

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VITOR CORRADINI

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE IMPRESSORA 3D COM  
TECNOLOGIA *FUSED FILAMENT FABRICATION* (FFF): UMA  
INVESTIGAÇÃO BASEADA EM TESTES DE VIBRAÇÃO**

SÃO CARLOS  
2025

VITOR CORRADINI

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE IMPRESSORA 3D COM  
TECNOLOGIA *FUSED FILAMENT FABRICATION* (FFF): UMA  
INVESTIGAÇÃO BASEADA EM TESTES DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Sidney Bruce Shiki

SÃO CARLOS  
2025

Dedico este trabalho a Deus, pela força, sabedoria e discernimento concedidos em cada etapa desta caminhada. À minha família e às pessoas que amo, por serem a manifestação do amor e do apoio que me sustentam, e a todos que, com sua presença e incentivo, tornaram este sonho uma realidade.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus pela oportunidade de ter a vida que eu tenho, com as pessoas que eu tenho ao meu lado durante essa minha longa jornada. De uma realidade em que o estudo não era prioridade, nas rodas de conversa com meus amigos quando eu era garoto, não imaginava nem nos melhores sonhos que um menino de quebrada chegaria tão longe. E cheguei porque tive pessoas maravilhosas ao meu lado, que me deram muita força, secaram o choro quando chorava e pedia para eu levantar a cabeça.

Agradecer à minha família, minha mãe, minhas irmãs Vivian e Roberta, minha avó Deodata, minha madrinha Maria Ivaneuda e meu padrinho José, meus primos Elizete e Alex. Agradecer à minha namorada Ana Julia que me deu todo suporte, amor e carinho do mundo desde que começamos a namorar, meus amigos da moradia da UFSCar do Bloco 36 com quem morei cinco anos e que foram a minha segunda família, meus colegas de turma que participaram da construção e realização desse sonho. E, além dos que já citei, tem muitos outros e importantes nomes implícitos nesses agradecimentos, que deixo o meu muito obrigado por estar nesse ciclo tão relevante para a minha vida.

Mãe, prometi que eu ia carregar a senhora para os lugares mais altos que eu puder para todos verem a minha rainha, aquela quem me deu tudo nessa vida. Foram muitos sonhos que a senhora abdicou de realizar para pagar as contas, dar um futuro melhor para nós do que você teve quando era mais nova. A senhora colocava duas maçãs na bolsa, colocava o chinelo e pegava o ônibus comigo para fazer vestibular em São Paulo, sempre me apoiando nas provas, mesmo eu não passando em alguns. Foram anos estudando para conseguir entrar numa universidade pública, já que nossa família não tinha condições de pagar uma faculdade particular e, em mais de três anos estudando, escondi as frustrações e choro lá no fundo do ônibus para a senhora não ver meu fracasso, porque eu sempre acreditei que um dia eu ainda daria muito orgulho para vocês.

Morar longe da senhora e de todos nunca foi uma questão fácil de lidar. Ver pela janela do ônibus a senhora secando o choro com uma blusa de manga comprida, sem saber quando eu ia voltar de novo porque eu tinha que estudar para as provas. Era choro de alegria quando eu chegava e tristeza quando tinha que ir embora. Foram anos trabalhando, estudando, lidando com ansiedade, frustração, tristezas, dificuldades, mas nada me abalava quando eu saía com a senhora e você sempre dizia para qualquer estranho “esse é meu filho que vai ser engenheiro lá em São Carlos”. Era assim que a cabeça levantava para qualquer problema do mundo que acontecia e eu seguia. Foram muitas coisas que passei, mas faria de novo, e de novo, tudo por nós e para nós.

O meu muito obrigado pela senhora ter aguentado tanta coisa, ter lutado tanto pela gente, por acreditar tanto em mim. Eu vou continuar ecoando o nome da senhora nas minhas conquistas e nas minhas vivências, pois sou eternamente grato à tudo o que a

senhora fez e faz por mim. Eu te amo muito e o nosso sonho está se realizando.

E padrinho, madrinha, prometi também que eu seria engenheiro e que não seria de avião, porque a tia tinha muito medo. Tio Zé, espero que aí do céu, o senhor esteja em festa, você e a tia sonharam esse sonho comigo durante muito tempo. Você e madrinha são meus segundos pais e me deram todo o amor do mundo, todo o carinho que uma criança gostaria de ter. Meu amor por vocês é muito grande e carrego vocês no meu coração em tudo o que eu faço também.

E se hoje eu sou emocionado, chorão, engraçado, besta e feliz, é de família. Como a gente costuma brincar nas rodas de conversa, "todo mundo é maluco, pobre, fala alto", mas com o coração que não cabem no peito.

Amo muito todos vocês.

*A periferia me fez forte, o conhecimento me fez livre.*



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 33/2025/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso  
Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

### FOLHA DE APROVAÇÃO

VITOR CORRADINI

AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE IMPRESSORA 3D COM TECNOLOGIA FUSED FILAMENT FABRICATION (FFF): UMA INVESTIGAÇÃO BASEADA EM TESTES DE VIBRAÇÃO

#### Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 25 de julho de 2025

#### ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 1	João Gustavo Pereira da Silva
Membro da Banca 2	Vitor Ramos Franco



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 25/07/2025, às 09:43, 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 **Joao Gustavo Pereira da Silva, Professor(a) do Ensino Superior**, em 25/07/2025, às 09:43, 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 **Sidney Bruce Shiki, Docente**, em 25/07/2025, às 09:45, 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 **1926647** e o código CRC **1C85714D**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.023423/2025-01

SEI nº 1926647

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

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) investigou a influência das vibrações mecânicas no processo de impressão 3D FFF (Fused Filament Fabrication) por meio da comparação entre as frequências de operação e as frequências de ressonância dos principais componentes estruturais de uma impressora 3D. A análise espectral, baseada na Transformada Rápida de Fourier (FFT), foi aplicada tanto em dados obtidos por teste de impacto quanto em registros realizados durante a impressão de corpos de prova com diferentes parâmetros operacionais. A metodologia adotada envolveu a variação sistemática de velocidade de impressão, densidade e padrão de preenchimento, totalizando 27 combinações experimentais. Além disso, foram utilizados acelerômetros para registrar a resposta dinâmica em três regiões principais da impressora: mesa de impressão, cabeçote extrusor e estrutura vertical. Os dados obtidos foram processados em ambiente MATLAB, permitindo a comparação direta entre as faixas de frequências de ressonância e operacionais. Os resultados dos testes de impacto mostraram picos de ressonância específicos para cada componente da máquina, destacando a importância da escolha do material da ponta do martelo para a qualidade do sinal. Na análise operacional, observou-se que as maiores amplitudes de vibração ocorreram durante a calibração, limpeza do bico e impressão da primeira camada. Além disso, mesmo com as frequências de operação se aproximando das frequências de ressonância, a impressora operou sem problemas. A análise do valor RMS identificou o corpo de prova de número 8 (50 mm/s, 20% de densidade e preenchimento do tipo giróide) com os maiores níveis de vibração no cabeçote e na mesa, embora sem provocar danos à máquina.

**Palavras-chave:** Impressão 3D. Vibração Mecânica. FFT. Frequência Natural. FFF.

## ABSTRACT

This work investigated the influence of mechanical vibrations in the FFF (Fused Filament Fabrication) 3D printing process by comparing the operating frequencies and resonance frequencies of the main structural components of a 3D printer. Spectral analysis, based on the Fast Fourier Transform (FFT), was applied to data obtained from both impact tests and recordings made during the printing of test specimens with different operational parameters. The adopted methodology involved the systematic variation of print speed, infill density, and infill pattern, totaling 27 experimental combinations. Additionally, accelerometers were used to record the dynamic response in three main regions of the printer: print bed, extruder head, and vertical structure. The obtained data were processed in a MATLAB environment, allowing for direct comparison between the resonance and operational frequency ranges. The results from the impact tests showed specific resonance peaks for each machine component, highlighting the importance of selecting the hammer tip material for signal quality. In the operational analysis, it was observed that the highest vibration amplitudes occurred during calibration, nozzle cleaning, and the printing of the first layer. Furthermore, even with operating frequencies approaching resonance frequencies, the printer functioned without issues. The RMS value analysis identified test specimen number 8 (50 mm/s, 20% infill density, and gyroid infill pattern) as having the highest vibration levels in the extruder head and print bed, although without causing any damage to the machine. This study fills a gap in the literature by directly correlating printing parameters with the vibrational behavior of a commercial 3D printer, providing valuable insights for process optimization and part quality.

**Keywords:** 3D Printing. Mechanical Vibration. FFT. Natural Frequency. FFF.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento da impressão 3D FFF . . . . .	15
Figura 2 – Tipos de enclausuramento: (a) aberto; (b) fechado . . . . .	25
Figura 3 – Tipos de arquiteturas: (a) Cartesiana; (b) Core XY; (c) Delta . . . . .	26
Figura 4 – Fatiador Ultimaker Cura . . . . .	27
Figura 5 – Tipos de densidade de preenchimento . . . . .	29
Figura 6 – Preenchimentos do tipo funcional . . . . .	30
Figura 7 – Locais de impacto para a obtenção das frequências naturais . . . . .	32
Figura 8 – Posicionamento dos sensores para a obtenção das frequências naturais .	32
Figura 9 – Fluxograma do código para o tratamento de dados do teste de impacto	34
Figura 10 – Posicionamento dos sensores para obter as frequências de operação . .	35
Figura 11 – Fluxograma do código para o tratamento de dados do regime operacional	36
Figura 12 – Fatiamento dos corpos de prova . . . . .	38
Figura 13 – Presença de repique com martelo de impacto com ponta de <i>Nylon</i> . . .	41
Figura 14 – Ausência de repique com martelo de impacto com ponta de borracha .	42
Figura 15 – Dados de aceleração no domínio do tempo da mesa de impressão . . . .	43
Figura 16 – FRF da mesa de impressão (resposta ao teste de impacto) . . . . .	44
Figura 17 – FRF do cabeçote de extrusão (resposta ao teste de impacto) . . . . .	44
Figura 18 – FRF da estrutura vertical (resposta ao teste de impacto) . . . . .	45
Figura 19 – FFT do teste 5 . . . . .	47
Figura 20 – FFT do teste 7 . . . . .	47
Figura 21 – FFT do teste 27 . . . . .	48
Figura 22 – FFT do teste 1 . . . . .	50
Figura 23 – FFT do teste 11 . . . . .	50
Figura 24 – FFT do teste 15 . . . . .	51
Figura 25 – FFT do teste 16 . . . . .	52
Figura 26 – FFT do teste 20 . . . . .	53
Figura 27 – FFT do teste 24 . . . . .	53
Figura 28 – Valores RMS de aceleração por componente . . . . .	55
Figura 29 – FFT do teste 8 . . . . .	56
Figura 30 – Dados de aceleração no domínio do tempo do corpo de prova 8 . . . . .	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de impressão dos corpos de prova . . . . .	39
Tabela 2 – Análise de vibração para velocidade baixa ( $v = 20\text{mm/s}$ ) . . . . .	46
Tabela 3 – Análise de vibração para velocidade intermediária ( $v = 50\text{mm/s}$ ) . . . . .	49
Tabela 4 – Análise de vibração para velocidade alta ( $v = 80\text{mm/s}$ ) . . . . .	52
Tabela 5 – Valores RMS de aceleração por componente . . . . .	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AC	<i>Alternating Current</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
PSD	<i>Power Spectral Diagram</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos	17
1.2 Estrutura do Texto	17
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
3.1 Vibrações mecânicas	22
3.1.1 Tipos de vibrações mecânicas	23
3.1.2 Tipos de frequências do sistema	23
3.1.3 Análise Espectral de Fourier	24
3.2 Impressão 3D FFF	24
3.2.1 Tipos de enclausuramento	25
3.2.2 Tipos de arquiteturas de movimentação	26
3.2.3 Fatiadores 3D	27
3.2.4 Parâmetros de impressão	28
3.2.4.1 Velocidade de impressão	28
3.2.4.2 Densidade de preenchimento	28
3.2.4.3 Padrão de preenchimento	29
<b>4 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
4.1 Configuração para aquisição de dados do teste de impacto	31
4.1.1 Posicionamento dos sensores	31
4.1.2 Taxa de amostragem e quantidade de amostras	33
4.1.3 <i>Software</i> MATLAB	33
4.1.3.1 Código para o tratamento dos dados do teste de impacto	33
4.2 Configuração para aquisição de dados do ensaio operacional	34
4.2.1 Código para o tratamento dos dados do ensaio operacional	36
4.2.2 Definição dos parâmetros dinâmicos de impressão	36
4.2.3 Corpos de prova	37
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>40</b>
5.1 Teste de impacto	40
5.1.1 Escolha do material da ponta do martelo de impacto	40
5.1.2 Faixa de frequências naturais por área excitada	42
5.2 Análise das frequências de operação	45

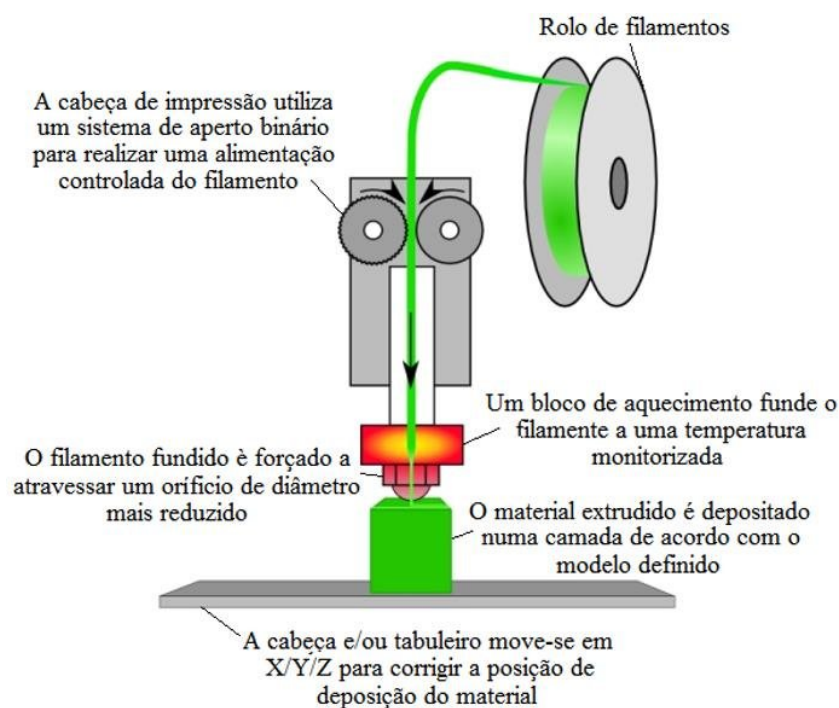
5.2.0.1	Análise de vibração para velocidade baixa ( $v = 20\text{mm/s}$ ) .	46
5.2.0.2	Análise de vibração para velocidade intermediária ( $v = 50\text{mm/s}$ ) . . . . .	48
5.2.0.3	Análise de vibração para velocidade alta ( $v = 80\text{mm/s}$ ) . .	51
5.2.1	Análise de RMS do sinal de vibração em regime operacional . . . .	53
<b>6</b>	<b>– CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>– APÊNDICES</b> . . . . .	<b>62</b>
	Script MATLAB para análise de FRF no teste de impacto . . . . .	62
	Script MATLAB para análise de FFT no regime operacional . . . . .	64
	Script MATLAB para análise de RMS no regime operacional . . . . .	65

## 1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D baseada na extrusão de material polimérico, conhecida também como FFF (do inglês *Fused Filament Fabrication*), é um processo de manufatura aditiva no qual os objetos são construídos camada por camada a partir de um arquivo *.gcode* gerado a partir de um modelo 3D digital. Esse modelo pode ser criado por meio de *softwares* de projeto assistido por computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*) ou obtido por técnicas de digitalização 3D, como *scanners* digitais de alta precisão, por exemplo. Nesse contexto, a FFF tem se destacado cada vez mais como uma alternativa para a fabricação de peças técnicas e funcionais quando comparada a métodos tradicionais de produção em massa, apresentando aplicabilidade em diversos contextos industriais. Embora suas aplicações ainda estejam fortemente associadas à construção de protótipos (TOFAIL et al., 2018), observa-se uma tendência crescente de adaptação dos processos produtivos convencionais a essa tecnologia.

Na Figura 1, são ilustradas de forma esquemática as etapas envolvidas em uma impressão 3D FFF, desde a alimentação do filamento polimérico até a construção gradual do objeto camada por camada, destacando os componentes principais que garantem a qualidade e o controle do processo de fabricação aditiva.

Figura 1 – Esquema de funcionamento da impressão 3D FFF



Fonte: MOREIRA, 2016.

Diferentemente dos processos convencionais de fabricação por subtração (retirada de material) ou conformação, a manufatura aditiva se baseia na adição controlada de material, resultando em uma variação positiva de massa durante a produção. Dessa forma, é possível transformar modelos virtuais em componentes físicos com elevado grau de precisão e complexidade geométrica, promovendo a ampliação da competitividade industrial por meio da adoção de práticas de fabricação mais eficazes. Ao longo do tempo, houve uma crescente adoção na indústria e no meio acadêmico por este tipo de manufatura aditiva, a qual está relacionada à capacidade de produzir geometrias complexas com baixo custo e elevado grau de customização (GUASTALDI et al., 2023).

No entanto, apesar de seu avanço tecnológico, a qualidade das peças fabricadas ainda é sensível a fatores mecânicos intrínsecos ao processo, como vibrações estruturais e dinâmicas. Durante a operação de uma impressora 3D, diversos componentes, como motores de passo, ventoinhas para resfriamento, correias e guias lineares, geram excitações que se propagam pela estrutura da máquina. Tais excitações, se coincidirem com as frequências naturais de determinadas partes da impressora, podem induzir fenômenos de ressonância, comprometendo a estabilidade da extrusão e resultando em falhas dimensionais, defeitos, trincas ou até mesmo defeitos internos. Em suma, compreender o comportamento vibratório do sistema se torna essencial para garantir precisão e repetibilidade na manufatura.

Para evitar a condição de ressonância, é importante identificar e analisar o sinal de frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). Essa técnica é amplamente utilizada na área de vibrações mecânicas, uma vez que converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Dessa forma, é possível obter o espectro em frequência do sinal de um sistema mecânico e identificar quais são as faixas críticas de operação.

Ao comparar as frequências naturais obtidas por meio de ensaio experimental - como o teste de impacto - com as frequências operacionais registradas durante a impressão da peça, é possível identificar sobreposições indesejadas de frequências e propor ajustes em alguns parâmetros de processo. Assim, a adoção de combinações ideais de velocidade, densidade e padrão de preenchimento pode contribuir de forma significativa a fim de minimizar os efeitos vibratórios.

Neste TCC, busca-se analisar experimentalmente o comportamento dinâmico de uma impressora 3D do tipo cartesiana por meio da comparação entre as frequências naturais e operacionais, variando parâmetros de impressão que impactam efetivamente na vibração do sistema analisado. O estudo se justifica pela necessidade de identificar condições de operação mais controladas, com menor suscetibilidade à ressonância, preservando a integridade estrutural e a qualidade das peças produzidas.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste TCC é avaliar a influência das vibrações mecânicas no processo de impressão 3D FFF por meio da aplicação de técnicas de análise espectral, com foco na comparação entre as frequências de operação registradas durante o funcionamento da máquina e as frequências naturais de suas principais partes.

Para que esse objetivo seja atingido, os objetivos específicos são:

- Realizar os testes de impacto para a identificação das frequências de ressonância da impressora 3D a partir das medições de vibração da mesa, cabeçote extrusor e estrutura da impressora;
- Registrar os valores das frequências de operação durante a impressão com diferentes combinações de parâmetros dinâmicos;
- Aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) na versão discreta e finita para interpretar os dados adquiridos por meio do MATLAB;
- Identificar combinações de parâmetros de impressão que evitam sobreposição com frequências de ressonância;
- Analisar os valores de RMS para os componentes da impressora 3D estudados;

## 1.2 Estrutura do Texto

Esta monografia está organizada da seguinte forma:

- No Capítulo 2, uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos relacionados à impressão 3D FFF, vibrações mecânicas, análise espectral e técnicas de caracterização de sistemas dinâmicos é apresentada;
- No Capítulo 3, são abordados os conceitos de vibrações, frequência natural, frequência de operação, Transformada de Fourier e os parâmetros dinâmicos de impressão que influenciam o comportamento dinâmico;
- No Capítulo 4, os procedimentos experimentais adotados são descritos, incluindo o teste de impacto, a coleta de dados com acelerômetros e a configuração inicial das impressões 3D pelo fatiador;
- No Capítulo 5, os resultados obtidos nos ensaios são expostos e analisados, com foco na comparação entre as frequências de ressonância e de operação;
- No Capítulo 6, os principais resultados e conclusões do estudo são sintetizados, e caminhos para o desenvolvimento de trabalhos futuros são propostos.

É importante citar o auxílio da ferramenta de inteligência artificial Gemini 2.5 na revisão ortográfica e gramatical do manuscrito, que abrangeu a verificação de concordância verbal e nominal e a correção de erros conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa (2009). Além disso, o Gemini contribuiu para a melhoria, adequação e correção de códigos LaTeX no Overleaf, sobretudo na inserção de figuras e na adequação da sintaxe das informações para as referências bibliográficas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o avanço da manufatura aditiva nas últimas décadas, a pesquisa na área se tornou muito fomentada, especialmente no que tange aos fatores que influenciam a qualidade e o controle do processo de impressão. Dentre esses fatores, as vibrações estruturais e operacionais da impressora 3D têm-se destacado, pois podem comprometer significativamente o desempenho mecânico e as características geométricas das peças produzidas. Neste capítulo, um levantamento da literatura relevante é apresentado, abordando estudos que exploram a análise modal e espectral de sistemas de impressão 3D, a influência de parâmetros na qualidade das peças e as abordagens para monitoramento e controle de vibrações, com foco nos trabalhos que servem de base para a proposta deste TCC.

No estudo de Barrioni (2021), apresentada-se uma análise de vibrações em corpos de prova com foco na caracterização mecânica do filamento de TPU (do inglês *Thermoplastic Polyurethane*). A pesquisa aborda a influência das vibrações e da variação de parâmetros da impressão 3D pelo método FFF, além de simulações numéricas de tração e compressão em classes de metamateriais. Os dados experimentais foram obtidos a partir de corpos de prova submetidos a diferentes condições de carregamento e os resultados indicam que a análise de vibrações pode ser uma ferramenta para estudar as curvas mecânicas do TPU sob diferentes carregamentos submetidos.

Seguindo uma linha semelhante, Maia (2023) investigou a influência dos parâmetros de impressão FFF no desempenho de peças produzidas com filamento de PETG (do inglês *Polyethylene Terephthalate Glycol*), utilizando o método de Taguchi. O estudo destacou a relevância de fatores como o padrão e o nível de preenchimento, a altura de camada e a orientação de impressão na qualidade final das peças.

Ainda no contexto de ensaios experimentais e variação de parâmetros de impressão, Pereira (2023) analisou a resistência mecânica de peças impressas com filamento de PLA (do inglês *Polylactic Acid*). Os parâmetros avaliados incluíram a temperatura do bico, altura da camada, velocidade de impressão, além da porcentagem e tipo de preenchimento. Os resultados indicaram que, em geral, os parâmetros se comportaram conforme esperado, sendo compatíveis com estudos consolidados encontrados na literatura.

Nas três pesquisas mencionadas, foram realizados ensaios experimentais com corpos de prova impressos via FFF, variando os parâmetros de fabricação. A principal diferença entre elas está no tipo de material utilizado — TPU, PETG e PLA — o que permitiu diferentes enfoques na avaliação do desempenho mecânico e dinâmico das peças.

Já na intersecção entre vibrações mecânicas e manufatura aditiva, Waheed e Bernadin (2024) aplicaram um tipo de monitoramento existente na condição *in-situ* utilizando sensores acústicos para detectar e controlar as vibrações mecânicas em tempo real de uma impressora 3D MakerBot Method X. Esse controle permitiu que os autores

ajustassem em tempo real a velocidade, o fluxo do filamento durante a impressão da peça teste, temperatura e o resfriamento. Os resultados obtidos mostraram altas vibrações com o tipo de preenchimento zigue-zague, além de sobreposição complexa de padrões de frequência (o que dificultou a análise por parte dos autores).

Jensen, Parker e Blough (2023) desenvolveram uma arquitetura para aquisição de dados durante o processo de manufatura aditiva a fim de verificar, armazenar e controlar os parâmetros de impressão para a detecção de falhas por meio da utilização de tecnologias como *Internet of Things* (IoT) e redes neurais. Essa arquitetura recebe sinais de vibração e, assim, permite acessar mecanismos para o controle do processo de impressão. Os resultados demonstraram a efetividade do uso de *deep learning* e inteligência artificial (IA, do inglês *Intelligence Artificial*) para verificar a ocorrência de padrões que levam a um produto defeituoso.

Já Białas, Dymarek e Dzitkowski (2023) se basearam no estudo das vibrações da estrutura de impressoras 3D, causadas pelo movimento do extrusor durante o processo de fabricação aditiva FFF. Foram realizados testes para medir as vibrações mecânicas com e sem modificações na estrutura (adição de elementos de dissipação de energia). Com base nos testes realizados, confirmou-se o efeito positivo da redução da amplitude de vibração da estrutura em cerca de 50-70%, o que contribuiu significativamente para a melhoria dos parâmetros dimensionais do produto final.

Conforme Pilch e Domin (2015), os autores analisaram as vibrações mecânicas na mesa da impressora 3D Kreator Motion utilizando técnicas de medição a *laser*. Os resultados mostraram que vibrações na direção perpendicular à mesa afetam negativamente a qualidade da impressão, gerando irregularidades nas camadas depositadas. Um dos desafios apontados pelos autores foi sobre a importância de controlar vibrações estruturais para garantir precisão dimensional e acabamento superficial nas peças impressas.

Na pesquisa de Zhang et al. (2019), o artigo buscou aprimorar a precisão de impressoras 3D coloridas FFF ao analisar suas características de vibração. Utilizando análise modal por elementos finitos e medições de espectro de potência, os pesquisadores otimizaram o *design* da impressora para reduzir a ressonância e melhorar a qualidade de impressão, validando a abordagem com experimentos práticos.

Segundo Kopets et al. (2021), realizaram uma análise modal por FEM (do inglês *Finite Element Method*) da impressora Anycubic i3 Mega, identificando suas frequências naturais e amplitudes associadas. Os resultados indicaram que certas frequências naturais impactam negativamente a qualidade da impressão em altas velocidades, principalmente por gerarem vibrações ressonantes. Além disso, a simulação não previu algumas vibrações reais de baixa frequência e alta amplitude, ressaltando limitações nos modelos computacionais simplificados.

Em suma, as pesquisas atuais apresentam avanços acerca de impressão 3D FFF e das vibrações mecânicas em diferentes áreas do conhecimento. Apesar de algumas pesquisas

focarem na caracterização dinâmica por meio da variação de parâmetros e da avaliação do processo de impressão e ensaios mecânicos de resistência nas peças, somente algumas delas relacionam diretamente essa variação às vibrações mecânicas. Outras pesquisas abordam essa combinação citada - impressão 3D e vibrações mecânicas -, todavia sem relacionar os parâmetros de densidade e tipo de preenchimento. E, até o presente momento, não foram encontradas pesquisas que focam na determinação da frequência natural de alguma impressora 3D, seja ela de marca comercial ou construída de maneira autônoma (DIY, do inglês *Do-It-Yourself*) e de código aberto.

Dessa forma, este TCC busca preencher essas lacunas nos temas citados, apresentando um estudo inédito que explora análises e resultados experimentais perante a análise espectral de Fourier para a comparação do sinal de frequência de operação e ressonância na impressão 3D por meio da variação de parâmetros de funcionamento.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos, teorias e ferramentas matemáticas que servem como base para a análise e discussão dos resultados. Os temas abordados - vibrações mecânicas e impressão 3D FFF - exploram também as contribuições de autores e pesquisadores na área de estudo.

#### 3.1 Vibrações mecânicas

Segundo Rao (2009), a vibração, também chamada de oscilação, pode ser definida como um movimento que se repete em intervalos de tempo regulares. Já Hibbeler (2005), define o termo como sendo todo e qualquer movimento periódico de um corpo ou sistema de corpos que estão ligados entre si, em torno de uma posição de equilíbrio. Para Thomson (1998), as forças associadas aos movimentos oscilatórios dos corpos também estão ligadas à vibração, fazendo com que todo corpo que possui massa e elasticidade seja capaz de vibrar. Dessa forma, nota-se que, por mais geral que seja a segunda definição, os autores convergem na ideia de que a vibração, seja ela de qualquer natureza, é um movimento dinâmico com características principais de repetibilidade e periodicidade.

Nota-se que diversas atividades humanas envolvem algum tipo de vibração. Assim, diversas partes do corpo humano funcionam por conta de vibrações, seja pela oscilação do tímpano para a ocorrência da audição, vibração das cordas vocais para a formação vocal, vibração da língua para atingir determinados sons, associação entre a respiração e a vibração dos pulmões, movimentos periódicos para andar, entre outras questões. Quando se analisa diversos sistemas de engenharia, observa-se que o ser humano age como elemento integrador do sistema, pois a vibração, quando transmitida para o ser humano, resulta em desconforto, incômodo e danos à saúde (RAO, 2009).

No âmbito da engenharia mecânica, as vibrações mecânicas podem ser tanto as causas quanto consequências de problemas mecânicos. Uma máquina, estrutura ou componente pode falhar devido ao desalinhamento dos motores, fadiga do material em decorrência da variação cíclica da tensão induzida, redução da vida útil de outros componentes, desgaste excessivo da estrutura, geração de ruído intenso e trepidação. Além disso, em determinadas aplicações, a vibração pode promover o afrouxamento de elementos de fixação, como parafusos e porcas, tornando a estrutura mais solta e suscetível a riscos (RAO, 2009).

A resposta global desse sistema vibratório dependerá das condições iniciais e das excitações realizadas (internas e externas). Na prática, uma das maiores dificuldades encontradas reside sobre a complexidade da análise matemática destes sistemas, sobretudo no seu comportamento dinâmico. Uma solução para essa modelagem matemática é a

adoção de modelos físicos simplificados, mas que descrevem detalhes suficientes do sistema e que não o tornem excessivamente complexo (RAO, 2009).

Além disso, é importante avaliar e quantificar a energia de um sinal de vibração, para prever, monitorar e controlar tais sistemas vibratórios. Nesse contexto, o Valor Quadrático Médio (RMS, do inglês *Root Mean Square*), emerge como uma das métricas mais utilizadas, pois, diferentemente dos valores de picos instantâneos - que podem ser influenciados por ruídos ou outras condições de sinal -, o RMS oferece uma medida representativa da magnitude eficaz da vibração ao longo do tempo. Com isso, ele reflete diretamente a energia contida no sinal, tornando-se um indicador robusto da intensidade global da vibração, essencial para avaliar o estado de componentes e prever a degradação de máquinas (THOMSON, 1998).

### 3.1.1 Tipos de vibrações mecânicas

Um sistema vibratório pode oscilar de duas formas principais: vibração livre e forçada. A vibração livre ocorre quando o movimento do objeto é mantido por forças restauradoras, ou seja, caracteriza-se pela ausência de uma força externa atuando diretamente no corpo para que ele oscile. Já a vibração forçada ocorre quando é causada por uma força externa de caráter periódico aplicada ao sistema, ou seja, o sistema é forçado a vibrar na frequência de excitação (HIBBELER, 2005).

Além dos dois tipos citadas anteriormente, os sistemas vibratórios podem ser classificados como sendo não amortecidos ou amortecidos. Um sistema vibratório não amortecido se caracteriza pela ausência de perda ou dissipação de energia, seja por atrito ou outra resistência durante vibração. Já um sistema amortecido, é o oposto, apresenta perda de energia causada pelas duas naturezas citadas (atrito ou outras resistências) (RAO, 2009). Em geral, é comum desprezar o amortecimento em sistemas físicos devido ao seu valor geralmente muito pequeno e à sua pouca e direta influência nas frequências naturais do sistema, mas se considera importante mantê-lo nos equacionamentos para melhor compreensão e análise de sistemas vibratórios para limitar a amplitude de oscilação na condição de ressonância (THOMSON, 1998).

### 3.1.2 Tipos de frequências do sistema

Uma frequência natural é uma propriedade intrínseca do sistema que caracteriza o comportamento dinâmico de um objeto ou estrutura quando é submetido a uma perturbação e que, ao ser perturbado, vibra de forma livre, sem a ação contínua de uma força externa.

Para identificar as frequências naturais de máquinas e estruturas, realiza-se o teste de impacto. Nesse procedimento, utiliza-se um martelo de impacto que atinge o objeto em teste com uma força alta o suficiente em magnitude para excitar suas frequências de ressonância. Em seguida, a resposta do sistema é registrada por meio de um acelerômetro

- analisador de frequência - e, posteriormente, é correlacionada com a força de entrada (NYB, 2025).

Nesse caso, a energia fornecida pela frequência de excitação é absorvida de maneira mais eficiente pelo sistema, crescendo de forma acentuada e resultando em vibrações intensas que podem comprometer a integridade da estrutura, provocando ruídos excessivos ou até mesmo levar a falhas graves de componentes mecânicos.

Devido ao efeito, muitas vezes catastrófico, que as vibrações podem causar às máquinas e estruturas, o teste e o estudo de vibrações nestes dispositivos se tornou um procedimento relevante no projeto e ao longo do desenvolvimento da maioria dos sistemas de engenharia (RAO, 2009).

### 3.1.3 Análise Espectral de Fourier

A análise espectral é uma ferramenta amplamente utilizada na engenharia para otimização de projetos, análise de vibrações, e interpretação de dados experimentais obtidos por sensores. Essa técnica permite decompor sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência, facilitando a identificação de componentes harmônicos presentes no sinal. Uma das ferramentas computacionais mais comuns para realizar essa conversão é a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que expressa um sinal como uma soma de funções senoidais de diferentes frequências (REAMAT, 2025). O espectro de um sinal permite a visualização gráfica da distribuição de energia em função da frequência, tornando mais evidente a compreensão do comportamento dinâmico de sistemas físicos.

A seguir, apresenta-se o equacionamento clássico da FFT na versão discreta e finita (1), uma vez que o sinal utilizado é definido apenas em instantes discretos de tempo e é composto por uma sequência de pontos. Além disso, é o método de cálculo da função `fft` usado pelo *software* MATLAB.

Definição: Seja  $x(n)$  uma sequência de  $N$  amostras discretas no tempo, onde  $n$  varia de 0 a  $N-1$ . A Transformada de Fourier Discreta (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*), denotada por  $X(k)$ , mapeia a sequência temporal para uma representação no domínio da frequência (SMITH JULIUS O., 2011).

Assim, a DFT é definida como:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega_k n} \quad (1)$$

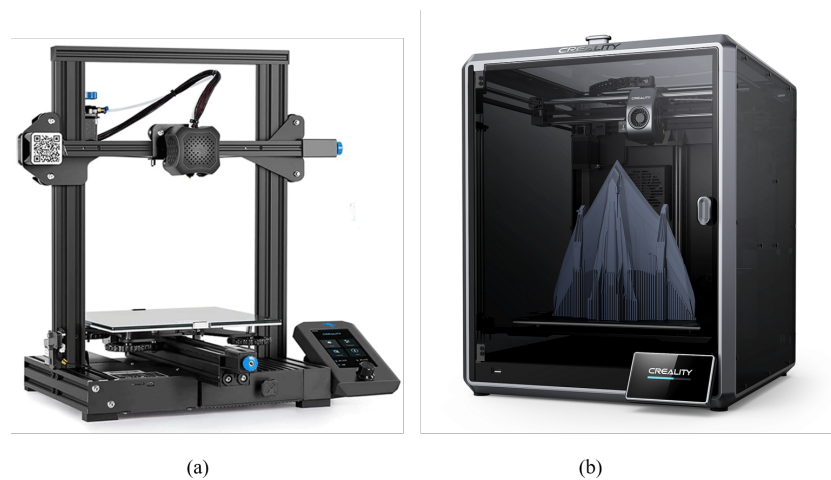
## 3.2 Impressão 3D FFF

Essa tecnologia se destaca como uma das tecnologias de manufatura aditiva mais utilizadas, consolidando-se na produção de componentes camada por camada ao longo do tempo de impressão (GUASTALDI et al., 2023).

### 3.2.1 Tipos de enclausuramento

As impressoras 3D podem ser classificadas de acordo com sua estrutura, relacionando-se a fatores como custo, facilidade de manutenção, estabilidade na impressão e tipos de materiais suportados. Na Figura 2, são mostradas as impressoras de estrutura aberta, que oferecem acessibilidade e praticidade, e as de estrutura fechada, que garantem maior controle térmico e precisão (CREALITY, 2023). Nesse contexto, a escolha entre essas configurações depende das necessidades do usuário e das aplicações desejadas, considerando vantagens e limitações de cada tipo.

Figura 2 – Tipos de enclausuramento: (a) aberto; (b) fechado



Fonte: CREALITY, 2023.

As impressoras 3D de estrutura aberta oferecem bom custo-benefício, sendo mais acessíveis sem comprometer a qualidade. Além disso, proporcionam um aprendizado imersivo ao permitir a visualização do funcionamento das peças, facilitando tanto a manutenção quanto o transporte devido ao acesso direto aos componentes e ao peso reduzido. Por essas razões, adotou-se esse tipo de estrutura para este estudo. Embora a impressão de materiais sensíveis a variações térmicas, como o ABS, possa apresentar desafios devido ao risco de rachaduras e deformações, isso não comprometerá os resultados deste estudo. Isso se deve ao fato de que será utilizado um material com maior estabilidade térmica para esse tipo de estrutura, como o PLA (RAZGRIZ, 2020).

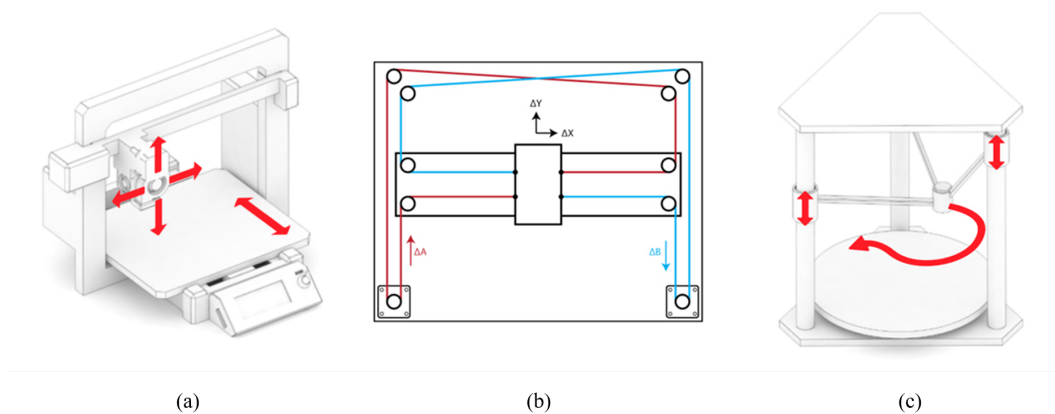
As impressoras 3D de estrutura fechada são mais robustas e indicadas para aplicações mais exigentes e industriais, especialmente para materiais sensíveis a variações térmicas, como o ABS, PETG, Nylon e Tritan, por exemplo. Elas oferecem maior robustez na impressão, reduzindo vibrações e garantindo precisão, além de exigirem menos manutenção devido à estrutura reforçada. No entanto, apresentam acesso mais difícil para

reparos, manutenção mais cara, maior peso para transporte e um custo elevado, que nem sempre representa o melhor custo-benefício (RAZGRIZ, 2020).

### 3.2.2 Tipos de arquiteturas de movimentação

Além dos tipos de estruturas, as impressoras 3D podem ser classificadas com base na arquitetura de movimentação, o que influencia diretamente o desempenho e a aplicação de cada modelo. Na Figura 3, é possível observar três tipos mais comuns, sendo as impressoras cartesianas, CoreXY e Delta, cada uma com suas características específicas de movimentação e vantagens. A escolha da arquitetura adequada depende de fatores como a necessidade de velocidade, precisão e complexidade do *design*.

Figura 3 – Tipos de arquiteturas: (a) Cartesiana; (b) Core XY; (c) Delta



Fonte: IMPRESSORAS3D.COM, 2024.

A impressora 3D do tipo cartesiano é caracterizada por uma configuração que utiliza pelo menos três motores para movimentar os componentes ao longo dos eixos do sistema de coordenadas cartesianas: Y (movimento para frente e para trás), X (movimento para a esquerda e para a direita) e Z (movimento para cima e para baixo), como visto na Figura 3(a). Apesar deste modelo de impressora 3D não ser recomendado para impressões rápidas, devido ao peso dos eixos, é bastante utilizado em impressoras de *desktop* devido à sua disponibilidade e custo acessível, tornando-o uma escolha popular para uso pessoal (IMPRESSORAS3D.COM, 2024). Assim, esse tipo de arquitetura de movimentação foi a escolhida neste estudo, pois além das vantagens citadas, é amplamente disponível e sua estrutura simples facilita a análise, atendendo aos objetivos deste trabalho.

Para o tipo CoreXY, esta possui uma configuração estrutural em que o movimento dos eixos X ou Y está interligado, o que é possível por meio de um modelo de correia específico, conforme ilustrado na Figura 3(b). Neste caso, a superfície de impressão é elevada se encontrar com a extrusora. É importante notar que o diferencial de uma impressora

CoreXY não é apenas a superfície de impressão móvel, mas também o *design* e o movimento das correias XY (IMPRESSORAS3D.COM, 2024).

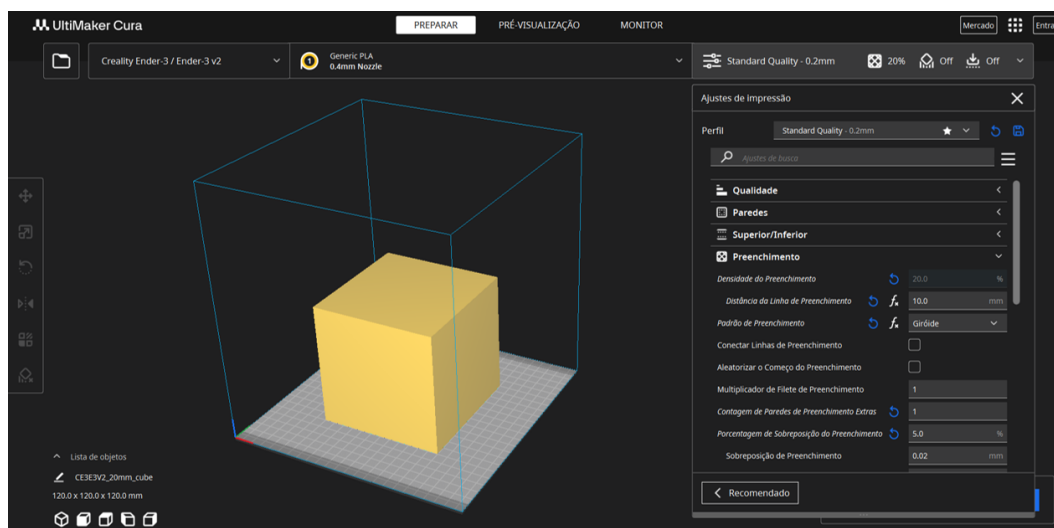
Já a impressora do tipo delta, a base de impressão permanece fixa enquanto três motores trabalham em conjunto para mover o *hotend*. O nome "Delta" deriva do formato triangular dos braços que sustentam o cabeçote extrusor, como apresentado na Figura 3(c). Assim, esse *design* foi desenvolvido para tornar as impressões mais rápidas (IMPRESSORAS3D.COM, 2024).

### 3.2.3 Fatiadores 3D

Os fatiadores são *softwares* responsáveis por converter modelos 3D em instruções específicas para impressoras 3D, geralmente no formato *.gcode*. Eles processam os modelos, dividindo-os em camadas (como se fossem "fatias") para viabilizar a fabricação com precisão e qualidade. São utilizados em diversas aplicações, como prototipagem, decoração, peças funcionais e colecionáveis, entre outras.

Atualmente, há diversos fatiadores disponíveis no mercado, muitos desenvolvidos por fabricantes de impressoras 3D. Neste estudo, utilizou-se o *Ultimaker Cura*, devido ao seu código aberto e interface intuitiva (como mostrado na Figura 4), disponibilidade gratuita, ampla documentação e uma comunidade ativa que contribui para sua constante evolução (CRIAR3D, 2023).

Figura 4 – Fatiador Ultimaker Cura



Fonte: ULTIMAKER CURA, 2025.

### 3.2.4 Parâmetros de impressão

Os parâmetros de impressão configurados no fatiador influenciam diretamente na qualidade final da peça, bem como o tempo de fabricação e o consumo de material. Aspectos como a velocidade de impressão, altura de camada e padrão de preenchimento afetam a precisão dimensional dos objetos impressos, a resistência mecânica e a eficiência do processo. A escolha adequada desses parâmetros é fundamental para equilibrar qualidade e desempenho, minimizando efeitos indesejados como vibrações excessivas e falhas estruturais.

#### 3.2.4.1 Velocidade de impressão

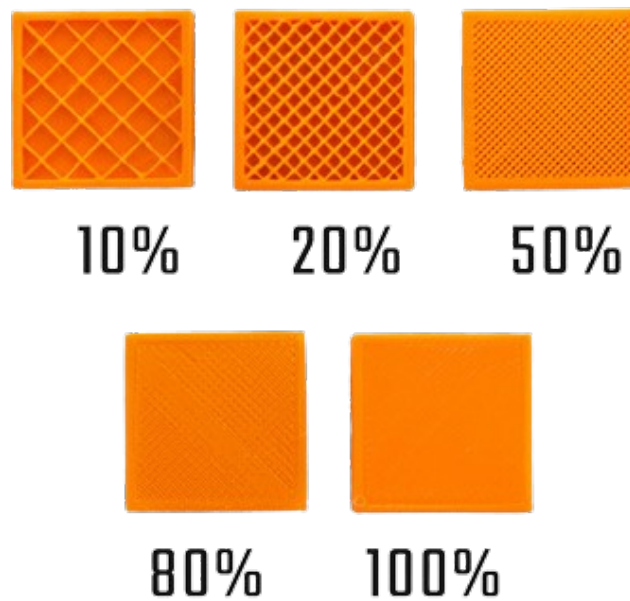
A velocidade de impressão é um fator que impacta tanto o tempo de fabricação quanto a qualidade do objeto 3D. Velocidades mais altas podem reduzir a precisão devido ao aumento da inércia no movimento do carrinho da impressora, o que intensifica as vibrações na máquina. Por outro lado, em velocidades mais baixas, o movimento se torna mais controlado, garantindo maior fidelidade e riqueza de detalhes, já que as vibrações são minimizadas. Assim, ajustar esse parâmetro corretamente é essencial para equilibrar tempo e qualidade na impressão (PORTELA, 2023).

#### 3.2.4.2 Densidade de preenchimento

A densidade de preenchimento, mais conhecida como *infill*, é definida como a porcentagem de material que preenche o interior de um objeto impresso em 3D, como ilustrado na Figura 5. Nota-se que ela influencia no tempo de fabricação, consumo de material e até na resistência mecânica da peça 3D. De modo geral, quanto menor o preenchimento interno (ou seja, quanto mais oca a peça), menor será o tempo de impressão e menor o custo. Em contrapartida, densidades mais elevadas aumentam significativamente o tempo de impressão e o consumo de filamento, podendo encarecer o processo sem proporcionar tantas melhorias relevantes nas propriedades mecânicas da peça.

Na prática, é comum utilizar uma densidade de preenchimento baixa, pois representa um equilíbrio entre resistência estrutural e eficiência de fabricação. Valores inferiores podem comprometer a integridade mecânica do objeto, tornando-o excessivamente frágil. Já densidades superiores tendem a oferecer ganhos pequenos em resistência, ao custo de maior tempo de produção e maior consumo de material.

Figura 5 – Tipos de densidade de preenchimento



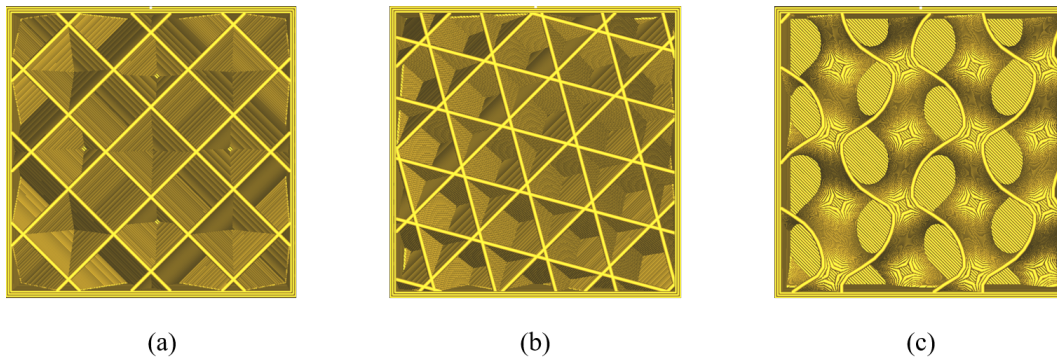
Fonte: OALOO, 2024.

### 3.2.4.3 Padrão de preenchimento

Tal parâmetro está relacionado à forma como o objeto 3D será impresso durante a impressão. Segundo Elmrabet e Siegkas (2020), o padrão de preenchimento se relaciona ao melhor desempenho mecânico da peça e ao tipo escolhido disponível no fatiador. Assim, de acordo com o *Ultimaker Cura* na versão 5.9.1, programa utilizado nos experimentos, existem 14 tipos de preenchimentos, dispostos em quatro categorias principais: modelos e miniaturas (relâmpago, linhas e zigue-zague), impressões 3D do tipo padrão (grade, triângulo e tri-hexágono), do tipo funcionais (cúbico, divisão cúbico, octeto e giróide) e flexíveis (concêntrico, cruzado e cruzado 3D) (GOLDSCHMIDT, 2025).

Como o objetivo deste trabalho é imprimir e analisar um modelo 3D funcional e com alta resistência mecânica em múltiplas direções, optou-se por escolher três tipos de preenchimentos do terceiro grupo citado anteriormente para a realização dos ensaios experimentais, a saber: cúbico, octeto e giróide.

Figura 6 – Preenchimentos do tipo funcional



Fonte: ULTIMAKER CURA, 2025.

O tipo de preenchimento “Cúbico”, mostrado na Figura 6(a), é um padrão que se baseia no empilhamento de cubos inclinados que se cruzam dentro de uma camada de impressão. Com isso, esse preenchimento é importante pelo seu comportamento térmico, pois ele cria bolsas de ar que atuam como isolantes térmicos, além de permitir que a peça flutue quando colocada em água. Além disso, não apresenta um tempo de impressão e consumo de filamento elevados, o que deixa a impressão mais ágil e dinâmica (GOLDSCHMIDT, 2025).

Já para o preenchimento “Octeto”, também conhecido como preenchimento tetraédrico, é um padrão baseado no empilhamento de formas de pirâmide, como ilustrado na Figura 6(b). O seu tempo de impressão é mais rápido quando comparado com o preenchimento cúbico, e o consumo de filamento segue o mesmo padrão (GOLDSCHMIDT, 2025).

A respeito do preenchimento “Giróide”, é considerada a configuração mais utilizada pelos usuários, como apresentado na Figura 6(c). Ele oferece um tempo de impressão pequeno e consumo de filamento relativamente baixo, porque não há linhas cruzadas na camada e, por causa desse fato, faz-se estender o tempo de processo. Para utilizá-lo, é necessário colocar suportes na peça e ainda permite a inserção de líquido ou outro fluido nas cavidades vazias da peça ao longo da impressão (GOLDSCHMIDT, 2025).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise das frequências envolvidas na impressão 3D, foram adotadas duas metodologias. Inicialmente, o teste de impacto permitiu identificar as frequências naturais da impressora e seus modos de vibração, com base na medição da vibração de seus componentes (mesa, cabeçote extrusor e estrutura). Em paralelo, as frequências de operação foram coletadas em tempo real durante a impressão, enquanto diferentes parâmetros, como velocidade, densidade e padrão de preenchimento, eram ajustados.

### 4.1 Configuração para aquisição de dados do teste de impacto

O procedimento adotado consistiu na execução de testes de impacto em uma impressora 3D FFF, com o uso de um martelo de impacto, seguida pela coleta e análise dos dados de vibração por meio da análise espectral de Fourier.

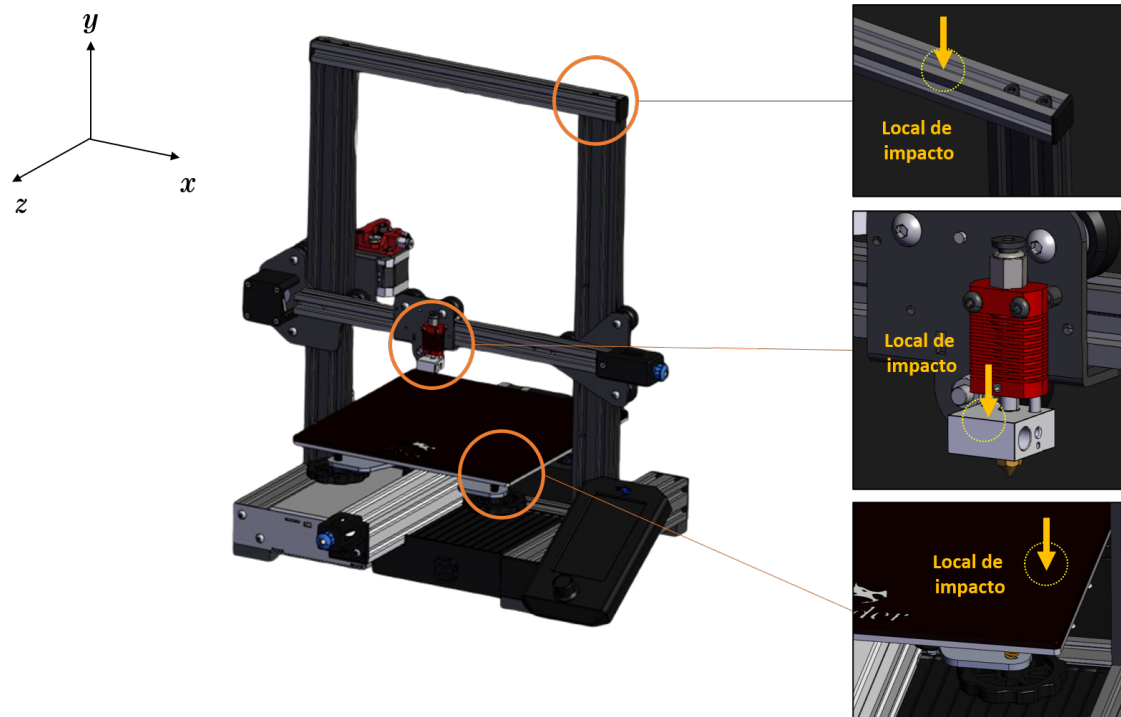
Os instrumentos e equipamentos utilizados para o ensaio foram:

- Impressora 3D Creality Ender 3 V2;
- Chassi National Instruments NI CDAQ-9174;
- Módulo de entrada 4 Canais National Instruments NI 9234;
- Acelerômetro PCB 333B30 SNLW 69303;
- Cera especializada para fixação dos sensores;
- Martelo de impacto PCB 086C03 SN LW 43894;
- *Software* LABView Instruments 2013;
- *Software* MATLAB® 2023a;

#### 4.1.1 Posicionamento dos sensores

Na Figura 7, são mostrados os locais de impacto realizados na mesa de impressão, no cabeçote extrusor e na estrutura da impressora 3D, bem como o sistema de coordenadas adotado para o teste de impacto.

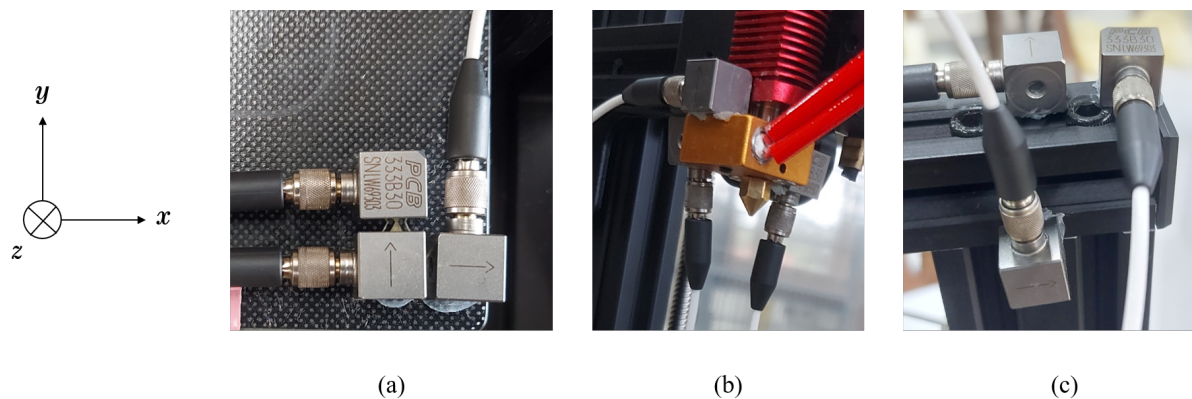
Figura 7 – Locais de impacto para a obtenção das frequências naturais



Fonte: GrabCAD, 2022 (adaptado).

Posteriormente, definiram-se três áreas principais da máquina para excitar e monitorar as frequências: mesa de impressão (7a), cabeçote extrusor (7b) e estrutura vertical (7c). A posteriori, os sensores foram fixados com cera de fixação rápida e posicionados nas áreas definidas, priorizando pontos na extremidade (mesa de impressão e estrutura) e na base do componente (cabeçote extrusor). Dessa forma, o posicionamento dos sensores escolhidos é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Posicionamento dos sensores para a obtenção das frequências naturais



(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ademais, a ordem dos canais da placa de aquisição de dados foi padronizada durante o teste de impacto: X (Canal 1), Y (Canal 2) e Z (Canal 3), de modo a facilitar a análise dos resultados numéricos e gráficos pelo *software* MATLAB.

#### 4.1.2 Taxa de amostragem e quantidade de amostras

O *software* LabVIEW é um ambiente de programação gráfica que fornece aceleradores de produtividade exclusivos para o desenvolvimento de sistemas de teste. O ambiente de programação dele integra, de forma simplificada, o hardware para aplicativos de engenharia para adquirir dados de *hardware* de terceiros (LABVIEW, 2025). Assim, a partir do seu uso, os dados de *input* definidos no *software* foram:

- Tempo total do teste: 50 segundos;
- Frequência de amostragem: 3200Hz;
- Quantidade de amostras: 160.000<sup>1</sup>;

Após todas as configurações realizadas e com os acelerômetros fixados nas áreas definidas com cera de fixação rápida, indicada pelo fabricante, aplicou-se uma força de impacto próxima ao posicionamento dos acelerômetros, o que era registrado pela placa de aquisição de sinal.

#### 4.1.3 *Software* MATLAB

MATLAB (do inglês *MATrix LABoratory*) é uma plataforma de programação e computação numérica usada por milhões de engenheiros e cientistas para analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos. Ele combina um ambiente de *desktop* ajustado para análise iterativa e processos de *design* com uma linguagem de programação que expressa matemática matricial diretamente. Com matemática, gráficos e programação, ele foi projetado para a maneira como o usuário pensa e o trabalho que faz (MATLAB, 2025).

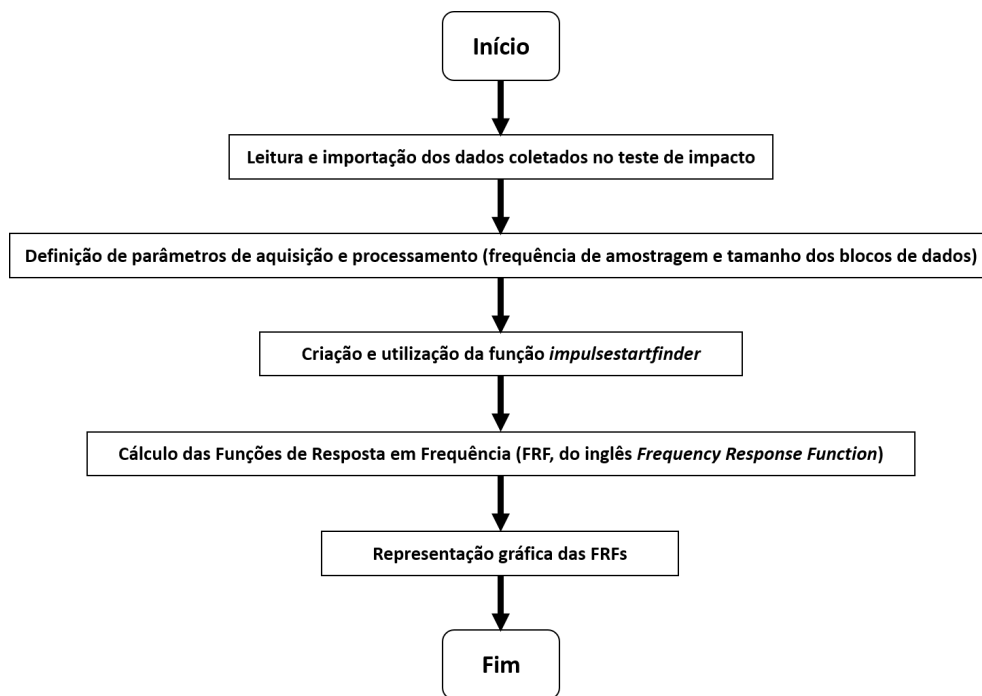
##### 4.1.3.1 Código para o tratamento dos dados do teste de impacto

O processamento dos dados do teste de impacto foi realizado utilizando-se um código desenvolvido em MATLAB, que está ilustrado na Figura 9 na forma de fluxograma.

---

<sup>1</sup>A quantidade de amostras foi determinada pelo produto entre o tempo total do teste e a frequência de amostragem.

Figura 9 – Fluxograma do código para o tratamento de dados do teste de impacto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a análise espectral no MATLAB, usou-se a janela *boxcar* (retangular) e também o comando *pwelch*, que calcula a PSD do sinal de força. Tal função é baseada no método de periodograma modificado e médio de Welch, que reduz a variância da estimativa espectral ao segmentar os dados, aplicar uma janela a cada segmento e depois calcular a média das transformadas de Fourier ao longo dos segmentos (MATLAB, 2025). Em seguida, a partir da PSD, foi possível estimar as FRFs entre a entrada (força do martelo,  $ff$ ) e cada uma das saídas (acelerações  $a1f$ ,  $a2f$  e  $a3f$ ). Para isso, utilizou-se o comando *tfestimate*, que calcula as FRFs, que são funções de transferência no domínio da frequência com base na razão entre o espectro cruzado entre dois sinais e o espectro de potência do sinal de entrada (MATLAB, 2025).

É importante citar a criação e utilização de uma função chamada *impulstartfinder*, que padroniza a extração de trechos do sinal de força obtido em ensaios de impacto com martelo instrumentado, removendo trechos iniciais com ruídos e identificando os instantes de tempo correspondentes aos impactos. Para mais informações, o código completo utilizado está no Apêndice 7.

## 4.2 Configuração para aquisição de dados do ensaio operacional

Para a análise das frequências de operação durante o processo de impressão 3D, a metodologia de aquisição de dados seguiu princípios semelhantes e configurações

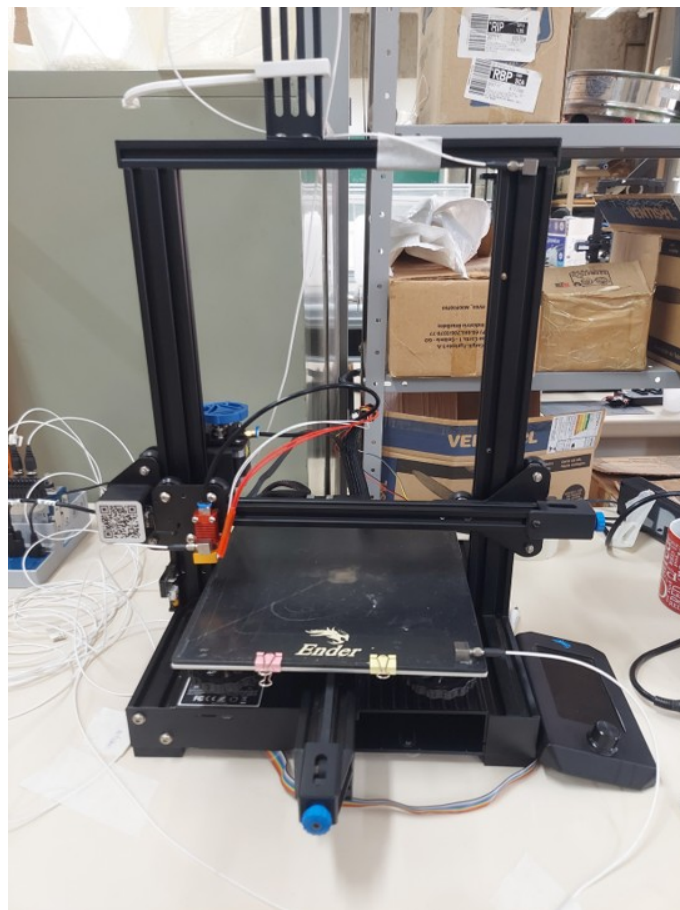
estabelecidas para o teste de impacto.

O posicionamento dos sensores, para a mesa de impressão foi considerado no eixo Z e, para o cabeçote e estrutura da impressora, escolheu-se o eixo Y. Tais escolhas se basearam no fato de que esses eixos foram os que mais obtiveram frequências altas durante o teste de impacto. Assim, os acelerômetros foram fixados nas áreas da mesa de impressão, cabeçote extrusor e estrutura vertical, seguindo esta ordem para a leitura dos canais 1, 2 e 3, respectivamente.

Adicionalmente, os dados de entrada configurados no *software* LabVIEW foram:

- Tempo total do teste: 11 minutos;
- Frequência de amostragem: 3200Hz;
- Quantidade de amostras: 2.112.000<sup>2</sup>;

Figura 10 – Posicionamento dos sensores para obter as frequências de operação



Fonte: Elaborada pelo autor.

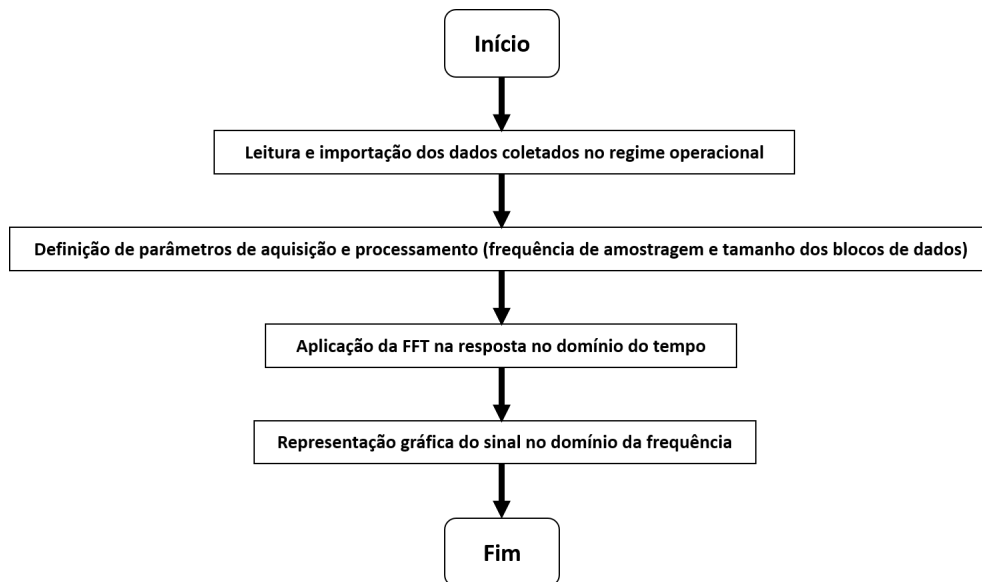
---

<sup>2</sup>A quantidade de amostras foi determinada pelo produto entre o tempo total do teste e a frequência de amostragem.

#### 4.2.1 Código para o tratamento dos dados do ensaio operacional

Similar à Figura 9, o processamento dos dados do regime operacional foi realizado com um código em MATLAB, ilustrado na Figura 11, também na forma de fluxograma.

Figura 11 – Fluxograma do código para o tratamento de dados do regime operacional



Fonte: Elaborada pelo autor.

A FFT foi aplicada utilizando os sinais completos de resposta no domínio do tempo medidos nos três componentes da impressora.

#### 4.2.2 Definição dos parâmetros dinâmicos de impressão

Esta seção visa abranger e estudar as condições operacionais que são relevantes para o estudo da impressão 3D por extrusão. Com isso, os parâmetros estabelecidos foram:

1. Velocidade de impressão: Foram selecionadas três velocidades distintas para avaliar seu impacto no processo. A menor velocidade recomendada pelo fabricante (20 mm/s) foi utilizada inicialmente, representando uma condição de alta precisão. Uma velocidade intermediária de 50 mm/s foi escolhida para representar um cenário de equilíbrio entre o tempo de impressão e a qualidade da peça. Por fim, a maior velocidade recomendada pelo fabricante (80 mm/s), que ainda garante qualidade de impressão, foi incluída para explorar os limites superiores de produtividade e desempenho da máquina.
2. Densidade de preenchimento: Esse parâmetro está ligado ao conceito de que, quanto mais material na camada é depositado, maior a densidade e, conseqüentemente, maior a massa da peça. Isso faz com que a impressora 3D realize mais movimentos à

medida que a densidade do objeto impresso aumenta. Assim, a fim de compreender essa relação, foram definidas três densidades de preenchimento: 20%, 30% e 50%.

3. Padrão de preenchimento: Três diferentes padrões de preenchimento foram escolhidos para analisar a sua contribuição para as propriedades mecânicas e estruturais das peças impressas. Os padrões cúbico, giróide e octeto foram selecionados por suas características geométricas e suas implicações na distribuição de forças e no comportamento geral da estrutura interna da peça.

Além dos parâmetros variáveis, foram estabelecidos parâmetros complementares que permaneceram constantes para todas as 27 combinações de impressão:

- Resolução: Standard Quality – 0,2mm
- Espessura de perímetro: 0,8mm (vertical e horizontal)
- Espessura da parede: 0,8mm
- Número de filetes da parede: 2
- Altura de camada: 0,2mm
- Aderência à mesa: Brim<sup>3</sup>
- Massa: 1g (aproximadamente)

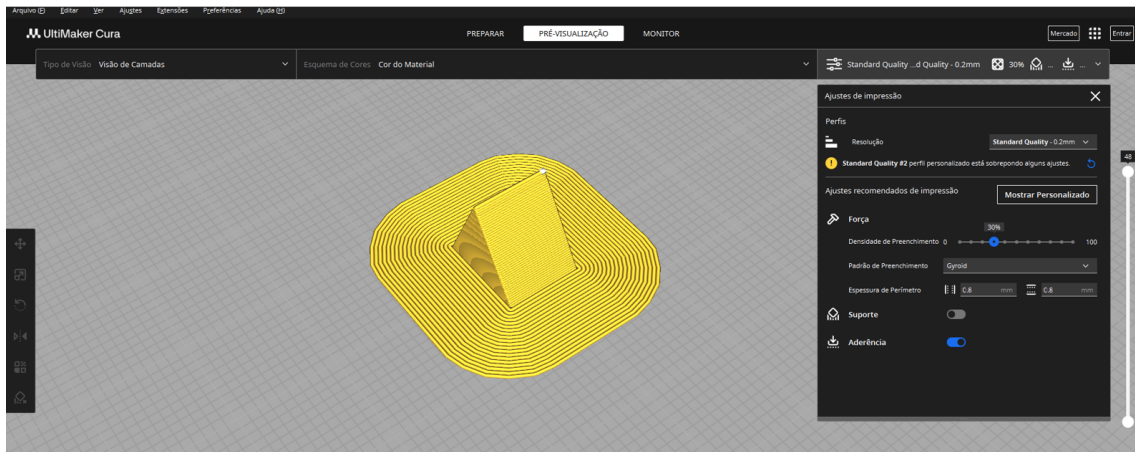
#### 4.2.3 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios apresentam dimensões de 8x8x10mm. A definição do seu formato piramidal de base quadrada foi estabelecida em função do tempo máximo de captação do sinal de frequência da impressora 3D feita pelo acelerômetro, que é de, no máximo, de 11 minutos, como já citado. Com isso, a representação geométrica detalhada desses corpos de prova pode ser visualizada na Figura 12.

---

<sup>3</sup>É um contorno de plástico na base da impressão para melhorar a aderência, que se estende para fora do modelo na primeira camada (3D LAB, 2021).

Figura 12 – Fatiamento dos corpos de prova



Fonte: ULTIMAKER CURA, 2025.

Considerando que cada corpo de prova possui uma massa aproximada de 1g, optou-se por realizar a análise de vibração focando na movimentação dos eixos da impressora, sem a extrusão de filamento. Dessa forma, avaliou-se que uma massa inercial bem reduzida não impactaria de forma significativa as vibrações mecânicas durante o processo de impressão.

Além disso, tal opção por não realizar a impressão dos corpos de prova é explicada pelo fato de que a extrusão de filamento requer que o bico da impressora atinja temperaturas elevadas, tipicamente acima de 200°C. Nessa condição de temperatura, identificou-se uma condição arriscada para os acelerômetros utilizados, podendo causar danos ao dispositivo e também distorcer consideravelmente as medições coletadas, interferindo no resultados gráficos e numéricos deste TCC.

Para todas as 27 combinações analisadas, os arquivos *.gcode* foram adaptados para permitir somente a movimentação dos componentes, desativando o aquecimento da mesa e do bico extrusor.

Tabela 1 – Parâmetros de impressão dos corpos de prova

<b>Nº do corpo de prova</b>	<b>Velocidade de impressão [mm/s]</b>	<b>Densidade de preenchimento [%]</b>	<b>Tipo de preenchimento [-]</b>
7	20	20	Cúbico
2	20	20	Giróide
3	20	20	Octeto
4	20	30	Cúbico
5	20	30	Giróide
6	20	30	Octeto
25	20	50	Cúbico
26	20	50	Giróide
27	20	50	Octeto
1	50	20	Cúbico
8	50	20	Giróide
9	50	20	Octeto
10	50	30	Cúbico
11	50	30	Giróide
12	50	30	Octeto
13	50	50	Cúbico
14	50	50	Giróide
15	50	50	Octeto
16	80	20	Cúbico
17	80	20	Giróide
18	80	20	Octeto
19	80	30	Cúbico
20	80	30	Giróide
21	80	30	Octeto
22	80	50	Cúbico
23	80	50	Giróide
24	80	50	Octeto

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão feitas uma análise dos dados experimentais e operacionais coletados do teste de impacto e das impressões dos objetos 3D definidos, bem como uma comparação entre as frequências naturais e de operação registradas para diferentes combinações entre os parâmetros de impressão escolhidos.

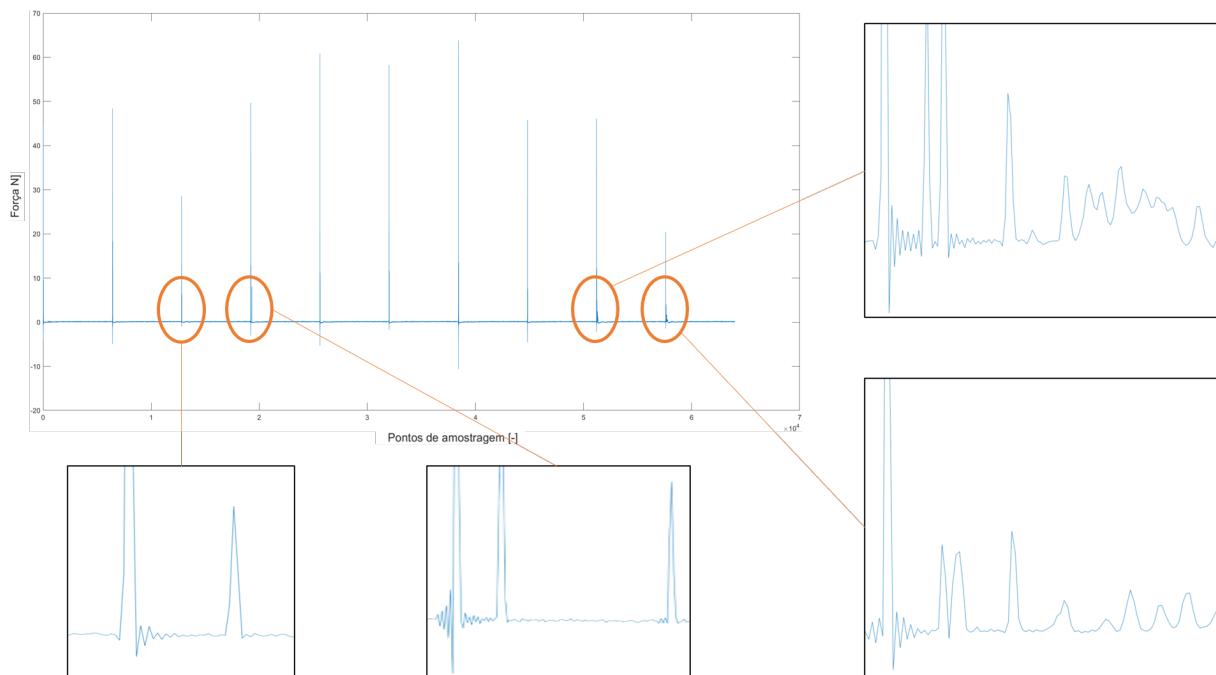
### 5.1 Teste de impacto

Tal procedimento é utilizado para analisar dados de vibração e impressões de objetos 3D. O principal objetivo desta instrumentação é comparar as frequências naturais obtidas experimentalmente com as frequências de operação registradas, considerando diferentes configurações de parâmetros de impressão.

#### 5.1.1 Escolha do material da ponta do martelo de impacto

Inicialmente, selecionou-se uma ponta do tipo *Nylon* para o martelo de impacto devido à sua dureza elevada, o que permite uma melhor excitação das frequências do sistema ao longo do teste de impacto. No entanto, após verificar a ocorrência de repique durante os ensaios experimentais, como mostrado na Figura 13, optou-se por utilizar um outro material na ponta do martelo de impacto a fim de minimizar tal efeito dinâmico indesejado.

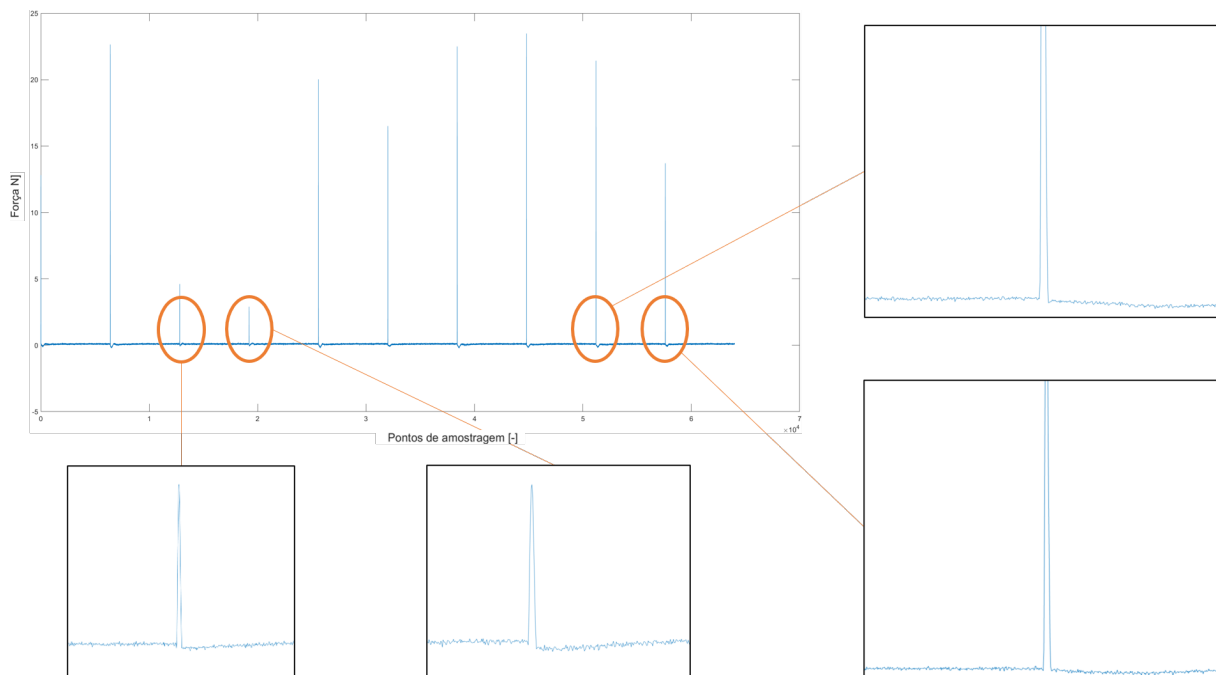
A respeito do repique, este se refere ao momento em que a estrutura ou sistema mecânico sofre após ser submetido a um impacto, de forma que ele retorna e encosta na ponta do martelo de impacto, causando uma segunda vibração ou impacto. Esse fenômeno pode gerar ruídos no sinal de vibração, afetar a precisão da medição e causar danos à estrutura ou sistema mecânico, o que prejudica a análise final dos resultados.

Figura 13 – Presença de repique com martelo de impacto com ponta de *Nylon*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, foi-se necessário trocar a ponta do martelo de impacto por uma que seja de borracha. O material foi escolhido pois a sua superfície mais macia reduz a probabilidade de uma segunda vibração ou impacto. Assim, embora a ponta de borracha não excite de forma eficiente frequências mais altas (maiores ou iguais a 1000Hz) devido à sua característica macia, essa limitação não afetou este estudo, pois a faixa de análise das vibrações definida foi de 0 até 400Hz. Com isso, de acordo com a Figura 14, nota-se que não há repique durante o ensaio, o que deixa o sinal mais evidente durante a análise dinâmica da impressora 3D.

Figura 14 – Ausência de repique com martelo de impacto com ponta de borracha



Fonte: Elaborada pelo autor.

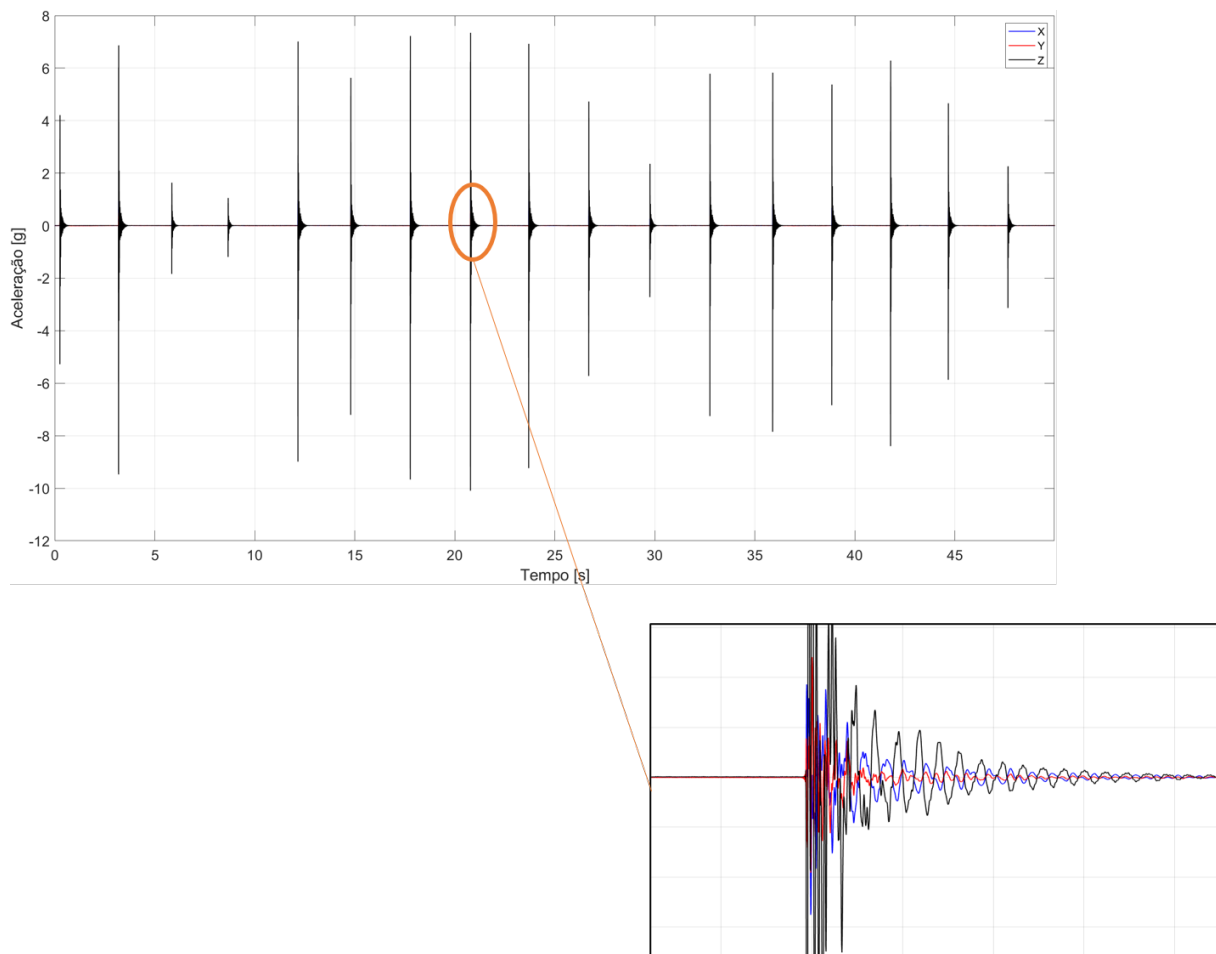
### 5.1.2 Faixa de frequências naturais por área excitada

Como citado na seção 5.1, a faixa de frequências analisada será entre 0 e 400Hz, pois, durante a maioria das impressões de objetos 3D, as frequências de operação estarão dentro da faixa citada, o que deixa este estudo direcionado e aplicável à maioria das situações de uso da máquina.

Inicialmente, a partir dos pontos coletados no teste de impacto, foi possível obter gráficos de aceleração dos sinais registrados pelos sensores no domínio do tempo, como por exemplo a mesa de impressão, mostrado na Figura 15. Em seguida, foi aplicada a estimativa das FRFs no domínio da frequência nas medições dos sinais dos três componentes da impressora 3D (mesa, cabeçote e estrutura). Como o código construído em MATLAB utilizou-se o comando *tfestimate* — que estima a função de transferência entre a entrada X e a saída Y com base na média de periodogramas segundo o método de Welch — conclui-se que o estimador adotado pelo *software* foi o do tipo H1.

Por fim, é importante destacar que foi considerado um amortecimento baixo durante os testes de impacto e, dessa forma, pode-se dizer que a frequência de ressonância é muito próxima da frequência natural.

Figura 15 – Dados de aceleração no domínio do tempo da mesa de impressão



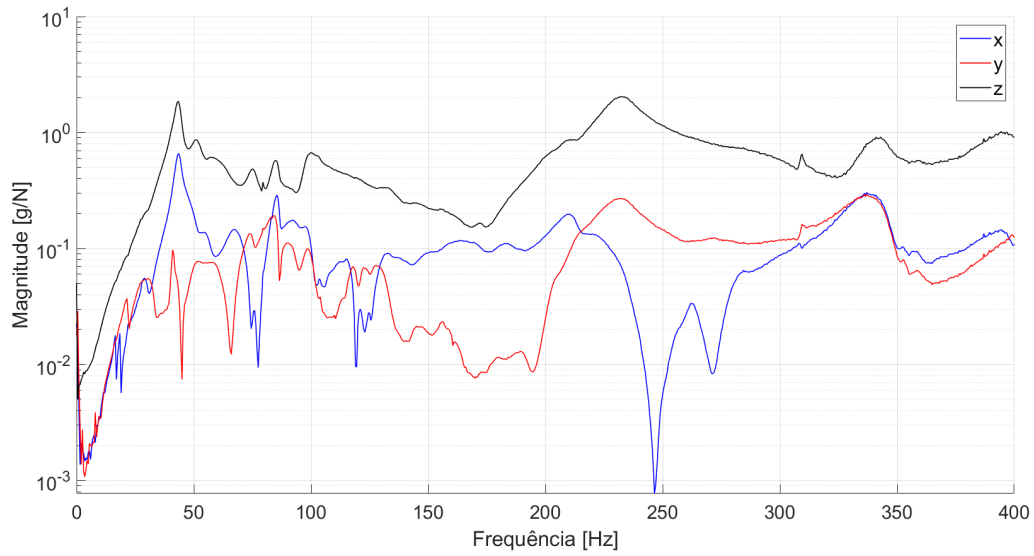
Fonte: Elaborada pelo autor.

análise da FRF obtida para a mesa de impressão mostrou a presença de maiores amplitudes de ressonância na direção Z, com picos de vibração em torno de 43Hz e 232Hz, como observado na Figura 16.

Já para o cabeçote de extrusão, a análise da FRF indicou a presença de frequências de ressonância com destaque para amplitudes significativas nas direções X e Y, que são as mais críticas para o controle dimensional da peça. Na Figura 17, são mostrados os picos de ressonância próximos de 146,5Hz, 247Hz, 344Hz e 395Hz na direção Y, além de um pico em 150Hz na direção Z.

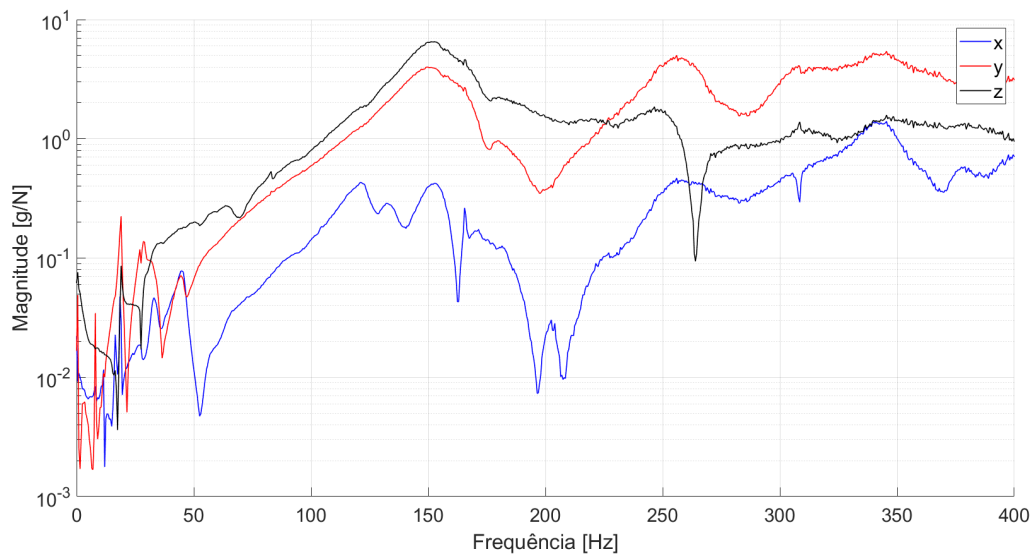
A FRF para a estrutura vertical revelou maior suscetibilidade de vibração na direção Y, sugerindo um comportamento predominante de flexão lateral por conta presença de apenas um parafuso de potência na estrutura da impressora. Os pontos de maior amplitude de vibração são encontrados nas frequências de 251Hz e 322Hz. Com isso, a Figura 18 ilustra a resposta da estrutura vertical.

Figura 16 – FRF da mesa de impressão (resposta ao teste de impacto)



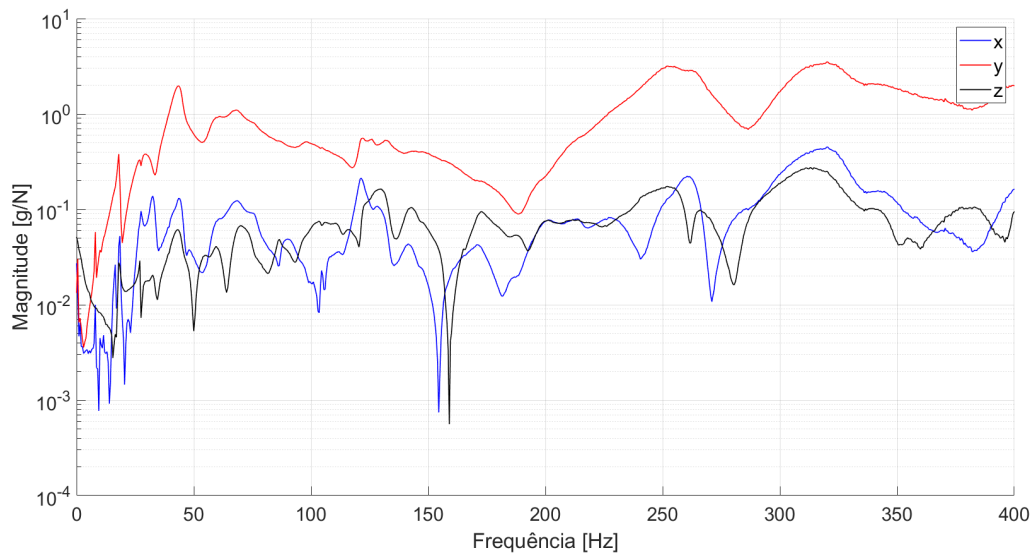
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 – FRF do cabeçote de extrusão (resposta ao teste de impacto)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – FRF da estrutura vertical (resposta ao teste de impacto)



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5.2 Análise das frequências de operação

Ao longo dos resultados obtidos, observou-se que tanto a mesa quanto o cabeçote de impressão apresentaram amplitudes maiores de vibração em seus respectivos sinais durante o processo de calibração e limpeza do bico, ocorridas antes da impressão do corpo de prova. Além disso, os sinais lidos na estrutura da impressora e no cabeçote também exibiram resposta de frequência de operação elevadas durante a impressão da primeira camada da peça.

Como os ensaios experimentais não utilizaram filamentos durante a impressão dos corpos de prova, focando na movimentação dos eixos da máquina, foi possível notar que o bico fica muito próximo da mesa quando realiza a sua limpeza. Em uma situação real em que o filamento fosse utilizado, aquecido e depositado para a formação da peça 3D impressa, o bico faria uma força vertical para baixo no filamento ao longo da deposição do polímero na mesa de impressão, fazendo com que essa força pressione o filamento entre o bico e a mesa, visando uma melhor aderência na primeira camada.

Além disso, em função da geometria piramidal de base quadrada do corpo de prova, observou-se que as camadas finais da impressão (isto é, as superiores) não provocaram vibrações mecânicas significativas. Isso é explicado pelo fato de que, nessa etapa, os deslocamentos dos eixos são menos extensos e menos repetitivos, o que se refletiu na diminuição das amplitudes espectrais no domínio da frequência.

Um ponto importante a ser comentado foi a presença de frequências com valores próximos a 0Hz. Isso pode ser explicado pela presença do nível DC (do inglês *Direct*

*Current*) no sinal, o qual seria uma parte de tensão contínua sobre o sinal gerada por conta da alimentação do acelerômetro que é um resquício de frequência baixa.

#### 5.2.0.1 Análise de vibração para velocidade baixa ( $v = 20\text{mm/s}$ )

O sinal medido na mesa apresentou a maior amplitude de frequência na faixa de 35,5Hz a 36Hz, um valor próximo ao valor da frequência de ressonância encontrada (42Hz), enquanto que o sinal registrado no cabeçote apontou frequências de 133Hz até 135,7Hz durante o processo de impressão da primeira camada do corpo de prova, o que denota um valor próximo do valor de frequência de ressonância encontrada (146,5Hz). Por fim, o sinal medido na estrutura apresentou frequências de operação com maiores amplitudes na faixa de 133Hz a 135Hz.

É importante salientar que os valores obtidos de frequência de operação para o cabeçote e a estrutura na condição de impressão da primeira camada foram muito próximos, o que sugere a influência da vibração da impressora 3D nestes componentes, já que estão interligados. Tal efeito pode ser observado na Tabela 2, uma vez que quando a densidade de preenchimento aumenta para 50% (nos corpos 025, 026 e 027), a vibração no cabeçote aumenta e este valor fica próximo ao valor da frequência registrada na estrutura, confirmando a relação feita. Densidades maiores exigem mais movimentações do cabeçote para realizar o preenchimento, o que aumenta a excitação dinâmica do sistema e favorece a ativação dessas frequências.

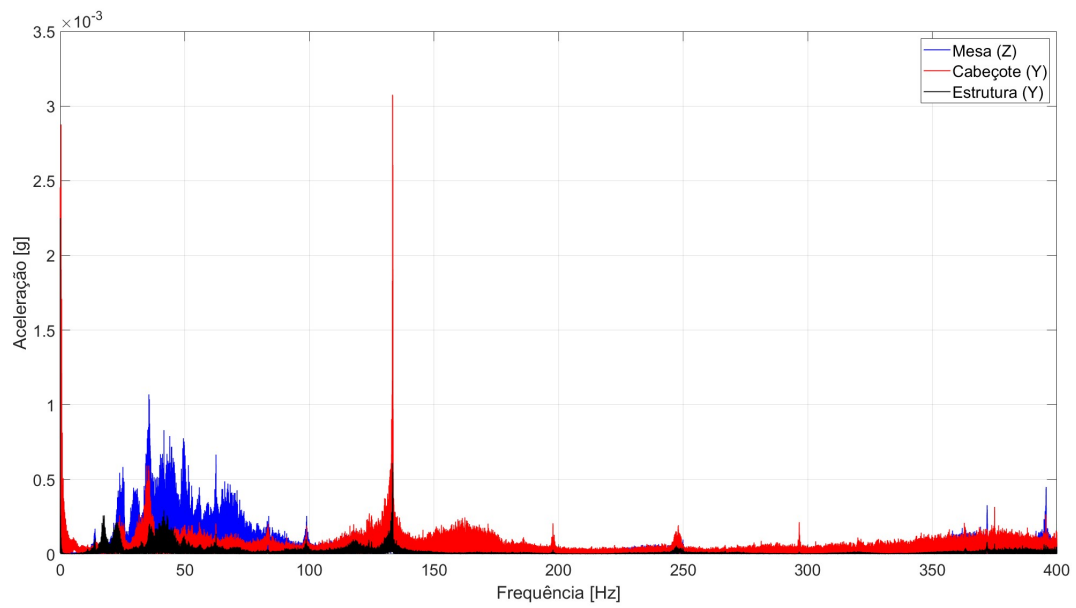
Nota-se também que as frequências de operação encontradas para a mesa, cabeçote e estrutura estão próximas às suas respectivas frequências de ressonância, todavia não são apresentados problemas para a máquina durante o seu funcionamento.

Tabela 2 – Análise de vibração para velocidade baixa ( $v = 20\text{mm/s}$ )

N° do corpo de prova	Mesa de impressão [Hz]	Cabeçote (1ª Camada) [Hz]	Estrutura (1ª Camada) [Hz]
002	35,8	133,0	133,0
003	36,0	133,2	133,1
004	35,8	133,2	133,2
005	35,6	133,5	133,5
006	35,6	132,6	132,5
007	35,5	133,5	133,5
025	35,5	135,7	135,7
026	35,0	135,5	135,6
027	36,0	135,5	135,5
<b>Freq. natural</b>	<b>43,0</b>	<b>146,5</b>	<b>148,0</b>

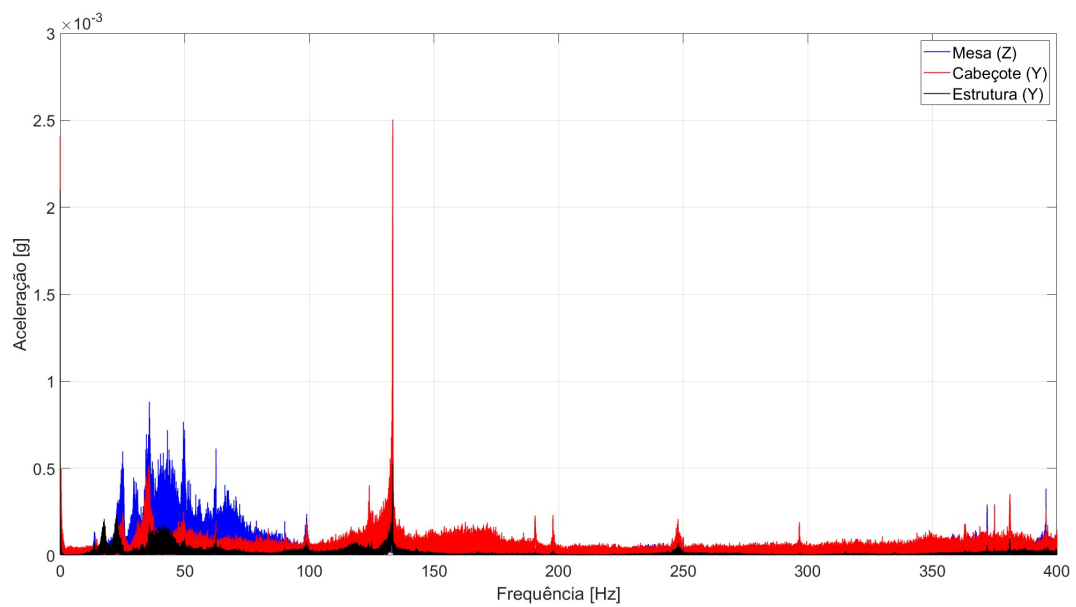
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – FFT do teste 5



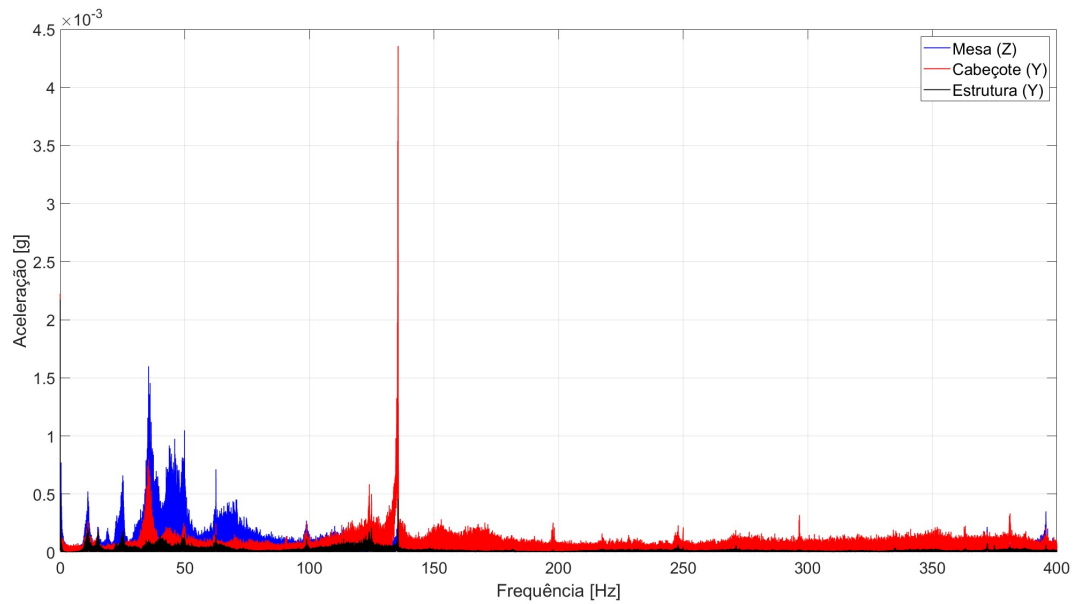
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – FFT do teste 7



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – FFT do teste 27



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 5.2.0.2 Análise de vibração para velocidade intermediária ( $v = 50\text{mm/s}$ )

Já nessa condição, o efeito foi semelhante ao encontrado em  $v = 20\text{mm/s}$ , pois o sinal da mesa apresentou - de forma predominante - a maior frequência na faixa de 35,5Hz a 36Hz, seguido de uma amplitude de 40,5Hz e duas frequências de 49,5Hz. Além disso, o sinal do cabeçote bem como o sinal medido na estrutura registraram frequências de 132,5Hz até 134Hz durante a impressão da primeira camada do corpo de prova.

Tabela 3 – Análise de vibração para velocidade intermediária ( $v = 50\text{mm/s}$ )

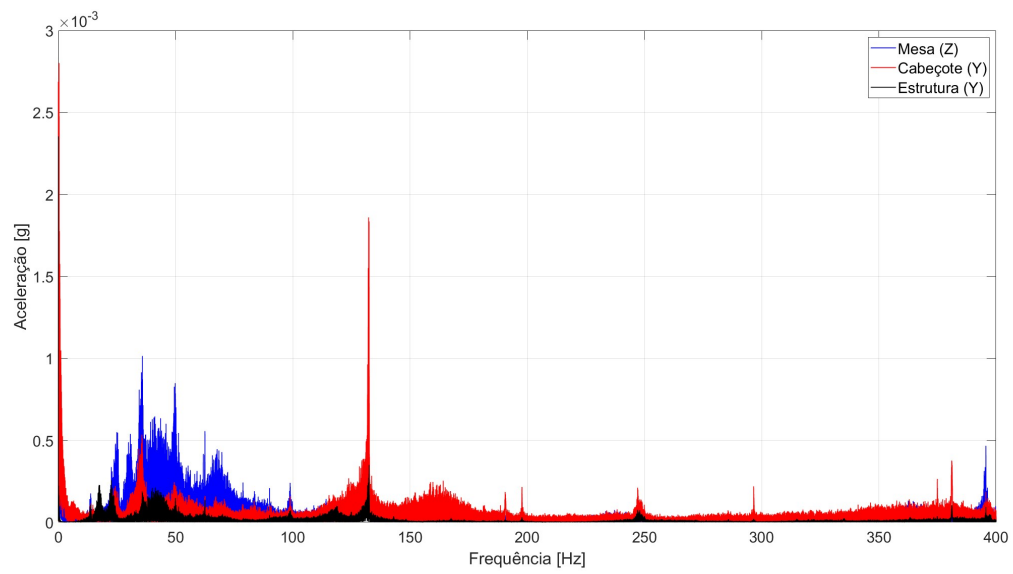
N° do corpo de prova	Mesa de impressão [Hz]	Cabeçote (1ª Camada) [Hz]	Estrutura (1ª Camada) [Hz]
001	35,8	132,5	132,5
008	36,0	133,5	133,5
009	35,5	133,6	133,6
010	49,5	133,5	133,6
011	35,8	133,7	133,6
012	49,5	133,5	133,5
013	36,0	133,9	133,9
014	40,5	133,8	133,9
015	35,7	134,0	134,0
<b>Freq. natural</b>	<b>43,0</b>	<b>146,5</b>	<b>148,0</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que o sinal de vibração medido na mesa apresentou uma amplitude predominante seguida por múltiplos picos secundários adjacentes. A amplitude máxima, em alguns corpos de prova, ocorreu antes da frequência de ressonância (como nos corpos de prova 001, 008, 009, 011, 013, 014 e 015), enquanto que em outros ela se manifestou após esse ponto (como nos corpos 010 e 012). Nesse contexto, a variação pode estar relacionada à mudança de distribuição da massa ao longo do ensaio ou um comportamento não linear da estrutura, que podem afetar os componentes móveis da impressora 3D.

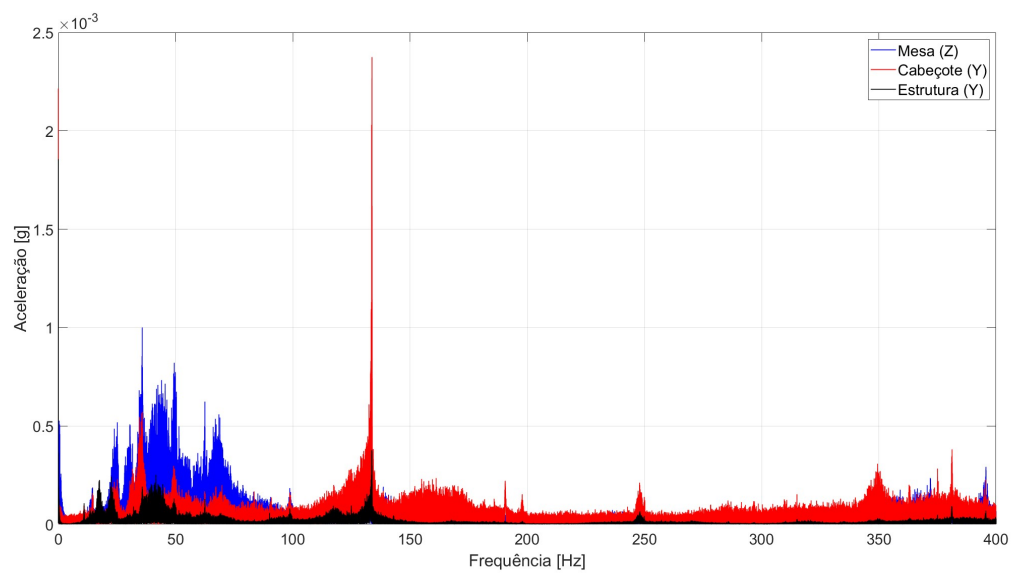
Novamente, assim como em  $v = 20\text{mm/s}$ , a densidade de preenchimento para 50% impactou no aumento das vibrações mecânicas no cabeçote e estrutura nos corpos de prova 013, 014 e 015. Além disso, a influência da vibração da impressora no cabeçote e na estrutura bem como a ausência de problemas da máquina mesmo com as frequências de operação próximas às frequências de ressonância foram observadas nessa condição.

Figura 22 – FFT do teste 1



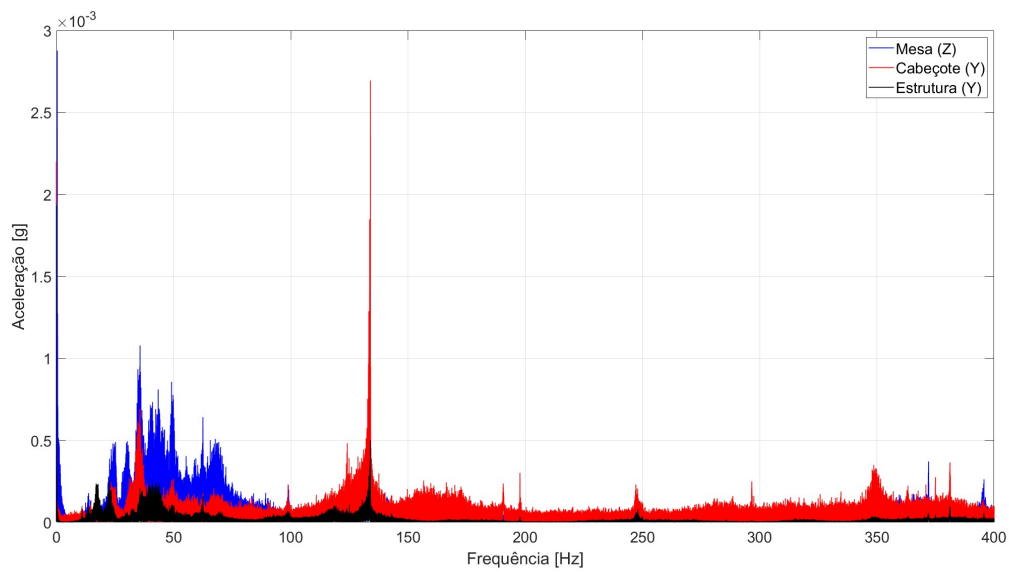
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – FFT do teste 11



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – FFT do teste 15



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.0.3 Análise de vibração para velocidade alta ( $v = 80\text{mm/s}$ )

Por fim, de forma similar, o comportamento do sinal nessa condição se pareceu com as outras duas condições, em que o sinal da mesa registrou a maior frequência na faixa de 35,Hz a 36Hz, o sinal medido no cabeçote apresentou frequências de 132,5Hz até 135Hz durante o processo de impressão da primeira camada do corpo de prova. Ademais, o sinal medido na estrutura apresentou frequências de operação com maiores amplitudes na faixa de 133Hz a 135Hz.

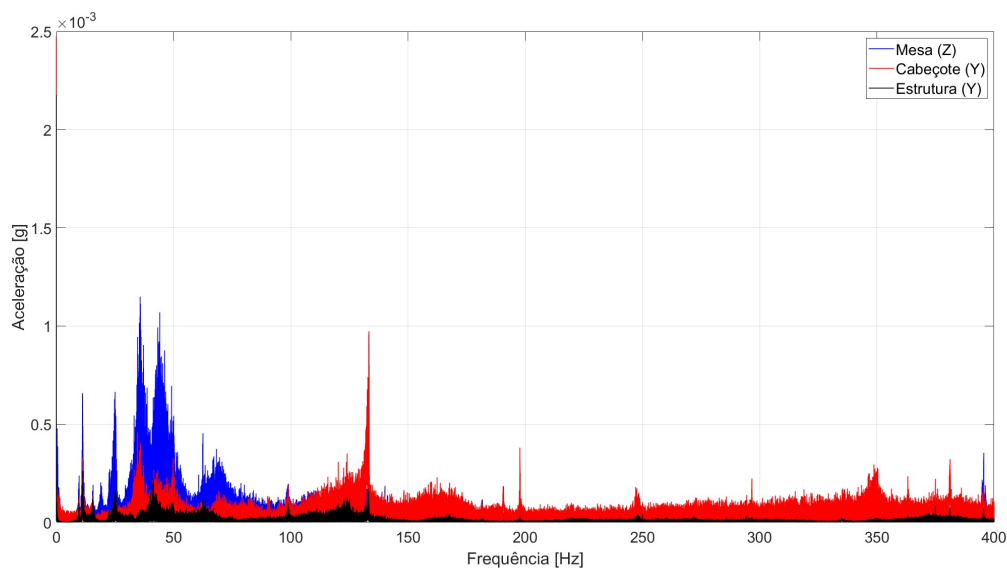
Tabela 4 – Análise de vibração para velocidade alta ( $v = 80\text{mm/s}$ )

N° do corpo de prova	Mesa de impressão [Hz]	Cabeçote (1ª Camada) [Hz]	Estrutura (1ª Camada) [Hz]
016	35,5	132,8	133,0
017	35,5	133,9	134,0
018	36,0	134,5	134,5
019	36,0	134,5	134,5
020	36,0	134,5	134,5
021	35,5	134,5	134,5
022	36,0	135,0	135,0
023	36,0	135,1	135,0
024	35,0	135,0	135,0
<b>Freq. natural</b>	<b>43,0</b>	<b>146,5</b>	<b>148,0</b>

Fonte: Elaborada pelo autor.

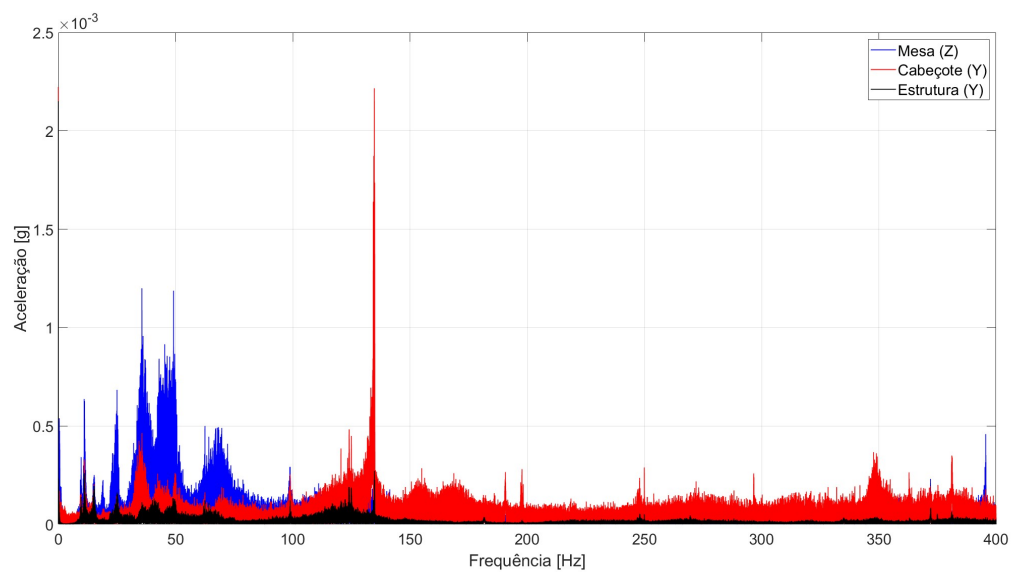
Assim como visto para velocidades baixa e intermediária, as análises de densidade de preenchimento para 50%, influência de vibrações da impressora 3D e a proximidade das frequências de ressonância e de operação sem danos à estrutura também se aplicaram nesta condição.

Figura 25 – FFT do teste 16



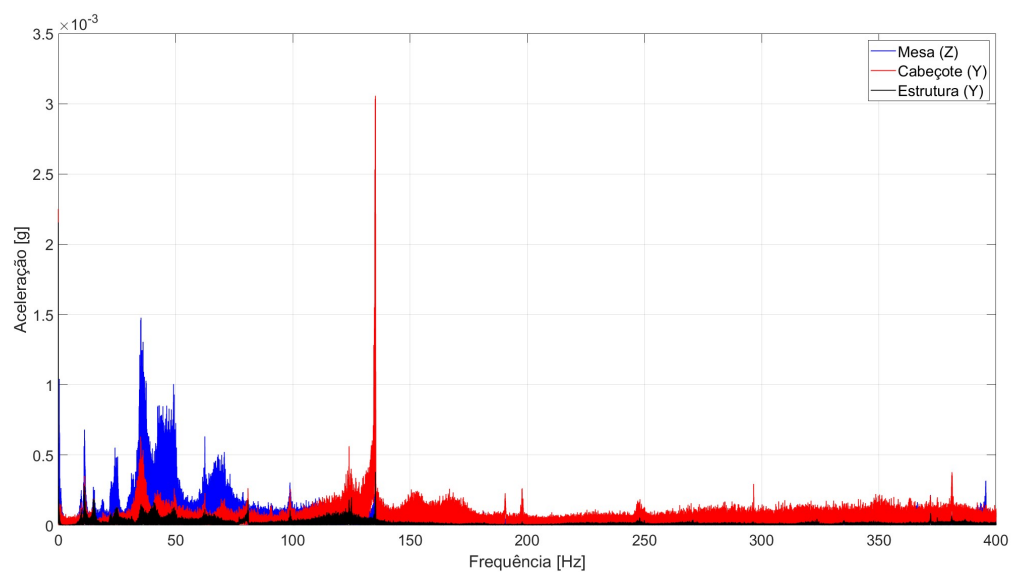
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – FFT do teste 20



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – FFT do teste 24



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.2.1 Análise de RMS do sinal de vibração em regime operacional

O cálculo do RMS é um método bastante popular na classificação de parâmetros de sistemas de energia (WANG; BOLLEN, 2004). O monitoramento de vibração tem sido

amplamente utilizado em sistemas mecânicos para avaliar o desempenho dinâmico de componentes e identificar falhas em estágio inicial (RILEY et al., 1999).

Para quantificar a intensidade vibracional observada, os cálculos do valor RMS foram realizados sobre os dados coletados de cada ensaio. É comum que os valores de aceleração estejam na unidade de medida 'g', a qual corresponde à aceleração da gravidade padrão. Assim, essa padronização é usada, pois muitos acelerômetros são calibrados para fornecer medições já para esta escala, inclusive o modelo utilizado neste TCC. Além disso, esta unidade de medida permite expressar a intensidade das vibrações em máquinas e estruturas de forma comparativa à própria força da gravidade.

Tabela 5 – Valores RMS de aceleração por componente

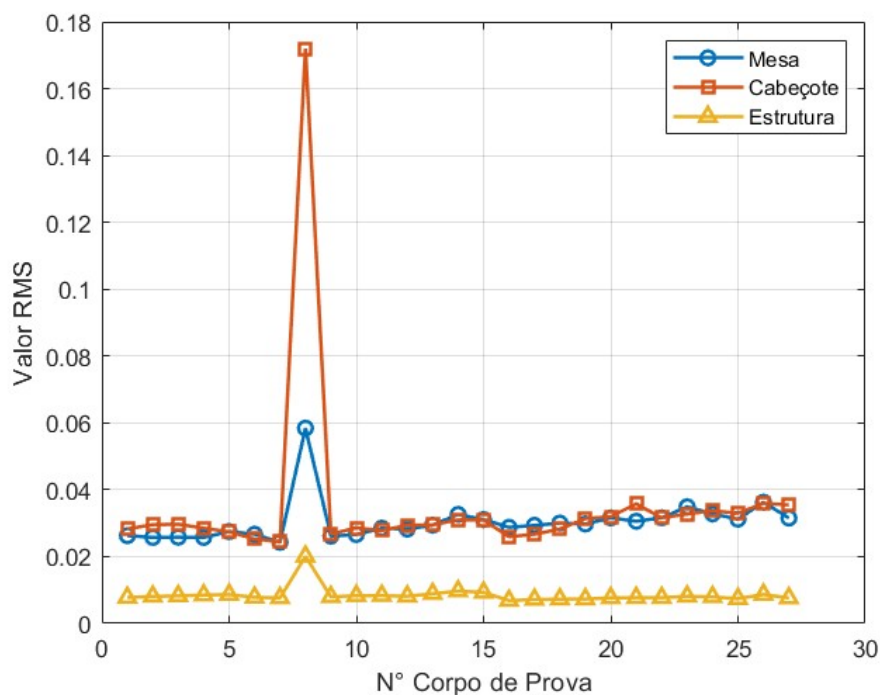
Nº do corpo de prova	Velocidade de impressão [mm/s]	Densidade de preenchimento [%]	Tipo de preenchimento [-]	Mesa (Eixo Z) [g]	Cabeçote (Eixo Y) [g]	Estrutura (Eixo Y) [g]
007	20	20	Cúbico	0,0243	0,0245	0,0077
002	20	20	Giróide	0,0257	0,0296	0,0081
003	20	20	Octeto	0,0258	0,0297	0,0082
004	20	30	Cúbico	0,0257	0,0285	0,0085
005	20	30	Giróide	0,0275	0,0274	0,0087
006	20	30	Octeto	0,0267	0,0253	0,0078
025	20	50	Cúbico	0,0312	0,0330	0,0074
026	20	50	Giróide	0,0363	0,0359	0,0087
027	20	50	Octeto	0,0315	0,0355	0,0076
001	50	20	Cúbico	0,0263	0,0283	0,0078
008	50	20	Giróide	0,0584	0,1720	0,0201
009	50	20	Octeto	0,0261	0,0268	0,0080
010	50	30	Cúbico	0,0266	0,0286	0,0083
011	50	30	Giróide	0,0285	0,0278	0,0083
012	50	30	Octeto	0,0282	0,0294	0,0081
013	50	50	Cúbico	0,0294	0,0295	0,0089
014	50	50	Giróide	0,0326	0,0310	0,0097
015	50	50	Octeto	0,0311	0,0309	0,0093
016	80	20	Cúbico	0,0288	0,0260	0,0068
017	80	20	Giróide	0,0293	0,0267	0,0072
018	80	20	Octeto	0,0300	0,0282	0,0073
019	80	30	Cúbico	0,0298	0,0314	0,0073
020	80	30	Giróide	0,0316	0,0320	0,0077
021	80	30	Octeto	0,0306	0,0358	0,0077
022	80	50	Cúbico	0,0316	0,0316	0,0077
023	80	50	Giróide	0,0349	0,0327	0,0081
024	80	50	Octeto	0,0328	0,0338	0,0079

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos valores da Tabela 5, verifica-se que a mesa e o cabeçote mostram níveis de vibração RMS significativamente maiores que a estrutura neste ensaio, já que medem a intensidade média da vibração, ou seja, quanto maior o valor RMS, maior a energia de vibração presente naquele ponto e para aquele corpo de prova.

Ao comparar os valores RMS da mesa, cabeçote e estrutura para um mesmo corpo de prova, identifica-se que o segundo corpo de prova teve os maiores valores de RMS registrados. Ele apresenta características de velocidade média (50mm/s), densidade de preenchimento de 20% e preenchimento do tipo giróide. Tal comportamento, é mostrado na Figura 28 para os três componentes de estudo da impressora 3D. O valor do RMS da mesa para o mesmo corpo de prova (0,0584g) é o mais elevado, seguido do RMS do cabeçote (0,1720g, um valor consideravelmente superior aos demais corpos de prova, que se mantêm na faixa de 0,02g a 0,03g) e o RMS da estrutura (0,0201 g, apesar de ser um aumento com proporção menor).

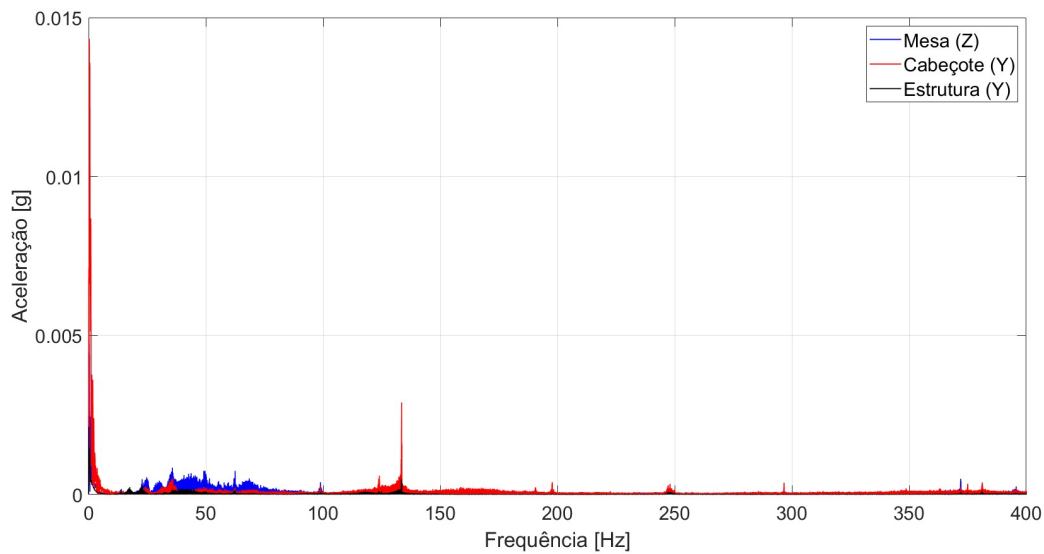
Figura 28 – Valores RMS de aceleração por componente



Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente, pode-se avaliar sobre a ocorrência de ressonância, todavia, o pico predominante no gráfico de FFT deste corpo de prova, de acordo com a Tabela 3 e Figura 29, está próxima mas não é suficiente para a ocorrência da condição de ressonância.

Figura 29 – FFT do teste 8

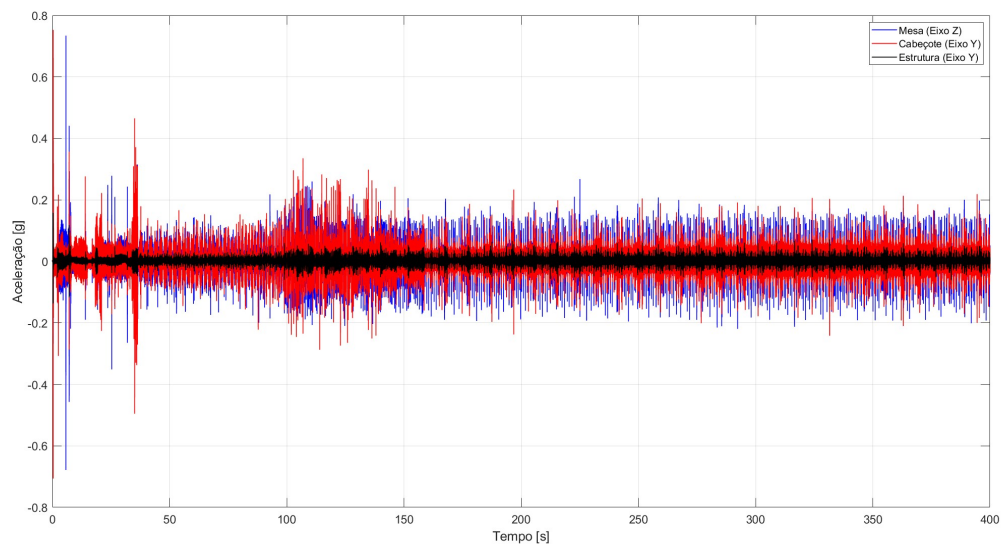


Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando se analisa o comportamento do corpo de prova 8 em relação ao domínio do tempo, mostrado na Figura 30, observa-se vibrações iniciais durante o início de impressão, quando o cabeçote e a mesa se movimentam para atingir os sensores fim de curso (como se fosse o comando *auto-home* da impressora) e, então, iniciar o processo de limpeza do bico. A posteriori, nota-se um segundo pico do sinal no cabeçote extrusor, ocasionado pelo reposicionamento da extrusora após a limpeza do bico. Em seguida, pela influência da geometria piramidal da peça impressa, o sinal tende a se estabilizar ao longo do tempo após a realização da impressão da primeira camada.

Tal comportamento inicial do *auto-home* e limpeza do bico são comandos padrão realizados pelo *.gcode*, logo o valor de RMS deveria ser alto para os demais corpos de prova, o que não acontece na prática.

Figura 30 – Dados de aceleração no domínio do tempo do corpo de prova 8



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, pode-se considerar erros de experimento como variáveis não controladas ao longo dos ensaios, como: ruídos, movimentos bruscos na superfície em que a máquina está posicionada ou algum tipo de interferência externa durante os experimentos. Além disso, pode-se ocorrer falhas temporárias de componentes da impressora, condições ambientais do espaço, estado da máquina ou perda de contato entre sensor e o módulo de entrada (adotando um comportamento exponencial).

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma abordagem experimental voltada à análise de vibrações em uma impressora 3D FFF, com o intuito de identificar o comportamento dos sinais das frequências de ressonância e operação medidos. Por meio da aplicação da FRF nos sinais coletados no teste de impacto, foram determinadas as frequências de ressonância a partir das medições de vibração da mesa, cabeçote e estrutura e, posteriormente, comparadas com os sinais de resposta espectral no regime operacional obtidas sob diferentes parâmetros de impressão.

Inicialmente, para o teste de impacto realizado, a escolha da ponta de borracha para o martelo de impacto mostrou-se eficaz na eliminação do repique, o que garantiu qualidade do sinal para a análise das frequências.

Na análise das frequências de operação, os resultados mostraram que as maiores amplitudes de vibração ocorreram durante as etapas de limpeza do bico e calibração da máquina, ocorridos logo no início da impressão 3D. Assim, os sinais medidos na mesa, cabeçote e estrutura apresentaram valores próximos às suas respectivas frequências de ressonância, mas, de modo geral, não foram observados problemas no funcionamento da impressora, indicando que a máquina operou fora da condição crítica de ressonância. Além disso, o parâmetro de densidade de preenchimento de 50% geram mais vibração ao longo do processo de impressão, uma vez que densidades maiores exigem mais movimentações do cabeçote para realizar o preenchimento, o que aumenta a excitação dinâmica do sistema e favorece a ativação dessas frequências.

Apesar de a extrusão ter sido desconsiderada durante os testes de operação, a análise das faixas de frequência mostrou-se válida para a identificação das frequências de ressonância sem afetar os sensores e a integridade dos dados registrados. Essa simplificação permitiu uma abordagem mais controlada, embora estudos futuros devam considerar a influência da massa do filamento e da alta temperatura da mesa e do cabeçote.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se que usuários e fabricantes de impressoras 3D considerem as frequências de ressonância dos componentes estruturais ao definir os parâmetros de impressão, sobretudo a velocidade e a densidade de preenchimento.

Para futuros trabalhos em vibrações mecânicas e impressão 3D FFF, sugere-se a realização de simulações por elementos finitos e experimentos vibratórios para a validação dos modos vibracionais observados, a aplicação da metodologia em diferentes modelos de impressora e a análise sob condição real de extrusão. Além disso, indica-se explorar outros parâmetros de impressão não abordados neste estudo, tais como: altura de camada, temperatura do bico e mesa, além de testar outros tipos de filamentos para verificação do comportamento vibratório e verificar se há variação nas frequências de operação encontrados neste TCC.

## REFERÊNCIAS

- 3D LAB. *Raft 3D, Brim ou Skirt? Entenda a diferença entre esses recursos!* [S.l.]: <<https://3dlab.com.br/diferencas-entre-raft-3d-brim-e-skirt/?srsId=AfmBOopdD0-B1v4LgCbY0OtIFUni5HJDpyaafQrJaDTpe7tQqyLkwr8J>>, 2021. Acesso em: 26 de julho de 2025.
- BARRIONI, T. T. N. **Análise numérica e caracterização hiperelástica de metamateriais mecânicos produzidos com impressão 3D**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/45945/3/Disserta%20a7%20a3o.pdf>>.
- BIAIAS, K.; DYMAREK, A.; DZITKOWSKI, T. Impact of 3d printer vibration reduction on the quality of its printout. In: SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**. Gliwice, Poland, 2023.
- CREALITY. **Impressoras 3D**. 2023. Disponível em: <[https://www.creality.com/br/products/creality-k2-plus-combo?spm=..product\\_83182551-a448-4a8b-a47f-c559d156cf96.header\\_1.1&spm\\_prev=..index.header\\_1.1](https://www.creality.com/br/products/creality-k2-plus-combo?spm=..product_83182551-a448-4a8b-a47f-c559d156cf96.header_1.1&spm_prev=..index.header_1.1)>.
- CRIAR3D. **Ultimaker Cura: A Ferramenta Essencial para a Impressão 3D de Sucesso**. 2023. Disponível em: <<https://3dcriar.com.br/ultimaker-cura-para-impressao-3d-de-sucesso/>>.
- ELMRABET, N.; SIEGKAS, P. Dimensional considerations on the mechanical properties of 3d printed polymer parts. **Polymer Testing**, Elsevier, v. 90, n. June, p. 106656, 2020.
- GOLDSCHMIDT, B. **Cura Infill patterns: os melhores tipos de preenchimento**. 2025. Disponível em: <<https://all3dp.com/pt/2/cura-infill-padroes-preenchimento/>>.
- GrabCAD. **Creality Ender-3 V2**. [S.l.]: <<https://grabcad.com/library/creality-ender-3-v2-4>>, 2022. Acesso em: 26 de julho de 2025.
- GUASTALDI, A. C. et al. **Bioimpressão no Contexto da Indústria 4.0: Aplicada à Saúde**. São Carlos, SP, Brasil: Editora EDUFSCar, 2023.
- HIBBELER, R. C. **Dinâmica: Mecânica para Engenharia**. [S.l.]: Prentice Hall, 2005. Acesso em: 13 jul. 2025.
- IMPRESSORAS3D.COM. **Partes de uma impressora 3D: Tipos de impressora 3D de acordo com sua estrutura**. 2024. Disponível em: <<https://www.impresoras3d.com/pt/partes-de-uma-impressora-3d/>>.
- JENSEN, N. J.; PARKER, G. G.; BLOUGH, J. R. Base vibration effects on additive manufactured part quality. **Experimental Techniques**, 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40799-023-00629-1>>.
- KOPETS, E. E. et al. Mechanical vibration analysis of a gantry 3d printer. In: **2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)**. St. Petersburg, Russia: IEEE, 2021. p. 1404–1408. ISBN 978-1-6654-0476-1.

- LABVIEW, C. N. **National Instruments LabVIEW**. 2025. Disponível em: <[https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.labview.html?srsltid=AfmBOopLHcHxx1b8\\_7ZK9SH6OYL\\_v5P\\_yA3QEhA76VrptFAsfn-wOCzb#559067](https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.labview.html?srsltid=AfmBOopLHcHxx1b8_7ZK9SH6OYL_v5P_yA3QEhA76VrptFAsfn-wOCzb#559067)>.
- MAIA, L. **Análise de Vibrações em Estruturas**. Dissertação (Tese de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, 2023. Disponível em: <[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/75198/1/2023\\_tcc\\_lmaia.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/75198/1/2023_tcc_lmaia.pdf)>.
- MATLAB. **Math. Graphics. Programming. Designed for the way you think and the work you do**. 2025. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>.
- MOREIRA, R. **Conceiving a Non-Contact Measurement System for the Polymer Temperature at the Nozzle Exit of a FDM 3D Printer**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, 2016. Acesso em: 13 jul. 2025.
- NYB. **Impact Testing**. 2025. <<https://www.nyb.com/impact-testing/>>. Accessed: 13 July 2025.
- OALOO. **Impressão 3D: vantagens e desvantagens**. 2024. <<https://www.oaloo.com.br/impresao-3d-vantagens-desvantagens/>>. Acesso em: 13 jul. 2025.
- PEREIRA, A. F. R. **Análise da resistência mecânica de corpos de provas produzidos por impressão 3D com diferentes parâmetros utilizando o termoplástico PLA**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Maranhão, 2023. Disponível em: <<https://rosario.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/6879/1/ANIELLYFERNANDAREISPEREIRA.pdf>>.
- PILCH, Z.; DOMIN, J. The impact of vibration of the 3d printer table on the quality of print. In: . [S.l.]: European Union, 2015. p. 1,2–6. ISBN 978-1-4673-9452-9.
- PORTELA, S. **O que é impressão 3D? Conheça a tecnologia de impressoras 3D**. 2023. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/tag/tipos-de-preenchimento/?srsltid=AfmBOooQeZRls-mWSzT4e5vrM96EDXsPCSHUC7v6cV9i4ST1kRXoe-8a>>.
- RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4<sup>a</sup> ed.. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.
- RAZGRIZ, G. **Impressora 3D fechada ou aberta? Qual devo escolher?** 2020. Disponível em: <<https://www.makehero.com/blog/impresora-3d-fechada-ou-aberta/?srsltid=AfmBOobyAwGntzdx1cyKC-c6Qs-l5FY9sg-qtIHqi7TizWIASmxP4M7>>.
- REAMAT. **Transformadas Integrais**. 2025. Livro Colaborativo Online – Recurso Educacional Aberto. Licença CC-BY-SA 3.0. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/reamat/TransformadasIntegrais/livro-af/livro.pdf>>.
- RILEY, C. M. et al. Stator current harmonics and their causal vibrations: A preliminary investigation of sensorless vibration monitoring applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 35, n. 1, p. 94–95, Jan./Feb. 1999.
- SMITH JULIUS O., I. **Spectral Audio Signal Processing**. [S.l.]: W3K Publishing, 2011. ISBN 978-0974560731.
- THOMSON, W. T. **Theory of Vibration with Applications**. Fifth edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

TOFAIL, S. A. M. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials Today**, v. 21, n. 1, p. 22–37, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>>.

ULTIMAKER CURA. **Ultimaker Cura**. 2025. Disponível em: <<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>>.

WAHEED, M. F.; BERNADIN, S. In-situ analysis of vibration and acoustic data in additive manufacturing. In: **SoutheastCon**. Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, 2024. p. 1–8. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10500055>>.

WANG, F.; BOLLEN, M. H. J. Frequency-response characteristics and error estimation in rms measurement. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 4, p. 1569, Oct. 2004.

ZHANG, D. et al. Optimization of vibration characteristics of fused deposition modeling color 3d printer based on modal and power spectrum method. **Applied Sciences**, MDPI, v. 9, n. 19, 2019. Published: 3 October 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4162>>.

## 7 APÊNDICES

Script MATLAB para análise de FRF no teste de impacto

```
1 clear;
2 clc;
3 close all;
4
5 files = {'nome_teste.lvm'};
6
7 arqs = length(files);
8 fs = 3200;
9 nblock = 10;
10 block_size = 6400;
11
12 Hc1 = [];Cc1 = Hc1;Pc = [];
13 Hc2 = [];Cc2 = Hc2;
14 Hc3 = [];Cc3 = Hc3;
15 ff = [];a1f = [];a2f = [];a3f = [];
16
17 for k = 1:arqs
18
19     data = importdata(files{k},'\t',24);
20     data = data.data(:,2:5);
21
22     f = data(:,1); % 1 é a força
23     a1 = data(:,2);
24     a2 = data(:,3);
25     a3 = data(:,4);
26     v_pos = impulstartfinder(f,0.7,block_size,nblock);
27
28     ini = v_pos;
29     fim = ini+block_size-1;
30
31     for n = 1:nblock
32         ff = [ff;f(ini(n):fim(n))];
33         a1f = [a1f;a1(ini(n):fim(n))];
34         a2f = [a2f;a2(ini(n):fim(n))];
35         a3f = [a3f;a3(ini(n):fim(n))];
36     end
```

```
37
38     a1f = -a1f;
39
40 end
41
42 P = pwelch(ff,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
43
44 [H1,freq] = tfestimate(ff,a1f,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
45 [H2,freq] = tfestimate(ff,a2f,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
46 [H3,freq] = tfestimate(ff,a3f,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
47
48 [C1,~] = mscohere(ff,a1f,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
49 [C2,~] = mscohere(ff,a2f,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
50 [C3,~] = mscohere(ff,a3f,boxcar(block_size),0,block_size,fs);
51
52 figure;
53 semilogy(freq,P,'b','linewidth',1);
54 xlabel('Frequência [Hz]');ylabel('Magnitude [N^2/Hz]');xlim([0
    400]);grid on;box off;
55
56 figure;
57 semilogy(freq,abs(H1),'b','linewidth',1);hold on;
58 semilogy(freq,abs(H2),'r','linewidth',1);
59 semilogy(freq,abs(H3),'k','linewidth',1);
60 xlabel('Frequência [Hz]','FontSize',18);
61 ylabel('Magnitude [g/N]','FontSize',18);
62 xlim([0 400]);
63 grid on;
64 box off;
65 legend('x','y','z','FontSize',18);
66 ax = gca;
67 ax.FontSize = 18;
68
69 figure;
70 plot(freq,C1,'linewidth',1);hold on;
71 plot(freq,C2,'r','linewidth',1);
72 plot(freq,C3,'k','linewidth',1);
73 xlabel('Frequência [Hz]','FontSize',16);
74 ylabel('Coerência','FontSize',16);
75 xlim([0 400]);
76 grid on;
```

```
77 box off;
78 legend('x','y','z','FontSize',16);
79 ax = gca;
80 ax.FontSize = 16;
```

Script MATLAB para análise de FFT no regime operacional

```
1 clear;
2 clc;
3 close all;
4
5 files = {'test_008.lvm'};
6 arqs = length(files);
7 fs = 3200; %
8 block_size_psd = 6400;
9
10 a1_all = [];
11 a2_all = [];
12 a3_all = [];
13
14 for k = 1:arqs
15     data = importdata(files{k}, '\t', 24);
16     a1_current = data.data(:,2);
17     a2_current = data.data(:,3);
18     a3_current = data.data(:,4);
19     a1_all = [a1_all; a1_current];
20     a2_all = [a2_all; a2_current];
21     a3_all = [a3_all; a3_current];
22 end
23
24 Ts = 1/fs;
25
26 N1 = length(a1_all);
27 N2 = length(a2_all);
28 N3 = length(a3_all);
29 tempo1 = (0:N1-1)*Ts;
30
31 Y1 = fft(a1_all);
32 Y2 = fft(a2_all);
33 Y3 = fft(a3_all);
```

```
34
35 P1 = abs(Y1/N1);
36 P2 = abs(Y2/N2);
37 P3 = abs(Y3/N3);
38
39 P1 = P1(1:N1/2+1);
40 P2 = P2(1:N2/2+1);
41 P3 = P3(1:N3/2+1);
42
43 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
44 P2(2:end-1) = 2*P2(2:end-1);
45 P3(2:end-1) = 2*P3(2:end-1);
46
47 f1= fs*(0:(N1/2))/N1;
48 f2= fs*(0:(N1/2))/N1;
49 f3= fs*(0:(N1/2))/N1;
50
51 figure;
52 plot(f1, P1, 'b', 'LineWidth', 1); hold on;
53 plot(f2, P2, 'r', 'LineWidth', 1);
54 plot(f3, P3, 'k', 'LineWidth', 1);
55 xlabel('Frequência [Hz]', 'FontSize', 18);
56 ylabel('Aceleração [g]', 'FontSize', 18);
57 xlim([0 400]);
58 grid on;
59 legend('Mesa (Z)', 'Cabçote (Y)', 'Estrutura (Y)', 'FontSize',
        18);
60
61 ax = gca;
62 ax.FontSize = 18;
63 ay = gca;
64 ay.FontSize = 18;
```

Script MATLAB para análise de RMS no regime operacional

```
1 clear;
2 clc;
3 close all;
4
5 num_arquivos = 27;
```

```
6 files = cell(1, num_arquivos);
7
8 for i = 1:num_arquivos
9     files{i} = sprintf('test_%03d.lvm', i);
10 end
11
12 rms_mesa_por_arquivo = zeros(num_arquivos, 1);
13 rms_cabecote_por_arquivo = zeros(num_arquivos, 1);
14 rms_estrutura_por_arquivo = zeros(num_arquivos, 1);
15
16 for k = 1:num_arquivos
17     current_file_name = files{k};
18     data = importdata(current_file_name, '\t', 24);
19     a1_current = data.data(:,2);
20     a2_current = data.data(:,3);
21     a3_current = data.data(:,4);
22     rms_mesa_por_arquivo(k) = rms(a1_current);
23     rms_cabecote_por_arquivo(k) = rms(a2_current);
24     rms_estrutura_por_arquivo(k) = rms(a3_current);
25
26 end
27
28 corpo_de_prova_ids = (1:num_arquivos)';
29 results_table = table(corpo_de_prova_ids, rms_mesa_por_arquivo,
30     rms_cabecote_por_arquivo, rms_estrutura_por_arquivo, ...
31     'VariableNames', {'CorpoDeProva', 'RMS_Mesa',
32     'RMS_Cabecote', 'RMS_Estrutura'});
33
34
35 disp('--- Tabela de Valores RMS por Corpo de Prova ---');
36 disp(results_table);
37
38 figure;
39 plot(corpo_de_prova_ids, rms_mesa_por_arquivo, '-o', 'DisplayName',
40     'Mesa', 'LineWidth', 1.5);
41 hold on;
42 plot(corpo_de_prova_ids, rms_cabecote_por_arquivo, '-s', '
43     DisplayName', 'Cabecote', 'LineWidth', 1.5);
44 plot(corpo_de_prova_ids, rms_estrutura_por_arquivo, '-^', '
45     DisplayName', 'Estrutura', 'LineWidth', 1.5);
46 hold off;
47 grid on;
```

```
42 xlabel('N Corpo de Prova');  
43 ylabel('Valor RMS');  
44 legend({'Mesa', 'Cabeçote', 'Estrutura'}, 'Location', 'northeast')  
    ;
```