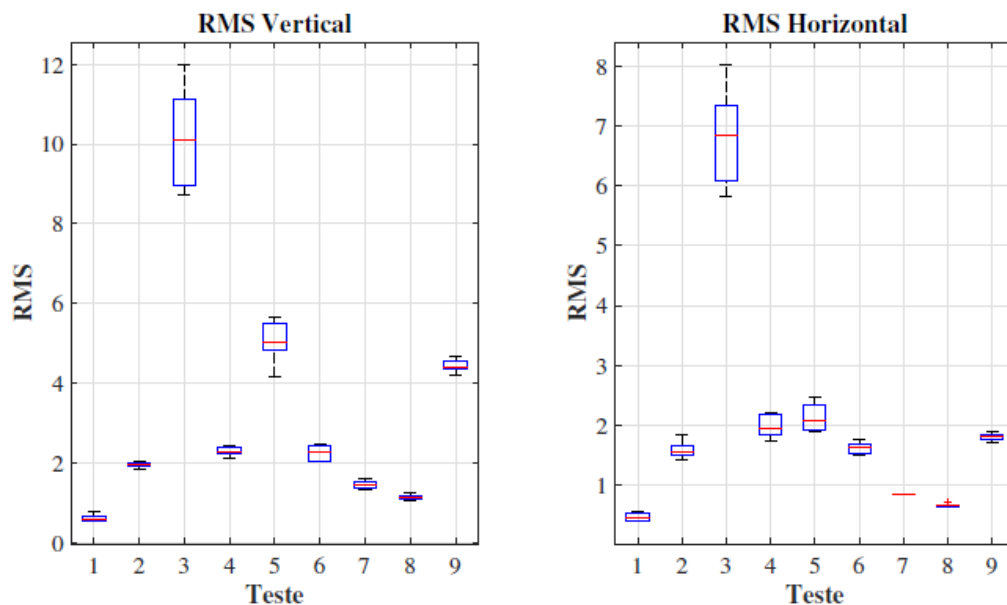
Como uma maneira de interpretar se os resultados apresentados pela análise dos sinais de áudio são coerentes e podem ser utilizados no monitoramento de processos de usinagem, foi

realizada a comparação desses resultados com os obtidos pela análise da vibração dentro do mesmo experimento.

Em seu estudo, Pereira (2022) coletou dados do torneamento de titânio durante os nove experimentos realizados, gerando uma análise do RMS por meio de *boxplots* e uma análise de frequências de acordo com as PSD do sinal.

A Figura 28 mostra os *boxplots* de análise do RMS do sinal de vibração, foi utilizado um acelerômetro para que os dados das vibrações geradas fossem coletados de acordo com o sentido da força aplicada. Nesses experimentos, o porta-ferramentas foi excitado na direção de corte e na direção de avanço, gerando análises do RMS vertical e horizontal, respectivamente.

Figura 28 – Valores de RMS de acordo com os testes de vibração.



Fonte: Pereira (2022)

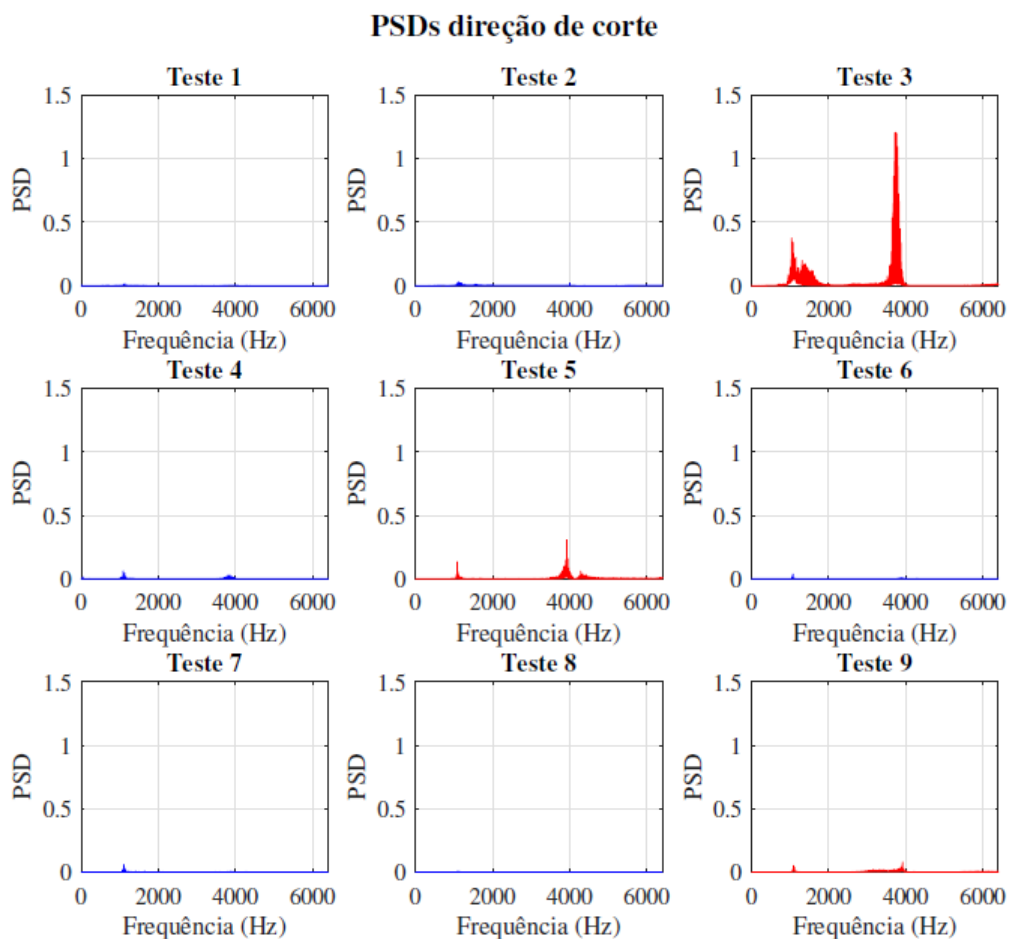
Pereira (2022) comenta que quando há maiores profundidades de usinagem e maiores avanços, são gerados maiores níveis de vibração. O teste de número 3 é o que apresenta maiores índices de RMS, corroborando com essa afirmação, já que é o teste que possui maior profundidade, 0.8 mm, e maior avanço, 0.2 mm, dentro das configurações estabelecidas para os testes, ao mesmo tempo.

Outros testes que se destacam no RMS vertical são o 5 e o 9, o primeiro possui o parâmetro de profundidade de 0.8 mm, com avanço de 0.15 mm e o último possui o parâmetro de avanço de 0.2 mm, com profundidade de 0.4 mm.

Ao comparar com os níveis de RMS apresentados no sinal sonoro, os áudios com maior índice também são os de número 3, 5 e 9. Essa constatação, juntamente com os dados obtidos neste trabalho, podem demonstrar a viabilidade da utilização do áudio em sistemas de monitoramento, já que apesar de ser um sistema mais simples, conseguiu gerar resultados similares quando o RMS de ambos estudos é comparado.

Assim como para os sinais de áudio, a PSD também foi coletada nos sinais de vibração. Quando os gráficos foram colocados na mesma grandeza, mostrados na Figura 29, também é possível notar que os sinais que apresentam maiores amplitudes de vibração são os dos testes 3, 5 e 9, destacados na cor vermelha.

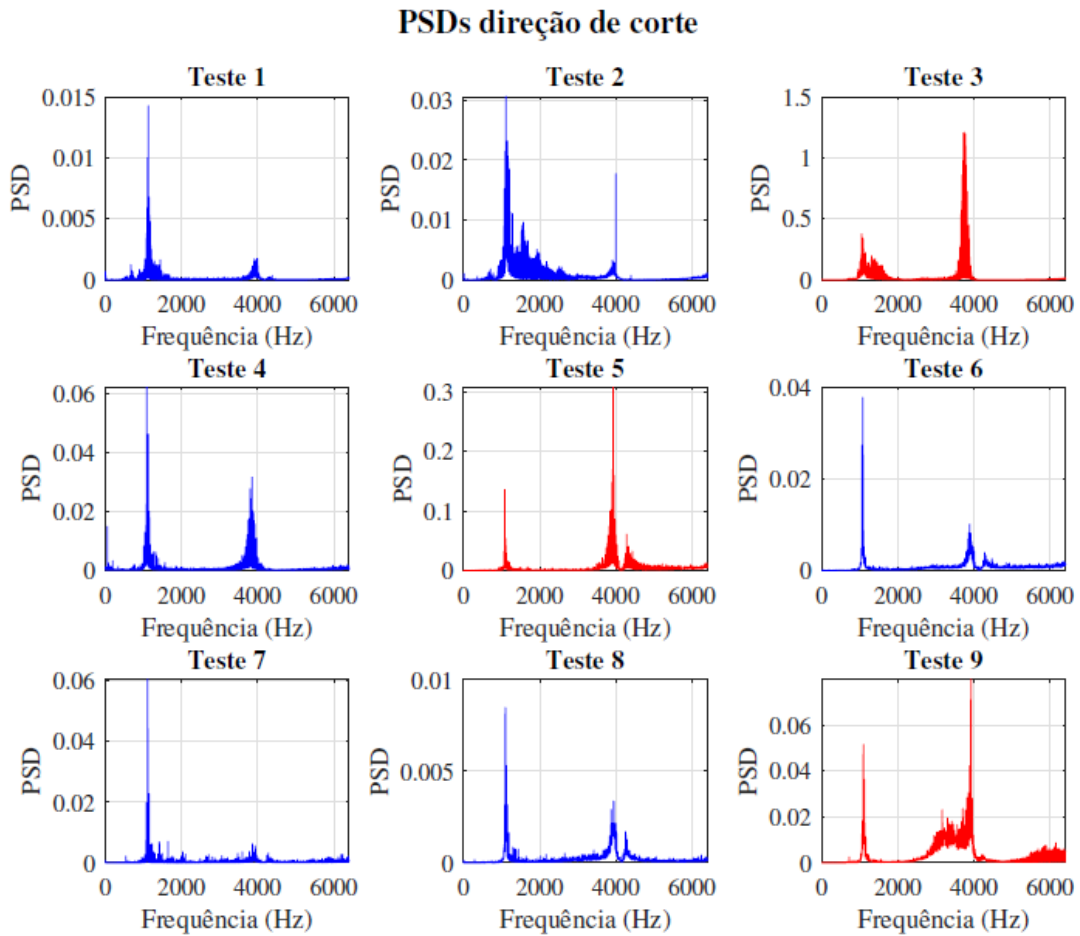
Figura 29 – Valores da PSD no sinal de vibração com mesma escala de grandeza.



Fonte: Pereira (2022)

Na Figura 30, é retirada a parametrização da mesma ordem de grandeza, para que a análise possa ser feita para cada teste.

Figura 30 – Valores da PSD no sinal de vibração com diferentes escalas de grandeza.



Fonte: Pereira (2022)

Pode-se observar que nos casos com maior vibração representados em vermelho, sendo os mesmos testes com os maiores RMS, os maiores picos de frequência estavam próximos a 4 kHz, diferente dos testes que apresentaram menor vibração que tem um pico de frequência inferior a 2 kHz.

Pereira (2022) analisou que esses valores de frequência são próximos aos valores dos modos de vibração de torção e de flexão na vertical para esse experimento, sendo respectivamente, 4203.5 Hz e 1124.9 Hz.

No caso da análise gráfica das PSD, o resultado da vibração divergiu do sinal sonoro, que apresentou maiores amplitudes de frequência nos testes 6 e 8, porém os testes do sinal sonoro analisaram uma faixa de frequências de até 2000 Hz, enquanto que no sinal de vibração a faixa analisada foi maior, com valor máximo de 6000 Hz. Porém, na comparação de dados dos picos, apesar de o pico mais proeminente nos sinais de áudio ser próximo aos 300 Hz,

também há picos com alta amplitude em 1.1 kHz, 2 kHz e 4 kHz em alguns áudios, o que faz com que os dados de ambas análises se aproximem.

## 6 CONCLUSÃO

---

A necessidade de trazer melhorias ao processo de produção, seja para reduzir custos, seja para evitar perdas de material ou tempo, faz com que estudos na área sejam relevantes. Segundo Gajate et al. (2010), a maximização da vida útil da ferramenta e o monitoramento de seu desgaste são fundamentais para a otimização de processos de usinagem.

Com o desenvolvimento tecnológico envolvendo dispositivos móveis ou smartphones, pesquisas com intuito de aplicar suas funcionalidades em projetos de engenharia vem sido feitas, como por exemplo monitorar a vida útil de pontes ou coletar dados de ruído, utilizando itens como o giroscópio e o microfone que são embutidos a esse tipo de dispositivo.

Nessa pesquisa, dados de sinal sonoro foram coletados por meio de um microfone de smartphone em um processo de usinagem: o torneamento de uma peça de titânio. Com o sinal obtido durante nove experimentos, realizou-se a análise de processamento de sinais no software MATLAB no domínio do tempo e da frequência para compreender o que o sinal obtido por meio de um dispositivo móvel podia revelar de informações sobre o processo. Além disso, esses resultados foram comparados com a pesquisa de mestrado de Pereira (2022) que coletou dados sobre a vibração do mesmo experimento por meio de acelerômetros. Comparar as duas pesquisas, tanto no domínio do tempo como no RMS, permite descobrir se sensores tradicionais e smartphones podem revelar dados similares do processo ou se não possuem correspondência.

No domínio do tempo, analisou-se o RMS do sinal sonoro dos nove experimentos e após isso, cada áudio coletado foi dividido em dez partes iguais para entender se os valores de cada trecho eram discrepantes do valor encontrado no áudio como um todo ou se os resultados se assemelhavam. No RMS, foi possível perceber que os maiores valores apareceram em áudios cujo teste possuía a menor rotação da máquina no experimento em questão, sendo de 682 RPM, e os maiores valores foram vistos em áudios cujo teste possuía o maior avanço da ferramenta de corte, sendo de 0.2 mm. Analisando trecho a trecho, pode-se perceber que no início dos processos, ou seja, quando a ferramenta nova começa a usinar a peça, o RMS é levemente maior que nos dois últimos trechos, ou seja, quando a ferramenta já estava no final da usinagem.

No domínio da frequência, ocorreram duas análises, uma por meio da DFT e a outra por meio da PSD. Assim como para o RMS, os testes também foram analisados como um todo e depois, analisou-se suas dez subpartes. Ao transformar o sinal de áudio para o domínio da frequência, torna-se possível analisar picos de frequência ou frequências dominantes e compreender o que elas significam no processo de usinagem.

Na primeira análise, utilizando a DFT, percebeu-se alguns picos de frequência abaixo de 2 kHz e próximos a 8 kHz. O sinal de *background* também foi coletado para saber quais frequências dominantes eram causadas pela máquina em funcionamento, sem estar usinando, e pelo ambiente de trabalho. Nesses áudios, a frequência dominante foi de 300 Hz e esse valor foi associado à máquina nas vezes em que apareceu como dominante nos dados dos experimentos. Foram coletados os três picos principais de cada um dos nove testes e esses valores foram correlacionados com as propriedades de usinagem que variaram em cada experimento. Valores dominantes próximo a 100 Hz apareceram em experimentos cuja velocidade de corte era mais alta, já para velocidades de corte mais baixas, os picos de frequências aproximavam-se de 8 kHz.

Na segunda análise, feita por meio da PSD, também foram encontrados os três maiores picos de cada experimento. Novamente, os picos próximos a 300 Hz apareceram, como era previsto, mas nessa análise, outras frequências dominantes consistentes tiveram destaque, como em 600 e 1100 Hz. Os picos da PSD foram utilizados para fazer uma correlação com os parâmetros de usinagem que variaram de acordo com os testes como velocidade de corte, avanço da ferramenta, profundidade de corte da ferramenta, rotação da máquina, velocidade de avanço da ferramenta e tempo de corte da máquina, e assim entender sua interferência nos sinais coletados. Ao correlacionar os dados, concluiu-se que as variáveis de velocidade de corte e de avanço, assim como a rotação da máquina possuem uma interferência indiretamente proporcional aos picos predominantes, já o avanço, a profundidade e o tempo de corte possuem uma interferência diretamente proporcional. Portanto, todos os parâmetros possuem alguma influência sobre os dados coletados, porém alguns possuem grande interferência como a velocidade de corte e a rotação, enquanto que outros possuem pouca interferência, como o avanço.

Como uma maneira de viabilizar o monitoramento de processos de usinagem por meio da análise realizada com o microfone do dispositivo móvel, os resultados dessa pesquisa foram comparados com dados da pesquisa de Pereira (2022) que utilizou sensores tradicionais de captação de vibração para a coleta de dados. Ao comparar os dados de RMS, notou-se que o teste que apresentava maior RMS em ambas pesquisas era o que possuía maior profundidade e maior avanço, outros dois testes também apresentaram comportamento similar. Na comparação com as PSD, os valores de gráficos tiveram algumas divergências, apesar disso, ao comparar os picos obtidos na análise sonora e na análise de vibração, as frequências predominantes eram similares sendo de 1.1 kHz, 2 kHz e 4 kHz. Desse modo, os resultados convergiram, o que significa que ambas análises trazem resultados semelhantes apesar da diferença de sensores, ou

seja, o microfone de smartphone, sendo um item mais viável economicamente e de mais fácil acesso, já que a popularização de dispositivos móveis vem aumentando, é capaz de obter resultados similares a um sensor tradicional, nesse caso um acelerômetro, para monitorar o processo de usinagem.

Desse modo, a pesquisa demonstrou que apesar de o sensor estudado, o microfone do smartphone, não ser robusto como os tradicionais, é capaz de gerar resultados que tornam possível o monitoramento de processos de usinagem, gerando informações de acordo com os parâmetros de usinagem e estágio do processo, refletindo o estado da ferramenta de corte.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALMEIDA, I. A. de. **Otimização do processo de usinagem de titânio com laser pulsado de neodímio**. 2007. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear Materiais, Ipen, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- ANTONIALLI, A. Í. S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2009. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- ARNOLD, H. **The recent history of the machine tool industry and the effects of technological change**. Munich: University Of Munich, Institute For Innovation Research And Technology Management, 2001.
- DEIAB, I.; ASSALEH, K.; HAMMAD, F. **On modeling of tool wear using sensor fusion and polynomial classifiers**. Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 1719--1729, 2009.
- DIMLA, E. **Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [s.l.], v. 40, n. 8, p. 1073-1098, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(99\)00122-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(99)00122-4).
- DOWNEY, J.; RAGHAVENDRA, R. et al. **Comparison and analysis of audible sound energy emissions during single point machining of HSTS with PVD TiCN cutter insert across full tool life**. Wear, Elsevier, v. 313, n. 1-2, p. 53--62, 2014.
- FRIGIERI, E. P.; YNOGUTI, C. A.; PAIVA, A. P. **Correlation analysis among audible sound emissions and machining parameters in hardened steel turning**. Journal of Intelligent Manufacturing, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 1753-1764, 17 ago. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-017-1356-9>.
- GAJATE, A. et al. **Tool wear monitoring using neuro-fuzzy techniques: a comparative study in a turning process**. Journal Of Intelligent Manufacturing, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 869-882, 1 ago. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-010-0443-y>.
- KALIM, F.; JEONG, J. P.; ILYAS, M. U. **CRATER: A crowd sensing application to estimate road conditions**. IEEE Access, IEEE, v. 4, p. 8317--8326, 2016.
- KOPAK, J.; SALI, S. **Tool wear monitoring during the turning process**. Journal of Materials Processing Technology. Ljubljana, Slovenia, p. 312-316. 2011.
- LMS. Theory and Background. 2000 (LMS International).
- MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2011. 397 p.
- MATARAZZO, T. J. et al. **Crowdsensing framework for monitoring bridge vibrations using moving smartphones: this paper discusses new services that can be delivered to urban environments through big data generated by the public's smartphones, enhancing the relationship between a city and its infrastructure**. Invited Paper, [s. l.], v. 106, n. 4, p. 577-593, 26 mar. 2018.
- MORGENTHAL, G.; HÖPFNER, H. **The application of smartphones to measuring transient structural displacements**. Journal of Civil Structural Health Monitoring, [S.L.], v. 2, n. 3-4, p. 149-161, 2 out. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-012-0025-0>.

- MURPHY, E.; KING, E. A. **Smartphone-based noise mapping: Integrating sound level meter app data into the strategic noise mapping process.** Science of The Total Environment, Elsevier, v. 562, p. 852--859, 2016.
- OESTREICH, D. H. et al. **Revisão da literatura sobre a usinabilidade do titânio e suas ligas.** In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, Porto Alegre. 2011.
- PEREIRA, A. G. **Aplicação do shunt piezoelétrico para controle passivo de chatter no processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V ELI.** 2022. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.
- SHAW, M. C. **METAL CUTTING PRINCIPLES.** 2. ed. Nova York: Oxford University Press, 2005. 759 p.
- SHIN, K; HAMMOND, J. K. **Fundamentals of Signal Processing: for sound and vibration engineers.** Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 209 p.
- SIDDHPURA, A.; PAUROBALLY, R. **A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer, v. 65, n. 1-4, p. 371--393, 201