



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

VICTÓRIA DUTRA KENNERLY

**MONITORAMENTO ATIVO VIA CTT APLICADO À ANÁLISE DE DEFEITOS
EM IMPRESSÃO 3D FDM**

Bauru

2025

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTÓRIA DUTRA KENNERLY

**MONITORAMENTO ATIVO VIA CTT APLICADO À ANÁLISE DE DEFEITOS
EM IMPRESSÃO 3D FDM**

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

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Isaac Ferreira

Bauru

2025

Kennerly, Victória Dutra.

Monitoramento ativo via CTT aplicado à análise de defeitos em impressão 3D FDM / Victória Dutra

Kennerly. - Bauru, 2025

136 p.: il., tabs, fotos.

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

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Fábio Isaac Ferreira

1. Monitoramento. 2. Detecção de defeitos. 3. Processamento de Sinais. 4. Manufatura Aditiva. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VICTORIA DUTRA KENNERLY, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de agosto do ano de 2025, às 10h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de VICTORIA DUTRA KENNERLY, intitulada **MONITORAMENTO ATIVO VIA CTT APLICADO À ANÁLISE DE DEFEITOS EM IMPRESSÃO 3D FDM**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual Paulista UNESP Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JÚNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, Prof. Dr. WENDERSON NASCIMENTO LOPES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Instituto Federal do Pará - IFPA. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR



Documento assinado digitalmente

PAULO ROBERTO DE AGUIAR
Data: 08/08/2025 16:32:00-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A crescente adoção da manufatura aditiva tem impulsionado a inovação em diferentes setores produtivos como por exemplo nas áreas médica e aeroespacial, mas também trouxe desafios importantes relacionados à confiabilidade das peças fabricadas. Defeitos na fabricação, que são indetectáveis pelo equipamento e podem ser imperceptíveis também ao operador da máquina, comprometem a qualidade final dos produtos e geram desperdício de material, tempo e energia, e a ausência de métodos acessíveis e não destrutivos para a inspeção dessas peças limita o avanço tecnológico sustentável da manufatura digital.

Esta pesquisa propõe uma abordagem para detecção de defeitos em peças de impressão 3D por FDM, utilizando processamento de sinais ultrassônicos e seleção otimizada de bandas de frequência.

Ao realizar o monitoramento de qualidade da fabricação, essa metodologia viabiliza a redução de desperdício de insumos, tempo de produção e retrabalho, promovendo um uso mais sustentável de recursos. Além disso, contribui para o aumento da produtividade e da lucratividade, ao evitar defeitos que poderiam comprometer a funcionalidade ou gerar a perda de usabilidade de produtos em escala industrial.

Do ponto de vista de inserção social, econômica e ambiental, a pesquisa fortalece a autonomia tecnológica na manufatura aditiva em impressão FDM e fomenta produções industriais mais sustentáveis.

Tanto no âmbito nacional quanto no internacional, as descobertas oriundas desse trabalho abrem oportunidades para cooperação entre universidades, centros de pesquisa e empresas do setor de manufatura aditiva, estimulando a consolidação de processos inteligentes compatíveis com a Indústria 4.0, a transferência de conhecimento e o desenvolvimento de soluções aplicáveis, escaláveis e ambientalmente responsáveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The growing adoption of additive manufacturing has boosted the innovation in different productive sectors, such as the medical and aerospace fields, but it has also brought important challenges related to the reliability of the manufactured parts. Defects in manufacturing, which are undetectable by the equipment and may also be imperceptible to the machine operator, compromise the final quality of products and generate waste of material, time and energy, and the absence of accessible, non-destructive methods for inspecting these parts limits the sustainable technological advance of digital manufacturing.

This research proposes an approach to detect defects in 3D parts manufactured by FDM, using ultrasonic signal processing and optimized selection of frequency bands. By monitoring manufacturing quality, this methodology makes it possible to reduce input waste, production time and rework, promoting a more sustainable use of resources. Beyond that, it helps to increase productivity and profitability by preventing defects that could compromise the functionality or lead to lose usability for products on a industrial scale.

From a point of view of social, economic and environmental insertion, the research strengthens technological autonomy in additive manufacturing in FDM printing and fosters a more sustainable industrial production.

Both nationally and internationally, the findings of this work create opportunities for cooperation between universities, research centers and companies of the additive manufacturing sectors, encouraging consolidation of smart processes compatible with 4.0 industry, knowledge sharing and the development of applicable, scalable and environmental responsible solutions.

Dedico este trabalho a Deus, por ser minha força e meu guia; à minha família por cada gesto de amor e incentivo; e ao meu filho cuja alegria e companhia me renovam com esperança e motivação todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de toda sabedoria. Foi Ele quem fortaleceu meus passos nos dias difíceis, acalmou minha alma nos momentos de angústia e renovou minha fé sempre que me senti pequena diante dos desafios. Sem Sua presença, nada disso faria sentido.

Ao meu orientador, Paulo Roberto de Aguiar, e ao meu coorientador, Fábio Isaac Ferreira, agradeço por cada palavra de orientação e cada gesto de confiança. Com generosidade e paciência, me ajudaram a transformar incertezas em aprendizados e ideias em descobertas.

Aos meus amigos de laboratório, Paulo Monson, Cristiano Soares, Gabriel David e Thiago Glisoi, que tornaram a jornada mais leve e gratificante por meio de seu apoio, conversas, risadas e orientações. Aos colegas do departamento, Amanda Nerger, Abdo Khoury, Ana Raquel Faccioli, Daniel Garcia, Giovanna Pascolat, Matheus leal e Tiago Forti, pelo convívio, pelas trocas e pela amizade construída no nosso dia a dia acadêmico.

À minha família toda, principalmente minha avó Esmeralda, meu avô Carlos, Tio Eduardo, Tia Karen, Mãe e Pai, agradeço por me amarem e cuidarem de mim mesmo nos dias em que estive ausente, por torcerem por mim com fé e por sustentarem minha caminhada com gestos e orações. As minhas irmãs Yolanda e Lavínia, pela parceria e amizade eterna, e por dividirem a jornada da vida comigo.

Ao meu Tio Anderson, um agradecimento especial por ser meu mentor de vida pessoal e profissional, que desde pequena por meio do seu exemplo me ensinou o caminho da retidão, disciplina e fé, me dando todo o suporte que precisei para conseguir chegar até aqui.

Ao meu filho Victor, companheiro de alma alegre e luz constante nos meus dias — tua presença foi luz e sentido em meio à correria e ao cansaço. E ao meu cãozinho Bacon, por estar ao meu lado, oferecendo sua ternura e companhia fiel, que me acompanharam até as madrugadas mais longas.

As minhas amigas queridas e mulheres maravilhosas: Daiane Bellini, Katia Villanova, Suellen Gomes, Raquel Akiyama, Renata Ortiz, Vitória Benedetti, Liara Coppini e Larissa Miranda, e aos amigos da vida: Vitor Garnica, João Victor Ricci, Augusto Andrade e Ingo Cescatto que sempre estiveram

presentes com escuta, carinho e acolhimento e ao Isaac Loureiro que me ensinou muito do que eu sei sobre tecnologia FDM - meu afeto mais sincero.

A todos que me ajudaram, direta ou indiretamente, com amor ou ciência a chegar até aqui e a realizar este trabalho — meu coração é grato. Que esta conquista não seja apenas um fim de ciclo, mas um começo de uma nova fase abençoada pelo aprendizado que tive com todos que passaram pelo meu caminho e por tudo o que vivi.

“Nesse caso o filósofo será sempre um cometa imprevisível, no sistema solar da cultura, porque o pensar filosófico está sempre no encalço das coisas mais dignas de conhecimento, dos conhecimentos maiores e mais importantes.”

- Friedrich Nietzsche

RESUMO

O processo de manufatura aditiva também conhecido como impressão 3D por Modelagem por Deposição Fundida (FDM) tem sido amplamente empregado na fabricação de peças com geometrias complexas devido à sua versatilidade e custos reduzidos. No entanto ocorrências de defeitos como a falta de filamento ocasionada por falhas no equipamento ou erro na parametrização durante o processo ainda representam um desafio, afetando a qualidade, confiabilidade e padronização dos produtos fabricados. Esse trabalho propõe um sistema de monitoramento ativo baseado na técnica *Chirp Through-Transmission* (CTT) para a detecção e classificação de defeitos na primeira camada impressão que de acordo com a literatura é considerada como base para as camadas subsequentes, sendo determinante para a estabilidade estrutural da peça impressa. A metodologia envolve a aquisição de sinais acústicos durante o processo de impressão para o qual foram realizados ensaios experimentais com a impressão de três condições com defeitos de fabricação que simulam a falha no equipamento ao depositar o filamento e uma impressão de peça íntegra considerada regular, utilizando filamento de Ácido Polilático (PLA). O processamento digital dos sinais foi realizado utilizando o Software Matlab® e foram produzidas análises no domínio do tempo e da frequência permitindo a extração de características que indicam a presença de defeitos nas peças. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do método proposto, com um coeficiente de determinação obtido através da correlação linear de 99,53% para o RMS cumulativo entre os sinais e cada condição de defeito das peças e a segunda banda de frequência indicou uma diferença energética de 52% entre a peça regular e o maior nível de defeito impresso evidenciando a sua capacidade de identificar variações estruturais na primeira camada e contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de controle de qualidade para a indústria da manufatura aditiva.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Impressão 3D, Monitoramento ativo, *Chirp Through-Transmission*, Processamento digital de sinais.

ABSTRACT

The additive manufacturing process known as Fused Deposition Modeling (FDM) has been widely employed in the fabrication of complex geometries due to its versatility and low cost. However, the occurrence of defects such as filament under-extrusion caused by equipment failures or parameterization errors, remain a challenge, affecting the quality, reliability, and consistency of printed parts. This work proposes an active monitoring system based on the Chirp Through-Transmission (CTT) technique for the detection and classification of defects in the first printed layer, which, according to the literature, is considered the foundation for the subsequent layers and is critical for the structural stability of the final part. The methodology involves the acquisition of acoustic signals during the printing process, using experimental trials with three defective printing conditions that simulate extrusion failure, as well as a regular print used as a reference, all using polylactic acid (PLA) filament. Signal processing was performed using Matlab®, including time and frequency domain analyses that enabled the extraction of features indicative of structural defects. The results demonstrate the feasibility of the proposed method, with a coefficient of determination of 99.53% obtained through linear correlation for the cumulative RMS between the signals and each defect condition of the parts and the second frequency band indicated an energy difference of 52% between the regular specimen and the highest level of printed defect assuring the method's ability to identify structural variations in the first layer and its potential contribution to the development of quality control systems for additive manufacturing.

Keywords: Additive manufacturing, 3D Printing, Active monitoring, Chirp Through-Transmission, Digital signal processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de Produção por Impressão 3D	27
Figura 2 - Evolução das tecnologias de MA	30
Figura 3 - Representação da sobreposição de camadas em FDM	32
Figura 4 – Representação da Impressão FDM em camadas	37
Figura 5 - Composição de linhas da primeira camada de fabricação	40
Figura 6 - Transdutor piezoelétrico	47
Figura 7 - Técnicas de Transmissão do Sinal Chirp	51
Figura 8 - Técnica Chirp-Through-Transmission: (a) Estrutura Íntegra; (b) Estrutura Defeituosa	52
Figura 9 - Diagrama de Blocos do Experimento	62
Figura 10 - Banco de ensaio	64
Figura 11 - Mesa de impressão (Peça Regular)	65
Figura 12 - Transdutor PZT utilizado no ensaio experimental	65
Figura 13 - Fluxograma do processo de impressão	68
Figura 14 – Representação CAD da mesa de impressão	69
Figura 15 - Técnica CTT aplicada ao peça de FDM: (a) Estrutura Íntegra; (b) Estrutura Defeituosa	69
Figura 16 - Estratégia Metodológica de Processamento	73
Figura 17 – Processamento no domínio do tempo (Análise Segmentada)	75
Figura 18 - Processamento no domínio da frequência (Bandas B1 e B2)	76
Figura 19 - Processamento baseado em algoritmos de detecção	77
Figura 20 - Processamento da taxa de potência	78
Figura 21 - Análise de preenchimento	79
Figura 22 - Sinais brutos dos cinco chirps	80
Figura 23 - Correlação dos cinco chirps emitidos	81
Figura 24 - Valores RMS para o primeiro chirp de cada condição	83
Figura 25 - Tendência de variação dos valores RMS para cada condição	84
Figura 26 - Soma cumulativa dos valores RMS	86
Figura 27 - Soma cumulativa dos valores RMS (Ampliado)	87
Figura 28 - Média dos valores RMS	88
Figura 29 - Média da soma cumulativa dos valores RMS	89
Figura 30 - Valores RMSD	91
Figura 31 - Ajuste linear dos dados	92
Figura 32 - Transformada de Fourier	94
Figura 33 – FFT: Banda de frequência 143,4kHz - 144,4kHz	95
Figura 34 – FFT: Banda de frequência 169,4kHz - 170,4kHz	96
Figura 35 – Densidade Espectral de Potência (Espectro do sinal para cada condição)	97
Figura 36 – PSD: Banda de frequência 143,4kHz - 144,4kHz	98
Figura 37 - PSD: Banda de frequência 169,4kHz - 170,4kHz	99

Figura 38 - RMS: B1 (143,4kHz - 144,4kHz).....	101
Figura 39 - RMS: B1 (143,4kHz - 144,4kHz) (Pico).....	101
Figura 40 - RMS: Média dos valores da B1	102
Figura 41 - RMS: Soma cumulativa B1	102
Figura 42 - RMS: B2 (169,4kHz - 170,4kHz).....	103
Figura 43 - RMS: B2 (169,4kHz - 170,4kHz) (Pico).....	103
Figura 44 - RMS: Média dos valores da B2.....	104
Figura 45 - RMS: Soma cumulativa B2	104
Figura 46 – Power-Law: B1 (143,4kHz - 144,4kHz)	106
Figura 47 – Power-Law: B1 (143,4kHz - 144,4kHz) (Pico).....	106
Figura 48 – Power-Law: Soma cumulativa B1 (143,4kHz - 144,4kHz).....	107
Figura 49 – Power-Law: B2 (169,4kHz - 170,4kHz)	107
Figura 50 – Power-Law: B2 (169,4kHz - 170,4kHz) (Pico).....	108
Figura 51 – Power-Law: Soma cumulativa B2 (169,4kHz - 170,4kHz).....	108
Figura 52 - CFAR: B1 (143,4kHz - 144,4kHz)	110
Figura 53 - CFAR: Média B1 (143,4kHz - 144,4kHz).....	111
Figura 54 - CFAR: B2 (169,4kHz - 170,4kHz)	111
Figura 55 - CFAR: Média B2 (169,4kHz - 170,4kHz).....	112
Figura 56 - MVD: B1 (143,4kHz - 144,4kHz).....	114
Figura 57 - MVD: Média B1 (143,4kHz - 144,4kHz)	114
Figura 58 - MVD: B2 (169,4kHz - 170,4kHz).....	115
Figura 59 - MVD: Média B2 (169,4kHz - 170,4kHz)	115
Figura 60 - RoP: Banda de frequência 110kHz - 200kHz.....	116
Figura 61 - RoP: Média banda de frequência 110kHz - 200kHz.....	117
Figura 62 - RoP: Soma cumulativa banda de frequência 110kHz - 200kHz....	117
Figura 63 - CFAR: B1 ($v = 2,5 / 2048$ divisões)	130
Figura 64 - CFAR: B1 ($v = 2,5 / 4096$ divisões)	130
Figura 65 - CFAR: B1 ($v = 3,0 / 2048$ divisões)	131
Figura 66 - CFAR: B1 ($v = 3,0 / 4096$ divisões)	131
Figura 67 - MVD: B1 (2048 divisões)	133
Figura 68 - MVD: B1 (4096 divisões)	133
Figura 69 - MVD: B1 (8192 divisões)	134
Figura 70 - MVD: B2 (2048 divisões)	134
Figura 71 - MVD: B2 (4096 div).....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Países líderes em publicações sobre FDM	35
Tabela 2 - Parâmetros de Configuração.....	38
Tabela 3 - Propriedades elétricas do PZT	47
Tabela 4 - Propriedades dimensionais do PZT.....	48
Tabela 5 - Parâmetros de configuração do experimento	64
Tabela 6 - Ficha Técnica das Peças.....	71
Tabela 7 - Relação RMS com níveis de defeitos	88
Tabela 8 - Relação RMS Cumulativo com níveis de defeitos	89
Tabela 9 - Matriz da Correlação de Pearson	93
Tabela 10 - Nomenclatura para bandas de frequências selecionadas	100
Tabela 11 - Avaliação dos processamentos.....	118
Tabela 12 - Processamento do Sinal Todo	120
Tabela 13 - Processamento das Bandas de Frequências B1 e B2.....	120
Tabela 14 - Análise Processamento:	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
ADC	Conversor Analógico-Digital (<i>Analogic-Digital Conversor</i>)
AE	Emissão Acústica (<i>Acoustic Emission</i>)
B1	Banda de Frequência (143,4kHz – 144,4kHz)
B2	Banda de Frequência (169,4kHz – 170,4kHz)
CAD	Projeto Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CDDM	Métrica do Desvio do Coeficiente de Correlação (<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i>)
CFAR	Taxa Coeficiente de Alarme Falso (<i>Coefficient False Alarm Rate</i>)
CLIP	Produção Contínua de Interface Líquida
CTT	<i>Chirp Through-Transmission</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DAQ	Dispositivo de Aquisição de Dados (<i>Data Acquisition</i>)
DFT	Transformada Discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
DLP	Processamento Digital de Luz
Dpi	Pontos por polegada (<i>Dots per Inch</i>)
EBM	Fusão por Feixe de Eletrons (<i>Electric Beam Melting</i>)
FDM	Manufatura por Fusão e Deposição (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FFF	Fabricação por Filamento Fundido (<i>Fused Filament Fabrication</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FIR	Resposta ao impulso finita (<i>Finite Impulse Response</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MA	Manufatura Aditiva
ME	Extrusão de Material (<i>Material Extrusion</i>)
MVD	Desvio do Valor Médio (<i>Mean Value Deviation</i>)
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol (Polyethylene Terephthalate Glycol)
PLA	Ácido Poliático (<i>Polylactic Acid</i>)
PSD	Densidade Espectral de Potência (<i>Power Spectral Density</i>)
Px	Número de pixels em uma imagem
PZT	Transdutor Piezelétrico (Lead Zirconate Titanate)

RMS	Valor Médio Quadrático (<i>Root Mean Square</i>)
RMSD	Desvio do Valor Médio Quadrático (<i>Root Mean Square Deviation</i>)
ROP	Razão de Potência (<i>Ratio of Power</i>)
R²	Coeficiente de Determinação
SHM	Monitoramento da integridade estrutural (<i>Structural Health Monitoring</i>)
SLA	Processo de fabricação por Estereolitografia (<i>Stereolithography</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering</i>)
Std	Desvio Padrão
STL	Formato de Arquivo de Estereolitografia (<i>Stereolithography File Format</i>)
TND	Técnicas Não-Destrutivas
USB	Porta Serial Universal (<i>Universal Serial Bus</i>)
UV	Ultravioleta

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO	21
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	24
2.1.1 Principais Técnicas de Manufatura Aditiva	25
2.1.2 Estado da Arte.....	28
2.1.3 Impressão 3D por Extrusão de Material.....	31
2.1.4 Modelagem por Deposição Fundida (FDM)	31
2.1.5 Software Fatiador	36
2.1.6 Parâmetros de Impressão	37
2.1.7 Primeira Camada de Impressão	38
2.1.8 Filamento de Ácido Polilático (PLA).....	40
2.2 MONITORAMENTO DE DEFEITOS E POTENCIAIS DANOS	41
2.2.1 Monitoramento por Técnicas Não-Destrutivas (TND)	41
2.2.2 Monitoramento por Emissão Acústica (EA).....	42
2.2.3 Monitoramento acústico em FDM	44
2.2.4 Transdutores Piezoelétricos (PZT)	46
2.3 TÉCNICA CHIRP THROUGH-TRANSMISSION (CTT)	49
2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	52
2.4.1 Transformada de Fourier (FFT)	54
2.4.2 Densidade de Potência Espectral (PSD)	55
2.4.3 Taxa de Potência do Sinal (RoP).....	56
2.5 Parâmetros estatísticos	56
2.5.1 Raiz do Valor Quadrático Médio (RMS).....	57
2.5.2 Desvio da Raiz do Valor Quadrático Médio (RMSD).....	57
2.5.3 Power Law.....	58
2.5.4 Taxa de Falsos Alarmes Constante (CFAR).....	59
2.5.5 Desvio do Valor Médio (MVD)	60
2.5.6 Correlação Linear e Correlação de Pearson.....	60
3. MATERIAL E MÉTODOS	62
3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS.....	63
3.2 TESTES PRELIMINARES	66

3.3	PROCESSO DE IMPRESSÃO E MONITORAMENTO	67
3.4	MÉTODO DE ANÁLISE DIMENSIONAL	70
3.4.1	Digitalização de Alta Resolução	70
3.4.2	Classificação dos Defeitos.....	71
3.5	MÉTODO DE PROCESSAMENTO DE SINAIS.....	72
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1	ANÁLISE DE PREENCHIMENTO	79
4.2	AVALIAÇÃO DE REPETIBILIDADE	80
4.3	RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA (RMS)	82
4.4	ENERGIA CUMULATIVA DA RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA	86
4.5	DESVIO DA RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA (RMSD).....	90
4.6	AJUSTE LINEAR E CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	91
4.7	TRANSFORMADA DE FOURIER (FFT).....	94
4.8	DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (PSD).....	96
4.9	ANÁLISE DAS BANDAS DE FREQUÊNCIAS SELECIONADAS.....	99
4.10	RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA (RMS)	100
4.11	POWER-LAW.....	105
4.12	TAXA CONSTANTE DE ALARME FALSO (CFAR).....	109
4.13	DESVIO DO VALOR MÉDIO (MVD).....	112
4.14	TAXA DE POTÊNCIA (RoP).....	116
4.15	AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE	118
4.16	SINTETIZAÇÃO DOS RESULTADOS.....	119
5.	CONCLUSÃO	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
	APÊNDICE A – Estatística CFAR	129
	APÊNDICE B – Estatística MVD.....	132

1. INTRODUÇÃO

A manufatura, de modo geral, refere-se ao processo de transformação de materiais em produtos por meio de diferentes processos produtivos. A hhhhmanufatura aditiva (MA) caracteriza-se pela construção de objetos por meio da adição sucessiva de material em camadas seletivas por meio da extrusão de um filamento, permitindo a criação de geometrias complexas. Conforme definido pela norma ISO/ASTM 52900:2021, que estabelece e define termos usados na tecnologia de manufatura aditiva, a MA representa o princípio de fabricação aditiva, ou seja, um processo que constrói geometrias físicas tridimensionais (3D) por meio da adição controlada e sucessiva de material em camadas diretamente a partir de seu modelo digital. (Ree, 2024)

Existem várias técnicas de impressão 3D, como extrusão de material, estereolitografia, deposição de energia direta e produção contínua de interface líquida. Porém, a técnica mais conhecida de impressão 3D que possui extrusão de material como princípio básico é a Modelagem por Deposição Fundida (FDM, do inglês Fused Deposition Modelling). Nessa técnica, filamentos de termoplásticos são extrudados camada por camada para criar os objetos. No entanto, um dos desafios da FDM é evitar a ocorrência de falhas na impressão que causam defeitos estruturais nas peças, especialmente na primeira camada da impressão, que pode comprometer a qualidade do objeto impresso.

A primeira camada é crucial para uma boa qualidade de impressão por FDM, pois atua como base para as camadas subsequentes, sendo determinante para a estabilidade estrutural da peça impressa. Irregularidades nessa etapa, como falhas no extrusor ou uma má adesão na mesa de impressão podem comprometer a qualidade do produto final. O monitoramento dessa camada possibilita a identificação precoce de tais falhas permitindo uma tomada de decisão assertiva sobre a continuidade ou interrupção do processo. Embora o monitoramento da primeira camada não elimine a possibilidade de defeitos nas camadas posteriores, sua relevância pode ser justificada por sua criticidade no processo.

O desenvolvimento de técnicas não destrutivas para inspeção de defeitos em manufatura aditiva representa um avanço na redução de desperdícios e otimização do processo produtivo. Ao analisar os sinais acústicos coletados

durante a impressão e aplicar métodos de extração de características, busca-se não apenas identificar defeitos, mas também compreender os padrões de sua ocorrência, possibilitando melhorias nos parâmetros de impressão.

O presente estudo contribui para a ampliação do conhecimento sobre monitoramento de falhas em manufatura aditiva, trazendo uma abordagem complementar ao que se encontra na bibliografia quanto ao tipo de monitoramento ao empregar transdutores piezoelétricos de baixo custo e técnicas de análise de sinais para o monitoramento ativo do processo, ou seja, aquele em que o sinal de entrada é conhecido e ele interage com o processo de modo a produzir o sinal de saída para a análise.

Trabalhos anteriores utilizam a técnica por meio do monitoramento passivo (Lopes, 2021), que apenas absorvem os sinais do processo que são coletados como sinal de saída para a análise. Os resultados obtidos podem viabilizar a implementação de sistemas inteligentes de controle de qualidade para fabricação 3D, dado que a técnica ainda não foi testada para essa aplicação, auxiliando no desenvolvimento de processos mais confiáveis, eficientes e de baixo custo. O monitoramento de parâmetros de condição e desempenho faz parte do conjunto de técnicas para manutenções conhecidas como preditiva, corretiva e preventiva, que são consideradas os principais tipos de manutenção em uma produção industrial (Silva de Freitas; Guimarães Baptista, 2016).

A origem deste trabalho está na intenção de uma pesquisa voltado ao desenvolvimento de estratégias de monitoramento de integridade para manufatura aditiva de baixo custo, com foco em aplicações acadêmicas e industriais. A motivação central é o reconhecimento de que, apesar do avanço das tecnologias de impressão, defeitos estruturais ainda ocorrem com frequência e muitas vezes não são detectadas durante o processo, resultando em desperdício de tempo, material e energia.

O principal problema abordado é a ausência de sistemas eficazes de inspeção em tempo real capazes de identificar defeitos desde as primeiras etapas da impressão. Embora a literatura apresente avanços em métodos de monitoramento passivo, nos quais apenas os sinais naturalmente emitidos pelo processo são captados e analisados, ainda são escassos os trabalhos que

exploram abordagens de monitoramento ativo, em que um sinal de entrada conhecido é transmitido e sua resposta analisada para inferência de integridade.

Nesse contexto, o diferencial deste trabalho propõe o uso da técnica *Chirp Through-Transmission* (CTT) com uma abordagem de monitoramento ativo. A técnica consiste na emissão de um sinal tipo *chirp* através da peça, sendo o sinal recebido analisado para detectar alterações causadas por descontinuidades ou defeitos no material. Trata-se de uma técnica comumente aplicada em materiais compósitos ou em inspeções industriais, mas que ainda não havia sido testada em peças fabricadas por FDM.

A pesquisa aqui apresentada diferencia-se de trabalhos anteriores por empregar transdutores piezoelétricos de baixo custo e uma cadeia de processamento digital de sinais aplicada diretamente ao sinal após o emprego da técnica CTT. As análises são realizadas com base em estatísticas como RMS, PSD, correlação, ajuste linear, entre outras, buscando identificar padrões de variação na resposta ultrassônica que indiquem a presença e o grau de severidade de defeitos.

Além de contribuir para a compreensão do comportamento acústico de peças fabricadas por FDM, o presente estudo visa demonstrar que a seleção adequada de bandas de frequência pode melhorar significativamente a sensibilidade das métricas utilizadas. Os resultados obtidos fornecem dados para o desenvolvimento de sistemas inteligentes de controle de qualidade, com potencial aplicação em processos industriais que exijam confiabilidade estrutural desde a etapa inicial de impressão. Ao propor uma abordagem complementar às estratégias de monitoramento passivo já consolidadas na literatura, esta pesquisa avança na direção de sistemas autônomos de inspeção para manufatura aditiva, contribuindo para a consolidação de práticas mais eficientes, preditivas e sustentáveis na produção por impressão 3D.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a detecção e classificação de diferentes condições de defeitos na primeira camada fabricada no processo de impressão 3D do tipo FDM utilizando o método de monitoramento não-destrutivo conhecido

como CTT por meio da caracterização e classificação entre as diferenças nos sinais coletados por transdutores piezoelétricos de baixo custo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A tecnologia FDM, apesar de vantajosa do ponto de vista do custo de produção, ainda apresenta falhas em seu processo quando relacionadas a qualidade de impressão, repetibilidade e precisão, o que tornam importantes os estudos que visam produzir dados para a incorporação de novas tecnologias de monitoramento. Dado que a falta de sistemas de monitoramento faz com que determinados tipos de defeitos ainda permaneçam indetectáveis aos sistemas já existentes, podendo ser observados apenas ao final da impressão, portanto cria-se a necessidade de que um operador humano acompanhe o processo com a função de mitigar desperdícios de material e energia e supervisionando para que as correções que são possíveis e perceptíveis sejam feitas.

Deste modo, existem motivações tanto do ponto de vista científico como do financeiro para tal pesquisa. Científico, pois visa trazer melhoria para o processo e a conquista de um elevado nível de qualidade do objeto fabricado. E financeiro pela redução de custos de produção, que ao realizar a identificação de defeitos na impressão de forma mais rápida, pode economizar tempo de manutenção, energia, material e, consequentemente, recursos financeiros.

O estudo feito por Alexandre et al. (2019) obteve resultados satisfatórios para o monitoramento de remoção de material do objeto no contexto do processo de retificação com a aplicação da técnica CTT utilizando transdutores piezoelétricos. Lopes (2021) empregou transdutores piezoelétricos para monitorar anomalias no processo de impressão 3D FDM e obteve resultados que atestaram a capacidade dos transdutores de coletar sinais do processo e detectar os eventos que simulavam falhas na impressão. Entende-se como uma lacuna de estudo a aplicação de técnica investigativa com foco no estudo do monitoramento da peça fabricada além do estado da máquina, propósito esse que visa ser alcançado por meio desse trabalho.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- 1) Capítulo 1 - Introdução: Apresenta o contexto da pesquisa, os objetivos e a justificativa do estudo, destacando a importância do monitoramento de defeitos em manufatura aditiva.
- 2) Capítulo 2 - Revisão da Literatura: Aborda os conceitos fundamentais relacionados à manufatura aditiva, técnicas de monitoramento de falhas, transdutores piezoelétricos e processamento digital de sinais, além do estado da arte na área de estudo.
- 3) Capítulo 3 - Material e Métodos: Descreve o procedimento experimental adotado, incluindo o banco de ensaios de monitoramento, a coleta de dados e as técnicas utilizadas para análise dos sinais acústicos.
- 4) Capítulo 4 - Resultados e Discussões: Apresenta e analisa os resultados obtidos nos experimentos, discutindo a eficácia do método proposto na detecção de falhas na impressão 3D.
- 5) Capítulo 5 - Conclusões: Resume as principais contribuições do estudo, destacando suas aplicações e possíveis trabalhos futuros na área.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção apresenta uma síntese sobre os principais tópicos que foram abordados na presente pesquisa.

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura, de modo geral, refere-se à transformação de materiais em produtos acabados por meio de diferentes processos produtivos. De acordo com (Beaman et al., 1997), os métodos de manufatura podem ser classificados em três categorias principais:

- a) Subtrativa: consiste na remoção de material indesejado para obter o formato desejado, como ocorre em processos de usinagem.
- b) Conformativa: envolve a modificação do material em uma matriz ou molde complexo, como nos processos de forjamento, moldagem ou fundição.
- c) Aditiva: caracteriza-se pela construção de objetos por meio da adição sucessiva de material em camadas seletivas, como ocorre na extrusão, permitindo a criação de geometrias complexas.

O conceito de fabricação aditiva é fundamentalmente diferente das tradicionais técnicas subtrativas, como usinagem ou conformativas, isto é, moldagem e fundição (Ree, 2024).

Entre essas categorias, a manufatura aditiva, consolidada popularmente como impressão 3D, destaca-se por seu princípio inovador de fabricação, construindo geometrias tridimensionais a partir de informações obtidas de uma representação computacional do objeto. Conforme definido pela norma ISO/ASTM 52900:2021, que estabelece e define termos usados na tecnologia de manufatura aditiva, a MA representa o princípio de fabricação aditiva, ou seja, um processo que constrói geometrias físicas 3D por meio da adição controlada e sucessiva de material em camadas diretamente a partir de seu modelo digital (Beaman et al., 1997; Ree, 2024).

De acordo com Volpato (2018), a MA possui potencial para fabricar geometrias complexas a partir da transformação de uma geometria 3D em uma sequência de geometrias 2D, definindo as camadas que compõem o objeto. O autor também ressalta que as tecnologias de MA se tornaram possíveis pela integração de processos tradicionais de manufatura (como metalurgia do pó, extrusão, soldagem, usinagem CNC etc.) com diversas outras tecnologias (como controles de movimento de alta precisão, sistemas de impressão a jato de tinta, tecnologias laser, feixe de elétrons etc.) e pelo desenvolvimento de materiais adequados a cada um desses processos.

2.1.1 Principais Técnicas de Manufatura Aditiva

As técnicas de manufatura aditiva, ou impressão 3D, evoluíram e se consolidaram de modo a serem classificadas da seguinte forma:

- a) Estereolitografia (SLA): Desenvolvida por Charles Hull, a foto polimerização em cuba, foi a primeira técnica de impressão 3D a ser comercializada, utilizando luz ultravioleta para curar resinas foto poliméricas líquidas, camada por camada (Nagaraju et al., 2023).
- b) Processamento Digital de Luz (DLP): Técnica que utiliza luz projetada para curar resinas líquidas camada por camada, semelhante à estereolitografia, mas com uma abordagem diferente (Li et al., 2023).
- c) PolyJet: Tecnologia que utiliza jatos de material líquido que são curados camada por camada com luz UV (Pugalendhi; Ranganathan; Ganesan, 2019).
- d) Polimerização de Dois Fótons: Técnica que utiliza dois fótons simultaneamente para curar resinas em alta resolução, permitindo a criação de estruturas complexas (Marschner et al., 2023).
- e) Extrusão de Material: (S. Scott, 1992) introduziu a modelagem por deposição fundida (FDM), que extrude filamentos de termoplástico para criar objetos.
- f) Fusão em Leito de Pó, do inglês *Powder Bed Fusion* (PBF): A sinterização seletiva a laser (SLS) foi desenvolvida, utilizando lasers

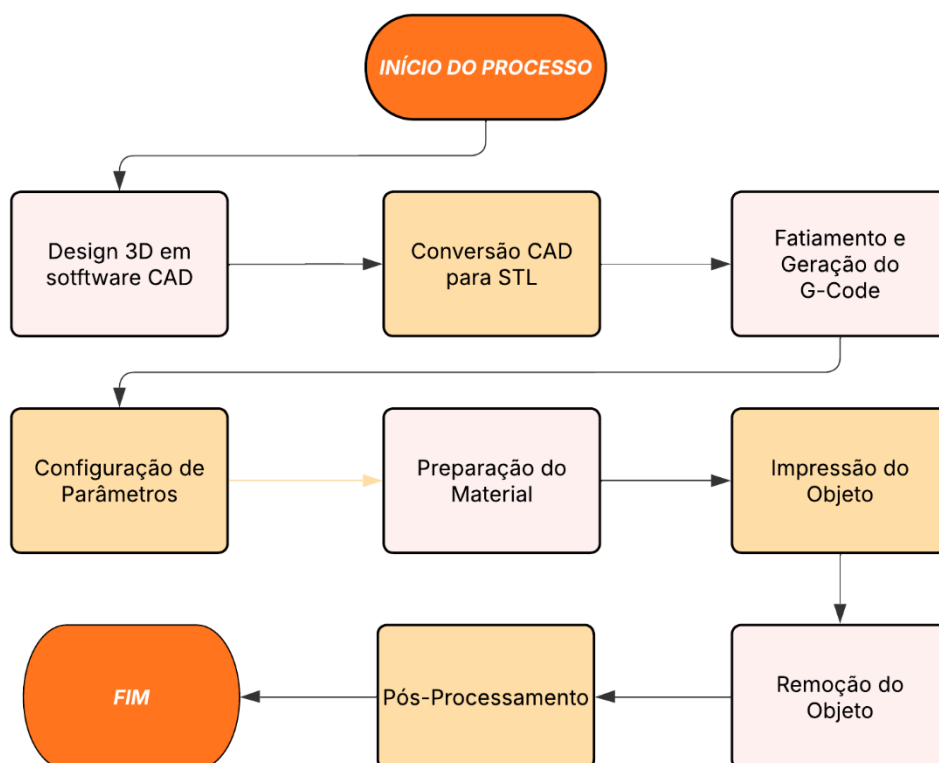
para fundir pós de materiais, permitindo a criação de objetos complexos (Pandav; Karanwad; Banerjee, 2024).

- g) Sinterização por Indução: Uma técnica que utiliza campos eletromagnéticos para aquecer e fundir materiais em pó (Tan et al., 2020).
- h) Fusão por Feixe de Elétrons (EBM, do inglês *Electron Beam Melting*): Técnica que utiliza feixes de elétrons para fundir pó metálico, geralmente em ambientes de vácuo (Galati e Iuliano, 2018).
- i) Deposição de Energia Direta (DED): Esta técnica começou a ganhar destaque nos anos 2000, permitindo a fabricação e reparo de peças metálicas complexas através da fusão do material por uma fonte térmica à medida que é depositado.
- j) Produção Contínua de Interface Líquida (CLIP): é uma tecnologia que permite a impressão contínua de objetos através de uma interface líquida que se move continuamente (Lipkowitz et al., 2022).
- k) Jateamento de Ligante e Jateamento de Material: Estas técnicas envolvem a deposição seletiva de agentes ligantes ou gotas de material para formar camadas (Ziaee e Crane, 2019).
- l) Bioprinting: Impressão 3D focada na criação de tecidos biológicos e estruturas para aplicações médicas e de engenharia de tecidos que combina técnicas de estereolitografia (SLA) e processamento digital de luz (DLP) (Li et al., 2020).
- m) Impressão 4D: Uma extensão da impressão 3D que usa materiais inteligentes que podem mudar suas propriedades ou forma em resposta a estímulos externos como temperatura ou umidade (Sharma e Rai, 2022).

Essas classificações refletem a evolução contínua da tecnologia de manufatura aditiva cada uma contribuindo para a expansão das aplicações e variedade de materiais disponíveis.

A Figura 1 apresenta um fluxograma que ilustra as etapas do processo de fabricação aditiva utilizando impressão 3D:

Figura 1 - Ciclo de Produção por Impressão 3D



Fonte: Baseado em Ree (2024)

O ciclo se inicia com a criação de um modelo tridimensional em um *software* CAD (Desenho Assistido por Computador), seguido pela conversão do arquivo para o formato STL (do inglês, *Stereolithography* ou *Standard Triangle Language*), que é o formato mais utilizado em impressão 3D. Ele armazena a geometria tridimensional de um objeto por meio de uma malha de triângulos para que seja interpretado e processado pelo *software* fatiador. Em seguida, gera-se o código G-code, por meio do *software* fatiador em questão que instrui a impressora sobre como construir o objeto. Posteriormente, realizam-se a configuração dos parâmetros de impressão e a preparação do material. A etapa seguinte consiste na construção do objeto propriamente dita. Após a impressão, o objeto é removido da impressora e passa por um pós-processamento, que pode incluir acabamentos adicionais para melhorar a qualidade do produto final.

2.1.2 Estado da Arte

A história da manufatura aditiva tem suas origens no final do século XIX, quando os primeiros experimentos na produção de sólidos por adição de camadas começaram a ser realizados. Duas áreas de aplicação se estabeleceram atribuindo as bases tecnológicas iniciais para o desenvolvimento das tecnologias modernas de impressão 3D e são elas: a topografia e a fotoescultura (Beaman et al., 1997).

O conceito de criação de mapas topográficos tridimensionais tem suas origens em 1892, quando Blather introduziu métodos baseados na impressão de linhas de contorno em placas de cera, que eram posteriormente empilhadas para formar uma representação tridimensional do terreno. Este método inicial foi aprimorado em 1964 por Zang, que utilizou placas transparentes para aumentar a precisão e a visualização das características topográficas. Em 1974, Matsubara fez avanços significativos ao empregar materiais fotopolimerizáveis, permitindo a construção de superfícies complexas através da fotopolimerização seletiva de camadas. Destacou (L. DiMatteo, 1976) sobre a relevância das técnicas de empilhamento na produção de superfícies complexas, identificando a capacidade dessas técnicas para fabricar geometrias difíceis de obter por métodos convencionais. Finalmente, em 1979, Nakagawa aplicou essas técnicas de empilhamento à fabricação de ferramentas industriais (Beaman et al., 1997), demonstrando a adaptabilidade e o potencial das abordagens topográficas no contexto da produção.

Segundo Beaman et al. (1997) o campo da fotoescultura iniciou-se com François Willeme, que, em 1860, desenvolveu técnicas para a criação de réplicas tridimensionais precisas. No início do século XX (Baese, 1904) avançou significativamente ao empregar gelatina sensível à luz, o que melhorou a precisão das réplicas tridimensionais. Entre as décadas de 1930 e 1940 (Isao, 1935) integrou foto escultura com topografia, expandindo as aplicações dessas tecnologias e ampliando as possibilidades de representação tridimensional.

Em 1951, Munz propôs um sistema de exposição em camadas que se assemelha aos métodos de estereolitografia atuais, uma abordagem amplamente utilizada na impressão 3D contemporânea. Nos anos seguintes, em

1977, desenvolveu técnicas de polimerização a laser para a formação de padrões tridimensionais, enquanto Ciraud, em 1971 introduziu um processo baseado em pó que contribuiu para a diversificação das técnicas de fabricação (Beaman et al., 1997).

Durante a década de 1980, Hideo Kodama e Herbert realizaram avanços independentes em sistemas de prototipagem rápida utilizando fotopolímeros, estabelecendo as bases para as tecnologias modernas de impressão 3D. Esses desenvolvimentos históricos não apenas ilustram a evolução tecnológica, mas também evidenciam a integração de ideias e inovações que resultaram nas sofisticadas técnicas de fabricação aditiva modernas (Beaman et al., 1997).

No entanto foi em 1987 que surgiu o primeiro equipamento comercial de manufatura aditiva, marcando um avanço crucial no desenvolvimento dessa tecnologia. Desde então, a manufatura aditiva tem experimentado uma rápida evolução, com o surgimento e aprimoramento de diversas técnicas ao longo dos anos (Volpato, 2018). O progresso na manufatura aditiva foi impulsionado por avanços em áreas complementares, como computação e ciência dos materiais. Durante a década de 1990, a tecnologia ganhou maior atenção com a introdução de metodologias como a estereolitografia (SLA, do inglês Stereolithography) e a sinterização seletiva a laser (SLS, do inglês Selective Laser Sintering), e todas as derivações dessas duas que possibilitaram a criação de protótipos com alta precisão e rapidez (Volpato, 2018). Essas inovações pavimentaram o caminho para a aplicação da manufatura aditiva em setores específicos, como a medicina, a indústria aeroespacial, indústria farmacêutica e a automotiva, onde a capacidade de fabricar partes complexas e personalizadas é de grande valor. Esses desenvolvimentos destacam a evolução contínua da manufatura aditiva, que se tornou uma parte integral da quarta revolução industrial, transformando a maneira como produtos são projetados e fabricados (Muktadir; Hasan; Alam, 2023).

Desde seu início em 1860, o processo de manufatura aditiva se desenvolveu conquistando os primeiros campos de aplicação. No entanto, a partir da década de 1990 que a história da manufatura aditiva começou a evoluir com maior velocidade e se consolidar com implementações cada vez mais representativas a níveis industriais, como representado na Figura 2.

Figura 2 - Evolução das tecnologias de MA



Fonte: Adaptado de Volpato (2018)

2.1.3 Impressão 3D por Extrusão de Material

Entre os tipos de impressão 3D mencionados anteriormente, a técnica mais conhecida de extrusão de material como princípio básico é a Modelagem por Deposição Fundida a qual nessa técnica, filamentos de termoplásticos são extrudados camada por camada para criar os objetos. Além do FDM, sendo um método mais moderno pode-se incluir também a Deposição de Energia Direta (DED), que utiliza a extrusão de materiais metálicos em pó ou fio combinada com uma fonte de calor (como laser ou plasma) para fundir o material durante o processo de deposição (Ree, 2024).

As demais tecnologias mencionadas na seção de principais tecnologias de manufatura aditiva utilizam princípios distintos. Por exemplo, a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) utiliza pós plásticos ou metálicos como materiais de alimentação para fabricar objetos. Já a estereolitografia (SLA) emprega materiais termofixos fotossensíveis, chamados resinas, que reagem à luz para a produção de peças (Alex et al., 2025).

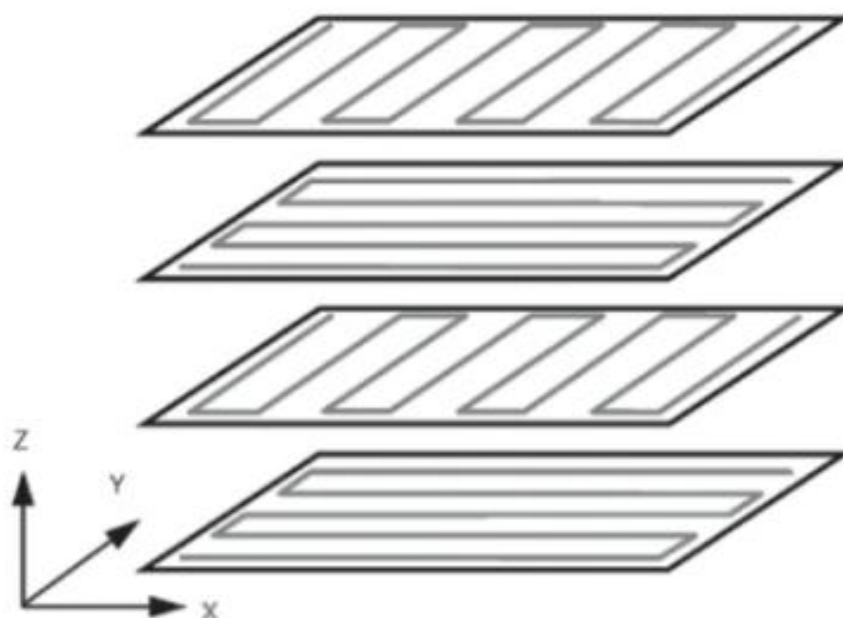
Engenheiros e pesquisadores têm grande interesse no impacto de diferentes parâmetros de processos da impressão 3D por extrusão de material (ME) no desempenho mecânico das estruturas impressas. O estudo desses efeitos é importante, pois permite a otimização dos parâmetros de processo para alcançar um desempenho mecânico superior nas estruturas fabricadas. Pesquisas demonstram que a orientação de construção dos designs impressos em 3D influencia significativamente diversos aspectos, como a qualidade da superfície, o custo, a precisão geométrica e as propriedades estruturais das peças (Alex et al., 2025).

2.1.4 Modelagem por Deposição Fundida (FDM)

O FDM foi inventado por S. Scott Crump e a primeira patente foi registrada em 1989 pela empresa Stratasy. Crump desenvolveu a ideia de uma impressora que pudesse criar objetos tridimensionais camada por camada a partir de um modelo digital (S. Scott, 1992).

O funcionamento do processo FDM ocorre com a deposição do material que em um filamento passa pelo processo de extrusão através de um bico aquecido, então um sistema de 3 eixos controla o movimento da cabeça extrusora que se move no plano X-Y conforme o caminho pré-definido pelo software e então deposita a primeira camada. Após completar a camada inicial, a mesa move-se no sentido negativo da direção z por uma espessura de camada definida para a deposição da camada subsequente, a nova camada adicionada se funde com a camada já depositada. A Figura 3 demonstra como camadas sucessivas de deposição de material são posicionadas até que a peça esteja completa.

Figura 3 - Representação da sobreposição de camadas em FDM



Fonte: Volpato (2018)

Para que a impressão ocorra é necessário que seja gerado o que chamamos de G-Code que é o arquivo com instruções direcionais executáveis que possa ser interpretado pela impressora. O Software que realiza esse procedimento é chamado de software fatiador e abordaremos mais sobre suas características no tópico seguinte.

De acordo com Ardeshir et al. (2024) o estudo da manufatura aditiva por FDM abrange diversas áreas do conhecimento, sendo amplamente explorado

nos campos da Ciência dos Materiais, Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica. Nos últimos anos, também houve um crescimento notável em aplicações biomédicas, alavancando pesquisas na Engenharia Biomédica e no desenvolvimento de biomateriais impressos em 3D. Além disso, estudos recentes vêm explorando a utilização de nanocompósitos, buscando melhorar as propriedades mecânicas e térmicas dos polímeros utilizados no processo de impressão. Essa diversidade de aplicações demonstra a versatilidade do FDM e seu potencial de contribuição para diferentes setores industriais e científicos.

Os avanços na FDM ocorreram a partir de vários desenvolvimentos importantes ao longo dos anos. Inicialmente, o FDM era utilizado principalmente para prototipagem devido à sua capacidade de criar modelos de forma rápida e econômica. Com o tempo, foram feitos aperfeiçoamentos nos materiais utilizados, como a introdução de novos termoplásticos e compostos que melhoraram as propriedades mecânicas e o acabamento das peças impressas. A integração do FDM com tecnologias na Indústria 4.0 expandiu ainda mais suas aplicações além da prototipagem para a fabricação do produto final (Dhinakaran et al., 2020).

A FDM incorporou várias tecnologias para aprimorar suas capacidades, incluindo tecnologias computacionais. Na parte mecânica, por exemplo, o uso de múltiplos bicos de extrusão é utilizado para criar objetos com recursos especiais, como pressão, volume e temperatura variados. Avanços em materiais inteligentes, como polímeros com memória e hidrogéis, foram integrados ao FDM possibilitando a impressão 4D, permitindo que objetos impressos mudem de forma ou propriedades em resposta a estímulos externos. Essas inovações expandiram as aplicações do FDM em diversos campos, incluindo na fabricação de componentes complexos incluindo dispositivos biomédicos (Sharma e Rai, 2022).

A popularidade do FDM na manufatura aditiva ainda se deve à sua acessibilidade, baixo custo e capacidade de fabricar peças com geometrias complexas. Esse método tem sido utilizado para a produção de protótipos funcionais, permitindo que engenheiros e designers testem conceitos rapidamente antes da produção final. Além disso, a FDM tem encontrado aplicações na fabricação de ferramentas e dispositivos personalizados, otimizando processos produtivos em indústrias como a automotiva e a

aeroespacial. O uso de materiais como biodegradáveis como o PLA, e com alta resistência térmica e mecânica como o ABS, ampliam as possibilidades desse processo, possibilitando a criação de peças finais para diversas aplicações. Ao longo dos anos, esse processo tem sido utilizado para fabricar produtos a partir de uma ampla gama de materiais, como plásticos, metais, cerâmicas e compósitos, para aplicações em aeroespacial, medicina, design de moldes e automóveis (Penumakala et al, 2020).

Com os avanços na pesquisa de novos materiais e no aprimoramento dos parâmetros de impressão, a FDM continua a evoluir, consolidando-se como uma tecnologia essencial para a inovação em manufatura aditiva. De acordo com (Ardeshir et al. 2024), o crescimento da pesquisa sobre FDM tem sido expressivo nas últimas décadas, com um aumento significativo no número de publicações entre 2015 e 2022. Esse crescimento reflete tanto o avanço da tecnologia de manufatura aditiva quanto a crescente adoção do FDM em diversas indústrias. As palavras-chave mais recorrentes na literatura, como *3D printing*, *Additive Manufacturing* e *Fused Deposition Modelling*, demonstram o foco da comunidade científica na evolução dos processos de impressão 3D, na otimização dos parâmetros de fabricação, monitoramento de falhas e na melhoria das propriedades dos materiais utilizados. Esse cenário evidencia o papel fundamental do FDM na inovação industrial e acadêmica, impulsionando novas pesquisas e aplicações.

A pesquisa sobre FDM possui uma distribuição geográfica diversificada, com destaque para os Estados Unidos, China e Índia como os países que mais publicam na área, seguidos por Itália e Alemanha (Ardeshir et al., 2024). A Tabela 1 relaciona os países que lideraram as publicações em FDM até o ano de 2023 com a quantidade de publicações e a porcentagem de cada país em relação a toda produção acadêmica disponível, de acordo com o estudo de ciênciometria publicado em 2024.

Tabela 1 - Países líderes em publicações sobre FDM

País	Número de Publicações	Porcentagem
EUA	1.177	18,25%
China	971	15,05%
Índia	797	12,36%
Itália	355	5,50%
Alemanha	352	5,46%
Inglaterra	324	5,02%
Coréia do Sul	243	3,77%
Austrália	236	3,66%
Espanha	226	3,50%
Malásia	216	3,35%
Polônia	199	3,09%
França	194	3,01%
Irã	185	2,87%
Canadá	170	2,64%
Brasil	145	2,25%
Singapura	132	2,05%
Taiwan	132	2,05%
Turquia	113	1,75%
Japão	109	1,69%
Romênia	94	1,46%
República Tcheca	89	1,38%
Arábia Saudita	88	1,36%
Rússia	80	1,24%
Suíça	73	1,13%
Holanda	71	1,10%

Fonte: Adaptado de Ardeshir et al. (2024)

Essa liderança dos EUA, China e Índia reflete o investimento dessas nações em tecnologia e inovação no setor de manufatura aditiva. Além disso, instituições de ensino e pesquisa como o Guru Nanak Dev Engineering College

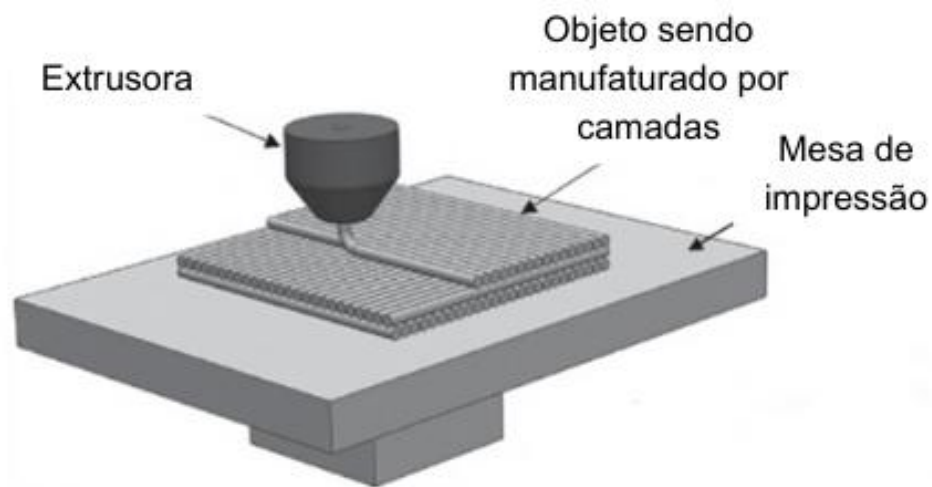
e o National Institute of Technology System (NIT System) desempenham um papel central na produção de conhecimento sobre FDM, contribuindo para avanços técnicos e científicos. As publicações mais influentes, como *RAPID PROTOTYPING J* e *MATERIALS DESIGN*, indicam os periódicos de maior impacto para pesquisadores interessados em acompanhar os desenvolvimentos mais recentes na área (Ardeshir et al., 2024).

2.1.5 Software Fatiador

O *software* responsável pelo fatiamento que realiza a conversão de modelos tridimensionais digitais em instruções executáveis pela impressora é chamado de fatiador. Esse processo, denominado fatiamento, divide o modelo 3D em camadas horizontais, definindo parâmetros como espessura das camadas, densidade de preenchimento, velocidades de impressão e temperatura do extrusor. Além disso, o software calcula a trajetória do bico extrusor para cada camada, otimizando o tempo de impressão e o uso de material.

Além de sua função principal de fatiamento, o *software* fatiador também desempenha um papel fundamental na personalização e otimização do processo de impressão. Ele permite ao usuário ajustar configurações específicas para atender às necessidades de cada projeto, como a definição de suportes para peças com geometrias complexas, a aplicação de diferentes padrões de preenchimento e a escolha de modos de impressão otimizados para velocidade ou qualidade. Muitos fatiadores também possuem recursos avançados, como análise de pré-visualização da impressão, correções automáticas de falhas no modelo e integração com interfaces de controle remoto (Volpato, 2018).

Figura 4 – Representação da Impressão FDM em camadas



Fonte: Volpato (2018)

2.1.6 Parâmetros de Impressão

Os parâmetros de impressão como densidade de preenchimento e espessura da camada, desempenham um papel fundamental na determinação das propriedades mecânicas dos materiais fabricados por impressão 3D.

Densidades de preenchimento mais elevadas estão associadas a uma melhoria nas propriedades mecânicas, sendo que os objetos com maior resistência frequentemente apresentam densidade de preenchimento em torno de 50%. Além disso, a densidade de preenchimento influencia diretamente o comportamento de amortecimento; nesse contexto, densidades mais altas resultam em uma menor razão de amortecimento (Prajapati et al., 2024).

A espessura da camada também é um parâmetro crítico. Por exemplo, camadas mais finas podem contribuir para o aumento da resistência à tração das peças impressas. Além disso, a interação entre esses parâmetros pode impactar outras propriedades relevantes, como rigidez e porosidade, as quais desempenham um papel determinante no desempenho mecânico do objeto fabricado (Prajapati et al., 2024).

A Tabela 2 exemplifica quais são os parâmetros de impressão que estão diretamente envolvidos com o processo de extrusão de material e suas respectivas unidades de medidas.

Tabela 2 - Parâmetros de Configuração

Parâmetros de Impressão	Unidades
Temperatura do Extrusor	°C
Temperatura da Mesa	°C
Velocidade de Impressão	mm/s
Diâmetro do Extrusor	mm
Diâmetro do filamento	mm
Ângulo de raster	grau
Linhas de contorno	unidade
Linhas de <i>raster</i>	unidade

Fonte: Adaptado de Thiago Glisoi Lopes (2021)

2.1.7 Primeira Camada de Impressão

A primeira camada é uma das etapas mais importantes na impressão 3D porque ela serve como base para todo o objeto a ser construído. Uma boa adesão da primeira camada à superfície de impressão é essencial para garantir estabilidade durante o processo, evitando deformações ou falhas nas camadas subsequentes. De acordo com Wu, Yu e WANG, (2016), no método FDM, a primeira camada desempenha o papel fundamental de fornecer a base estrutural para o objeto que está sendo produzido. Além disso, a qualidade dessa camada influencia diretamente a resistência estrutural e o acabamento do objeto final. Se a primeira camada apresentar problemas, como má adesão ou irregularidades na impressão, é muito provável que todo o processo seja comprometido,

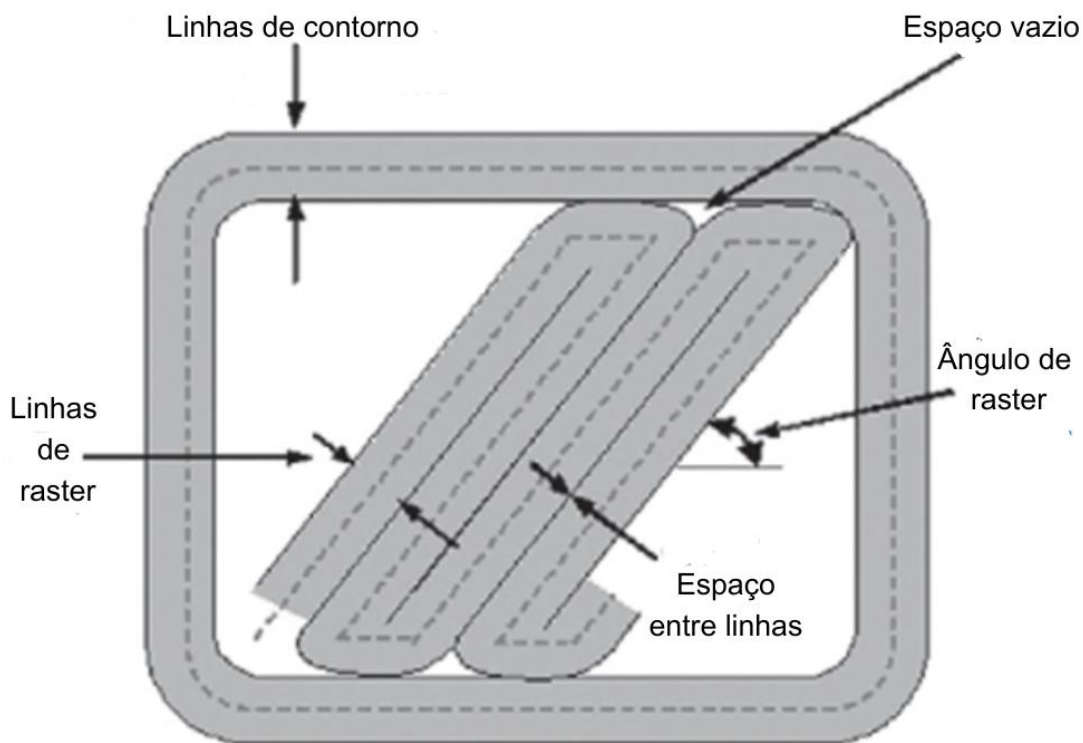
resultando em desperdício de material e tempo. Portanto, uma configuração rigorosa nessa etapa é crucial para o sucesso da impressão.

O estudo de Carmo et al. (2021a) destaca que o processo de impressão 3D possui um período crítico no início durante a fabricação da primeira camada da peça. A definição incorreta dos parâmetros de impressão, como a altura do extrusor em relação à mesa de impressão, pode levar a uma série de deficiências nas peças, incluindo baixa precisão dimensional, baixa qualidade de superfície e resistência mecânica reduzida. Esses defeitos podem comprometer ou até impedir o uso da peça impressa. Portanto, a primeira camada é crucial para garantir a qualidade geral da peça final.

Bhavsar et al. (2020) afirmam que a etapa de impressão da primeira camada é considerada a mais crítica para identificar anormalidades que possam desencadear danos. A Figura 5 apresenta um esquema ilustrativo da estratégia de preenchimento utilizada na fabricação por FDM. A peça é construída camada por camada, sendo cada camada composta por diferentes elementos estruturais que influenciam diretamente as propriedades mecânicas, o tempo de fabricação e a eficiência no uso de material.

As linhas de contorno definem a geometria externa da peça e são responsáveis pelo acabamento superficial e pela resistência estrutural da borda. Internamente, a peça é preenchida pelas chamadas linhas de raster, que seguem um padrão de trajetória pré-determinado e são depositadas de forma paralela. O ângulo de raster representa a inclinação dessas linhas em relação ao eixo da peça e pode ser ajustado para otimizar características mecânicas, como resistência à tração e rigidez. Outro parâmetro importante é o espaço entre linhas, que determina a densidade do preenchimento e afeta a distribuição de tensões dentro da estrutura. Quando esse espaço é maior, há uma redução na quantidade de material utilizado e no tempo de impressão, porém, com impacto na resistência da peça. Já o espaço vazio refere-se às regiões internas sem material, comuns em determinados padrões de preenchimentos com geometrias complexas como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Composição de linhas da primeira camada de fabricação



Fonte: Volpato (2017)

O estudo desses parâmetros é essencial para a caracterização das peças fabricadas por FDM, uma vez que a configuração do preenchimento pode impactar diretamente a integridade estrutural e o desempenho mecânico do material impresso.

2.1.8 Filamento de Ácido Polilático (PLA)

O ácido polilático (*PLA*, do inglês *Polylactic Acid*) é um termoplástico biodegradável derivado de recursos renováveis, como o amido de milho ou a cana-de-açúcar. É amplamente reconhecido por seu baixo ponto de fusão, facilitando o trabalho com ele em impressões 3D reduzindo o consumo de energia e também pela sua reduzida pegada de carbono, que o torna uma escolha vantajosa para impressão 3D e outras aplicações. O filamento de PLA destaca-se por suas propriedades mecânicas estáveis e previsíveis, que

contribuem para sua versatilidade e confiabilidade em diversos contextos industriais (Alex et al., 2025).

O PLA é amplamente utilizado em aplicações médicas e embalagens de alimentos devido à sua biodegradabilidade e propriedades não-tóxicas. Além disso, é frequentemente empregado em impressão 3D para prototipagem e fabricação de peças que não exigem alta resistência térmica, aproveitando suas boas propriedades mecânicas. Quando comparado ao filamento ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), o PLA possui menor elasticidade, mas apresenta resistência maior que o ABS, o que pode ser vantajoso dependendo da aplicação (Prajapati et al., 2024).

2.2 MONITORAMENTO DE DEFEITOS E POTENCIAIS DANOS

A abordagem de monitoramento de defeitos que podem ocasionar danos em processos industriais é fundamental para a mitigação de custos associados a reparos, manutenção e desperdícios. Enquanto o conceito de defeito é associado a irregularidades e a não-conformidade com parâmetros de fabricação, a definição de dano é compreendida segundo Vieira Filho (2010) como qualquer modificação na estrutura que comprometa seu desempenho atual ou potencialmente afete seu desempenho futuro. Essas modificações podem manifestar-se em alterações na massa, rigidez, dissipação de energia e na seção transversal da estrutura, resultando, consequentemente, em variações na resposta dinâmica do objeto. O processo de identificação de dano parte do princípio da comparação entre duas ou mais condições de fabricação, adota-se uma fabricação considerada como sem defeitos na qual se classifica os parâmetros ditos ideais esperados do processo.

2.2.1 Monitoramento por Técnicas Não-Destrutivas (TND)

Os testes não destrutivos (TND) compreendem um conjunto de técnicas aplicadas na avaliação e inspeção de materiais, componentes ou estruturas, com o propósito de identificar defeitos e avaliar propriedades a fim de garantir a

integridade sem causar danos permanentes ao objeto em análise. De acordo com Fatoba e Jen (2023) a capacidade de identificar a propagação de fissuras que ocorrem tanto na superfície como no interior de um material é o que torna essa abordagem vantajosa. Essas abordagens representam ferramentas essenciais para a verificação da qualidade e segurança de componentes e estruturas, contribuindo para a detecção de defeitos, prevenção de falhas, e garantindo o desempenho confiável da fabricação ao longo do tempo. Uma variedade de técnicas de testes não destrutivos encontra-se disponível, sendo cada uma delas adaptada para ser empregada com diferentes tipos de materiais e contextos específicos, como o método de varredura em conjunto com o método de emissão acústica, que foi utilizado neste trabalho (Fatoba e Jen, 2023).

O desenvolvimento de métodos não destrutivos de monitoramento pode oferecer vantagens significativas. Esses métodos permitem que a detecção de anomalias seja realizada sem que a integridade do objeto seja alterada, possibilitando a implementação de correções, ou até mesmo que a interrupção do processo possa ser efetuada antes que defeitos ocasionem danos inviabilizando a fabricação e, com isso, haja desperdício de material, tempo e energia.

2.2.2 Monitoramento por Emissão Acústica (EA)

As ondas acústicas são perturbações mecânicas que se propagam através de meios materiais, como gases, líquidos e sólidos, transmitindo energia na forma de variação de pressão. Essas variações de pressão resultam em compressões e expansões sucessivas das partículas do meio, criando um padrão ondulatório que se desloca no espaço. As ondas acústicas consistem em regiões de compressão, onde as partículas do meio estão mais próximas umas das outras, e regiões de rarefação, onde as partículas estão mais afastadas. Essas alternâncias criam uma variação de pressão capaz de se propagar. As ondas elásticas, também denominadas ondas mecânicas, possuem características fundamentais elementares como a frequência e comprimento de onda. Quando essas ondas se propagam em uma estrutura, dois fenômenos

essenciais ocorrem: alteração na velocidade e atenuação da onda, originados pelos mecanismos de absorção e dispersão (Alexandre et al., 2019).

Assinaturas acústicas de técnicas de MA estão diretamente relacionadas aos efeitos físicos que podem ocorrer na parte impressa, como emissão acústica oriunda de trincas, ou falta de material e entupimento do bico extrusor e aos ruídos que surgem durante o processo de fabricação. As assinaturas acústicas sobrepostas, resultantes da convolução, têm a capacidade de serem empregadas na formação de uma assinatura única que expressa condições tanto do processo quanto do sistema. Essa assinatura pode abrigar informações essenciais sobre o procedimento em questão e a eventual probabilidade de ocorrência de um dano na fabricação (Fatoba e Jen, 2023).

As técnicas de monitoramento ultrassônico têm se tornado cada vez mais essenciais em processos de usinagem industrial, especialmente para garantir o controle de qualidade e otimizar o desempenho. Essas técnicas utilizam ondas sonoras com frequências variadas para detectar alterações nas propriedades dos materiais, identificar defeitos e monitorar condições de possíveis danos durante operações de usinagem (Alexandre et al., 2019).

Desse conceito surgem as técnicas baseadas na Função de Resposta em Frequência (FRF). As técnicas baseadas em FRF são amplamente utilizadas em análises dinâmicas de sistemas mecânicos, estruturas e materiais. Descreve a relação entre um sinal de entrada e um sinal de saída como resposta do sistema analisado em função de suas frequências. Essa função é obtida por meio de ensaios experimentais realizados com sensores e analisados por meio de transformadas de Fourier. A FRF é especialmente útil para detectar mudanças no comportamento estrutural, sendo aplicada em áreas como monitoramento de integridade estrutural (SHM) (Guimarães Baptista, 2010).

O método de monitoramento acústico pode ser dividido em duas técnicas principais, o monitoramento ativo e o passivo. O monitoramento passivo opera por meio da aquisição de sinais de uma excitação natural que são vibrações proveniente do ambiente, processo, ou objeto de análise. O monitoramento ativo ocorre por meio de uma excitação forçada, ou seja, introduzida por um sinal emissor controlado por atuadores que faz a varredura do que se deseja analisar e é coletado para processamento após o sinal percorrer o percurso de interesse (Silva et al., 2016).

2.2.3 Monitoramento acústico em FDM

Existem trabalhos que utilizam EA como técnica de análise para estudos relacionados ao processo de MA e a integridade de peças monocamadas. Esses estudos realizam abordagens tanto no domínio do tempo como da frequência, um exemplo é o estudo de Wu et al. (2016), que utilizou recursos de análise no domínio do tempo como indicadores para comparação entre duas condições de funcionamento da fabricação FDM utilizando o sensor de EA. Os resultados experimentais indicaram que tanto estados normais quanto anormais podem ser identificados.

No estudo realizado por Bhavsar et al. (2020) o objetivo foi desenvolver uma técnica para a detecção online de falhas na adesão da primeira camada durante a impressão por FDM. A análise foi feita utilizando sinais vibroacústicos medidos por um sensor de PVDF e aplicando a técnica de processamento de sinais conhecida como transformada wavelet discreta para identificar diferenças entre as assinaturas obtidas durante processos de adesão bons e ruins da primeira camada de filamento na mesa de impressão. O estudo demonstrou que diferenças significativas nas assinaturas vibroacústicas podem ser observadas entre processos de adesão bons e ruins, permitindo a identificação de falhas na adesão da primeira camada.

Sobre o monitoramento de defeitos em peças monocamada na fabricação FDM, pode-se citar o trabalho de Carmo et al. (2021b), onde é feita uma análise sobre como os efeitos de variações na geometria e parametrização em peças monocamadas afetam na geometria e qualidade final do produto. As variações estudadas estão relacionadas com a configuração da altura do extrusor em relação à mesa de impressão. Dentre os defeitos encontrados que ocorreram devido à variação do eixo Z foi principalmente o descolamento das peças da mesa de impressão. Isso foi mais comum e pronunciado nas condições em que uma maior variação no eixo Z.

Em relação a classificação de falhas na fabricação, também existe a contribuição feita por Lopes et al. (2023) que faz o monitoramento de danos em peças monocamada por meio da simulação de falhas do processo como interrupção de filamento e entupimento do extrusor que ocasionam defeitos nas

peças, o qual pode-se constatar uma diferença nas amplitudes dos sinais coletados utilizando um microfone de eletreto devido à ausência de material na cabeça extrusora.

Como exemplo de estudo que empregou o uso de transdutores piezoelétricos no monitoramento em FDM, o trabalho de Lopes (2021) desenvolveu uma abordagem baseada na aquisição de dados por sensores de emissão acústica (EA) e transdutores piezelétricos (PZT), visando identificar falhas durante a fabricação da primeira camada no processo FDM. O monitoramento realizado no referido estudo fundamenta-se na captura passiva de sinais acústicos gerados pela interação entre o extrusor e o material de impressão, sendo os dados processados por meio de técnicas como Transformada Rápida de Fourier (FFT), Valor Médio Quadrático (RMS) e Razão de Potência (ROP) para a identificação de padrões de ocorrência.

Embora o monitoramento passivo tenha demonstrado eficácia na detecção de falhas, algumas limitações desse método podem ser identificadas. A dependência de sensores EA pode introduzir variações devido à captação de ruídos ambientais e à necessidade de calibração específica para diferentes configurações de impressão. O estudo também utilizou diferentes algoritmos de aprendizado de máquina para avaliar a precisão da classificação dos danos, porém, a eficácia dessas técnicas pode ser aprimorada ao empregar abordagens de monitoramento ativo, nas quais a excitação dos materiais é controlada e os sinais resultantes são analisados de forma mais direcionada.

Dessa forma, a presente pesquisa propõe uma abordagem diferenciada ao empregar um monitoramento ativo em substituição ao passivo, proporcionando maior controle sobre as condições de aquisição dos sinais. Além disso, o uso exclusivo de transdutores PZT representa uma vantagem, dado que esses dispositivos têm sido estudados como uma alternativa viável e de menor custo em relação aos sensores de emissão acústica tradicionais. O monitoramento ativo permite a aplicação de excitações específicas para avaliar a resposta do material sob condições controladas, reduzindo a interferência de fatores externos e aumentando a confiabilidade dos dados adquiridos.

A integração da metodologia de monitoramento ativo com transdutores PZT, proposta neste estudo, busca preencher lacunas identificadas em pesquisas anteriores, aprimorando a precisão na identificação de anomalias e

expandindo as aplicações do processamento digital de sinais na manufatura aditiva. Essa abordagem contribui para um diagnóstico mais preciso e eficiente, possibilitando a otimização da manufatura de peças com geometrias complexas e o aumento da confiabilidade dos processos produtivos baseados em impressão 3D.

2.2.4 Transdutores Piezoelétricos (PZT)

Os transdutores piezoelétricos são dispositivos que, por meio do efeito piezoelétrico, convertem energia elétrica em movimento mecânico (efeito direto), e vice-versa (efeito reverso). Dependendo da frequência da tensão elétrica aplicada e das propriedades do material piezoelétrico, a vibração pode produzir ondas sonoras de diferentes frequências e intensidades (Silva et al., 2016).

Devido a capacidade de operar tanto como sensor quanto como atuador, a utilização dos transdutores piezoelétricos é considerada como vantajosa de acordo com estudos anteriores que consolidaram os transdutores piezoelétricos de PZT (*Pb-lead Zirconate Titanate – Titanato Zirconato de Chumbo*) como uma alternativa de baixo custo aos componentes tradicionais usados na análise de impedância eletromecânica e detecção de descontinuidades, principalmente quando comparados ao sensor de emissão acústica. O transdutor piezoelétrico comercial, amplamente conhecido no mercado como *buzzer*, é comumente encontrado em uma grande variedade de aparelhos eletrônicos e atua como um sinalizador sonoro (Silva et al., 2016).

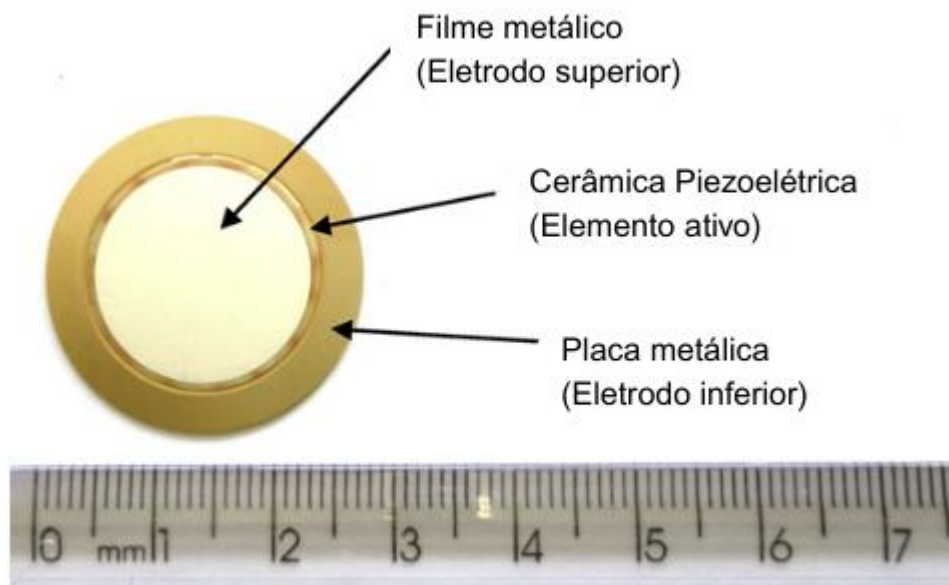
Uma vantagem de destaque desses componentes são o custo extremamente baixos e a facilidade de serem encontrados no Brasil sem a necessidade de importação. O que torna vantajoso e tem motivado o uso desses componentes em trabalhos científicos (Silva de Freitas; Guimarães Baptista, 2016).

O *buzzer* é constituído por uma base de latão como placa metálica sobre a qual se encontra a cerâmica piezoelétrica revestida por um filme metálico. O dispositivo possui formato circular, podendo ser encontrado em lojas de

eletrônicos a um custo entre R\$ 0,05 e R\$ 1,00 e com dimensões de diâmetros que variam de 12 mm a 41 mm (Silva De Freitas; Guimarães Baptista, 2016)

A Figura 6 representa o modelo do transdutor utilizado no experimento.

Figura 6 - Transdutor piezoelétrico



Fonte: Adaptado de Silva De Freitas e Guimarães Baptista (2016)

As informações técnicas dos transdutores estão relacionadas na tabela 5 e foram retiradas do Dataset do dispositivo disponibilizado pela fabricante Murata Manufacturing Co. (2009).

Tabela 3 - Propriedades elétricas do PZT

Número da peça	Frequência Ressonante (kHz)	Impedância Ressonante (ohm)	Capacitância (nF)
7BB-15-6	6,0 $\pm$ 1,0kHz	800 máx	10 $\pm$ 30% [1kHz]
7BB-27-4	4,6 $\pm$ 0,5kHz	200 máx	20 $\pm$ 30% [1kHz]

Tabela 4 - Propriedades dimensionais do PZT

Número da peça	Tamanho da placa (Ø)	Espessura Total (mm)	Espessura da placa (mm)	Material da placa
7BB-15-6	15,0	0,22	0,10	Latão
7BB-27-4	27,0	0,54	0,30	Latão

Os transdutores piezoelétricos oferecem várias vantagens importantes que os tornam adequados para monitoramento ultrassônico em aplicações industriais. Primeiramente, são uma alternativa de baixo custo em relação a sensores convencionais, tornando-se acessíveis para diferentes cenários de monitoramento, incluindo monitoramento estrutural e processos de fabricação. Sua simplicidade de conexão com os sistemas de aquisição de dados reduz ainda mais os custos quando comparado com sensores comerciais de emissão acústica (Giroto et al., 2019).

Os transdutores piezoelétricos têm demonstrado eficácia na detecção de problemas como queima superficial durante o processo da retificação mecânica, obtendo resultados comparáveis aos de sensores mais caros. Para a aplicação em monitoramento, devido ao seu caráter dual de funcionamento, como emissor e receptor de sinais, sua atuação pode ser respectivamente considerada como uma forma ativa e passiva de monitoramento (Alexandre et al., 2019).

O estudo realizado por Lopes (2021) discute o uso de transdutores piezoelétricos, especificamente o PZT, como uma alternativa de baixo custo ao sensor de EA tradicional para monitoramento de processos de manufatura. O estudo investiga a viabilidade do PZT para detectar anomalias nos parâmetros fundamentais de camada e na geometria das peças impressas durante o processo FDM. Os resultados do estudo indicaram que o PZT demonstrou viabilidade como uma alternativa ao sensor de EA no monitoramento do processo de manufatura FDM. O PZT foi capaz de detectar anomalias nos parâmetros fundamentais de camada e na geometria das peças impressas, similarmente ao sensor EA. Além disso, foram desenvolvidos modelos de classificação para identificar diferentes modos de fabricação irregular, utilizando

dados obtidos tanto pelo sensor EA quanto pelo PZT obtendo precisão satisfatória para os dois sensores.

2.3 TÉCNICA CHIRP THROUGH-TRANSMISSION (CTT)

Uma abordagem emergente de monitoramento que utiliza transdutores piezoelétricos é a técnica *Chirp Through-Transmission* (CTT), que utiliza o processamento digital de sinais para aprimorar as capacidades de monitoramento. Essa técnica utiliza um sinal contínuo tipo *chirp*, permitindo a identificação de defeitos. De acordo com Alexandre et al. (2019) o sinal *Chirp* pode ser propagado por meio de técnicas de transmissão e recepção que se diferenciam pela configuração dos transdutores e tipo de informação extraída do material. Três arranjos são utilizados em ensaios não destrutivos e monitoramento de integridade estrutural:

- a) *Pulse-Echo*: Utiliza apenas um transdutor, que atua simultaneamente como emissor e receptor. O sinal é refletido por discontinuidades internas e retorna ao mesmo sensor. Essa técnica é vantajosa por exigir acesso a apenas um lado da estrutura, sendo ideal para detecção de trincas internas e medição de espessura. Sua análise é baseada nas reflexões (ecos) geradas por defeitos.
- b) *Pitch-Catch*: Emprega dois transdutores posicionados no mesmo lado da peça. Um atua como emissor e o outro como receptor, geralmente em um ângulo ou pequena distância. Essa configuração permite a detecção de defeitos superficiais, sendo útil em geometrias complexas. A técnica é sensível às variações na propagação da onda ao longo da superfície do material.
- c) *Through-Transmission*: Também usa dois transdutores, mas dispostos em lados opostos da amostra. O sinal atravessa o material de um lado ao outro, sendo captado após a propagação completa. É uma técnica eficaz para identificar falhas internas, alterações na densidade ou remoção de material, uma vez que mede diretamente a atenuação e

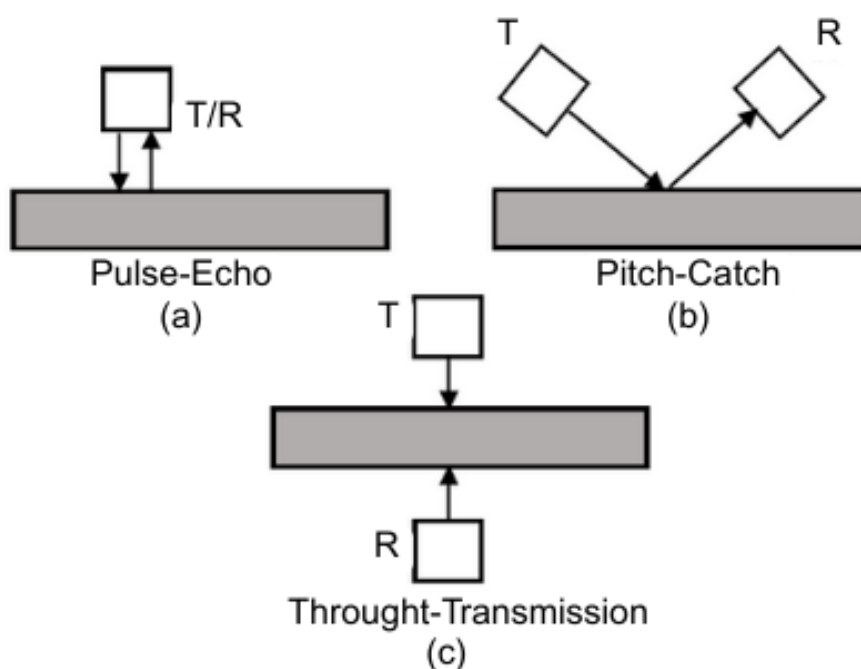
dispersão das ondas. No entanto, exige acesso físico a ambos os lados da peça.

Cada uma dessas técnicas pode ser empregada com sinais *chirp*, que consistem em varreduras de frequência, permitindo análises espectrais mais completas e maior sensibilidade à integridade do material.

Para monitoramento nos processos, bandas de frequência específicas são identificadas com base em sua capacidade de indicar alterações na estrutura da peça. Essas faixas de frequência permitem um diagnóstico mais preciso da perda de material e rugosidade, podendo facilitar intervenções e ajustes durante o processo de manufatura. A capacidade de selecionar bandas de frequência apropriadas é crucial para maximizar a eficácia dos transdutores piezoelétricos em aplicações de monitoramento.

A utilização de transdutores piezoelétricos no emprego da técnica CTT apresenta uma alternativa econômica que aprimora as capacidades de monitoramento, reduzindo os custos gerais. O método em questão foca na análise de bandas de frequência na onda recebida que melhor caracterizam danos estruturais, utilizando parâmetros estatísticos como Raiz do Valor Quadrático Médio (RMS) para análise. Essa técnica otimiza o procedimento experimental e aumenta a sensibilidade às alterações nas condições do material, tornando-se efetiva para o monitoramento durante os processos de usinagem (Alexandre et al., 2019). A Figura 8 ilustra o funcionamento das três técnicas.

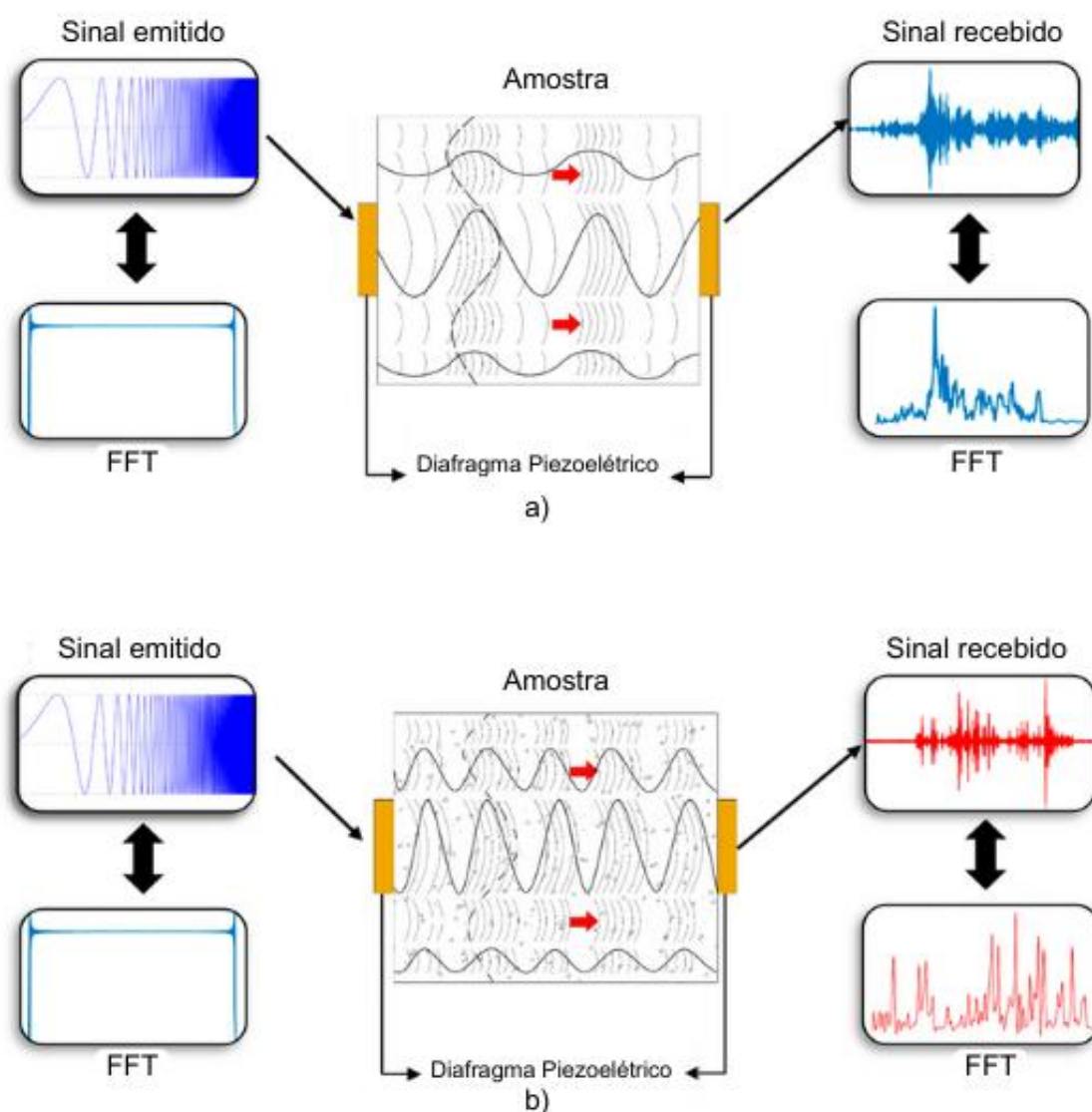
Figura 7 - Técnicas de Transmissão do Sinal Chirp



Fonte: Adaptado de Alexandre et al. (2019)

O monitoramento Through-Transmission é a técnica que utiliza dois transdutores posicionados em lados opostos de uma amostra juntamente com um gerador de sinal usado para criar pulsos elétricos contínuos com frequências e amplitudes específicas, que são convertidos em ondas ultrassônicas pelo primeiro transdutor, conhecido como emissor. Essas ondas ultrassônicas propagam-se através da amostra e são detectadas pelo segundo transdutor, o receptor. No contexto do monitoramento de processos industriais, como a retificação, a técnica Through-Transmission permite a detecção de alterações na estrutura do material, como remoção de material ou alterações na microestrutura, sem depender de parâmetros tradicionais de ultrassom, como comprimento de onda (Alexandre et al., 2019).

Figura 8 - Técnica Chirp-Through-Transmission: (a) Estrutura Íntegra; (b) Estrutura Defeituosa



Fonte: Adaptado de Alexandre et al. (2019)

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

O processamento digital de sinais (DSP, do inglês *Digital Signal Processing*) tem um papel fundamental na modernização dos processos de manufatura, permitindo uma maior precisão e controle durante a produção. O método em questão se baseia na coleta, análise, interpretação e tratamento de sinais digitais, como a eliminação de ruídos, para extrair informações importantes sobre o comportamento de máquinas e materiais. Aplicado em áreas

como monitoramento de condições, detecção de falhas, danos e defeitos para otimização de produção e processos, o DSP possibilita a identificação de padrões complexos de descontinuidades e condições, redução de desperdícios e como consequência a melhoria continuada da qualidade dos processos e da produção. Os sinais obtidos em um experimento podem ser analisados tanto no domínio do tempo, onde os dados são representados em função do tempo associados a valores de amplitude, quanto no domínio da frequência, onde cada frequência do sinal pode ser analisada por meio dos seus valores de amplitude, a partir da transformada de Fourier.

No estudo feito por Lopes (2021) o processamento digital de sinais desempenha um papel fundamental no monitoramento do processo de manufatura por fusão e deposição (FDM). Foram empregadas diversas técnicas, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), o Valor Médio Quadrático (RMS), a Razão de Potência (ROP) e o Desvio do Valor Médio Quadrático (RMSD), para interpretar os dados obtidos pelos sensores. A aplicação dessas ferramentas possibilitou a identificação e categorização de anomalias durante a fabricação das peças. Além disso, a pesquisa destaca a importância do PDS na avaliação do desempenho dos transdutores piezoelétricos, levando em conta fatores como a variação da temperatura e as condições de fixação da mesa de impressão, que influenciam diretamente as respostas dos sensores.

O trabalho do Alexandre et al. (2019) discute o processamento de sinais no contexto da técnica CTT para monitoramento do processo de retificação. Ele menciona que os conjuntos de dados dos testes de retificação foram processados digitalmente usando o software MATLAB®, que é um software amplamente utilizado por pesquisadores ao redor do mundo. No contexto do artigo em questão, dois sinais distintos foram adquiridos, um referente ao sinal *chirp* do PZT emissor e outro referente ao sinal *chirp* coletadas pelo PZT receptor. A análise espectral dos sinais correspondentes aos sinais do receptor foi realizada para encontrar a banda de frequência que melhor caracteriza as condições da peça de trabalho e utilizou a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analisar o conteúdo espectral dos sinais do PZT receptor. Os resultados do estudo indicaram que a técnica proposta de monitoramento por ultrassom, utilizando transdutores piezoelétricos, foi eficaz na detecção de remoção de material durante o processo de retificação. Ao realizar as análises estatísticas de

RMS e *Counts*, foi possível constatar uma tendência de crescimento quando sinais filtrados foram utilizados, confirmando o diagnóstico de remoção de material.

A aplicação de estatísticas matemáticas na análise e processamento digital de sinais é essencial para extrair informações relevantes, detectar padrões, identificar anomalias e melhorar a interpretação dos dados. Em particular, sinais acústicos, elétricos ou térmicos podem ser analisados estatisticamente para diversas finalidades, como monitoramento de processos em detecção de falhas, defeitos e reconhecimento de padrões de ocorrência.

2.4.1 Transformada de Fourier (FFT)

Em situações em que a análise dos eventos observados no domínio do tempo é complexa, a abordagem no domínio da frequência é comumente adotada para identificar comportamentos específicos. A transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) é utilizada pois uma das maiores vantagens do algoritmo da FFT são a redução no poder computacional e tempo necessários para a obtenção da Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*) e destaca-se como um método empregado para a determinação do conteúdo harmônico e na análise espectral.

A DFT é calculada de acordo com a Equação (1).

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{j2\pi nm}{N}} \quad (1)$$

Sendo:

$X(m)$: valor da DFT;

m : índice da componente de saída da DFT no domínio da frequência;

X : sequência de amostras do sinal discreto;

n : índice de amostras no domínio do tempo, $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$;

j : $\sqrt{-1}$;

N : número de amostras.

2.4.2 Densidade de Potência Espectral (PSD)

A densidade espectral de potência (PSD, do inglês *Power Spectral Density*) descreve como a potência de um sinal está distribuída em função da frequência. Para sua estimativa, foi utilizado o método de Welch (Stoica; Moses, 2005), que divide o sinal em segmentos sobrepostos, aplica uma janela em cada segmento e calcula o periodograma correspondente. A PSD final é obtida pela média desses periodogramas, o que reduz a variância da estimativa em relação ao uso direto do periodograma. A fórmula que descreve a função PSD é representada na Equação (2).

$$\Phi_W(\omega) = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S \frac{1}{MP} \left| \sum_{t=1}^M \vartheta(t) y_j(t) e^{-i\omega t} \right|^2 \quad (2)$$

Em que:

$\Phi_W(\omega)$: Densidade Espectral de Potência na frequência do sinal;

$y_j(t)$: j -ésimo segmento do sinal original;

M : número de amostras em cada segmento;

S : número total de segmentos;

P : potência de normalização da janela;

$\vartheta(t)$: função da janela aplicada a cada segmento;

$e^{i\omega t}$: representa a transformação para o domínio da frequência.

2.4.3 Taxa de Potência do Sinal (RoP)

A Ratio of Power (RoP) é uma métrica usada para quantificar a relação entre diferentes componentes de potência em um sinal, comparar diferentes bandas de frequência ou avaliar mudanças na energia do sinal ao longo do tempo. A análise RoP de um material inspecionado por ultrassom pode indicar qual banda contém mais energia e ajudar na identificação de danos. De acordo com Ferreira (2016), para cada bloco de sinal de EA o valor ROP é obtido pela Equação (3).

$$RoP = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_2} |X_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \quad (3)$$

Sendo:

N : tamanho do bloco do sinal;

n^1 e n^2 : faixa de frequência para análise.

Essa pode ser uma métrica determinante para quantificar o quanto da potência do sinal está concentrada na banda de frequência que contém o comportamento de interesse do sinal em relação a todo o espectro analisado. Isso pode ajudar a validar a eficácia da técnica *Chirp Through-Transmission* (CTT) na detecção de danos em peças monocamadas de impressão 3D.

2.5 Parâmetros estatísticos

Na análise de uma emissão acústica, os sinais são decompostos matematicamente e examinados em relação a características como amplitude, comprimento e ciclos, possibilitando a identificação de padrões, anomalias, tendências e demais informações relevantes por meio dos índices de danos. No

próximo tópico abordaremos quais serão as estatísticas utilizadas e suas respectivas características.

2.5.1 Raiz do Valor Quadrático Médio (RMS)

De acordo com Alexandre et al. (2019) uma das estatísticas mais utilizadas na análise do sinal de emissão acústica é a raiz do valor quadrático médio (RMS). A aplicação da estatística RMS na identificação de falhas em processos de fabricação tem sido amplamente estudada na literatura. A estatística RMS é definida pela Equação (4).

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n)} \quad (4)$$

N : número discreto de dados do sinal x ;

x : sinal bruto discreto.

2.5.2 Desvio da Raiz do Valor Quadrático Médio (RMSD)

Assim como o RMS, o RMSD é uma métrica estatística comumente utilizada na análise de sinais acústicos. A estatística em questão é empregada para medir a diferença entre um conjunto de dados observados e um conjunto de referência. Seu cálculo envolve a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre os valores comparados. Essa medida é amplamente aplicada para estimar erros em modelos, analisar a precisão de dados e comparar sinais como foi empregada por Lopes (2021) nos estudos comparativos entre o espectro representativo de mesa isolada e o espectro representativo de mesa aquecida a temperatura ambiente (25 °C) e é definido como consta na Equação (5):

$$RMSD = \sum_{k=\omega_i}^{\omega_f} \sqrt{\frac{[X_d(k) - X_h(k)]^2}{X_h^2(k)}} \quad (5)$$

Sendo:

$X_d(k)$: o valor dos dados experimentais ou medidos;

$X_h(k)$: o valor de referência ou esperado;

ω_i e ω_f : correspondem as bandas de frequências a serem analisadas;

k : representa as frequências na qual os espectros foram analisados.

2.5.3 Power Law

O parâmetro estatístico *Power law* (Lei de Potência) descreve uma relação matemática onde uma variável depende da outra por uma potência, em vez de uma relação linear. Essa lei aparece em diversos fenômenos naturais e sistemas complexos, como a propagação de ondas acústicas, atenuação de sinais, distribuição de amplitudes sonoras e padrões de falhas estruturais. Em análise de sinais acústicos, ela é útil para modelar comportamentos não lineares, onde eventos raros de alta intensidade coexistem com eventos frequentes de baixa intensidade, ajudando na identificação de padrões e na previsão de anomalias. De acordo com Ferreira (2016) pode ser descrita como na Equação (6).

$$T_{pl}(X) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k^p \quad (6)$$

Em que:

X_k : k -ésimo elemento do valor absoluto da transformada rápida de Fourier (FFT);

N : quantidade total de dados;

v : expoente com valor ajustável.

2.5.4 Taxa de Falsos Alarmes Constante (CFAR)

No contexto do processamento digital de sinais acústicos, a técnica CFAR (*Constant False Alarm Rate*), traduzida como Taxa de Falsos Alarmes Constante, é amplamente utilizada para otimizar a detecção de sinais em ambientes que possam conter a presença de ruídos. Em aplicações como o monitoramento de integridade estrutural (SHM, do inglês *Structural Health Monitoring*), o CFAR auxilia na identificação de danos por meio da análise de sinais ultrassônicos e vibrações. Outra aplicação relevante é no reconhecimento de padrões sonoros, onde o CFAR permite separar eventos acústicos significativos do ruído ambiente.

De acordo com Ferreira (2016) e (Wang et al., 2001), a fórmula que descreve essa análise está representada na Equação (7).

$$T_{cfar}(X) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} X_k^v}{(\sum_{k=0}^{N-1} X_k)^v} \quad (7)$$

Sendo:

X_k : k -ésimo elemento do valor absoluto da transformada rápida de Fourier (FFT);

N : quantidade total de dados;

v : expoente com valor ajustável.

De acordo com (WANG et al., 2001), $v = 1$ e $v = \infty$ correspondem a um detector de energia e para $2 < v < 3$, tem-se obtido um bom desempenho da estatística para uma ampla faixa.

2.5.5 Desvio do Valor Médio (MVD)

O parâmetro MVD (do inglês, *Mean Value Deviation*) é uma métrica estatística utilizada para quantificar a variação de um conjunto de dados em relação à sua média. Ela mede o desvio médio dos valores individuais em relação ao valor médio do conjunto, ajudando a identificar a dispersão ou irregularidade dos dados. Em análise de sinais acústicos, a MVD pode ser utilizada para avaliar a estabilidade do sinal, detectar anomalias e comparar padrões sonoros em diferentes condições operacionais. De acordo com Ferreira (2016), o cálculo que representa a métrica em questão é descrito na Equação (8).

$$T_{mvd}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \log \frac{\bar{X}}{X_k} \quad (8)$$

Sendo:

X_k : k -ésimo elemento do valor absoluto da transformada rápida de Fourier (FFT);

N : quantidade total de dados;

$\bar{X}$: valor médio de X_k .

2.5.6 Correlação Linear e Correlação de Pearson

O ajuste linear é um método estatístico utilizado para modelar a relação entre uma variável independente e uma variável dependente, assumindo que essa relação pode ser representada por uma linha reta. Essa técnica é amplamente empregada em diversas áreas da ciência e engenharia para analisar tendências, prever valores e compreender a influência de uma variável sobre outra.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida estatística que quantifica a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis. Ela varia de -1 a +1 e se obtemos um valor próximo de +1, conclui-se que existe uma forte correlação positiva, ou seja, as variáveis tendem a aumentar juntas. Mas se o valor for próximo de -1 indica uma forte correlação negativa, ou seja, as variáveis tendem a diminuir juntas. E se o valor for próximo de 0, mais fraca é a correlação ou de fato não há nenhuma relação linear entre as variáveis. Quanto mais próximo dos extremos de intervalo, mais forte é a correlação. A fórmula da correlação de Pearson é dada pela Equação (9).

$$r = \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2) - (\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (9)$$

Sendo:

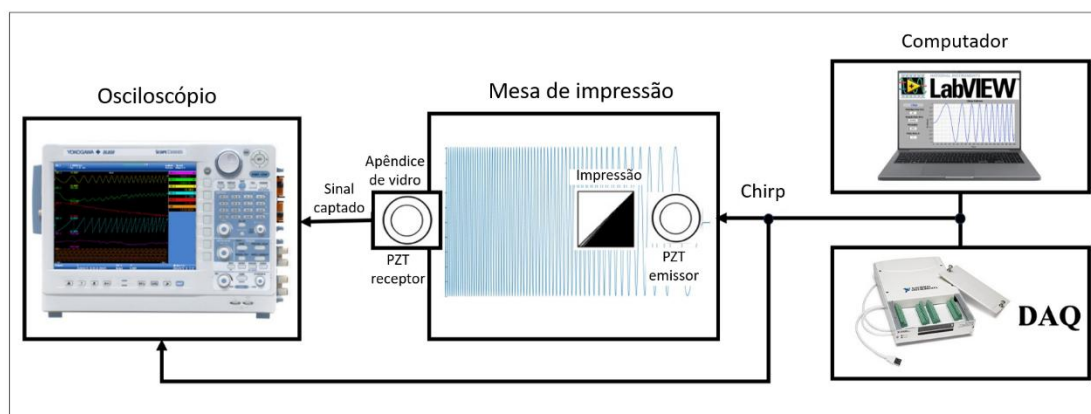
x_i e y_i : são os valores das variáveis analisadas;

$\bar{x}$ e $\bar{y}$: são as médias das respectivas variáveis.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em uma impressora do tipo FDM da fabricante GTMax3D, modelo Core A1V2, cuja mesa de impressão possui as dimensões de (310 x 210 x 4) mm (largura x comprimento x espessura). Dois transdutores piezoelétricos (PZT) de baixo custo de 27,0 mm diâmetro e 15,0 mm diâmetro para o emissor e receptor, respectivamente, foram acoplados nas extremidades opostas da mesa utilizando uma gota de adesivo instantâneo de cianocrilato. O receptor PZT foi acoplado a um bloco de vidro de dimensões (50x50x2,5) mm (largura x comprimento x espessura) fixado à mesa de impressão com adesivo de cianocrilato e posicionada no lado oposto do emissor como representado na Figura 8 visando mitigar a influência do calor da mesa de impressão em relação a resposta do sensor receptor, devido a sensibilidade térmica.

Figura 9 - Diagrama de Blocos do Experimento



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Para os ensaios experimentais foi utilizada a placa de aquisição da fabricante National Instruments, modelo NI USB-6221 que, em conjunto com o *software* LabVIEW, foi configurada para gerar os cinco sinais do tipo *chirp* com frequência inicial de 0 kHz e frequência final de 250 kHz e amplitude de 5V. A frequência de 250 kHz foi escolhida com base nos resultados apresentados em por Giroto et al. (2019) e Silva De Freitas e Guimarães Baptista (2016), onde

foi determinado que a frequência máxima de operação do transdutor PZT é de 250 kHz.

Os sinais do emissor e receptor foram coletados e armazenados pelo osciloscópio da fabricante Yokogawa, modelo ScopeCorder DL850, com frequência de amostragem de 2 MHz e, posteriormente, processados utilizando o software MATLAB®. Dessa forma, foi possível satisfazer o teorema de Nyquist-Shannon, já que a frequência de amostragem utilizada pelo equipamento (2 MHz) foi de 8 vezes a frequência máxima do sinal *chirp*. O valor em questão foi definido com base em uma melhor representação do sinal e a capacidade de detectar detalhes rápidos ou variações que poderiam ser perdidas em uma taxa de amostragem mais baixa.

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS

Os experimentos consistiram na fabricação de peças monocamadas com dimensões de (50 x 50 x 0,4) mm (largura x comprimento x espessura) em quatro diferentes condições. A primeira sendo considerada uma peça regular, ou seja, sem defeitos ou material faltante e as outras três com defeitos de fabricação programados manualmente no *G-Code* durante a fabricação das linhas de *raster*, que aumentam de forma crescente em cada condição produzindo peças com 0%, 32%, 50% e 68% de defeito respectivamente.

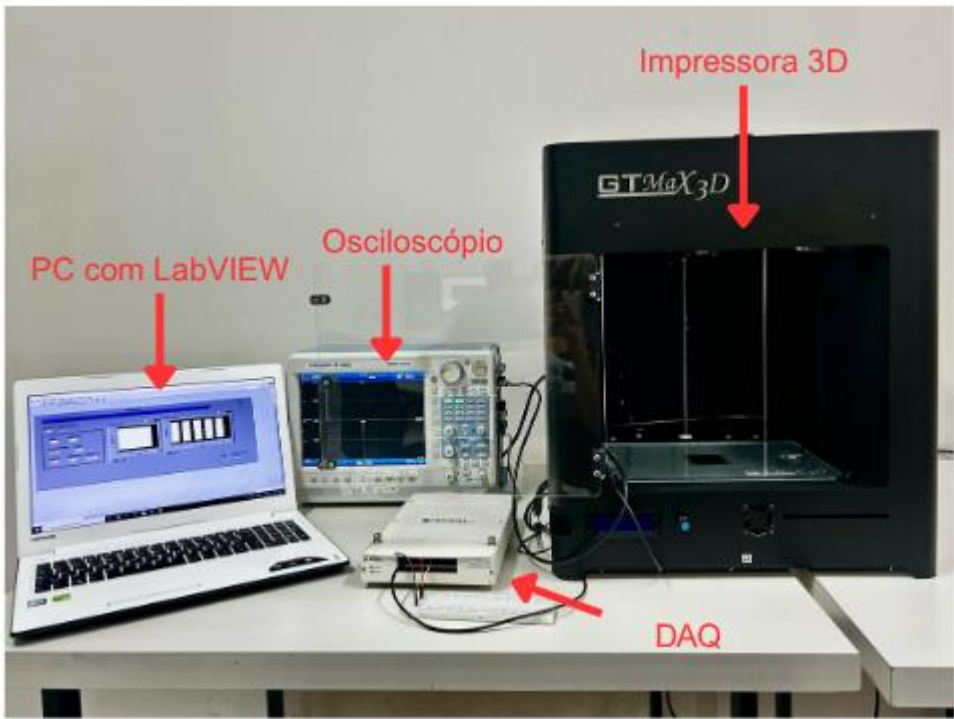
As peças foram impressas utilizando o filamento de PLA na cor preta e desenhadas no *software* SketchUp® com 2 linhas de contorno para o preenchimento do padrão externo e 170 linhas de *raster* para o preenchimento interno, com ângulo de 45°, as quais para cada condição de defeito apresentarão menos linhas de raster. O processo de fatiamento foi executado no *software* Simplify® e os demais parâmetros de impressão utilizados estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de configuração do experimento

Parâmetros de Impressão	Valores
Temperatura do Extrusor	180°C
Temperatura da Mesa	65°C
Diâmetro do Extrusor	0,4 mm
Diâmetro do filamento	0,4 mm
Ângulo de <i>raster</i>	45°
Linhas de contorno	2 linhas
Linhas de <i>raster</i>	170 linhas

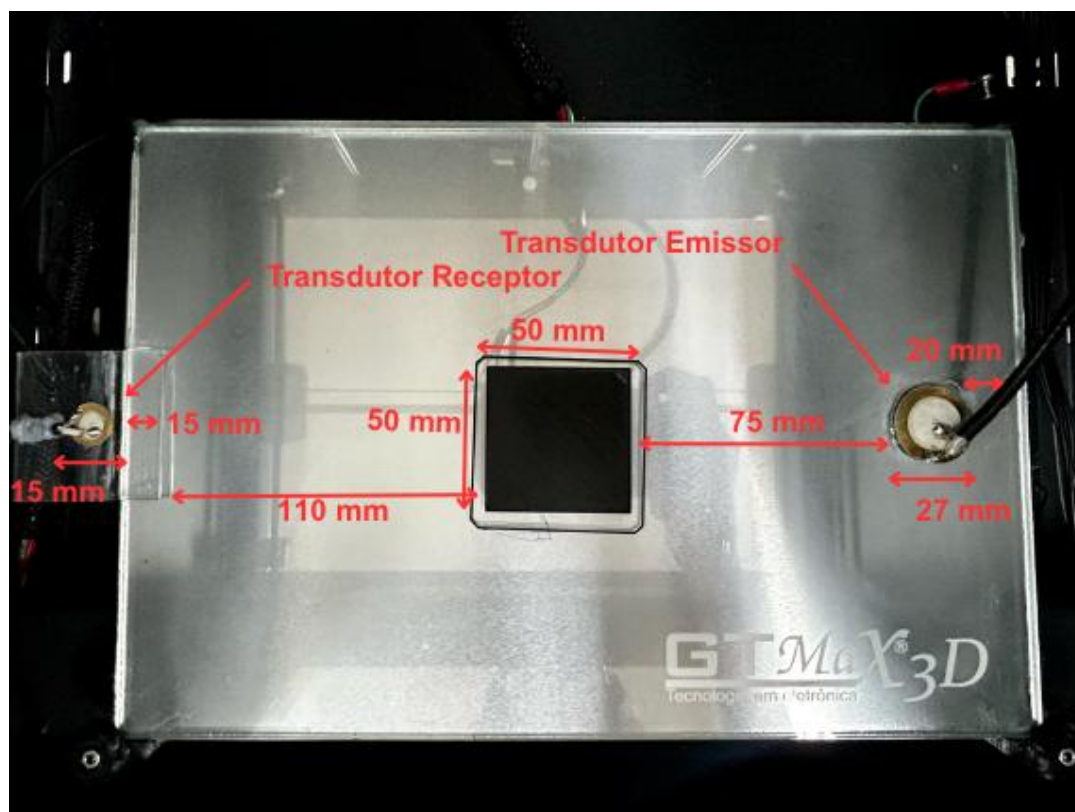
A Figura 10 representa o banco de ensaio contendo o sistema de aquisição de dados, osciloscópio e a impressora 3D.

Figura 10 - Banco de ensaio



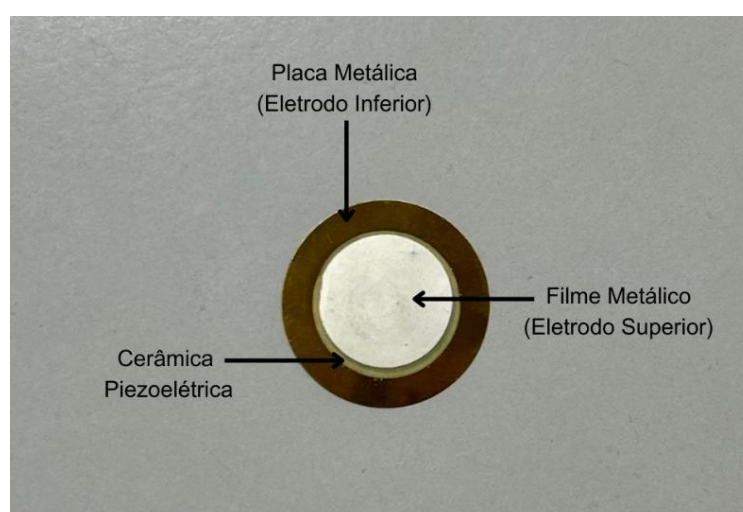
As Figuras 11 e 13 representam a mesa e a câmara de impressão com uma peça regular impressa e a Figura 12 apresenta o modelo de PZT utilizado.

Figura 11 - Mesa de impressão (Peça Regular)



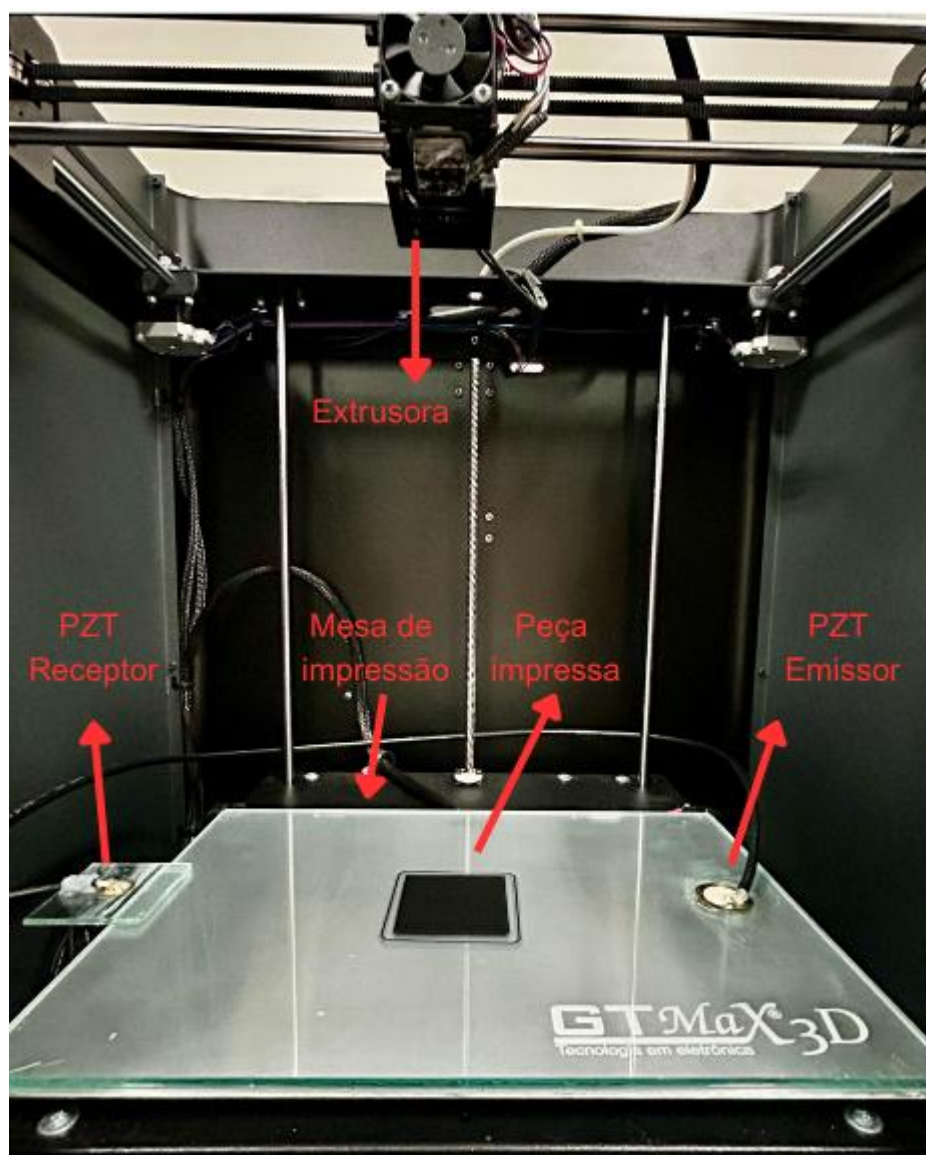
Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Figura 12 - Transdutor PZT utilizado no ensaio experimental



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Figura 13 - Câmara de impressão



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

3.2 TESTES PRELIMINARES

Antes de iniciar os testes nas peças impressas, foi necessário validar a montagem do banco de ensaios por meio da análise do sinal *chirp* na mesa de impressão 3D. Essa etapa envolveu a verificação das respostas tanto do sensor emissor quanto do receptor, garantindo um desempenho adequado na relação emissão-recepção dos transdutores, além da avaliação da qualidade da fixação dos dispositivos na mesa.

Após confirmar que o sistema estava operando corretamente, realizou-se a coleta do sinal de referência, denominado *baseline*. Esse sinal corresponde à transmissão do ultrassom na superfície da mesa de impressão sem a presença de nenhum material, servindo como parâmetro comparativo para os sinais obtidos nas condições de teste (peça regular e com defeitos).

A coleta do *baseline* é essencial para estabelecer uma referência confiável, permitindo a identificação de frequências indesejadas, atenuações e outros efeitos inerentes ao ambiente experimental que poderiam comprometer a análise dos resultados. Dessa forma, essa estratégia assegura que as interpretações obtidas sejam padronizadas minimizando a influência de fatores externos e ruídos indesejados.

3.3 PROCESSO DE IMPRESSÃO E MONITORAMENTO

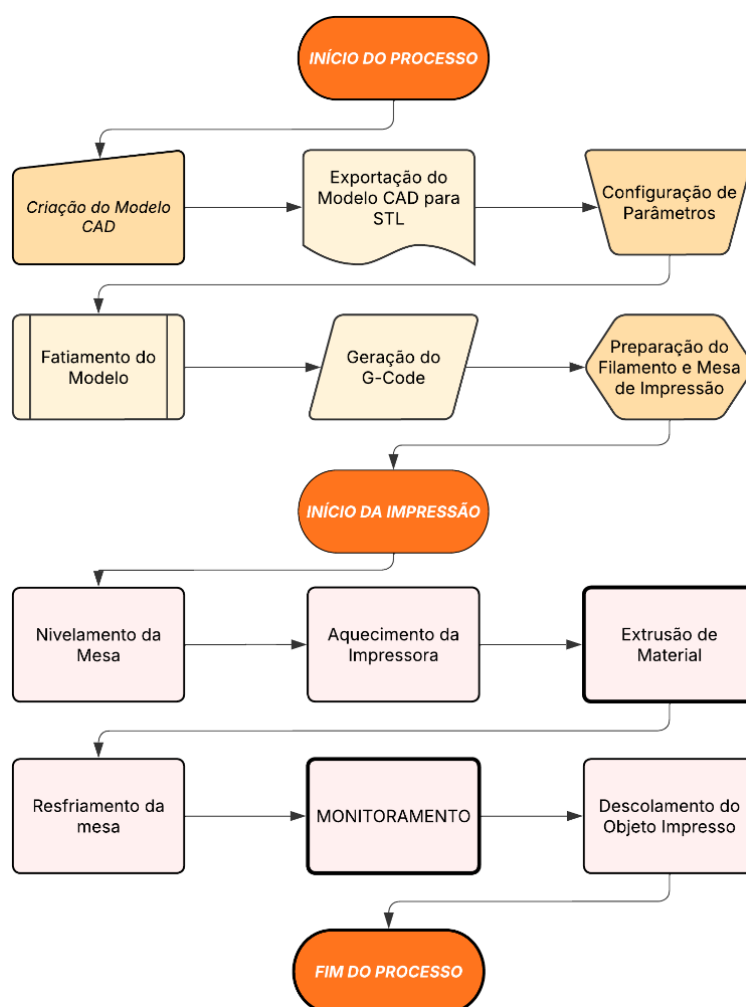
O processo tem início com o desenvolvimento do modelo tridimensional em um software de desenho assistido por computador CAD (do inglês *Computer-Aided Design*). Após sua criação, o modelo é exportado no formato STL (do inglês, *Standard Tessellation Language*), que converte a geometria tridimensional em uma malha composta por triângulos, garantindo compatibilidade com softwares de fatiamento e impressoras 3D.

Na sequência, os parâmetros de impressão são configurados no software de fatiamento. Entre eles, destacam-se a altura e espessura das camadas, velocidade de impressão, e densidade de preenchimento, variáveis que influenciam diretamente na qualidade e no tempo de fabricação da peça. O software realiza o fatiamento do modelo, convertendo-o em camadas sobrepostas e gerando um arquivo no formato *G-Code*. Esse arquivo contém as instruções detalhadas de movimentação e operação da impressora.

Com o *G-Code* pronto, inicia-se a preparação do filamento, que é carregado no sistema de extrusão da impressora. Antes da impressão, é fundamental nivelar a mesa de impressão para garantir um alinhamento preciso com o bico extrusor, prevenindo falhas na aderência da primeira camada. Com a mesa nivelada, a impressora aquece tanto o bico extrusor quanto a mesa, atingindo a temperatura ideal para a extrusão do filamento e a fixação da peça.

O processo de impressão tem início com a fusão e deposição do material camada por camada, até que a peça seja completamente formada. Após a conclusão da impressão, ocorre o resfriamento controlado da impressora, reduzindo gradualmente a temperatura do bico extrusor e da mesa. Esse resfriamento é essencial para garantir o endurecimento da peça e facilitar sua remoção sem danos na retirada. A técnica CTT é executada logo após a peça ser fabricada e o bico extrusor retornar à posição de origem, aguardando o resfriamento da mesa de impressão até temperatura ambiente (25°C) para que não haja deformação na peça. A Figura 13 apresenta o fluxograma do processo de impressão 3D, detalhando cada etapa desde a criação do modelo digital até a finalização da peça impressa.

Figura 13 - Fluxograma do processo de impressão



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

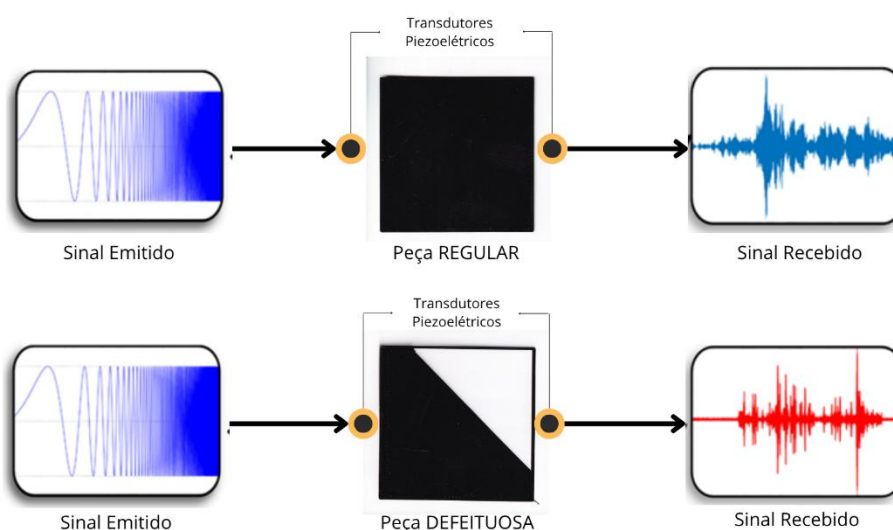
. O monitoramento realizado no experimento é considerado ativo devido à ocorrência da emissão além de apenas a recepção de sinais. O qual o sinal de resposta é coletado após percorrer a mesa de impressão com a peça a ser estudada, conforme demonstram as Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Representação CAD da mesa de impressão



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Figura 15 - Técnica CTT aplicada ao peça de FDM: (a) Estrutura Íntegra; (b) Estrutura Defeituosa



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Finalmente, procede-se à remoção da peça da mesa de impressão de modo a evitar danos à peça ou à superfície da peça e da mesa. Este fluxo de trabalho detalhado foi seguido rigorosamente durante a produção das amostras fabricadas no presente estudo, garantindo a precisão e a qualidade das peças fabricadas.

3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional é fundamental para a correlação com os resultados obtidos a partir dos sinais. Por meio da medição da quantidade de material faltante, é possível verificar se os resultados obtidos refletem a real condição da fabricação.

3.4.1 Digitalização de Alta Resolução

Para viabilizar a inspeção visual, foi utilizado um scanner Canon LiDE 300 BR para digitalizar a superfície superior de cada peça impressa, gerando imagens em alta resolução. Como essas imagens apresentam as informações visuais em pixels (px) e visando convertê-las para valores em milímetros, as dimensões das peças foram analisadas no software de domínio público Fiji, que utiliza o ImageJ para análise de imagens científicas.

A partir dessa análise, foram extraídas informações como largura total, altura total e a largura entre segmentos das peças. Em seguida, utilizando o mesmo software, foram realizadas medições específicas que permitiram a obtenção de dados geométricos sobre as regiões com ausência de material nas peças. Após a extração dessas informações, as imagens processadas, juntamente com as medições efetuadas, foram salvas em arquivos de imagem em alta resolução. Por fim, todas as dimensões extraídas foram convertidas para milímetros e organizadas em uma ficha técnica, conforme apresentado na Tabela 6 no tópico seguinte.

3.4.2 Classificação dos Defeitos

O procedimento de classificação desses defeitos é primordial para o desenvolvimento de um sistema de detecção que realize um diagnóstico assertivo sobre a condição da peça no processo. Para que seja desenvolvida uma interpretação que correlacione os sinais obtidos com as peças impressas, a classificação de acordo com as medidas das áreas dos defeitos foi escolhida para entender como a ausência de material tem influência nos sinais obtidos. A análise das áreas das peças proporcionou informações úteis ao desenvolvimento do processo de classificação. A análise de área dos defeitos também foi realizada utilizando o software Fiji, que por meio do escaneamento das peças pôde viabilizar o processo de medição por pixels.

Está contido na ficha técnica da Tabela 6 todos os dados pertinentes às análises de área e preenchimento das peças.

Tabela 6 - Ficha Técnica das Peças

REGULAR		
Dimensão (mm)	Área Impressa (mm ²)	Preenchimento (%)
50 x 50 x 0,4	2500	100
Área do defeito (mm): 0,000		

DEFEITO 1		
Dimensão (mm)	Área Impressa (mm ²)	Preenchimento (%)
50 x 50 x 0,4	1739,162	69,56648
Área do defeito (mm): 760,838		





DEFEITO 2		
Dimensão (mm)	Área Impressa (mm ²)	Preenchimento (%)
50 x 50 x 0,4	1366,413	54,65652
Área do defeito (mm): 1133,587		



DEFEITO 3		
Dimensão (mm)	Área Impressa (mm ²)	Preenchimento (%)
50 x 50 x 0,4	990,480	39,619
Área do defeito (mm): 1509,520		



Por meio da avaliação das peças dos três ensaios é possível notar que elas apresentaram diferenças crescentes nos seus valores de área e preenchimento como era esperado de acordo com a alteração feita na programação do *G-Code* das amostras, o que atribuiu tais diferenças.

Análises de processamento de sinais digitais e aplicação de estatísticas matemáticas foram realizadas com base na análise dimensional demonstrada na Tabela 6, que tem suma importância para a correlação e classificação dos sinais obtidos.

3.5 MÉTODO DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

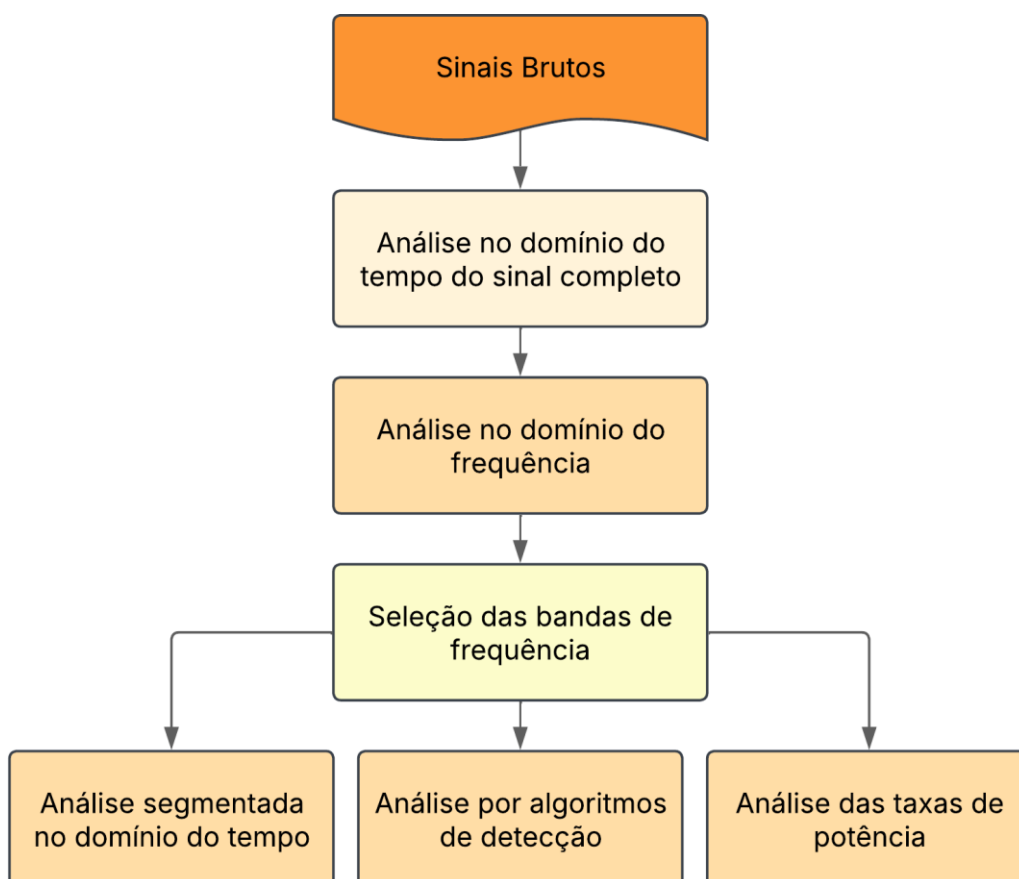
A obtenção dos sinais analógicos dos cinco chirps emitidos em sequência, é realizada por meio da coleta dos sinais de resposta e de emissão dos transdutores por duas entradas para serem analisados pelo osciloscópio. Dentro do osciloscópio, um conversor analógico-digital amostra o sinal analógico em intervalos regulares definidos pela taxa de amostragem. O ADC transforma

esses valores contínuos em uma sequência de valores digitais discretos, representados por números. O sinal digitalizado é então armazenado na memória interna do osciloscópio.

Para o estudo da relação entre o estado das peças e os sinais recolhidos por meio da técnica CTT, doze algoritmos foram desenvolvidos e implementados no software MATLAB® como serão apresentados nos fluxogramas contidos nesse capítulo.

A estratégia metodológica de processamento está representada no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 - Estratégia Metodológica de Processamento



Antes da extração dos *chirps*, o sinal bruto passou por uma etapa inicial de filtragem com um filtro digital IIR com o objetivo de eliminar interferências de baixa frequência provenientes da rede elétrica. Esse ruído, comum em sistemas de aquisição, pode afetar a detecção correta dos eventos acústicos de interesse, além de comprometer a análise espectral. A aplicação desse filtro assegura uma

base de sinal mais limpa para a extração dos pulsos e o posterior processamento estatístico.

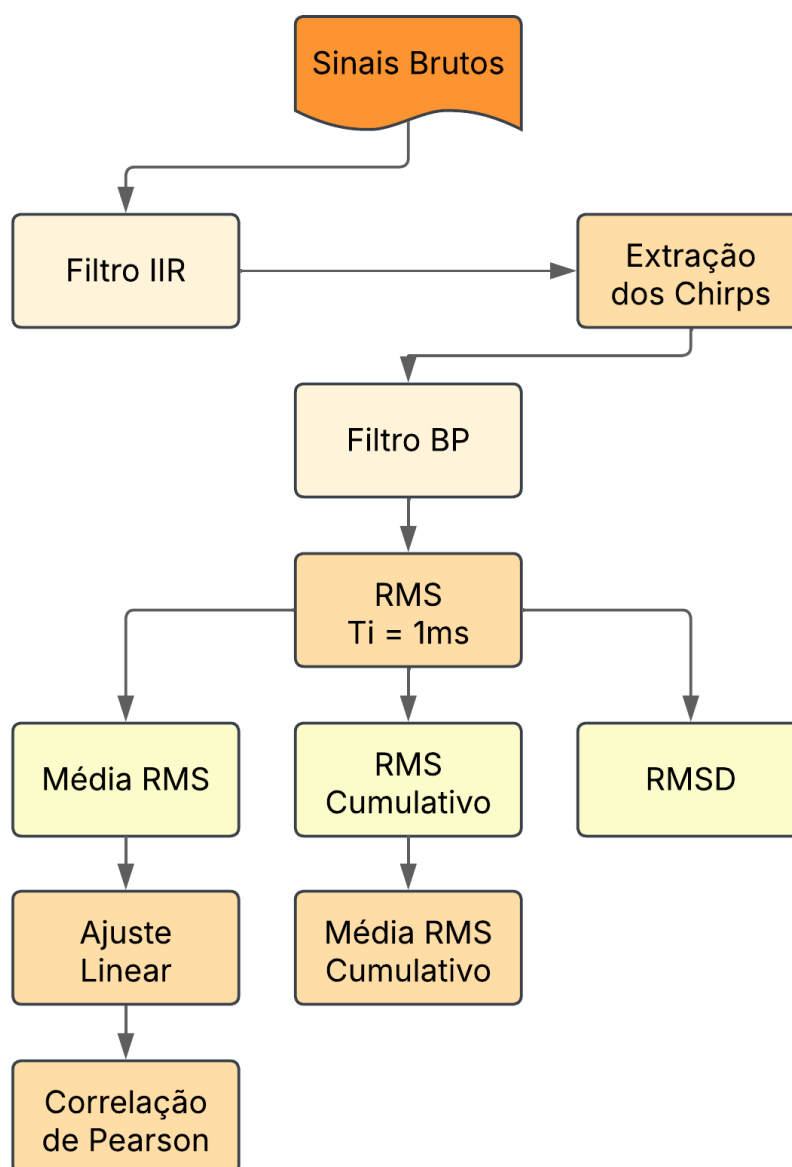
Inicialmente é realizada a análise de correlação dos sinais brutos dos cinco *chirps* emitidos para cada condição, a fim de identificar e garantir a repetibilidade dos ensaios. Posteriormente, a sequência de cinco *chirps* recebidos de cada parte impressa foi extraída em *chirps* individuais para permitir analisar cada sinal *chirp* separadamente, dado que o sinal é representado digitalmente por meio de amostras.

O processamento dos sinais do domínio do tempo foi realizado em duas etapas principais: uma análise considerando o espectro completo do sinal e uma análise focada em bandas de frequência pré-selecionadas.

Tanto na análise do domínio do tempo para o espectro todo quanto para as bandas de frequências selecionadas para o estudo de aprofundamento, foram iniciadas as avaliações por meio das estatísticas de RMS usando um tempo de integração de um milissegundo, média RMS, RMS cumulativo, RMSD, ajuste linear dos dados e Correlação de Pearson.

No caso da análise segmentada de frequências, como pré-processamento foi aplicado um filtro digital do tipo passa-faixa *Butterworth* de 5ª ordem utilizando a função *butter*. O filtro teve como objetivo isolar as bandas espectrais de interesse, previamente determinadas com base na análise da concentração de energia dos sinais como está exemplificado na Figura 17.

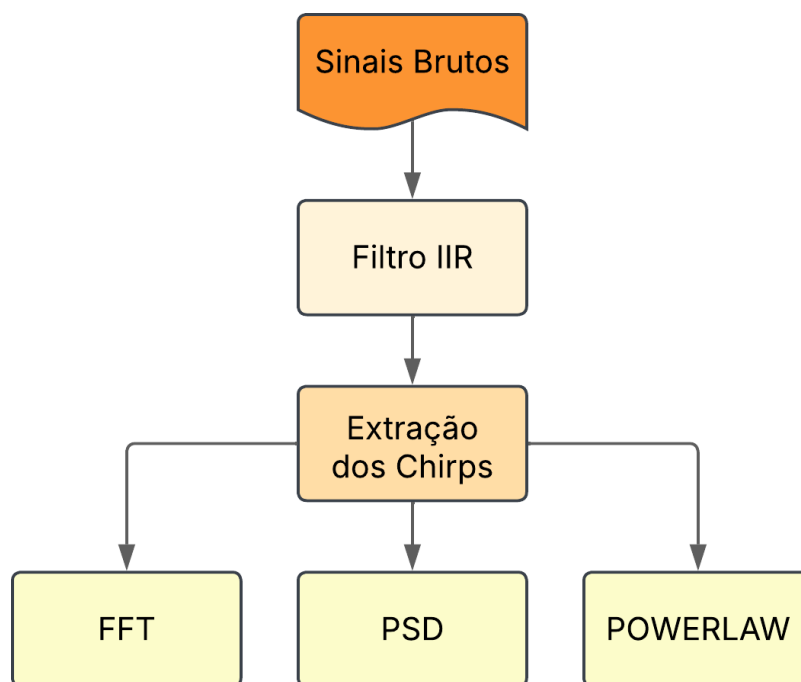
Figura 17 – Processamento no domínio do tempo (Análise Segmentada)



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Com base nos resultados da análise do sinal completo, a análise no domínio da frequência foi empregada visando verificar a existência de bandas de frequência consideradas ótimas para a realização do processamento detalhado utilizando as mesmas técnicas de processamento aplicadas ao sinal completo como mencionado anteriormente. O fluxograma que representa as análises no domínio da frequência que determinaram quais seriam essas bandas que foram realizadas o aprofundamento de estudo no domínio da tempo está representada na Figura 18.

Figura 18 - Processamento no domínio da frequência (Bandas B1 e B2)

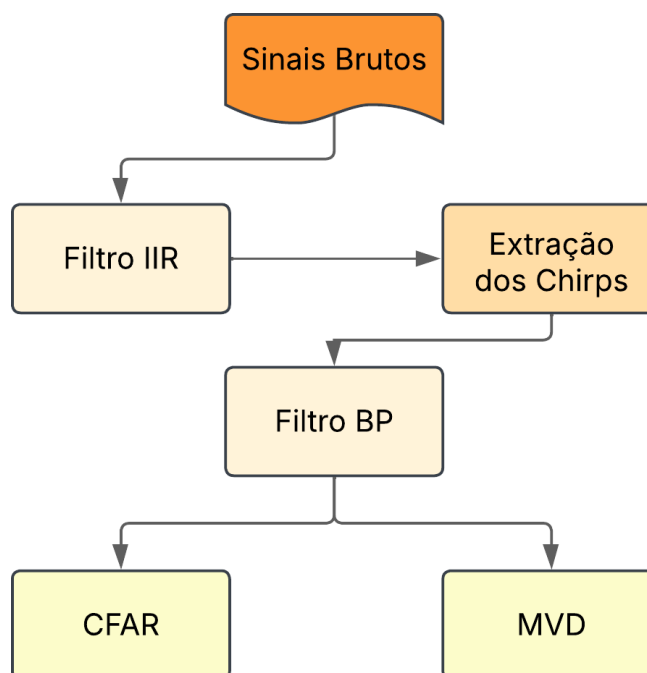


Fonte: Elaborado pela autora, 2025

A análise no domínio da frequência foi empregada através de três algoritmos cujo objetivo era analisar quais componentes de frequência estavam presentes no sinal, o quanto de energia estava presente em relação as frequências e como essa energia estava se distribuindo entre as frequências analisadas. Para isso foi utilizado o cálculo de PSD (*Power Spectral Density*), no qual o sinal *chirp* foi obtido utilizando o método *Welch* com janela *Hamming* com 50% de sobreposição, FFT (*Fast Fourier Transform*) e *Power-Law*, a fim de compreender a distribuição da energia do material na propagação do sinal.

Algoritmos de detecção, como CFAR (*Constant False Alarm Rate*) e MVD (*Mean Variance Deviation*), foram empregados para identificar possíveis variações que indiquem os defeitos bem como está representado no fluxograma da Figura 19.

Figura 19 - Processamento baseado em algoritmos de detecção

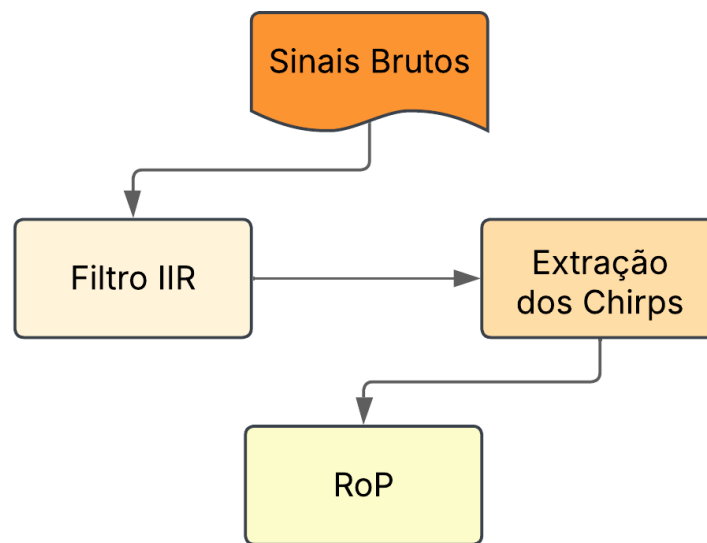


Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Essa abordagem possibilita a visualização das diversas frequências presentes no sinal, permitindo a identificação de padrões característicos. A partir dessas características, é possível extrair informações para uma análise mais aprofundada. Por exemplo, a observação de picos de frequência ou características desconhecidas podem ser cruciais na descrição e interpretação de propriedades específicas dos sinais, ampliando assim o conhecimento obtido por meio da análise.

E para finalizar e complementar a avaliação do método CTT, foi aplicada a estatística *Ratio of Power* (RoP) diretamente no sinal *chirp*, a fim de determinar a sensibilidade para a análise de defeitos das bandas selecionadas em relação ao espectro total como demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Processamento da taxa de potência



Fonte: Elaborado pela autora, 2025

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

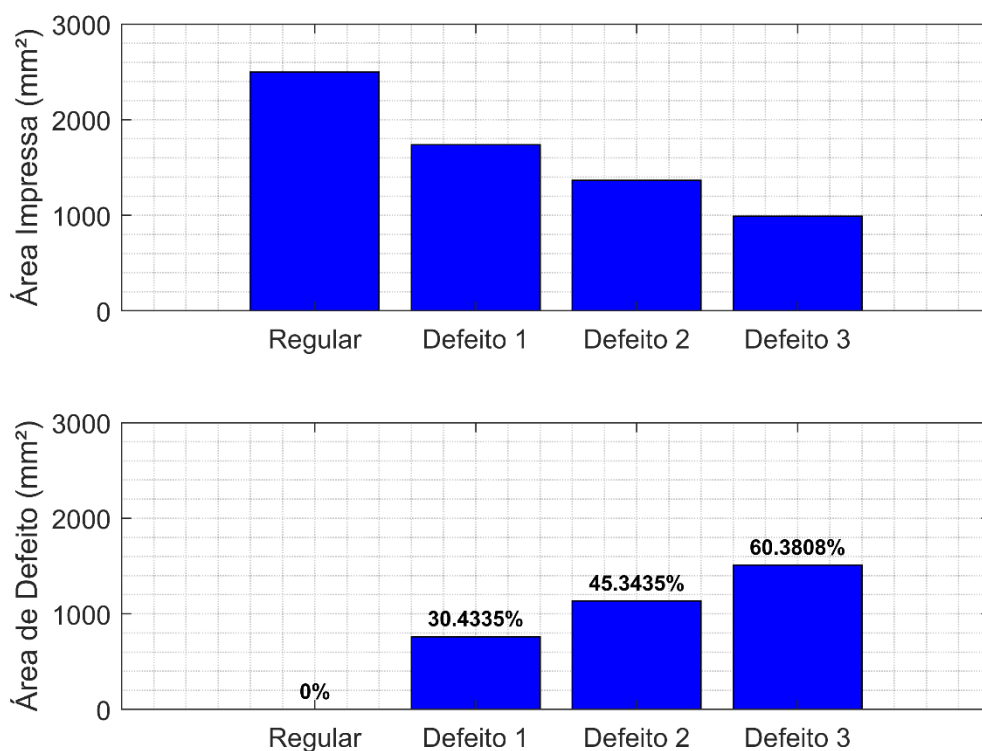
4.1 ANÁLISE DE PREENCHIMENTO

A análise dos gráficos apresentados permite avaliar a relação entre a quantidade de material impresso e a presença de defeitos nas peças fabricadas por impressão 3D.

De acordo com a Figura 21(a), observa-se que a área impressa (em mm²) diminui à medida que a peça apresenta defeitos. A peça regular possui a maior área impressa, enquanto as peças com defeito 1, defeito 2 e defeito 3 mostram uma redução progressiva na quantidade de material depositado.

Conforme a Figura 21(b), a área correspondente aos defeitos aumenta conforme a severidade dos problemas na impressão. A peça regular não apresenta defeitos (0%), enquanto defeito 1, defeito 2 e defeito 3 possuem, respectivamente, 30%, 45% e 60% de área comprometida.

Figura 21 - Análise de preenchimento

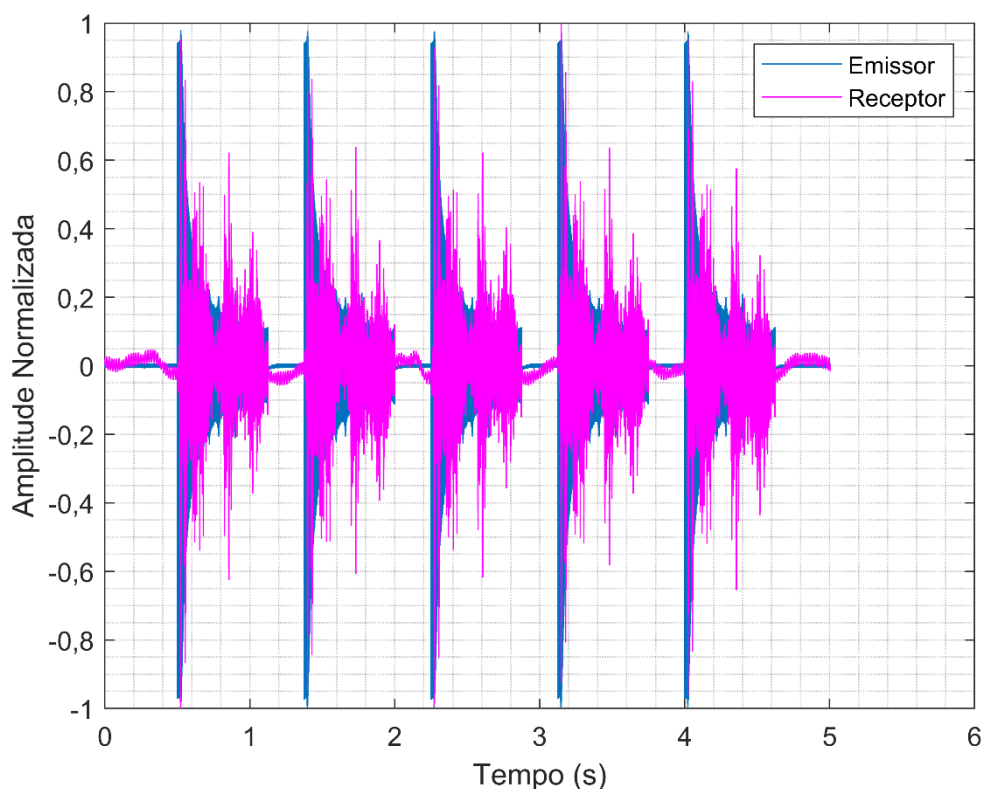


Essa análise sugere que a redução na quantidade de material impresso está diretamente relacionada ao aumento da porcentagem de defeitos. Isso pode ser atribuído a falha na deposição do filamento programada no *G-Code* conforme era esperado.

4.2 AVALIAÇÃO DE REPETIBILIDADE

Os sinais *chirp* foram emitidos com cinco repetições subsequentes com duração de 5 segundos. O emissor envia os sinais *chirp* com frequência que varia de 0 a 250 KHz, enquanto o receptor capta os sinais transmitidos através da peça. A amplitude dos sinais emitidos diminui com o aumento da frequência devido às características dimensionais e capacitivas dos transdutores, e a amplitude dos sinais recebidos sofre atenuação significativa por perdas energéticas intrínsecas do sistema. A Figura 22 representa como se apresentam os cinco sinais que foram emitidos pelo PZT emissor sobrepostos com os recebidos pelo PZT receptor nas condições de estudo.

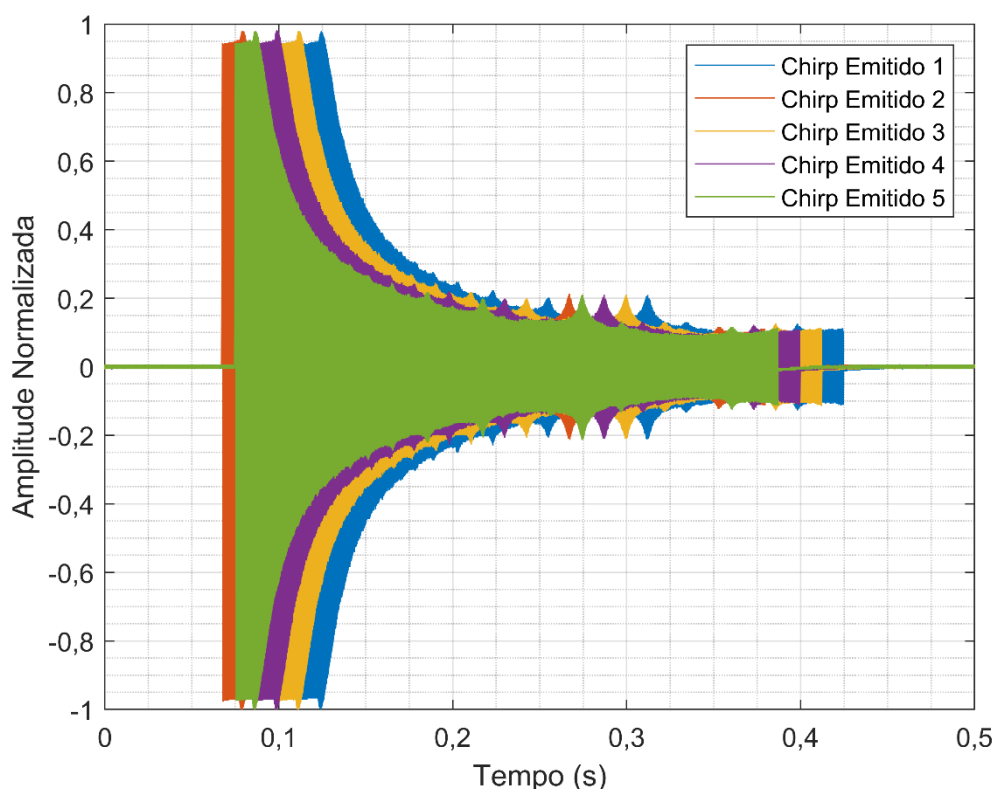
Figura 22 - Sinais brutos dos cinco *chirps*



Para avaliar a repetibilidade dos sinais emitidos pelo transdutor piezelétrico, foi realizado o cálculo da correlação de Pearson entre os cinco *chirps* emitidos sequencialmente. Para verificar a repetibilidade do processo de emissão dos sinais acústicos utilizados nas análises, foi realizada uma avaliação da similaridade entre os cinco *chirps* emitidos durante a varredura de cada peça. Como os sinais gerados deveriam ser teoricamente idênticos, pequenas diferenças temporais na extração dos trechos poderiam comprometer a correlação direta. Por isso, foi aplicada uma etapa de alinhamento temporal seguida de normalização, com o objetivo de ajustar o corte, eliminar possíveis offsets e variações de amplitude.

Após esse pré-processamento, a média da correlação obtida foi de 99,76%, evidenciando a repetibilidade e estabilidade da emissão do sinal de entrada durante a inspeção de cada peça, garantindo que eventuais variações observadas nos sinais recebidos possam ser atribuídas às características estruturais da amostra testada, como a presença de defeitos como demonstrado na Figura 23.

Figura 23 - Correlação dos cinco *chirps* emitidos



As modificações da forma do sinal emitido para o recebido e essa diferença observada no gráfico da Figura 23 podem ser explicadas devido a vários fenômenos característicos das ondas acústicas como reflexão, difração e refração. Como o sinal emitido viaja através do material piezoelétrico, passando pela mesa de impressão até encontrar a peça impressa chegando finalmente ao PZT receptor, as mudanças de meio de propagação e a flexão do sinal quando encontra a peça física causam tais alterações observadas entre os sinais emitidos e recebidos, mas também fazem com que o sinal se modele de modo a incorporar características da peça a ser monitorada em cada condição de impressão. A correlação entre os sinais emitidos e recebidos é praticamente total, evidenciando a alta repetibilidade do método. No entanto, o conjunto de frequências variando de 0 kHz a 250 kHz nos sinais emitidos apresenta alterações de amplitude ao longo do percurso até o transdutor receptor. Essas alterações ocorrem devido a esses fenômenos acústicos que afetam essas ondas geradas pelo emissor PZT, enquanto atravessam elementos como a mesa de impressão, a peça fabricada, os próprios transdutores e o bloco de vidro.

É evidente na figura que os sinais recebidos sofrem modificações significativas devido a esses efeitos, o que indica que eles carregam informações específicas sobre as condições da peça fabricada. Assim, a análise do conteúdo em frequência dos sinais e dos valores de RMS (*Root Mean Square*) pode ser uma abordagem eficaz para extrair características correlacionadas às condições das peças. Esses resultados serão detalhados a seguir.

4.3 RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA (RMS)

Foi calculado o valor RMS do sinal utilizando a Equação (1) para o sinal todo, utilizando um tempo de integração de 1 ms. Esse cálculo é fundamental para avaliar a energia do sinal ao longo do tempo, proporcionando uma métrica útil para comparar os diferentes estados da peça.

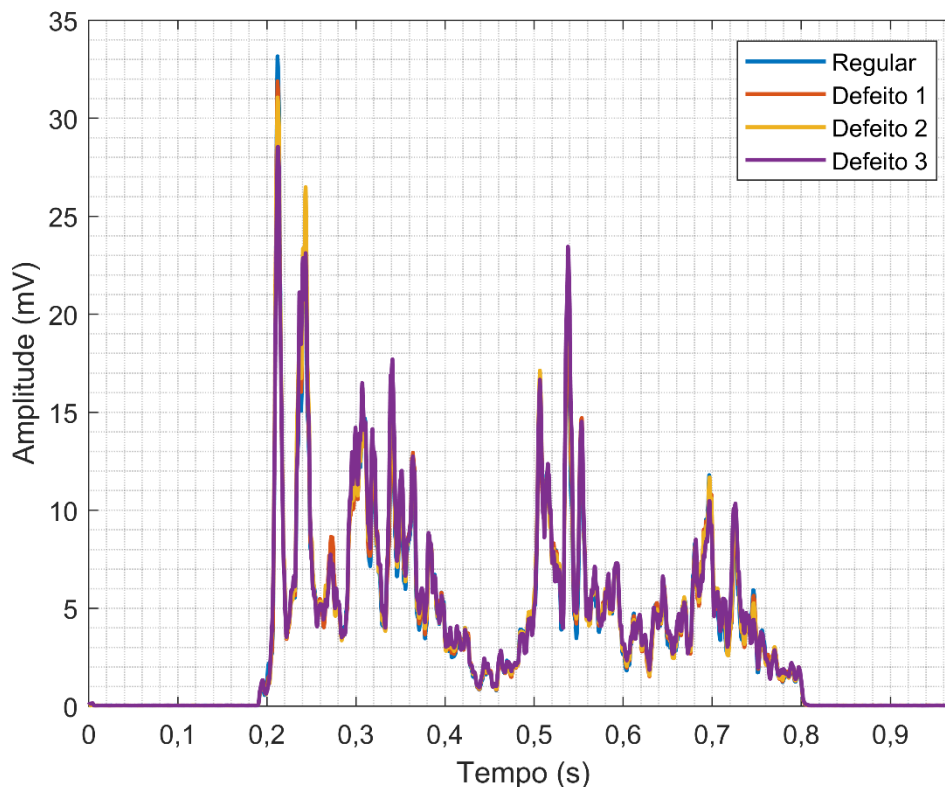
O gráfico gerado a partir desse processamento apresenta quatro sinais distintos, correspondentes às diferentes condições da peça: uma considerada regular e três com defeitos. No eixo Y, temos os valores de amplitude em milivolts

(mV), enquanto no eixo X, o tempo é representado em segundos (s). A análise desses sinais permite observar como a presença de defeitos altera a resposta do sinal, facilitando a detecção e classificação deles.

A Figura 24 apresenta os valores da raiz quadrada média que foram calculados a partir do primeiro sinal bruto do pacote de cinco *chirps* em todas as condições das peças. A partir da figura, é possível observar que as amplitudes correspondentes a cada condição das peças são bastante próximas, com sobreposições ao longo do intervalo de tempo do *chirp* recebido

A potência média representa a intensidade média do sinal ao longo do tempo, proporcionando uma medida de sua força média, independente das variações temporais. Por outro lado, a energia total reflete a quantidade total de trabalho realizado pelo sinal desde o seu início até o fim. Portanto, por meio dessa análise é possível verificar o quanto esse sinal varia mesmo com toda a complexidade de sua composição.

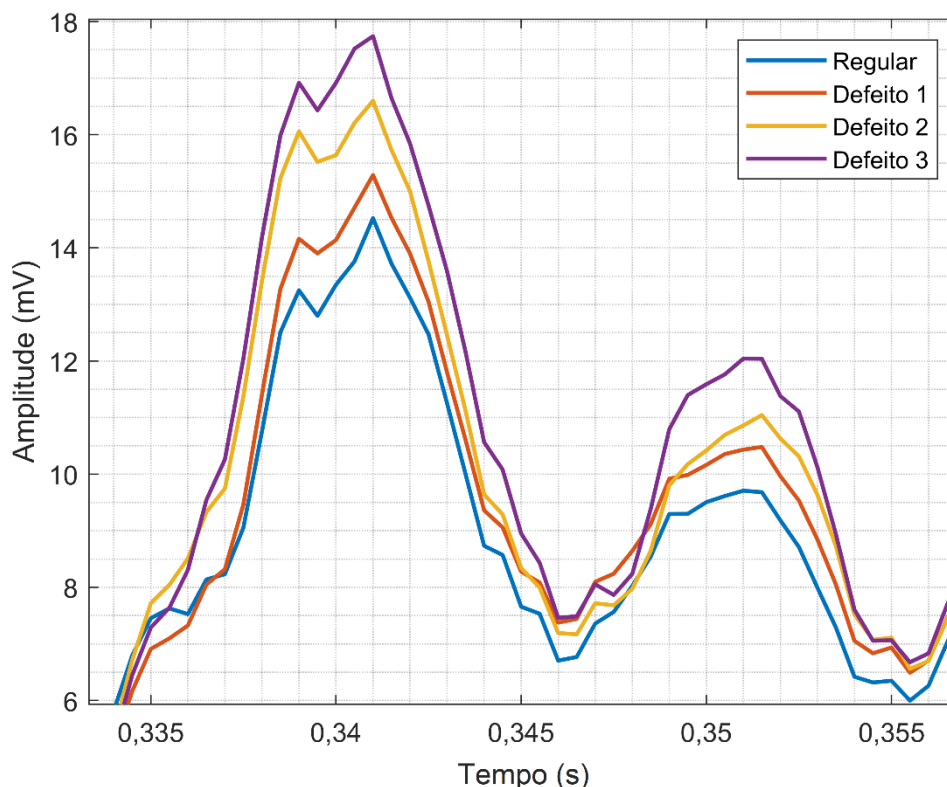
Figura 24 - Valores RMS para o primeiro *chirp* de cada condição



No entanto, há regiões em que as amplitudes de cada condição apresentam diferenças, como observado na Figura 25. Isso indica que a

atividade do sinal acústico no transdutor receptor varia de acordo com a condição da peça, embora seja necessária uma análise mais aprofundada. Cabe destacar que a mesma análise pode ser realizada para os demais *chirps*, uma vez que a correlação entre eles é muito alta, como mencionado anteriormente.

Figura 25 - Tendência de variação dos valores RMS para cada condição



A Figura 25 representa um instante específico do sinal em que foi perceptível a variação na amplitude das ondas em resposta às diferentes condições estruturais da peça. No contexto do monitoramento baseado em CTT, espera-se que a propagação da onda seja influenciada diretamente pela presença de discontinuidades no material, alterando a amplitude do sinal recebido.

Quando a onda do sinal *chirp* se propaga através da mesa de impressão e interage com a peça em análise, esta última atua como um meio físico que impõe resistência à propagação da onda ultrassônica, promovendo efeitos de

atenuação, dispersão e reflexão. A resistência imposta ao deslocamento da onda está relacionada à impedância acústica representada pela Equação (10).

$$Z = \rho c \quad (10)$$

Sendo:

ρ : é a densidade do material;

c : a velocidade do som na estrutura.

A presença de defeitos afeta a transmissão do sinal de maneira significativa. Em uma peça regular, sem defeito, a onda sofre maior atenuação devido à presença contínua do material, resultando em menor amplitude do sinal recebido. Isso ocorre porque a onda perde energia ao atravessar o meio, devido a mecanismos de absorção e espalhamento internos devido a presença de mais material. Por outro lado, à medida que o nível de defeito aumenta, há uma redução da massa volumétrica, diminuindo a resistência ao deslocamento da onda. Com menos material atuando como meio dissipativo, ocorre menor atenuação e maior transmissão da energia da onda, o que resulta em uma elevação da amplitude do sinal registrado pelo transdutor receptor.

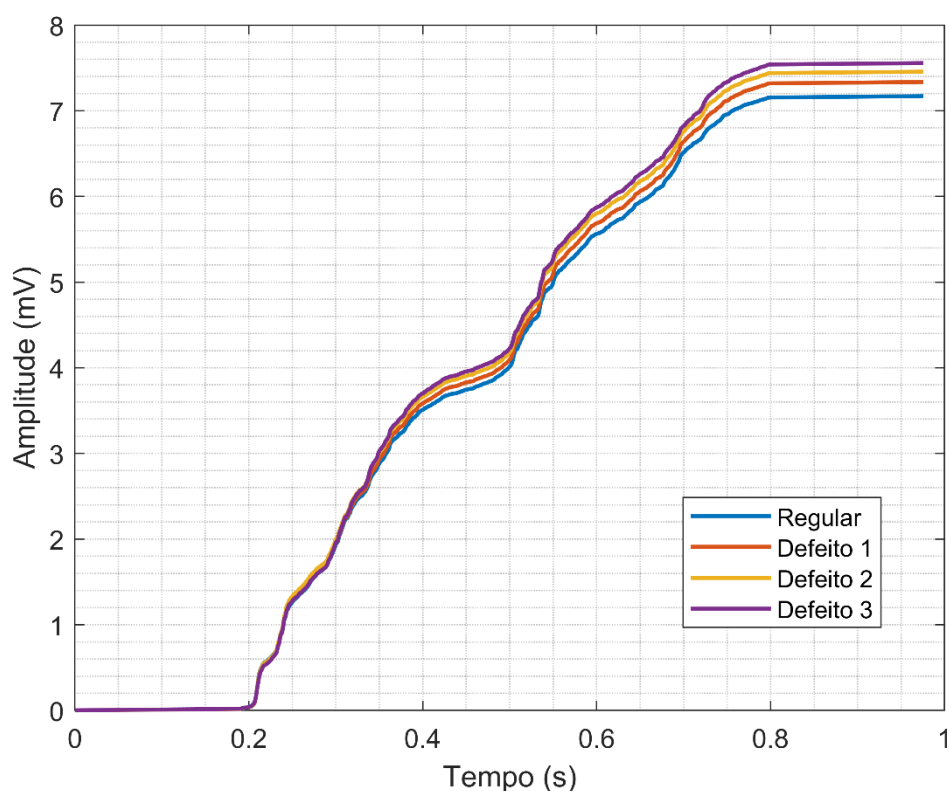
Esse comportamento está de acordo com a teoria da propagação de ondas ultrassônicas em meios heterogêneos, onde a diminuição da impedância acústica média do meio reduz a perda de energia por absorção e reflexão, favorecendo a transmissão do sinal. Assim, pode-se afirmar que a análise da amplitude do sinal recebido pode ser utilizada como um parâmetro sensível para detectar e classificar descontinuidades estruturais na peça fabricada via FDM.

Complementarmente é interessante investigar a energia cumulativa de cada *chirp* recebido a partir dos valores RMS obtidos para cada condição da parte porque pode nos indicar se algo está mudando no sinal, e por meio disso verificar se sinal de cada condição está apresentando um comportamento que indique o aumento na área do defeito.

4.4 ENERGIA CUMULATIVA DA RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA

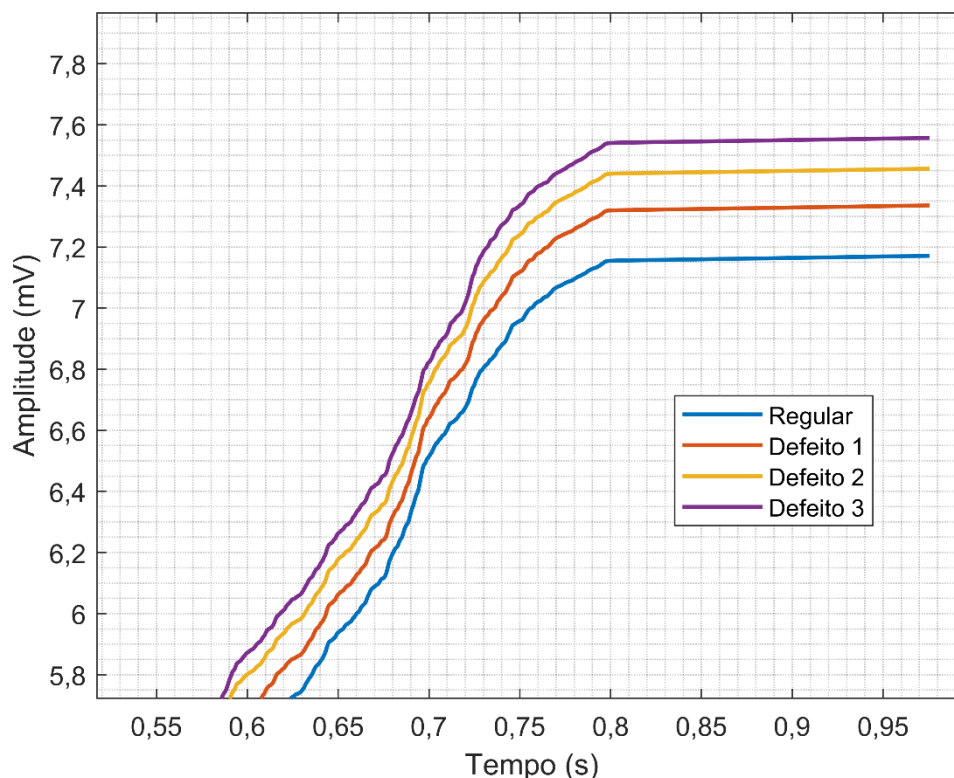
A Figura 26 mostra os valores RMS cumulativos do primeiro *chirp* para cada condição da parte. Primeiramente, observa-se um aumento constante e não linear, nos valores RMS cumulativos ao longo da duração do *chirp* recebido, conforme esperado.

Figura 26 - Soma cumulativa dos valores RMS



No entanto, os valores RMS cumulativos são muito próximos no início de cada *chirp*, aumentando a diferença de amplitude entre eles a partir de 1/3 da duração do *chirp* até o final do tempo decorrido, onde as diferenças são muito mais pronunciadas, como pode ser visto na ampliação na Figura 27. É visto que os valores de RMS cumulativos mostram que a amplitude dos sinais recebidos aumenta de forma notável e apresenta a tendência de variação de acordo com a condição da peça. Isso sugere uma característica interessante para potencialmente monitorar defeitos na impressão.

Figura 27 - Soma cumulativa dos valores RMS (Ampliado)



Com base na análise anterior, observa-se que a intensidade dos sinais acústicos ao longo da duração do *chirp* varia de forma mais acentuada à medida que o defeito na peça aumenta. Além disso, foi calculada a média dos valores RMS de cada *chirp* para cada condição da peça, conforme será demonstrado na Figura 27. Nota-se um aumento nos valores médios de RMS conforme o nível de defeito aumenta. Essas diferenças são semelhantes às observadas nos valores RMS cumulativos. Para o cálculo da média RMS as diferenças apresentaram variações em relação à peça regular (sem defeito).

Para os valores médios do RMS obteve-se um aumento entre a relação da energia do sinal para as respectivas áreas de defeitos os resultados são demonstrados conforme na Figura 28 e Tabela 7.

Figura 28 - Média dos valores RMS

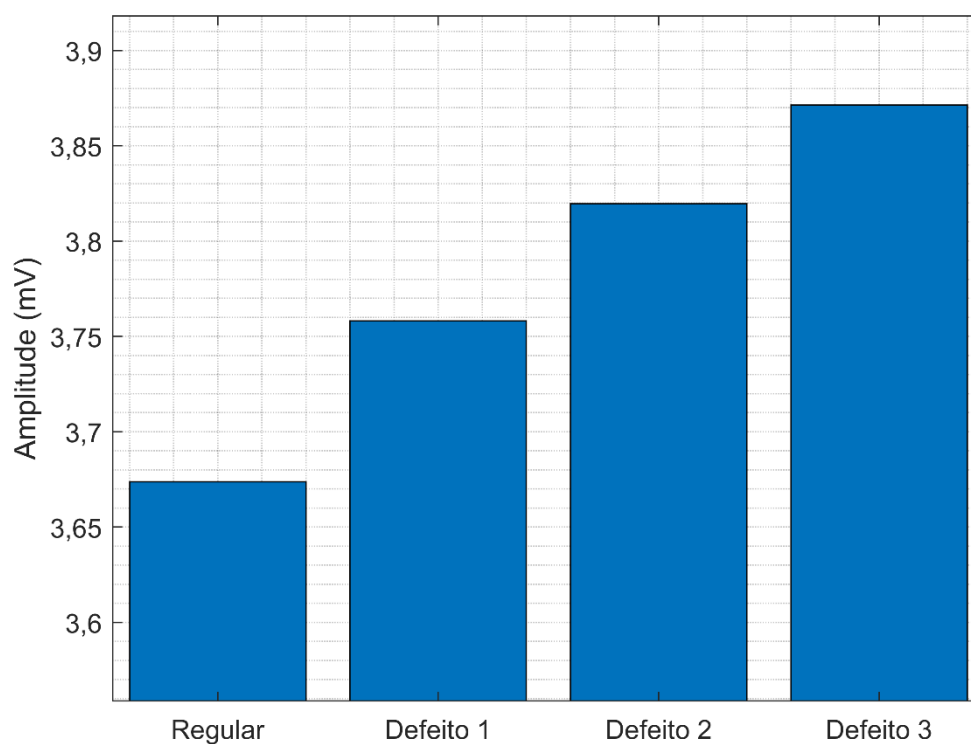


Tabela 7 - Relação RMS com níveis de defeitos

Área do defeito (mm ²)	Média do RMS (mV)	Aumento de Energia (%)
Sem defeito	3,67	Baseline
760,838	3,75	2,17
1133,587	3,81	3,81
1509,520	3,86	5,17

Para a análise feita por meio do cálculo do RMS cumulativo entre a relação do sinal com as áreas dos defeitos, o gráfico da Figura 29 apresenta a variação da amplitude média e a Tabela 8 o aumento percentual médio.

Figura 29 - Média da soma cumulativa dos valores RMS

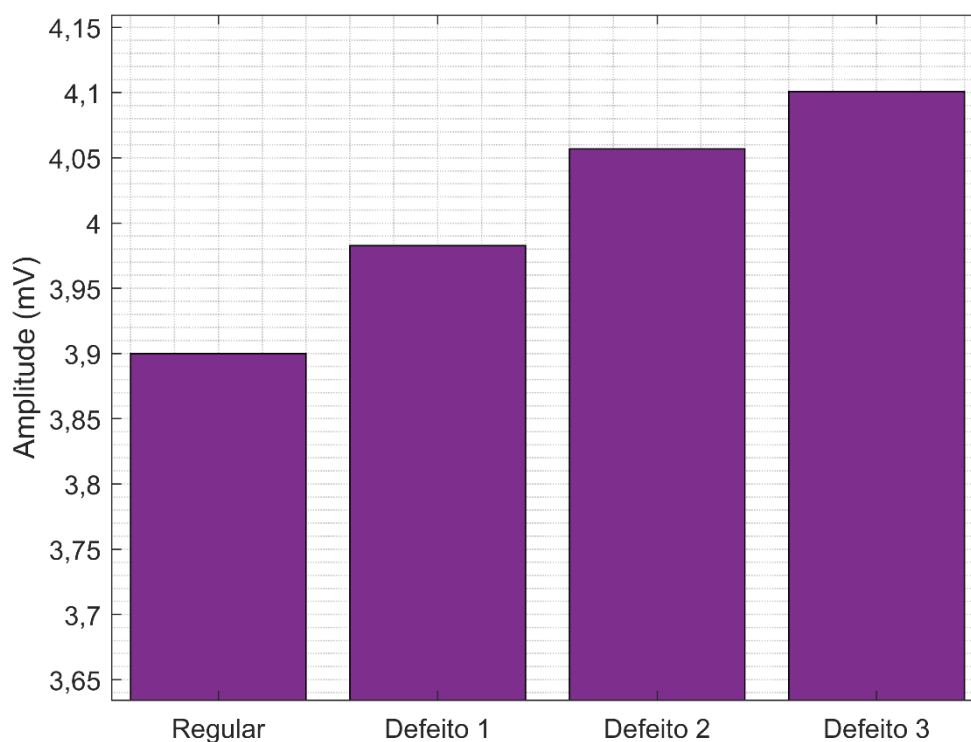


Tabela 8 - Relação RMS Cumulativo com níveis de defeitos

Área do defeito (mm ²)	Média do RMS (mV)	Aumento de Energia (%)
Sem defeito	3,88	Baseline
760,838	3,98	2,57
1133,587	4,05	4,38
1509,520	4,10	5,67

Observando os resultados obtidos por meio da análise de médias do RMS dos sinais, é possível afirmar que a energia do sinal cresce de forma diretamente proporcional ao aumento das áreas dos defeitos. De acordo com as análises anteriores pode-se sustentar a ideia de que a peça se comporta como um filtro

dentro do setup de transmissão do sinal, e isso pode ser verificado por meio do acréscimo da energia do sinal.

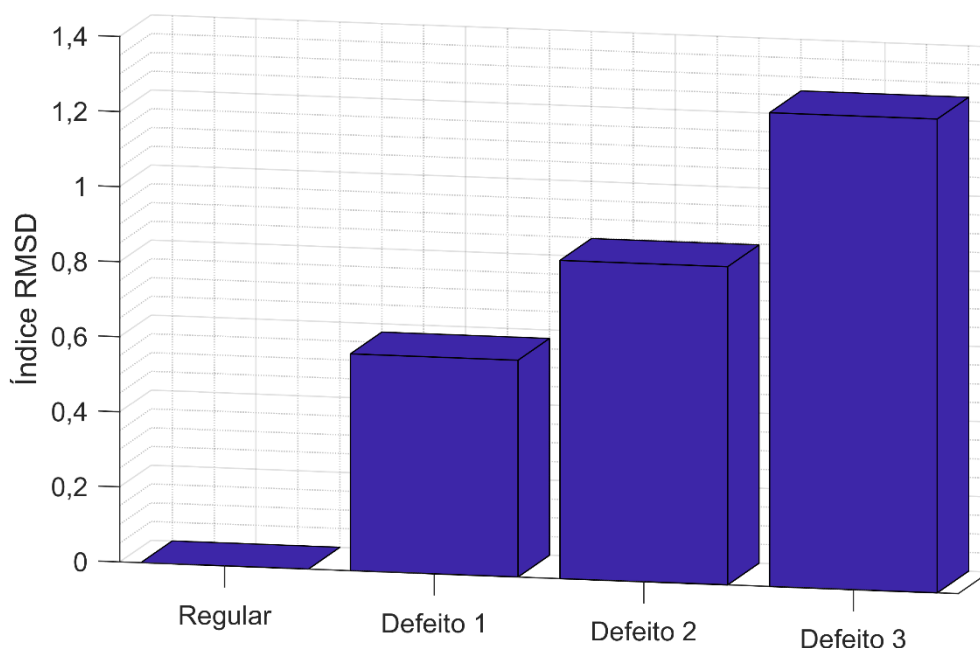
A peça regular para esse estudo pode ser considerada como uma barreira ideal para comparação com as outras condições e assim então sucessivamente quanto maior a área do defeito, maior também a energia do sinal. Quanto mais material mais difícil fica para as ondas acústicas percorrerem sua trajetória entre os transdutores, conforme vai havendo a redução de material caracterizando os níveis de defeitos a energia aumenta gradativamente, refletida nos índices dos valores médios de RMS normal e cumulativos, devido a desobstrução do caminho que o sinal faria ao percorrer o setup até o transdutor receptor pela ausência de material. Com base na análise prévia, foram calculadas as correlações entre os valores médios de RMS e as áreas defeituosas das peças impressas para avaliar a relação entre essas variáveis.

4.5 DESVIO DA RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA (RMSD)

Buscando o aprofundamento no estudo da variação entre os sinais coletados, o cálculo de *Root Mean Square Deviation* (RMSD) é uma medida estatística amplamente utilizada para caracterização do desvio em relação aos valores médios relacionados à diferença de amplitude. Em sinais acústicos, o RMSD fornece uma única medida da intensidade média das diferenças, sendo utilizada para avaliar a precisão de modelos de predição e a semelhança entre sinais.

A Figura 30 mostra o resultado do RMSD dos sinais calculado por meio da Equação (2) analisando todas as bandas de frequências, partindo de 0kHz a 250kHz, de cada condição em relação à peça regular considerada como baseline.

Figura 30 - Valores RMSD



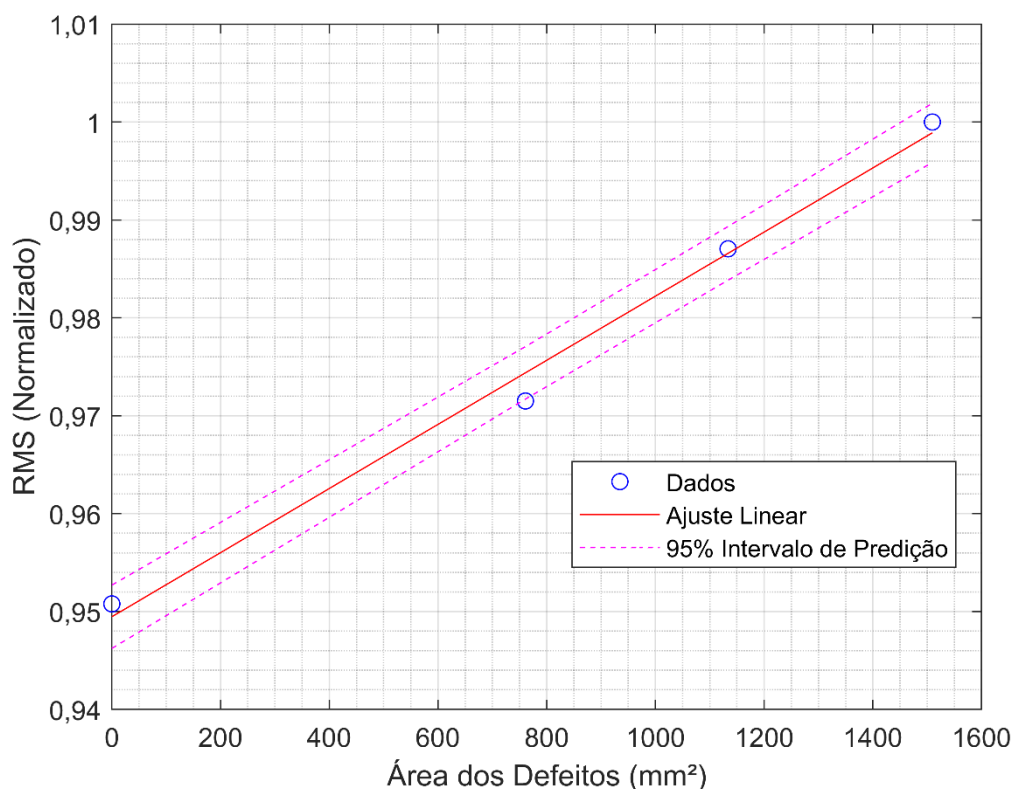
Por meio do gráfico observa-se que o aumento da área do defeito causa também o aumento da amplitude de resposta do desvio bem como as respostas encontradas nas análises anteriores.

4.6 AJUSTE LINEAR E CORRELAÇÃO DE PEARSON

O Ajuste linear é uma técnica estatística aplicada para modelar e analisar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes, com o objetivo de encontrar a linha reta que melhor descreve essa relação nos dados. Sua utilização é amplamente empregada para prever valores e entender como mudanças nas variáveis preditoras afetam a variável resposta, proporcionando uma forma clara e quantitativa de interpretar a relação entre variáveis e realizar previsões. O gráfico apresentado na Figura 31 mostra a relação entre as áreas dos defeitos (em mm²) e os valores normalizados de RMS médio (em mV) para um conjunto de dados das áreas de defeitos. Os pontos azuis representam os dados observados, ou seja, o valor nominal das áreas, enquanto a linha vermelha indica o ajuste linear mais preciso realizado

usando regressão linear. Observamos uma tendência linear positiva, onde um aumento na área dos defeitos resulta em um aumento nos valores normalizados de RMS cumulativo.

Figura 31 - Ajuste linear dos dados



O intervalo de previsão de 95%, representado pelas linhas tracejadas magenta, fornece uma faixa de confiança para as medidas investigadas. A proximidade dos pontos de dados à linha de ajuste linear sugere uma correlação linear forte entre as variáveis de áreas dos defeitos com a média dos valores RMS normalizados.

Como análise complementar, a correlação de Pearson foi empregada para melhor entendimento da relação entre as variáveis. A correlação de Pearson é uma medida estatística que quantifica a intensidade e a direção da relação linear entre duas variáveis. Ela varia de -1 a +1 e se obtemos um valor próximo de +1, conclui-se que existe uma forte correlação positiva, ou seja, as variáveis tendem a aumentar juntas. Mas se o valor for próximo de -1 indica uma forte correlação negativa, ou seja, as variáveis tendem a diminuir juntas. E se o valor for próximo de 0, mais fraca é a correlação ou de fato não há nenhuma relação linear entre

as variáveis. Quanto mais próximo dos extremos de intervalo, mais forte é a correlação. A matriz está representada na Tabela 9.

Tabela 9 - Matriz da Correlação de Pearson

Matriz de Correlação de Pearson (r)	
1.0000	0.9977
0.9977	1.0000

O valor encontrado por meio da correlação de Pearson foi de 0,9957 o que indica uma correlação forte entre os valores recebidos pelo transdutor receptor e às equivalências das respectivas áreas atribuídas a cada nível de defeito.

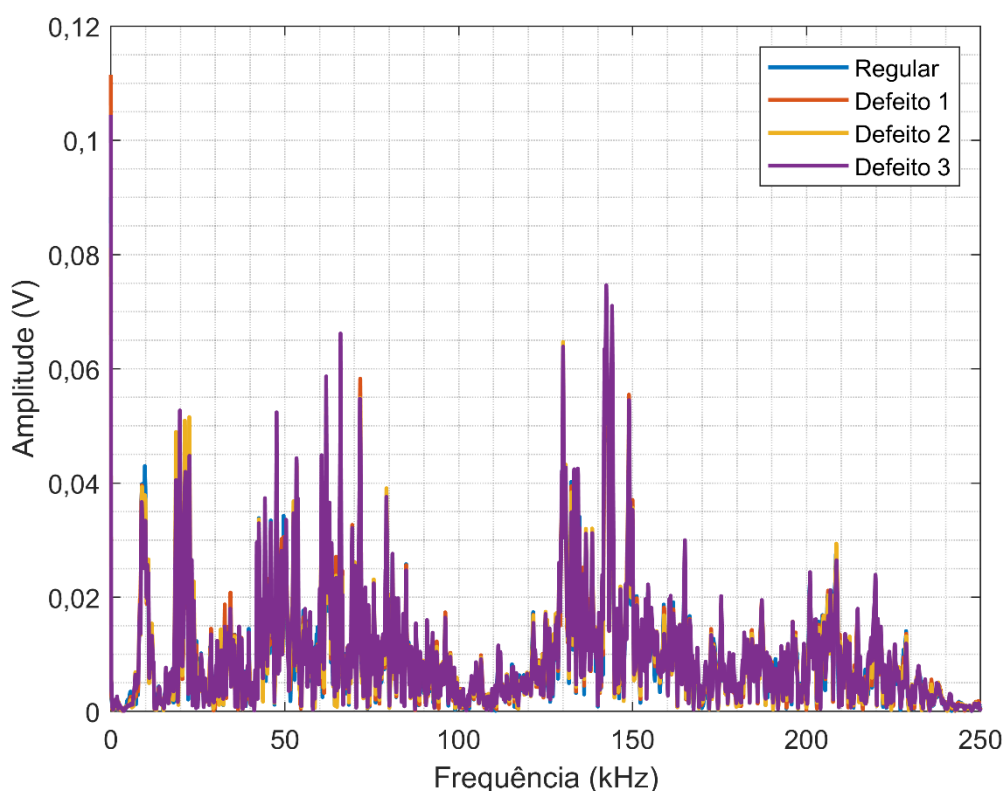
O coeficiente de determinação R-Squared é fundamental para validar modelos de ajuste linear, pois mostra o quão bem o modelo é capaz de explicar os dados. O coeficiente em questão demonstra se os dados seguem uma tendência linear e se o modelo ajustado é útil para realizar previsões. Quando o R-Squared é alto, indica que o modelo é confiável dentro do contexto dos dados analisados. Diferente da Correlação de Pearson que lida com a correlação de modo a entender o comportamento da tendência das variáveis de aumentarem de forma direta ou inversamente proporcional, o coeficiente de determinação mede a proporção da variância indicando a qualidade do ajuste. Valores próximos de 1 indicam que o modelo reduz significativamente a dispersão dos dados, explicando bem sua relação com a variável independente. O R-Squared, ou Coeficiente de Determinação (R^2) encontrado para esse estudo foi de 0,99532, justificando a tendência do modelo e sua confiabilidade para realização de previsões.

4.7 TRANSFORMADA DE FOURIER (FFT)

A Figura 32 apresenta o gráfico que demonstra os sinais de cada condição de peça que foi impressa no domínio da frequência. As frequências variam de 0kHz a 250kHz, de acordo com a característica de resposta do transdutor e programação do sinal *chirp*.

Pode-se notar que os sinais de cada condição se sobrepõem uns aos outros em determinadas frequências ao longo de todo o espectro. Nota-se que os sinais interagem de forma aleatória e são afetados por fenômenos inerentes às ondas acústicas como refração, difração e reflexão que desencadeiam uma série de interferências dos tipos destrutivas e construtivas que compõem toda a complexidade observada.

Figura 32 - Transformada de Fourier

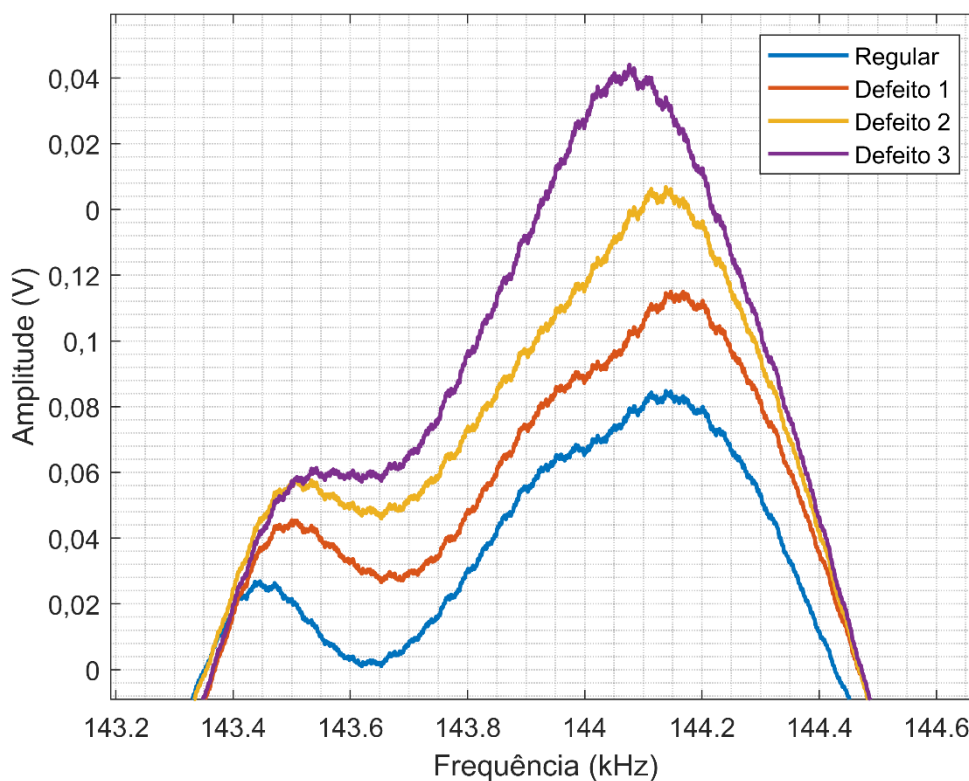


Existem também determinadas regiões onde é podem ser observadas as componentes de frequências sem sobreposições para verificar se existe uma frequência ótima que descreva a condição da peça de acordo com a quantidade

de material faltante. Por meio da quantidade material, pode-se avaliar que peça regular pela sua totalidade de preenchimento se comportará como um filtro que apresenta maior resistência para a passagem do sinal, sendo assim apresentaria uma amplitude menor que os demais sinais, comportamento esse que ocorreria sucessivamente para cada condição de defeito. Por meio de varredura manual foram encontradas duas bandas de frequências que podem ser utilizadas como referência para a análise espectral.

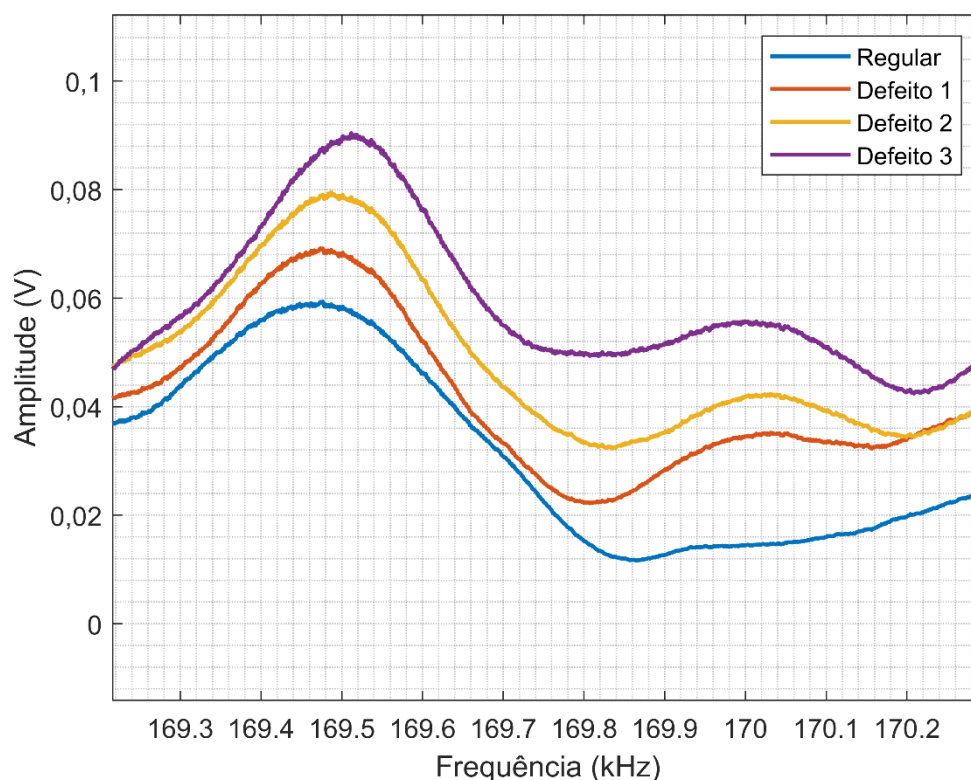
A primeira banda se encontra na faixa de frequência que vai de 143,4kHz a 144,4kHz e nela é possível observar o comportamento esperado para a análise com um destacamento pronunciado dos sinais com demonstrado na Figura 33. Embora haja a sobreposição em algumas partes é possível analisar que existe uma diferença entre os sinais quando avaliamos a relação entre a amplitude para a mesma faixa de frequência.

Figura 33 – FFT: Banda de frequência 143,4kHz - 144,4kHz



A segunda banda foi identificada na faixa de frequência de 169,4kHz a 170,4kHz a qual também foi possível verificar comportamento semelhante a primeira banda identificada. A Figura 34 demonstra o comportamento dos sinais na segunda banda.

Figura 34 – FFT: Banda de frequência 169,4kHz - 170,4kHz



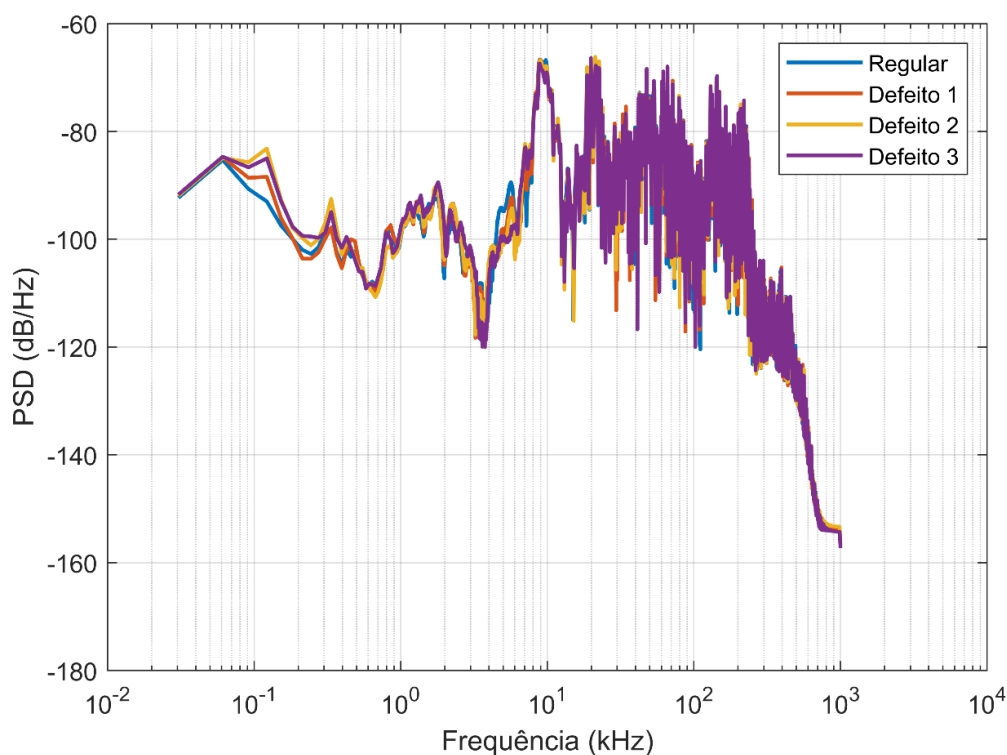
4.8 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA (PSD)

A Figura 35 mostra a Densidade Espectral de Potência (PSD) na qual pode-se observar que os sinais de cada condição se sobrepõem uns aos outros de maneira completa e parcialmente ao longo de quase todo o espectro como na análise de FFT. Porém existem certas regiões que apresentam faixas de frequência em que os sinais estão livres de sobreposições e podem ser observados de modo a verificar se as frequências encontradas na análise de FFT também apresentam mesmo comportamento ou se existe uma ou mais faixas de

frequências diferentes que descrevam as condições das peças de acordo com a quantidade de material faltante para cada nível de defeito.

Por meio da análise de acréscimo da quantidade material, confirma-se que a peça regular pela sua totalidade de preenchimento se comporta como um filtro que apresenta maior resistência para a passagem do sinal, sendo assim apresentaria uma amplitude menor que os demais sinais, comportamento esse que ocorre sucessivamente para cada condição de defeito também na análise espectral.

Figura 35 – Densidade Espectral de Potência
(Espectro do sinal para cada condição)



Bem como na análise com a Transformada de Fourier, bandas de frequência que representem o comportamento esperado do sinal também foram inspecionadas para a análise de densidade espectral, porém os resultados obtidos com a análise de PSD foram mais satisfatórios pois apresentaram menos ruídos como pode ser observado na Figura 36. Foi possível constatar que a partir do início das faixas selecionadas de observa-se de forma mais destacada as respostas dos sinais que correspondem com as características de cada condição impressa. Nota-se que a amplitude dos sinais apresenta um comportamento com

uma tendência de variação entre cada condição em relação ao preenchimento da área total que é o esperado pela aplicação desta técnica, a peça regular com uma amplitude menor, em seguida defeito 1 com a amplitude relativamente maior que a da regular, porém menos que a do defeito 2, e assim sucessivamente.

Esse comportamento dos sinais se perpetua nas faixas de frequências com período de 1 KHz como estão descritos em ambos os gráficos das Figuras 36 e 37. O que demonstra que um sistema de monitoramento para detecção de erros de impressão 3D poderia ser implementado nas faixas de frequência em questão onde não foram observadas sobreposição dos sinais e onde eles apresentaram uma resposta adequada ao que se esperava inicialmente com a técnica.

Figura 36 – PSD: Banda de frequência 143,4kHz - 144,4kHz

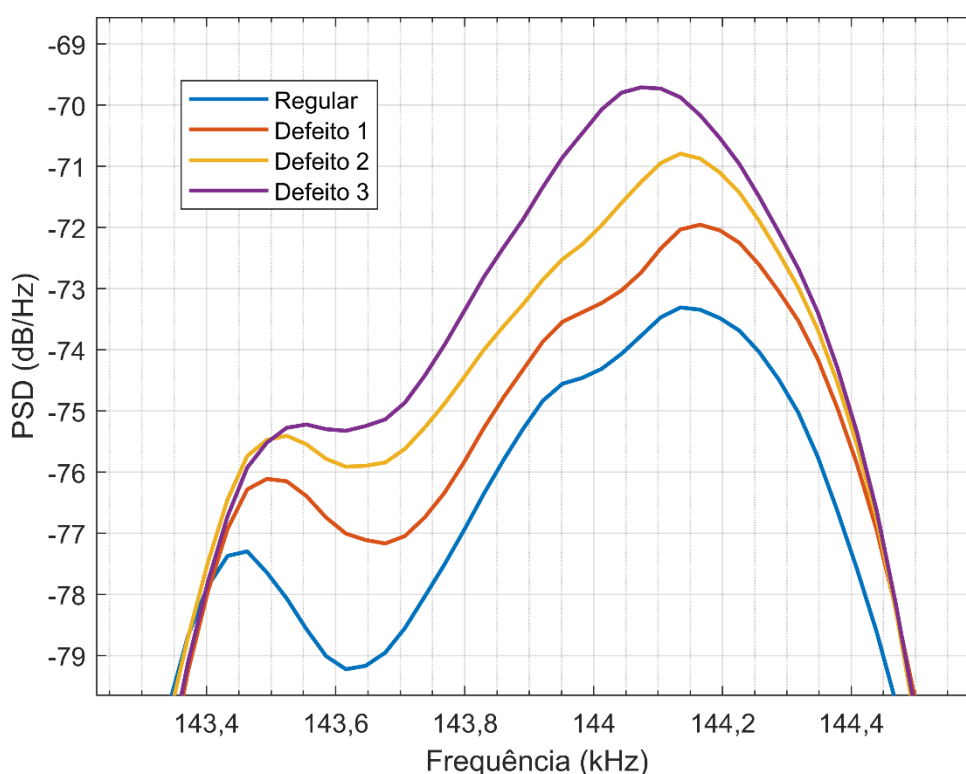
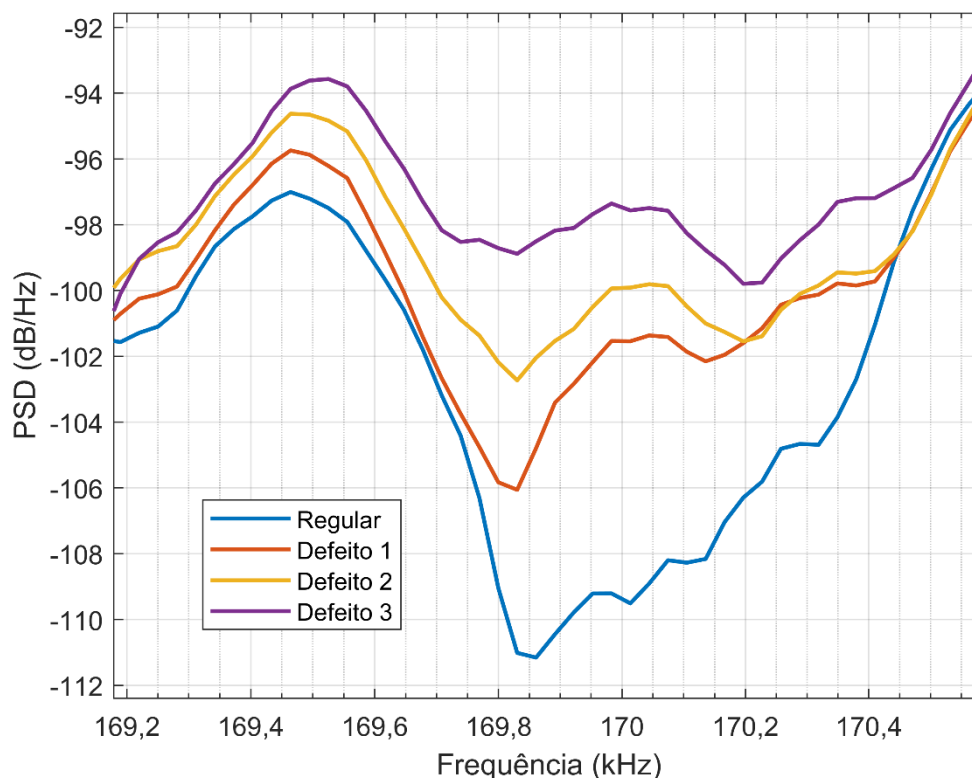


Figura 37 - PSD: Banda de frequência 169,4kHz - 170,4kHz



4.9 ANÁLISE DAS BANDAS DE FREQUÊNCIAS SELECIONADAS

Após a identificação de duas bandas de frequência ideais com essas faixas espectrais bem definidas para a análise quantitativa dos sinais acústicos, foram empregadas métricas estatísticas para extrair informações relevantes sobre a forma e variações dos sinais. Ao analisar o sinal completo, consequentemente lidamos com muitas frequências diferentes, algumas das quais podem ser ruídos ou interferências externas, que não têm relação com o defeito que se deseja detectar. Ao focar em faixas específicas, temos a possibilidade de filtrar esses ruídos mantendo apenas as frequências relevantes para a detecção de falhas, o que melhora a relação sinal-ruído e tornando a análise mais eficiente. A importância dessa análise pode ser explicada pela possibilidade de diferenciar padrões característicos dos sinais das peças com defeitos e não danificadas, contribuindo para a confiabilidade dos diagnósticos e aprimorando a sensibilidade da técnica utilizada para validação científica. Para

otimizar a explicação dos resultados iremos estabelecer a nomenclatura B1 para a faixa de frequência de 143,4 a 144,4kHz e B2 para a banda que vai de 169,4 a 170,4kHz, conforme sintetizado na Tabela 10.

Tabela 10 - Nomenclatura para bandas de frequências selecionadas

Nomenclatura	Faixa de Frequência
B1	143,4kHz – 144,4kHz
B2	169,4kHz – 170,4kHz

4.10 RAIZ MÉDIA QUADRÁTICA (RMS)

O propósito da análise por RMS é identificar o valor médio da energia do sinal ao longo do tempo, e o comportamento identificado nas bandas selecionadas indica que as determinadas faixas de frequências estão interagindo de maneira parecida com a análise realizada com o espectro todo do sinal e com as características estruturais de cada peça. Dado que o RMS total e o RMS das duas bandas em questão seguem um padrão similar ao longo do tempo, como demonstrado nos gráficos das Figuras 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45. Isso sugere que essas bandas concentram uma parcela significativa da energia do sinal, e havendo defeitos na peça, eles podem estar sendo refletidos no sinal de forma mais pronunciada nessas frequências do que outras, o que tornaria essas bandas adequadas para análise de defeitos. Foi utilizado o filtro BP nas bandas selecionadas para o cálculo do RMS e então o sinal foi atenuado com um filtro FIR de ordem 10. Como resultado do valor RMS para as duas bandas, foi possível verificar que os valores acumulados das estatísticas são capazes de caracterizar a condição da peça. A estatística RMS foi calculada utilizando a Equação (1).

Figura 38 - RMS: B1 (143,4kHz - 144,4kHz)

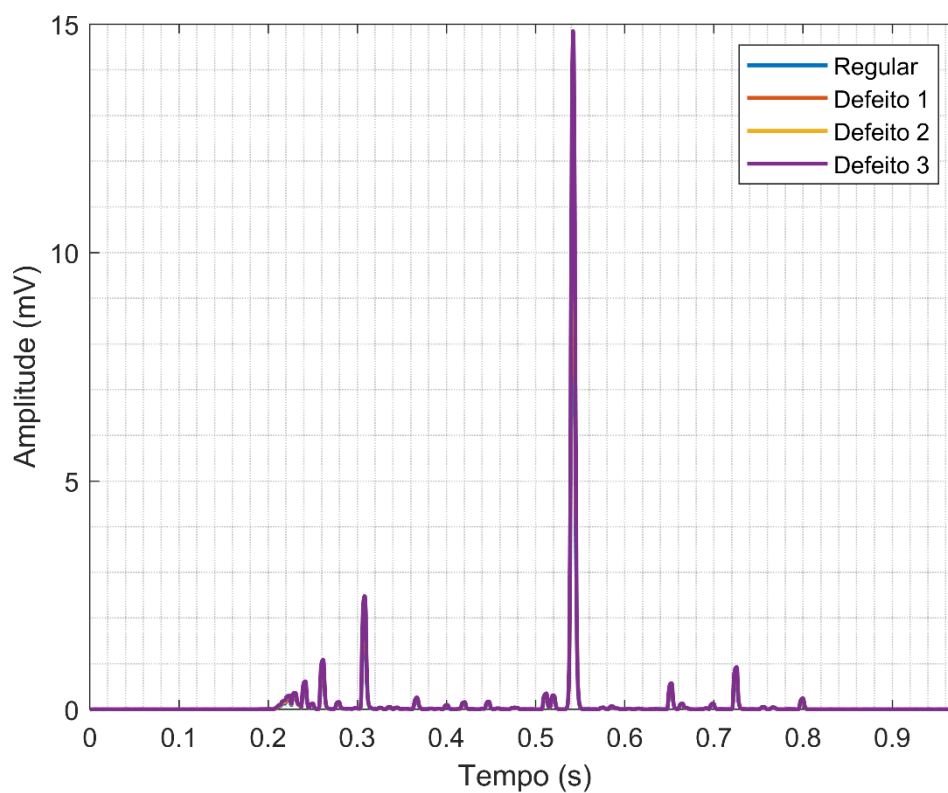


Figura 39 - RMS: B1 (143,4kHz - 144,4kHz) (Pico)

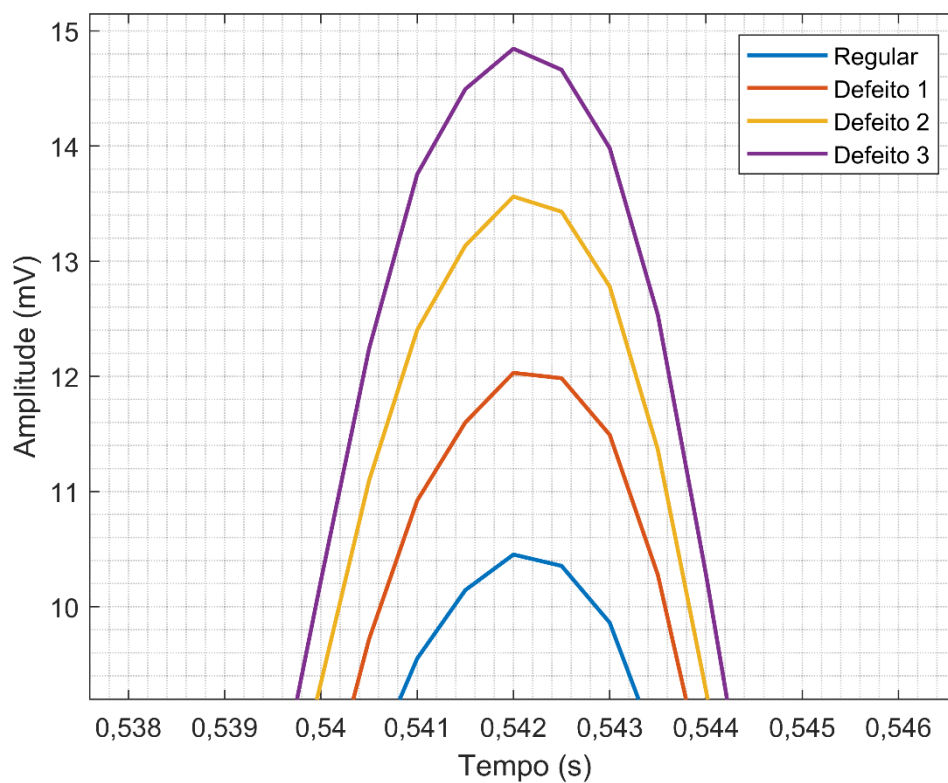


Figura 40 - RMS: Média dos valores da B1

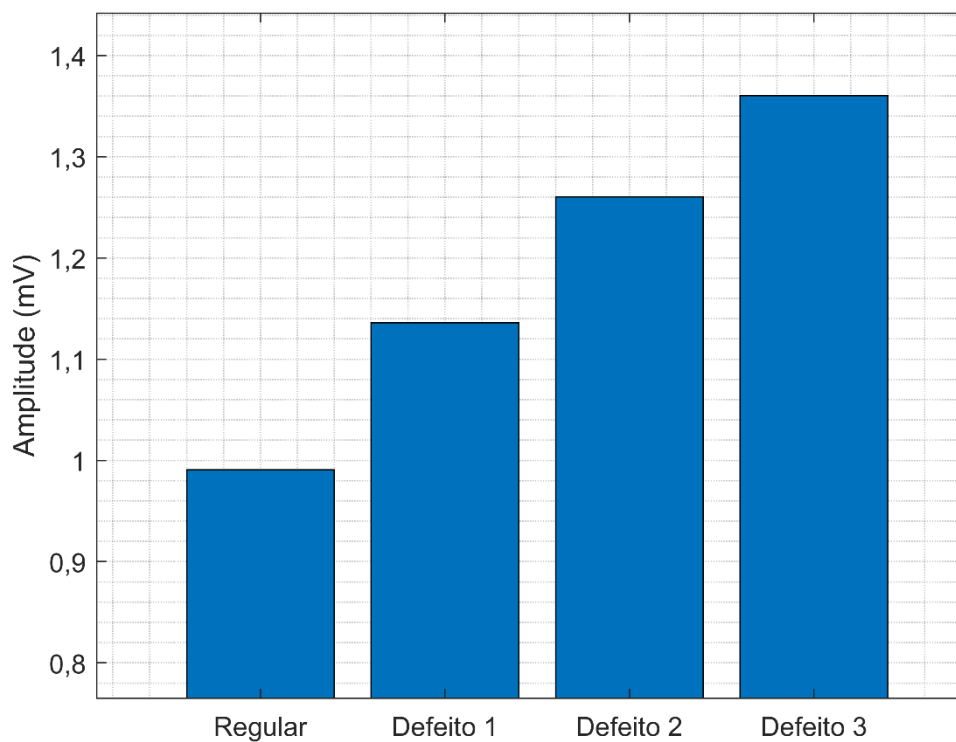


Figura 41 - RMS: Soma cumulativa B1

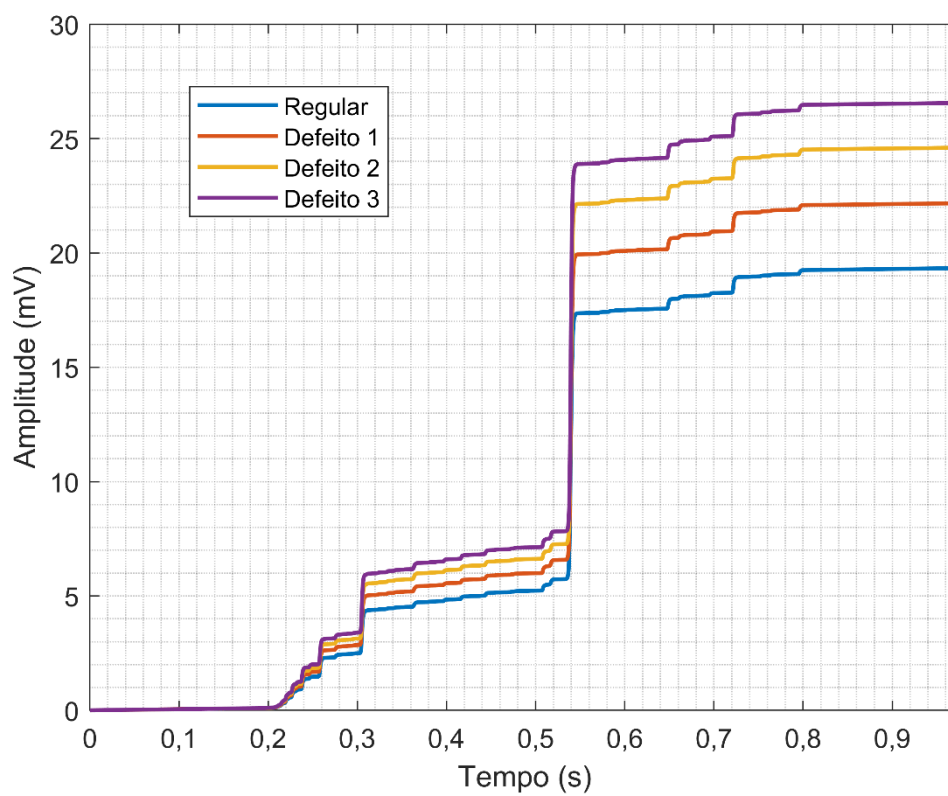


Figura 42 - RMS: B2 (169,4kHz - 170,4kHz)

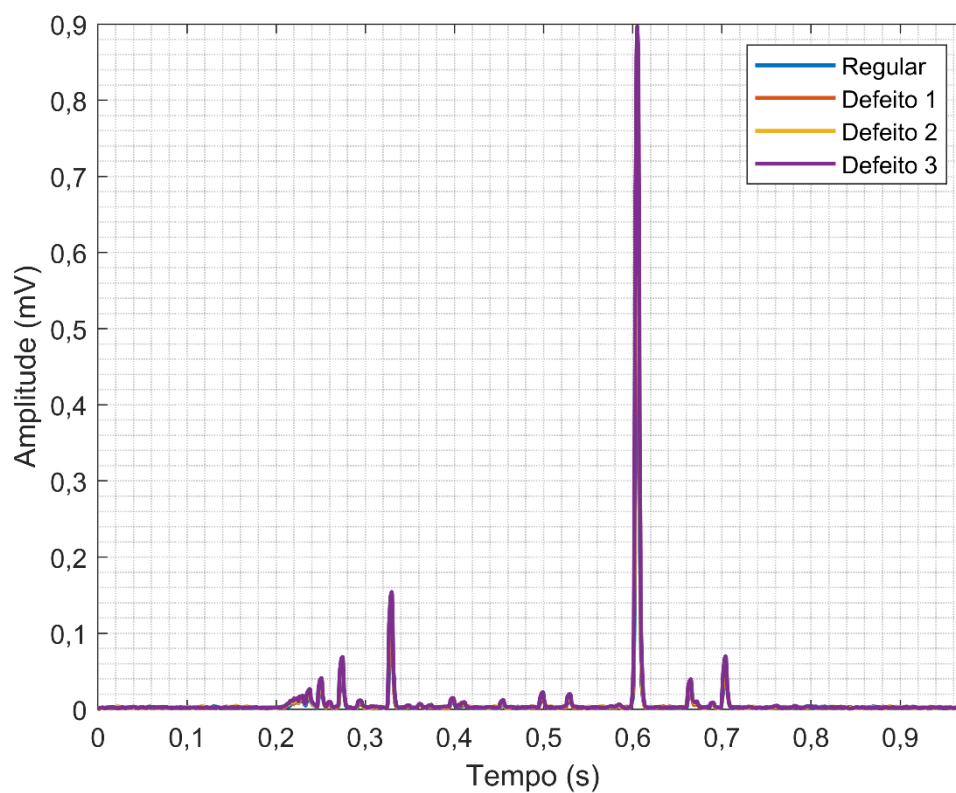


Figura 43 - RMS: B2 (169,4kHz - 170,4kHz) (Pico)

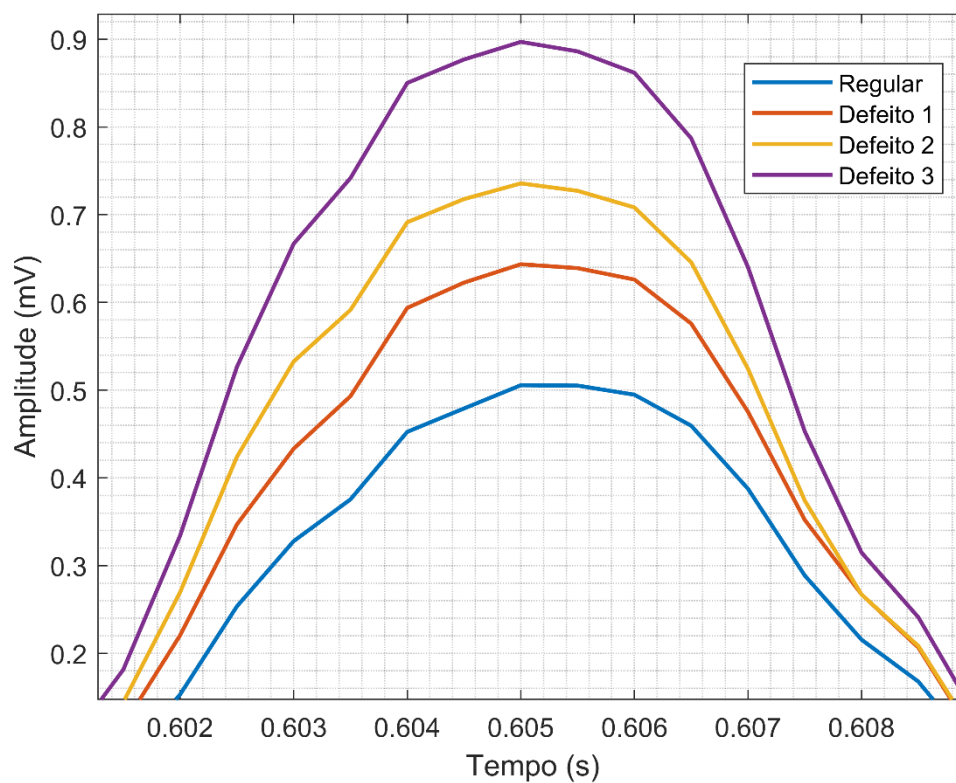


Figura 44 - RMS: Média dos valores da B2

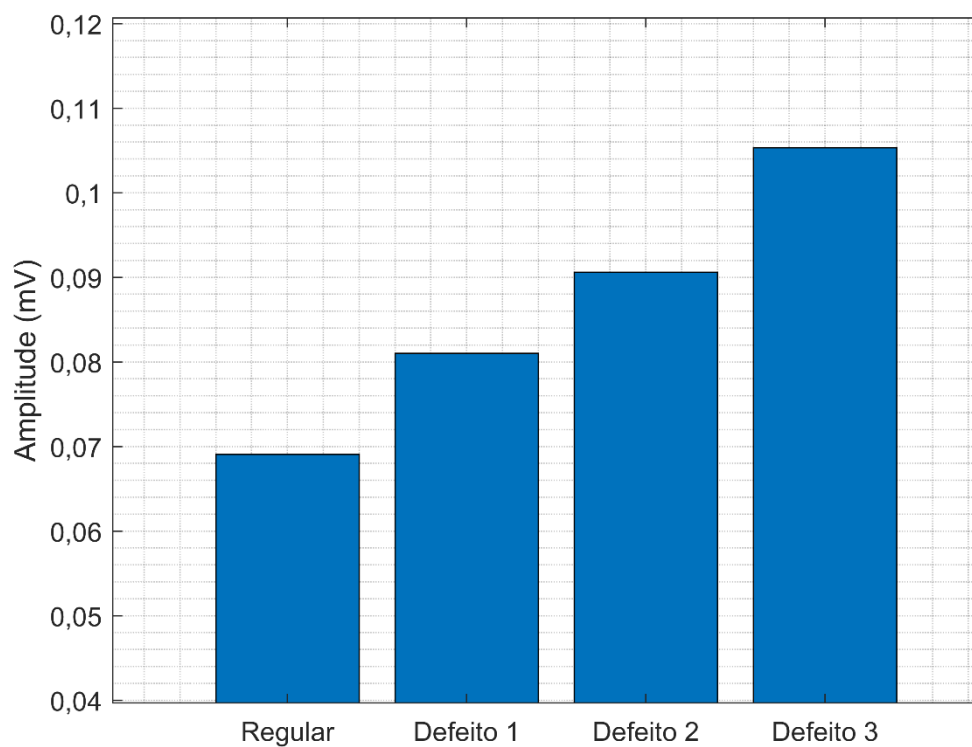
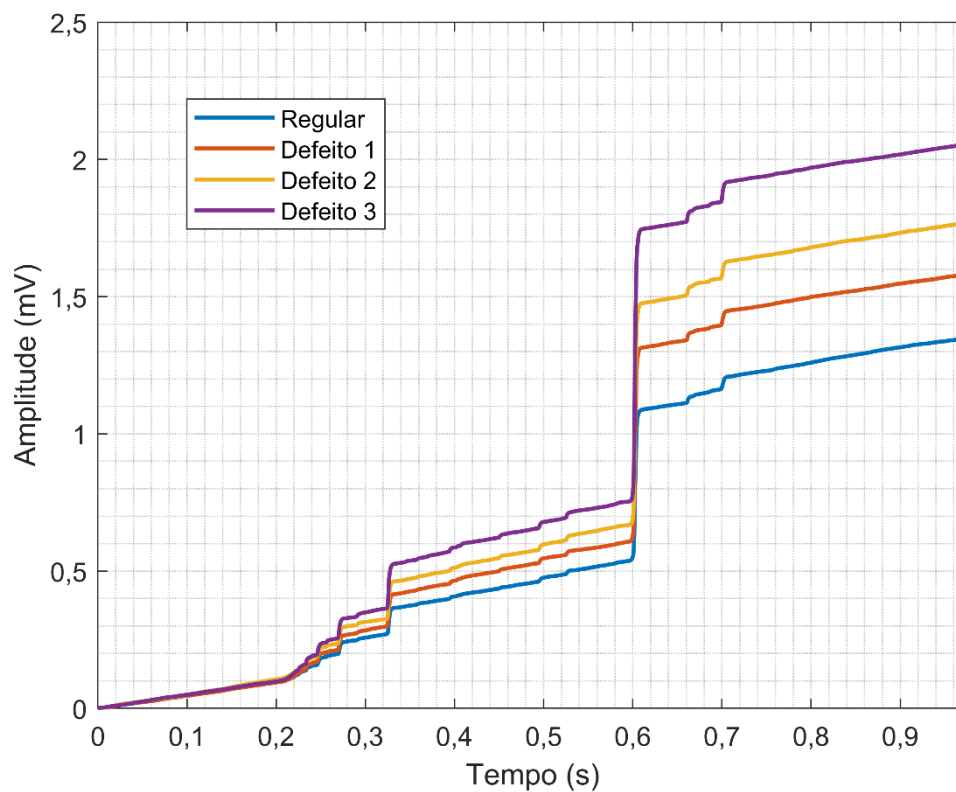


Figura 45 - RMS: Soma cumulativa B2



4.11 POWER-LAW

A análise por RMS forneceu a medida da intensidade do sinal e apresenta o quanto de energia está sendo transportada ao longo do tempo, mas não abrange a interpretação sobre como essa energia se distribui nas frequências em questão. Ou seja, ele não revela as características específicas das diferentes bandas de frequência. A análise pela estatística *power-law* é capaz de descrever como essa energia se distribui entre as bandas de frequências analisadas. A distribuição *power-law* mostra que, em muitos sistemas complexos, há uma pequena quantidade de frequências ou eventos que dominam a maior parte da energia ou atividade, enquanto o restante é disperso.

A análise do sinal utilizando a estatística em questão revelou que as duas bandas de frequência específicas agregam a maior parte da energia do sinal, seguindo uma distribuição em que poucas frequências predominam na resposta do material. Esse comportamento indica que a propagação das ondas na peça impressa por FDM não ocorre de maneira uniforme, mas sim de forma não uniforme, onde certas frequências se destacam como mais importantes devido a fatores como modos de vibração, dispersão seletiva da onda e possíveis interações com as descontinuidades das peças. Dessa forma, a presença de uma distribuição *power-law* que se relaciona com o comportamento da análise de intensidade, reforça a ideia de que a resposta do sinal é influenciada por um grupo restrito de frequências que são predominantes, tornando essas bandas espectrais particularmente sensíveis para a detecção de defeitos estruturais e otimização do monitoramento não destrutivo.

A estatística *power-law* foi calculada utilizando a Equação (3) e os resultados para B1 e B2 podem ser encontrados nos gráficos das Figuras 46, 47, 48, 49, 50 e 51. Para a estatística *power-law*, o sinal utilizado foi filtrado apenas com o BP filtro para as bandas selecionadas nas quais foi possível caracterizar a condição das peças produzidas por meio do transiente gerado pelo parâmetro estatístico. A caracterização da condição das peças produzidas se torna evidente no parâmetro acumulado.

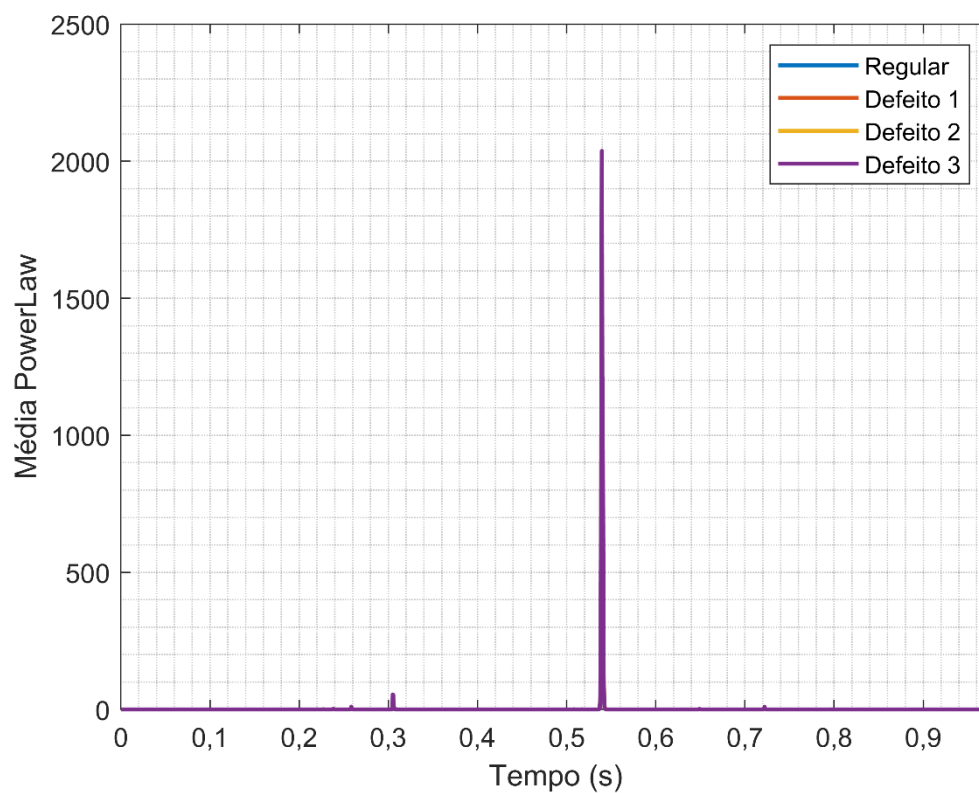
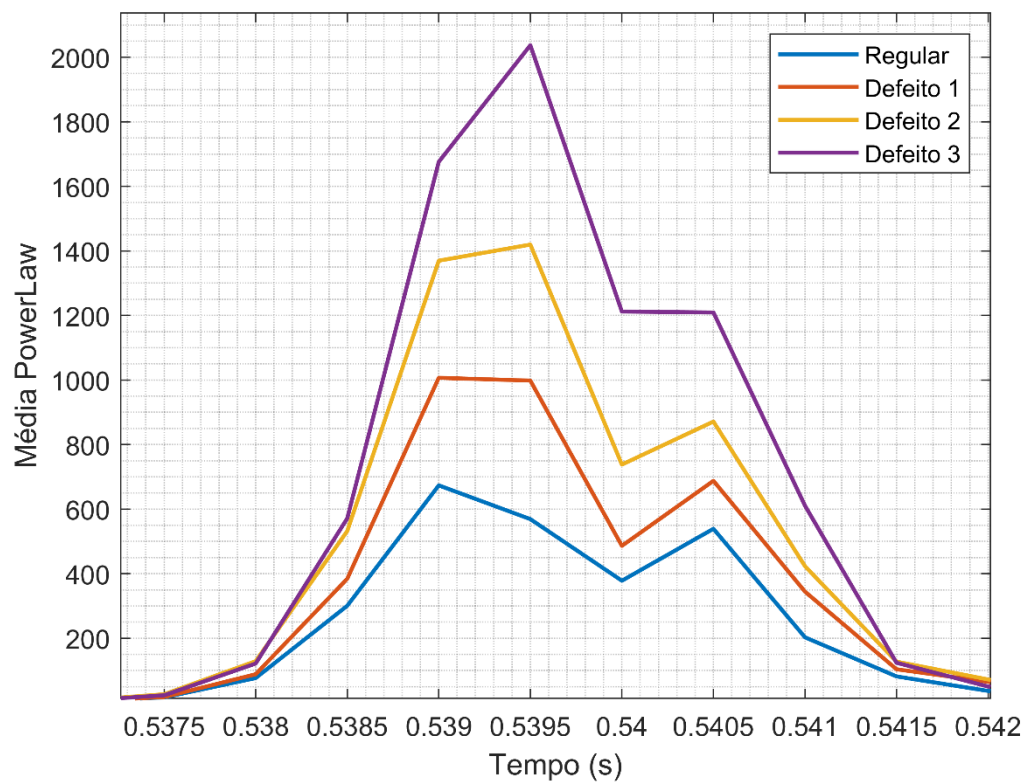
Figura 46 – *Power-Law*: B1 (143,4kHz - 144,4kHz)Figura 47 – *Power-Law*: B1 (143,4kHz - 144,4kHz) (Pico)

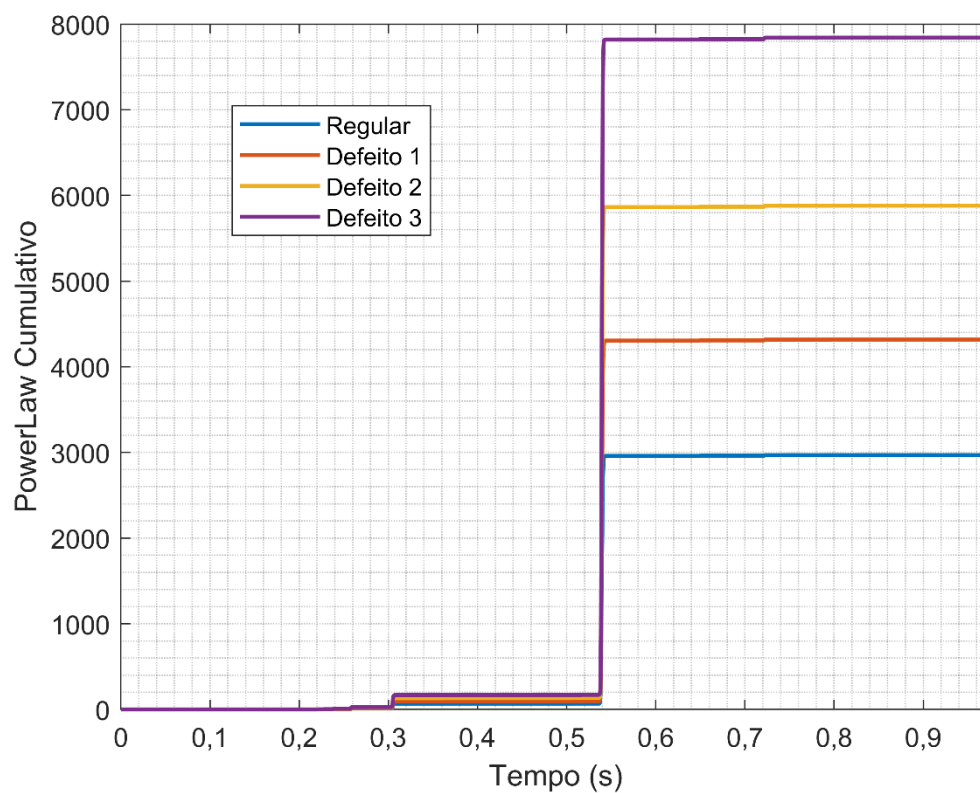
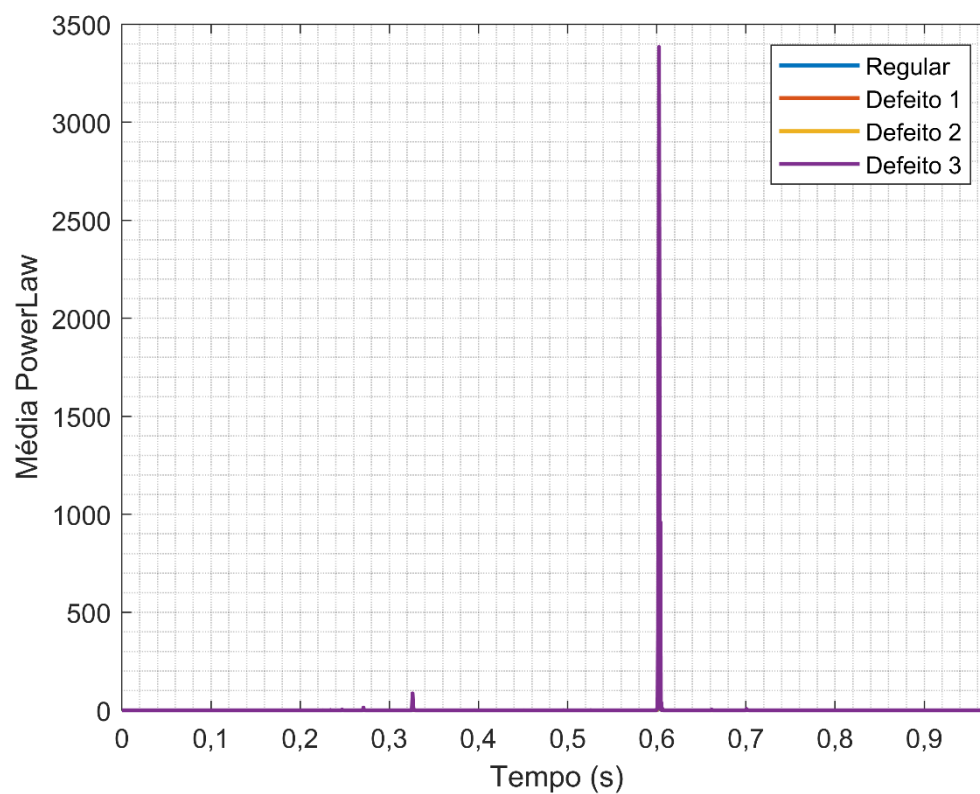
Figura 48 – *Power-Law*: Soma cumulativa B1 (143,4kHz - 144,4kHz)Figura 49 – *Power-Law*: B2 (169,4kHz - 170,4kHz)

Figura 50 – *Power-Law*: B2 (169,4kHz - 170,4kHz) (Pico)

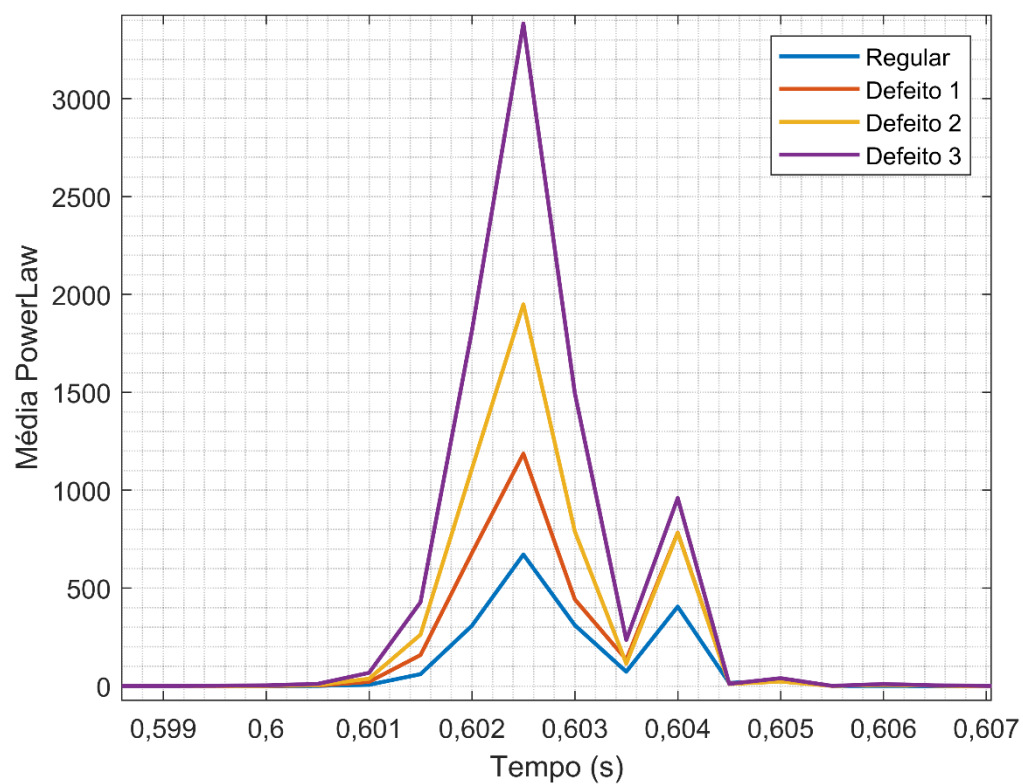
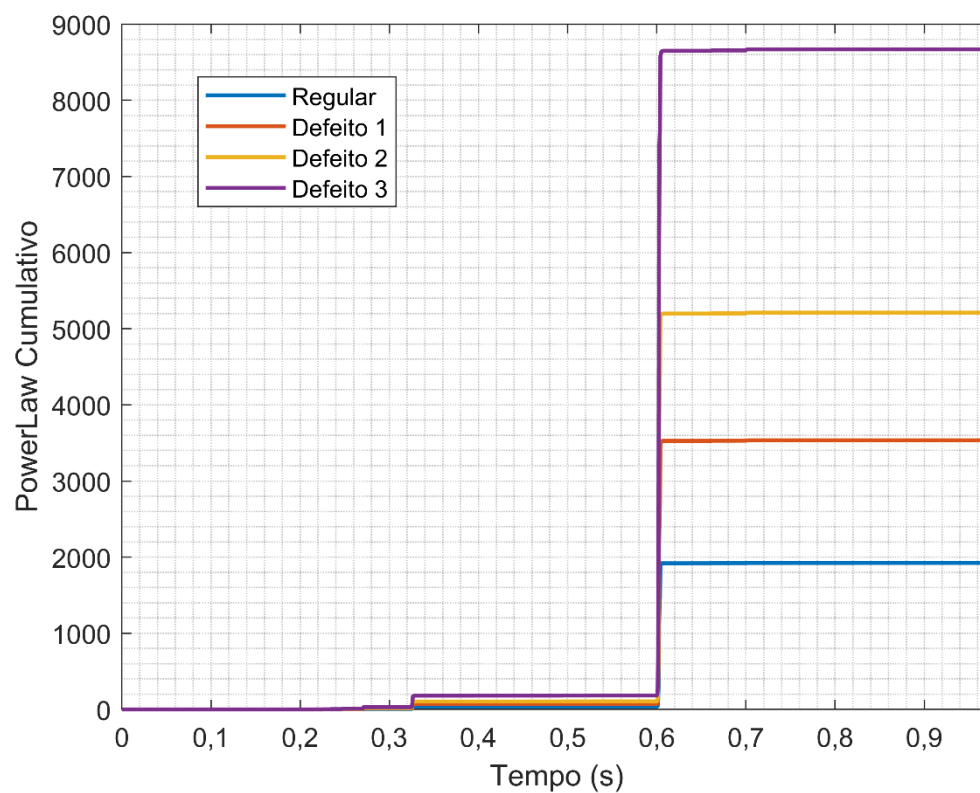


Figura 51 – *Power-Law*: Soma cumulativa B2 (169,4kHz - 170,4kHz)



4.12 TAXA CONSTANTE DE ALARME FALSO (CFAR)

O CFAR (do inglês, *Constant False Alarm Rate*) é um método de detecção adaptativa que ajusta dinamicamente um limiar de detecção com base na análise do ruído ao redor de um ponto do sinal. Para que o CFAR funcione bem, ele assume que o ruído segue uma distribuição estatística previsível, geralmente gaussiana, ou seja, um ruído branco com média constante e variância bem definida. Se o ruído realmente seguir esse padrão, o CFAR pode definir um limiar confiável e detectar anomalias com precisão.

O *power-law* é uma estatística usada para analisar como a energia do sinal está distribuída. Quando um sistema segue um comportamento *power-law*, isso significa que um pequeno número de frequências carrega a maior parte da energia, enquanto o restante do espectro contém frequências de menor energia.

Isso não é um comportamento "aleatório" como o ruído Gaussiano, é um comportamento hierárquico, onde algumas frequências dominam a resposta do sistema. Se a distribuição do sinal segue um *power-law*, significa que a energia não está espalhada de maneira uniforme pelo espectro, o que pode gerar padrões não-lineares e imprevisíveis. O CFAR presume que o ruído tem um comportamento aleatório e homogêneo, entretanto, quando o sinal segue uma *power law*, ele apresenta variações estruturadas e hierárquicas que o CFAR pode interpretar de forma equivocada, tornando-o ineficaz — como ocorreu nesta análise, cujos resultados não foram satisfatórios.

Apesar disso, ao investigar o impacto da variação de parâmetros no cálculo, o número de divisões e o valor do limiar v observou-se que esses ajustes influenciam significativamente o comportamento dos sinais. Especificamente, verificou-se que o aumento no número de divisões, aliado à variação do parâmetro v , resultou em uma atenuação progressiva dos índices.

Embora não seja possível afirmar, neste contexto, se essa atenuação favorece ou prejudica a detecção de danos, o comportamento observado demonstra que o método é sensível a esses parâmetros. Isso abre margem para estudos exploratórios futuros que avaliem a adequação dessas estatísticas em contextos semelhantes, especialmente no domínio do processamento de sinais voltados à avaliação não destrutiva de materiais.

Os demais cálculos realizados utilizando a estatística em questão podem ser encontradas no Apêndice A.

O sinal puro foi atenuado com filtro BP nas bandas selecionadas e, após o cálculo do CFAR utilizando 1024 divisões e valor de v sendo 2,5, foi filtrado com um filtro FIR de ordem 10. A estatística CFAR foi calculada utilizando a Equação (4) e os resultados obtidos estão representados nos gráficos das Figuras 52, 53, 54 e 55. Os demais cálculos realizados utilizando a estatística em questão podem ser encontradas no Apêndice A.

Figura 52 - CFAR: B1 (143,4kHz - 144,4kHz)

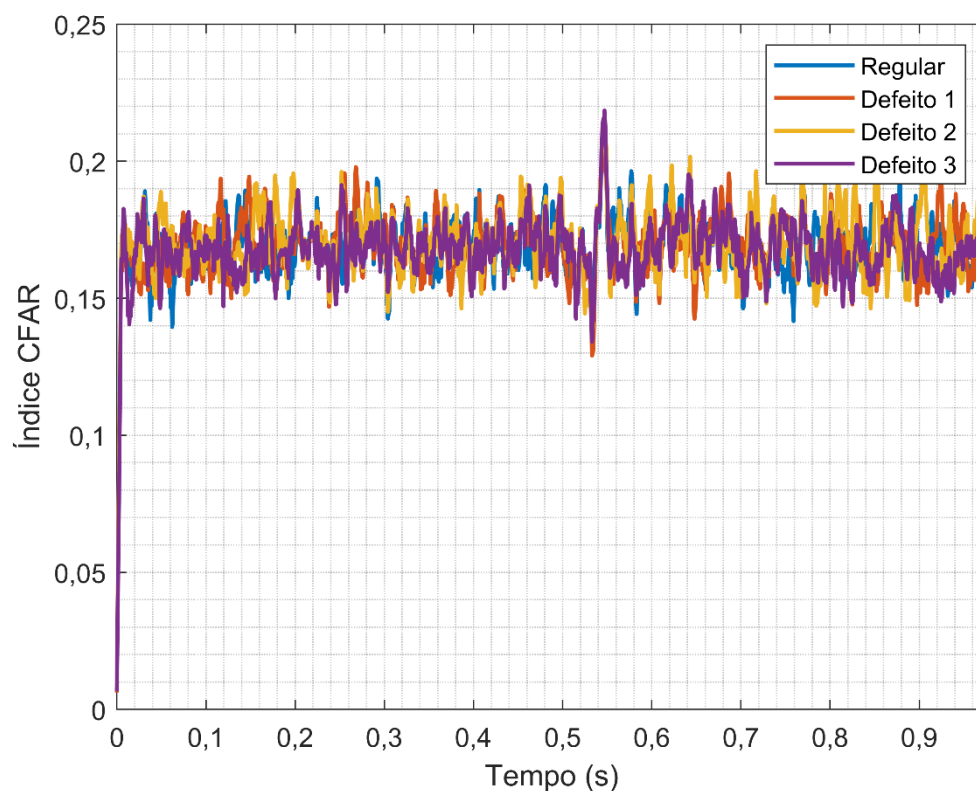


Figura 53 - CFAR: Média B1 (143,4kHz - 144,4kHz)

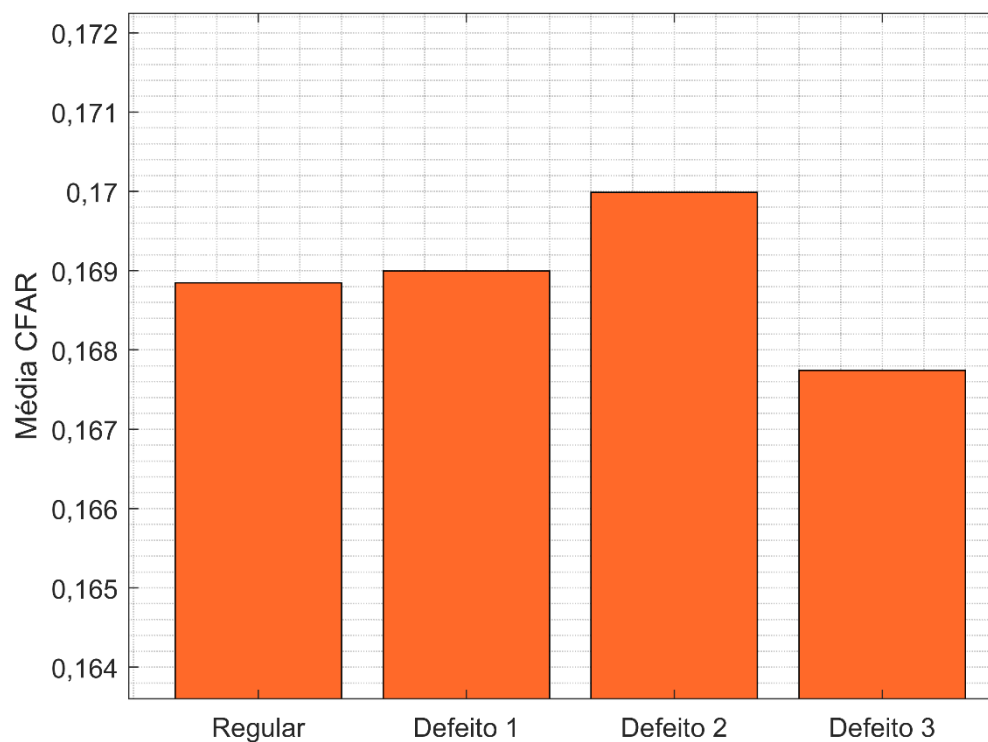


Figura 54 - CFAR: B2 (169,4kHz - 170,4kHz)

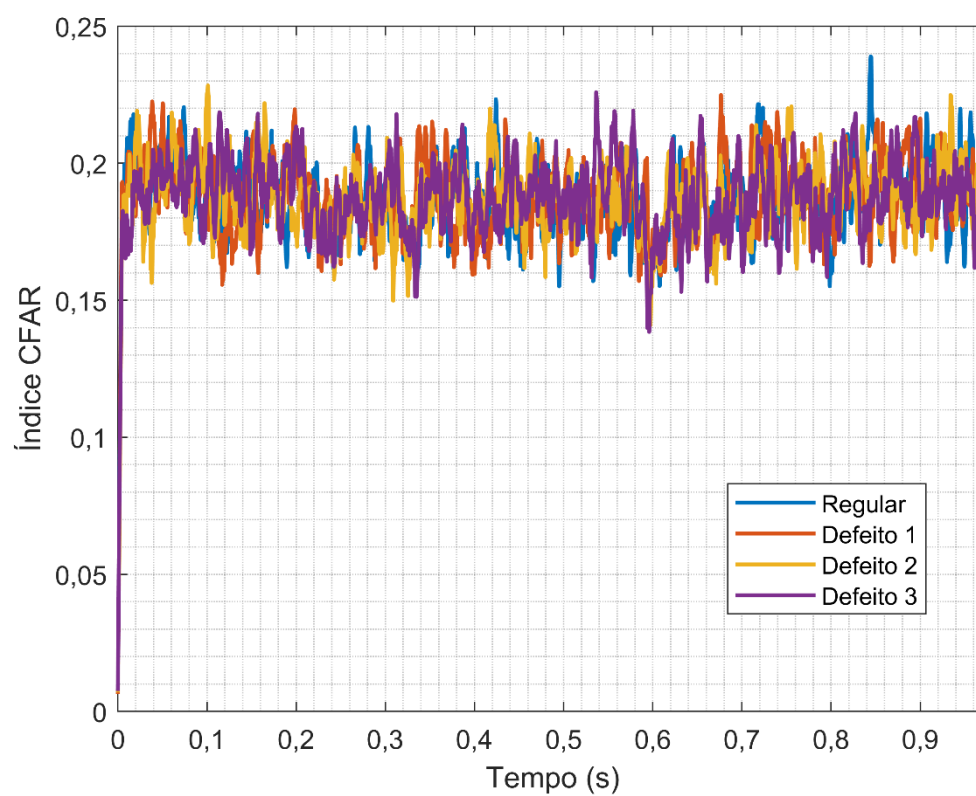
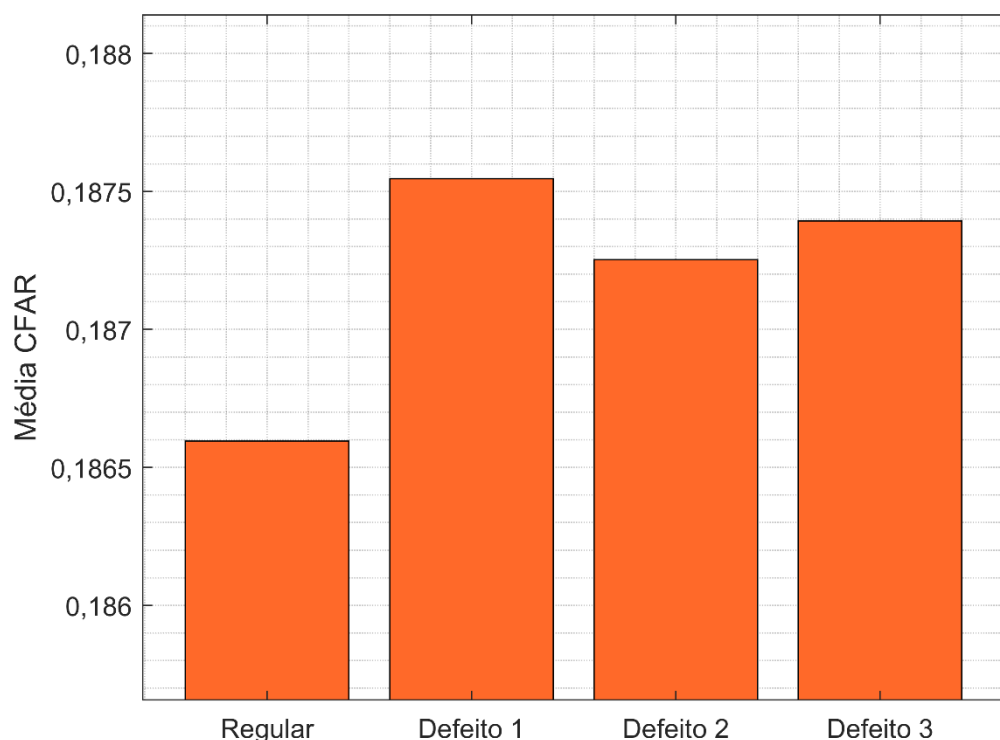


Figura 55 - CFAR: Média B2 (169,4kHz - 170,4kHz)



4.13 DESVIO DO VALOR MÉDIO (MVD)

A estatística MVD foi calculada utilizando a Equação (5). No caso da estatística em questão não foi encontrado nenhum resultado conforme o esperado pelo padrão de variação dos sinais de acordo com as áreas de defeitos. Serão apresentadas nessa seção os gráficos por meio das Figuras 56, 57, 58 e 59 que representam o índice MVD e a média dos valores da estatística para as duas faixas de frequências pré-selecionadas ditas B1 e B2.

A estatística MVD mede a diferença média entre valores consecutivos do sinal, sendo utilizada para quantificar as mudanças do sinal ao longo do tempo. No entanto, ela apresentou dificuldades na análise porque, assim como o CFAR, depende de um comportamento homogêneo e previsível dessas mudanças. As análises anteriores revelaram que o sinal segue uma distribuição Power-law, onde poucas bandas de frequência concentram a maior parte da energia, tornando a variação do sinal não-linear e altamente dependente dessas

frequências dominantes. Esse comportamento hierárquico faz com que a diferença entre valores consecutivos não cresça com a mesma tendência de variação, pois as oscilações do sinal não acontecem de forma equilibrada. Enquanto métricas como RMS, PSD, FFT e *Power-Law* capturam as características gerais do sinal, o MVD é sensível a pequenas flutuações e pode ser afetado por dispersão e interferência, resultando em uma resposta inconsistente. Assim, a falha do MVD reforça a conclusão de que o comportamento do sinal não segue uma estrutura simples, exigindo métodos mais eficientes para sua análise. O sinal puro foi atenuado com filtro BP nas bandas selecionadas e então realizou-se o cálculo do MVD utilizando 1024 divisões. Após o cálculo, o sinal foi filtrado novamente com um filtro FIR de ordem 10. Todas os cálculos adicionais realizados por meio da análise com a estatística MVD são apresentados no Apêndice B.

Assim como observado na análise com a estatística CFAR, também foi constatada, no caso do MVD, uma atenuação progressiva nos sinais à medida que se ajustaram os parâmetros de cálculo. Embora esses comportamentos não configurem o foco da presente investigação, sua recorrência sugere uma sensibilidade dos métodos estatísticos às condições de configuração, o que pode servir como base para estudos exploratórios futuros voltados à calibração e adequação dessas abordagens em diferentes contextos de aplicação.

Figura 56 - MVD: B1 (143,4kHz - 144,4kHz)

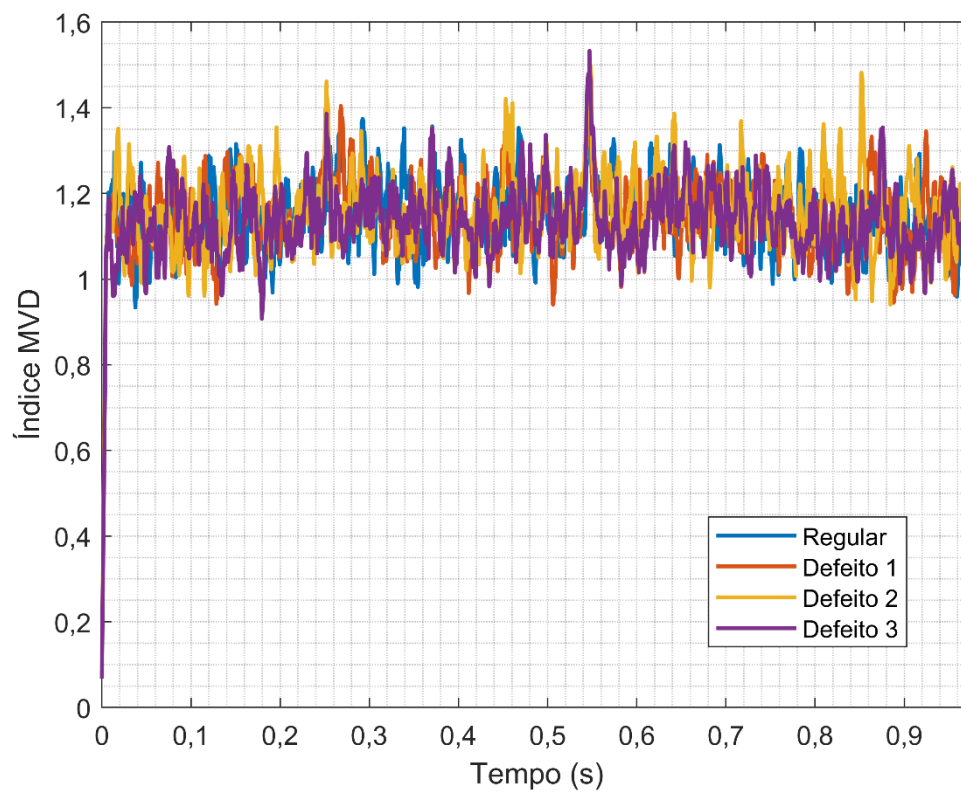


Figura 57 - MVD: Média B1 (143,4kHz - 144,4kHz)

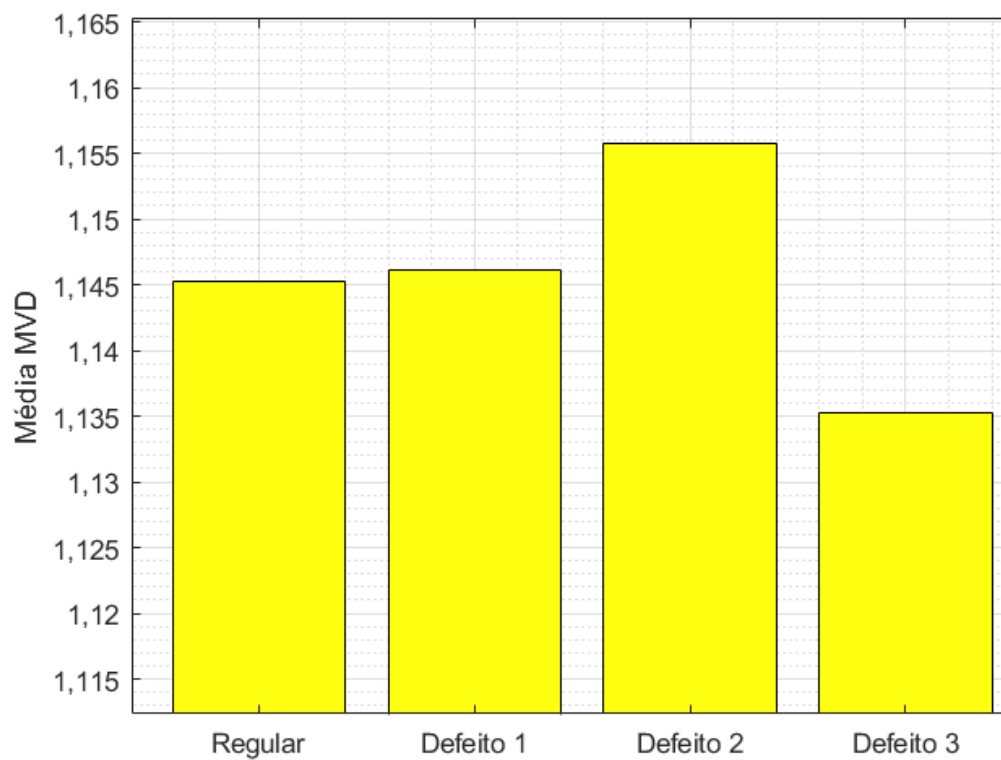


Figura 58 - MVD: B2 (169,4kHz - 170,4kHz)

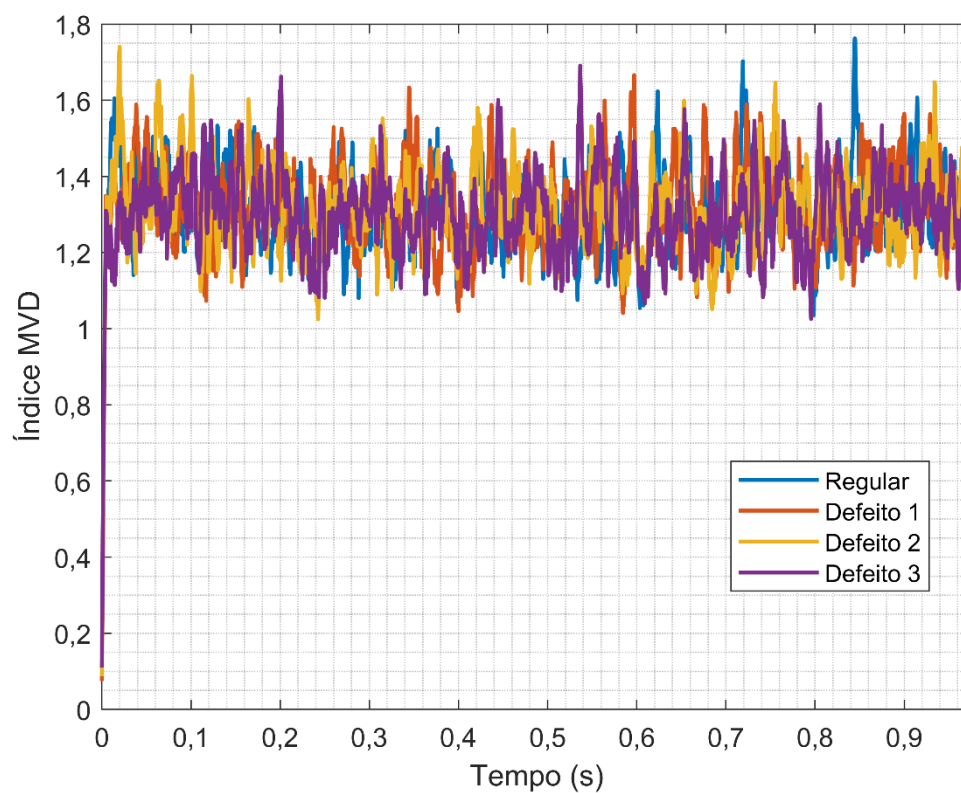
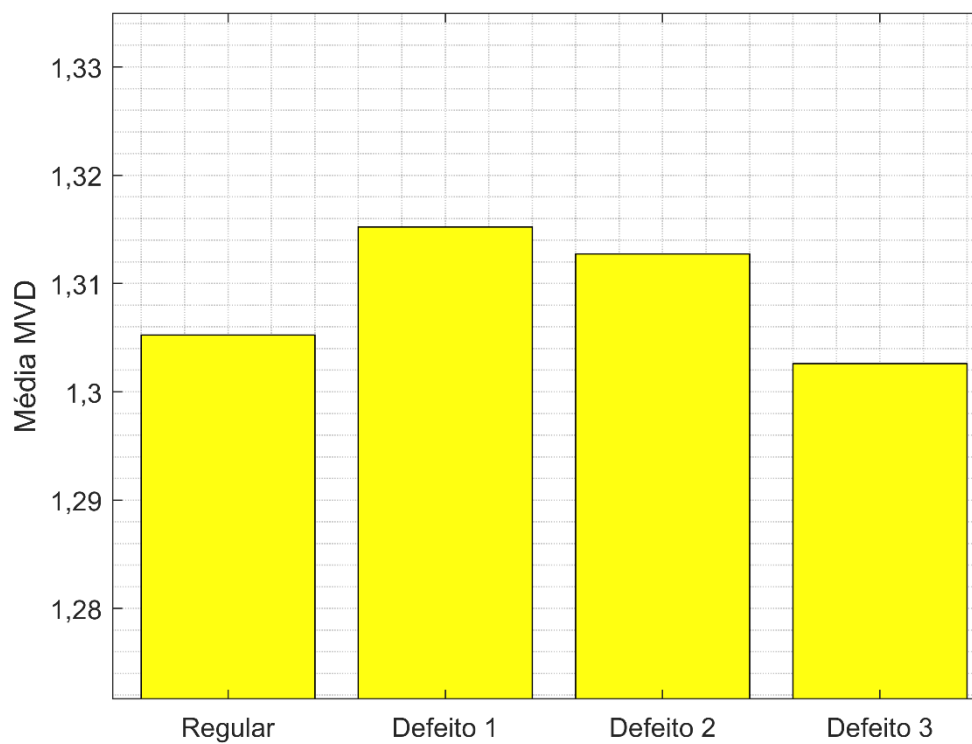


Figura 59 - MVD: Média B2 (169,4kHz - 170,4kHz)



4.14 TAXA DE POTÊNCIA (RoP)

O cálculo do Ratio of Power (RoP) depende diretamente da largura da banda de frequência escolhida, e isso pode afetar a confiabilidade dos resultados. Para essa análise, a banda de 1 kHz foi pequena demais para capturar a energia necessária para um cálculo adequado do RoP, o que resultou em resultados inconclusivos. Após uma varredura manual do sinal, a banda de 90 kHz foi identificada como menor tamanho mais adequado, pois abrange um espectro mais amplo, permitindo a captura de uma quantidade suficiente de energia para uma análise mais estável. As bandas de 143,4 kHz - 144,4 kHz e 169,4 kHz - 170,4 kHz, por serem estreitas, não conseguiram fornecer uma medição precisa, enquanto a banda de 110 kHz - 200 kHz mostrou-se mais representativa da energia do sinal, oferecendo uma melhor relação sinal/ruído e, consequentemente, resultados mais confiáveis no cálculo do RoP. A estatística RoP foi calculada utilizando a Equação (8) e está apresentada nas Figuras 60, 61 e 62.

Figura 60 - RoP: Banda de frequência 110kHz - 200kHz

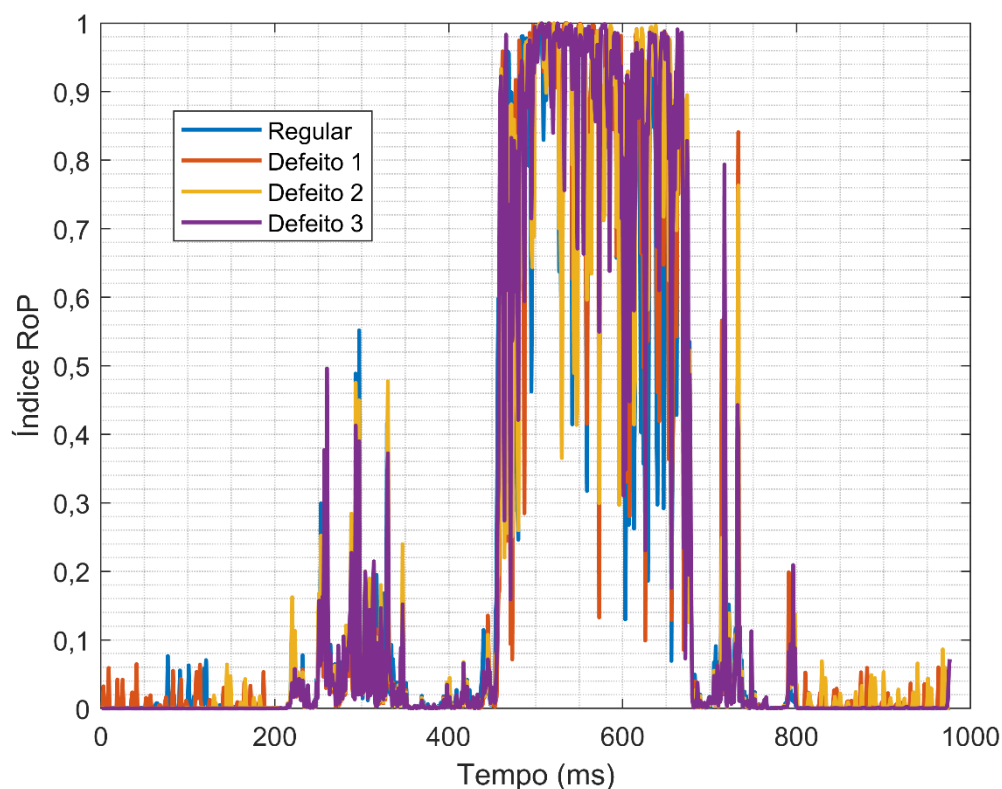


Figura 61 - RoP: Média banda de frequência 110kHz - 200kHz

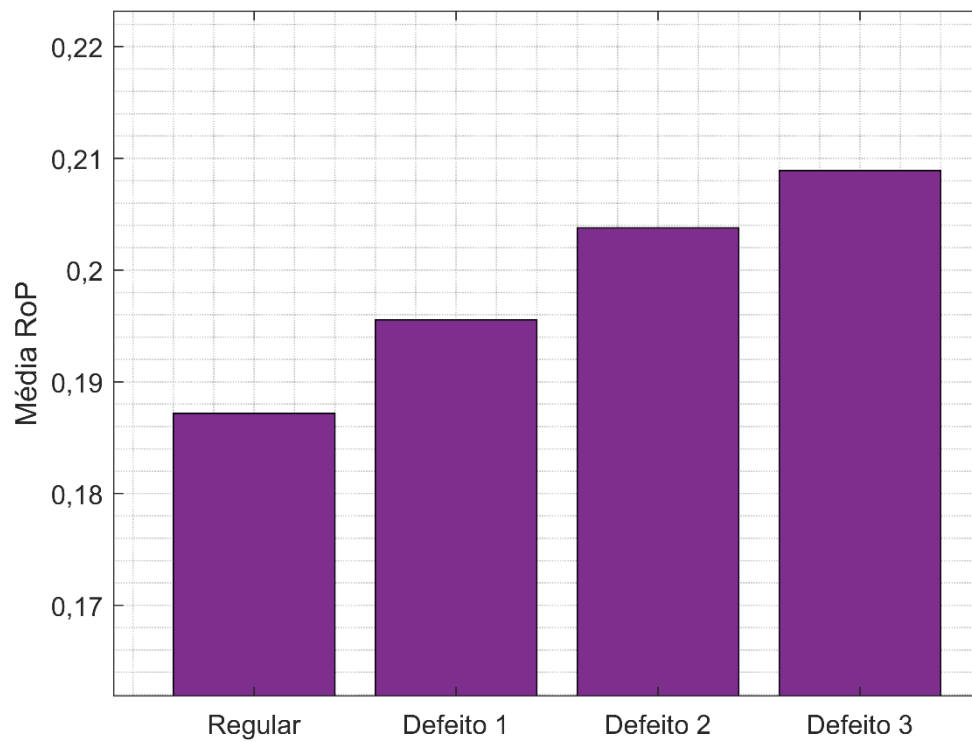
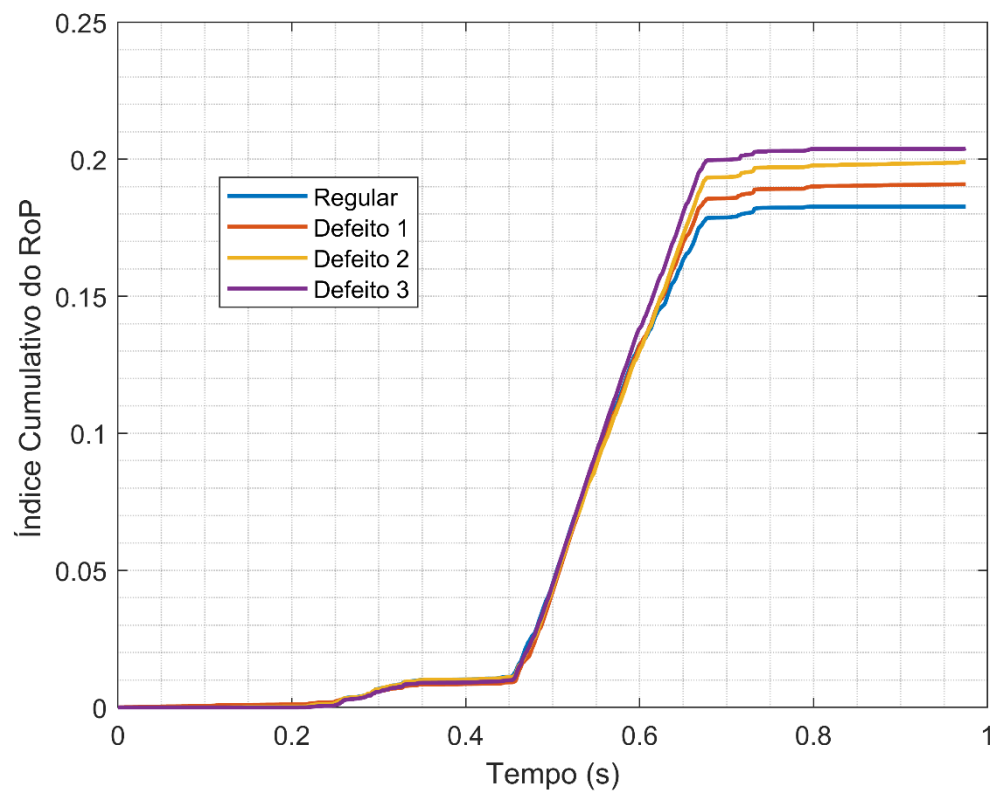


Figura 62 - RoP: Soma cumulativa banda de frequência 110kHz - 200kHz



4.15 AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE

Para validar os métodos empregados e identificar oportunidades de aprimoramento visando a precisão na detecção dos defeitos, a avaliação qualitativa dos resultados obtidos alinhada aos princípios da avaliação de conformidade pode determinar se os processamentos de sinais aplicados são eficientes na detecção dos defeitos como apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Avaliação dos processamentos

Processamento	Resultado	Observações
RMS	Satisfatório	Identifica corretamente os defeitos pela tendência do sinal.
RMSD	Satisfatório	Cumprir o critério de detecção dos defeitos.
FFT	Satisfatório	Apresenta o espectro de frequência adequado para detectar as anomalias.
PSD	Satisfatório	Mostra a distribuição de potência de forma clara e sem ruído excessivo.
Powerlaw	Satisfatório	Detecta os defeitos conforme esperado com base na análise do comportamento do sinal.
CFAR	Não Satisfatório	Apresenta desempenho insuficiente na detecção dos defeitos, porém com potencial para estudos posteriores.
MVD	Não Satisfatório	Não atingiu a confiabilidade necessária para identificar os defeitos, porém com potencial para estudos posteriores.
RoP	Satisfatório	É satisfatório na detecção, mas opera em uma banda diferente do esperado.

4.16 SINTETIZAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise dos sinais obtidos pela técnica Chirp Through-Transmission (CTT) foi estruturada em duas frentes complementares: análise espectral total (0–250 kHz) como descrito na Tabela 12 e análise por bandas de frequência como descrito na Tabela 13. O objetivo foi verificar a capacidade das estatísticas em identificar variações relacionadas à presença e intensidade de defeitos. A primeira abordagem consistiu na análise do espectro total, buscando capturar o comportamento geral do sinal em toda a faixa de frequências. As estatísticas aplicadas — RMS, RMS cumulativo, RMSD, ajuste linear e correlação de Pearson — apresentaram resultados satisfatórios para todas as condições testadas.

O RMS médio aumentou proporcionalmente com a severidade do defeito, partindo de 7,16 mV (condição regular) até 7,54 mV (defeito 3), com variações percentuais seguindo a tendência de crescimento. O RMS cumulativo, por sua vez, evidenciou essas variações de forma mais pronunciada, com curvas crescentes e inclinadas proporcionalmente ao aumento da área do defeito.

Peças com maior defeito apresentaram inclinações mais acentuadas, indicando maior concentração de energia acumulada, possivelmente decorrente da interação do sinal com descontinuidades internas.

O ajuste linear das curvas cumulativas demonstrou que o crescimento da energia ao longo do tempo está diretamente relacionado à ausência de material.

O grau de relação linear entre os valores finais do RMS cumulativo e as áreas dos defeitos foi quantificado pela correlação de Pearson, resultando em um coeficiente de 0,9977 e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99532. Esse resultado indica que mais de 99% da variação da energia acumulada pode ser explicada pelo aumento da área defeituosa, evidenciando a eficácia estatística dessa métrica como indicadora da integridade da peça.

Tabela 12 - Processamento do Sinal Todo

Processamento	0 kHz – 250 kHz
RMS	Satisfatório
RMSD	Satisfatório
Energia Cumulativa	Satisfatório
Ajuste Linear	Satisfatório
Correlação de Pearson	Satisfatório

A segunda abordagem delimitou os sinais em bandas específicas com o intuito de avaliar o comportamento do sinal em regiões espectrais com maior densidade de energia, conforme indicado pela análise prévia de FFT e PSD. As estatísticas aplicadas foram: RMS, FFT, PSD, Power Law, CFAR, MVD e RoP.

Tabela 13 - Processamento das Bandas de Frequências B1 e B2

Processamento	143,4kHz – 144,4kHz	169,4kHz – 170,4 kHz
RMS	Satisfatório	Satisfatório
FFT	Satisfatório	Satisfatório
PSD	Satisfatório	Satisfatório
Power Law	Satisfatório	Satisfatório
CFAR	Não Satisfatório	Não Satisfatório
MVD	Não Satisfatório	Não Satisfatório
RoP	Satisfatório*	Satisfatório*

*Resultado satisfatório encontrado em uma largura de banda maior que 1kHz (110kHz – 200kHz)

As estatísticas RMS, FFT, PSD e Power Law apresentaram resultados satisfatórios para ambas as bandas. Notadamente, a banda B2 revelou-se a mais

sensível à variação estrutural, com variação percentual no RMS médio de até 52,98% entre a condição regular e o defeito 3 como visto na Tabela 14. Essa amplificação do contraste evidencia o potencial das bandas selecionadas para realçar diferenças entre as condições.

Entretanto, métricas como CFAR e MVD não apresentaram desempenho satisfatório nas bandas B1 e B2. Essas estatísticas, que dependem da distribuição estatística do ruído e da estrutura do sinal, foram impactadas pela natureza hierárquica e não linear do espectro — característica já evidenciada pela análise de Power Law. Além disso, a largura estreita das bandas analisadas comprometeu a estabilidade dos cálculos, tornando os resultados mais suscetíveis a flutuações locais e ruídos não estruturais. Durante os testes, verificou-se que a variação no número de divisões (div) e no parâmetro de limiar v resultava em sinais processados mais atenuados e o comportamento com tendência de crescimento foi observado entre duas ou três das condições, porém não sendo conclusivo para essa análise. Embora essa atenuação não fosse o foco deste estudo, ela revelou que essas estatísticas podem apresentar comportamentos úteis sob outras configurações ou tipos de análise, como por exemplo em estratégias adaptativas ou em materiais com diferentes características de propagação. Assim, embora os resultados obtidos não tenham sido satisfatórios para esta aplicação específica, essas estatísticas apresentam potencial para estudos exploratórios futuros, desde que associadas a parâmetros e abordagens mais adequados ao contexto do material e da faixa espectral.

A análise também demonstrou que, apesar da banda B2 (169,4–170,4 kHz) ter proporcionado os maiores contrastes percentuais nas métricas baseadas em energia, como descrito na Tabela 14 — o que a torna sensível à identificação de variações estruturais —, os maiores coeficientes de correlação linear com a área dos defeitos foram obtidos a partir da análise no espectro total.

Esses resultados se complementam pois enquanto a análise por bandas estreitas, como a B2, permite realçar diferenças específicas entre as condições testadas, servindo como uma ferramenta útil de sensibilidade espectral, a análise no espectro total oferece maior eficiência estatística. Essa combinação entre resolução espectral localizada e consistência da estatística global evidencia a importância de considerar múltiplas abordagens em conjunto, ampliando a

compreensão sobre o comportamento acústico do material e potencializando a capacidade de detecção de defeitos em sistemas de monitoramento.

Tabela 14 - Análise Processamento:
RMS Sinal Todo vs. RMS Bandas de Frequência

Condições	Todo (mV)	(%)	B1 (mV)	(%)	B2 (mV)	(%)
Regular	7,16	---	19,3	---	1,34	---
Defeito 1	7,32	2,23	22,1	14,50	1,58	17,91
Defeito 2	7,44	3,91	24,6	27,46	1,76	31,34
Defeito 3	7,54	5,03	26,5	37,30	2,05	52,98

Por fim, é importante frisar que a estabilidade da emissão acústica foi verificada por meio da sobreposição dos cinco *chirps* utilizados na emissão. A correlação entre os cinco sinais resultou em 99,76% de igualdade entre os sinais, confirmando a alta repetibilidade do método de emissão assegurando que as variações detectadas nos sinais recebidos estão relacionadas de fato às características da peça, e não à inconsistência na relação de emissão e recepção.

5. CONCLUSÃO

A ideia inicial do trabalho era avaliar a aplicação da técnica CTT com a abordagem por meio do monitoramento ativo para identificação de defeitos em peças impressas por FDM. Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a eficácia da técnica Chirp Through-Transmission (CTT), aliada ao processamento digital de sinais, na avaliação da integridade estrutural de peças impressas em 3D por FDM. A abordagem adotada permitiu identificar a presença de defeitos, classificar a severidade dos mesmos e quantificar seu impacto na resposta ultrassônica do material.

As estatísticas aplicadas ao espectro total (0–250 kHz), como RMS, RMS cumulativo, ajuste linear e correlação de Pearson, apresentaram desempenho satisfatório, com resultados fortemente correlacionados à área dos defeitos. Destaca-se, entre essas, o RMS cumulativo, cujo coeficiente de correlação foi de 0,9977 e o coeficiente de determinação (R^2) atingiu 0,99532, demonstrando a confiabilidade da métrica para aplicação em detecção de defeitos de peças impressas por FDM.

A análise espectral segmentada evidenciou o potencial da seleção de bandas de frequência para a sensibilidade a detecção. A banda B2, por exemplo, apresentou variações percentuais mais pronunciadas nas métricas baseadas em energia, como o RMS — com destaque para a diferença de até 52,98% entre a condição regular e o defeito 3. Essa banda se mostrou sensível às variações estruturais, reforçando a importância de identificar bandas ótimas que ampliaram o contraste entre as condições testadas.

Estatísticas como CFAR e MVD apresentaram limitações de desempenho nas bandas avaliadas, resultado atribuído à natureza hierárquica e não linear do sinal, bem como à instabilidade associada a larguras de banda muito pequenas, como foi o caso das selecionadas para o estudo. Ainda assim, observou-se que ajustes em seus parâmetros resultaram em atenuações consistentes nos sinais processados, o que indica que essas métricas podem ter utilidade em abordagens futuras, desde que adaptadas ao contexto da análise.

Além disso, a análise do RoP demonstrou que a largura da banda é um fator determinante para a confiabilidade dos resultados. A banda inicial de 1 kHz foi insuficiente para uma análise, enquanto a faixa de 110–200 kHz foi a que

melhor representou a energia do sinal, proporcionando uma melhor relação sinal/ruído.

Como contribuição principal, este estudo demonstra que a escolha adequada das bandas de frequência influencia significativamente a sensibilidade das métricas de análise e que a combinação entre métricas estatísticas confiáveis e bandas espectrais otimizadas garantem uma detecção de defeitos complementar, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias não destrutivas mais eficazes na manufatura aditiva. Esses achados abrem caminhos promissores para investigações futuras que envolvam novas topologias de materiais, otimização espectral automática ou o uso de inteligência artificial para classificação e diagnóstico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEX, Y. *et al.* Comprehensive study of PLA material extrusion 3D printing optimization and its comparison with PLA injection molding through life cycle assessment. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 43, 1 abr. 2025.

ALEXANDRE, Felipe A. *et al.* A novel ultrasound technique based on piezoelectric diaphragms applied to material removal monitoring in the grinding process. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 18, 2 set. 2019.

ARDESHIR, Hesam *et al.* A scientometrics study and its practical implications for fused deposition modeling. **Alexandria Engineering Journal**, v. 99, p. 217–231, 1 jul. 2024.

BAESE, Carlo. **Photographic process for the reproduction of plastic objects**. United States of America, 8 nov. 1904.

BEAMAN, Joseph J. *et al.* **Solid Freeform Fabrication: A New Direction in Manufacturing**. [S.l.]: Springer US, 1997.

BHAVSAR, Pavan *et al.* Detecting first layer bond quality during FDM 3D printing using a discrete wavelet energy approach. *In*: Elsevier B.V., 2020.

CARMO, Matheus Godoy Fonseca do *et al.* Studying the Defects and Geometric Anomalies on Monolayer Parts Obtained via the Fused Deposition Modeling Process. *In*: MDPI AG, 5 fev. 2021a.

CARMO, Matheus Godoy Fonseca do *et al.* Studying the Defects and Geometric Anomalies on Monolayer Parts Obtained via the Fused Deposition Modeling Process. *In*: MDPI AG, 5 fev. 2021b.

DHINAKARAN, V. *et al.* A review on recent advancements in fused deposition modeling. *In*: Elsevier Ltd, 1 jan. 2020.

FATOBA, Olawale Samuel; JEN, Tien Chien. Acoustic-Based In-Situ Monitoring of Additive Manufacturing Fabrication: A Review. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

FERREIRA, Fábio Isaac. **Predição da Largura Útil de Dressadores de Ponta Única Utilizando Emissão Acústica e Redes Neurais Artificiais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

GALATI, Manuela; IULIANO, Luca. **A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations**. **Additive Manufacturing** Elsevier B.V., , 1 jan. 2018.

GIROTO, Pedro Cerri *et al.* Development of a piezoelectric transducer coupling system for structural health monitoring applications. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 out. 2019.

ISAO, Morioka. **Process for manufacturing a relief by the aid of photography**. United States of America, 24 set. 1935.

L. DIMATTEO. **Method of generating and constructing three-dimensional bodies**. United States of America, 20 jan. 1976.

LI, Wanlu *et al.* iScience Stereolithography apparatus and digital light processing-based 3D bioprinting for tissue fabrication. *[S.d.]*.

LIPKOWITZ, Gabriel *et al.* Injection continuous liquid interface production of 3D objects. **Science Advances**, v. 8, n. 39, 30 set. 2022.

LOPES, Thiago Glisoi *et al.* Machine condition monitoring in FDM based on electret microphone, SVM, and neural networks. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 129, n. 3–4, p. 1769–1786, 1 nov. 2023.

MARSCHNER, David E. *et al.* A methodology for two-photon polymerization micro 3D printing of objects with long overhanging structures. **Additive Manufacturing**, v. 66, 25 mar. 2023.

MUKTADIR, M. A.; HASAN, Md Nahid; ALAM, Manjurul. Additive manufacturing and acoustic emission: A brief review. **Journal of Additive Manufacturing Technologies**, 2023.

MURATA MANUFACTURING CO. **Piezoelectric Sound Components**. Disponível em: <<http://www.murata.com/info/rohs.html>>.

NAGARAJU, Dusanapudi Siva *et al.* Mechanical properties of 3D printed specimen using FDM (Fused deposition modelling) and SLA (Stereolithography) technologies. **Materials Today: Proceedings**, out. 2023.

PANDAV, Ganesh; KARANWAD, Tukaram; BANERJEE, Subham. Sketching feasibility of additively manufactured different size gradient conventional hollow capsular shells (HCSs) by selective laser sintering (SLS): From design to applications. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 151, 1 mar. 2024.

PENUMAKALA, Pavan Kumar; SANTO, Jose; THOMAS, Alen. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 201, 15 nov. 2020.

PRAJAPATI, Sheonandan *et al.* A review on comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS, TPU, and PETG manufactured engineering components by using fused deposition modelling. **Materials Today: Proceedings**, 15 maio 2024.

PUGALENDHI, Arivazhagan; RANGANATHAN, Rajesh; GANESAN, Sivakumar. Impact of process parameters on mechanical behaviour in multi-material jetting. *In: Elsevier Ltd*, 2019.

REE, Brian J. Critical review and perspectives on recent progresses in 3D printing processes, materials, and applications. **Polymer**, v. 308, 20 ago. 2024.

S. SCOTT, Crump. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. United States of America, 9 jun. 1992.

SHARMA, Ankit; RAI, Aryan. Fused deposition modelling (FDM) based 3D & 4D Printing: A state of art review. *In: Elsevier Ltd*, 1 jan. 2022.

SILVA DE FREITAS, Everaldo; GUIMARÃES BAPTISTA, Fabrício. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 238, p. 220–228, 1 fev. 2016.

SILVA DE FREITAS, Everaldo; GUIMARÃES BAPTISTA, Fabrício. **Análise Experimental de Diafragmas Piezelétricos Comerciais para Detecção de Dano Estrutural Baseada na Impedância Eletromecânica**. Bauru: Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho - UNESP, 2016.

STOICA, Petre.; MOSES, Randolph L. **Spectral analysis of signals**. [S.l.]: Pearson/Prentice Hall, 2005.

TAN, Hong Wei *et al.* Induction Sintering of Silver Nanoparticle Inks on Polyimide Substrates. **Advanced Materials Technologies**, v. 5, n. 1, 1 jan. 2020.

GLISSOI LOPES, Thiago. **Detecção e Classificação de Anomalias no Processo de Manufatura Aditiva**. Bauru: Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho - UNESP, 2021.

GUIMARÃES BAPTISTA, Fabrício. **Campus de Ilha Solteira “Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica”** FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista -, 2010.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva : tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda, 2018.

WANG, Zhen *et al.* Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 41, p. 283–309, 2001.

WU, Haixi; WANG, Yan; YU, Zhonghua. In situ monitoring of FDM machine condition via acoustic emission. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 84, n. 5–8, p. 1483–1495, 1 maio 2016.

ZIAEE, Mohsen; CRANE, Nathan B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 781–801, 1 ago. 2019.

APÊNDICE A – Estatística CFAR

Para uma análise complementar das estatísticas utilizadas no presente estudo, foram aplicadas outras estratégias de processamento às bases B1 e B2 que embora não tenham sido utilizadas na análise principal por não apresentarem resultados compatíveis com o esperado para a técnica, permitiram observar efeitos interessantes decorrentes da variação de parâmetros de processamento. Especificamente, ao aumentar o número de divisões consideradas e ajustar o valor do limiar γ , observou-se uma atenuação nos índices CFAR. Esse comportamento não estava previsto como foco desta investigação, mas reforça a sensibilidade do método às condições de entrada e aos parâmetros utilizados.

A inclusão dos gráficos das Figuras 63, 64, 65 e 66 neste apêndice visa evidenciar essa tendência, que pode não representar um ganho direto em termos de desempenho, mas aponta para um possível caminho de exploração em estudos futuros. Dessa forma, ainda que os resultados não tenham sido promissores dentro do escopo desta análise, eles podem fornecer subsídios importantes para o refinamento da técnica em aplicações semelhantes ou adaptadas.

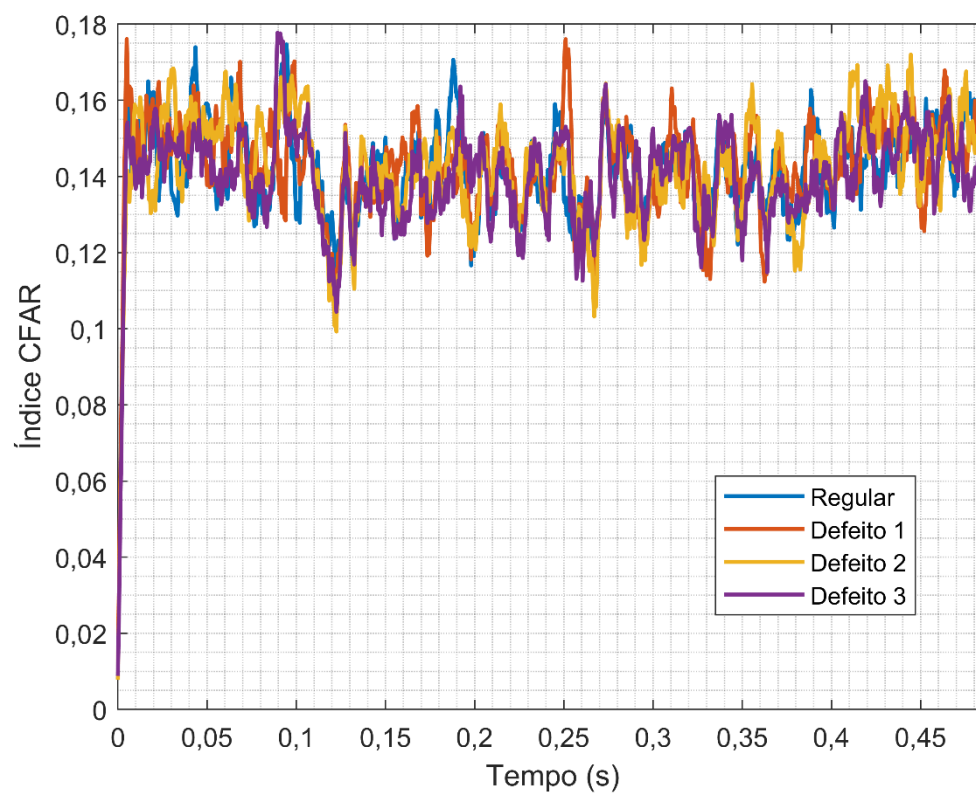
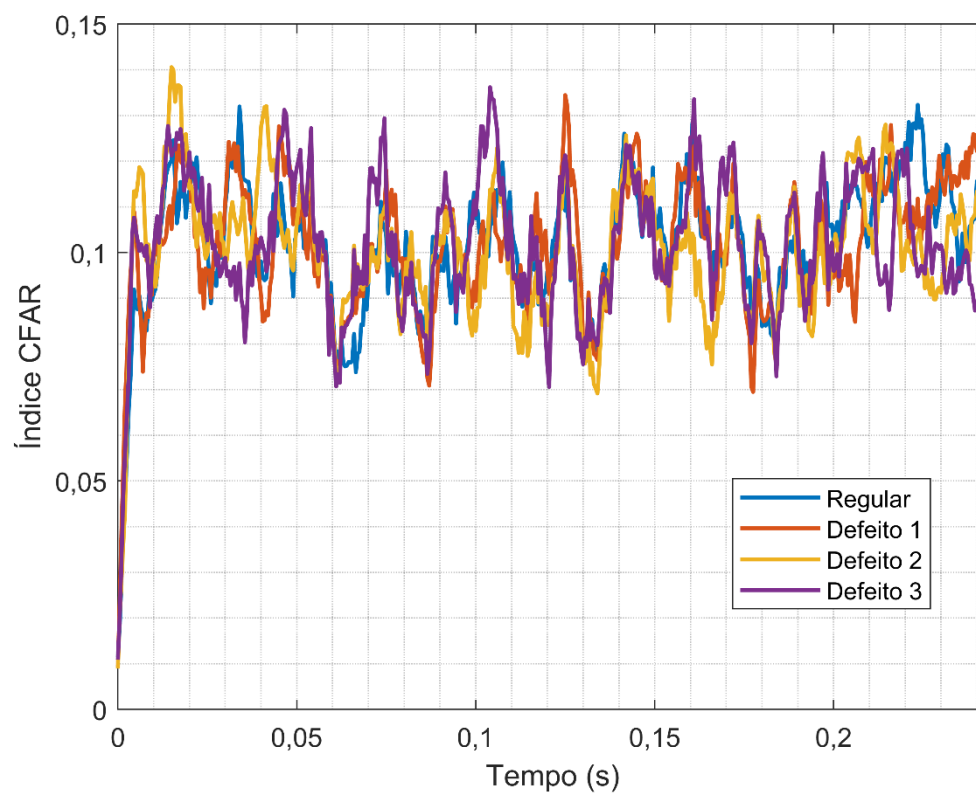
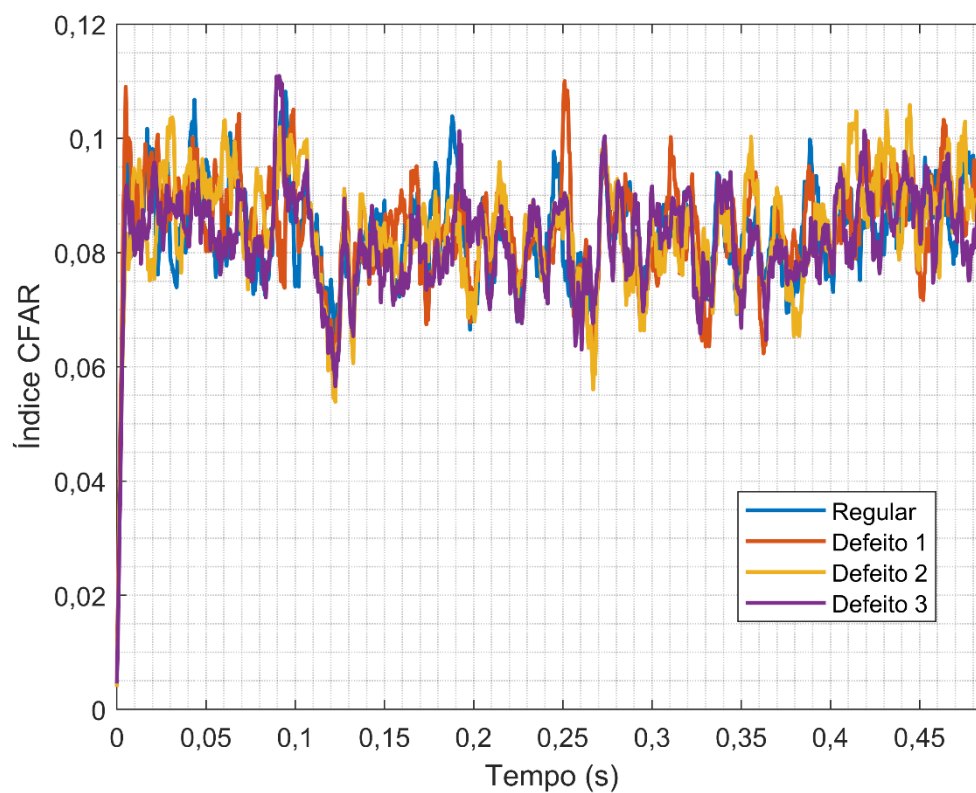
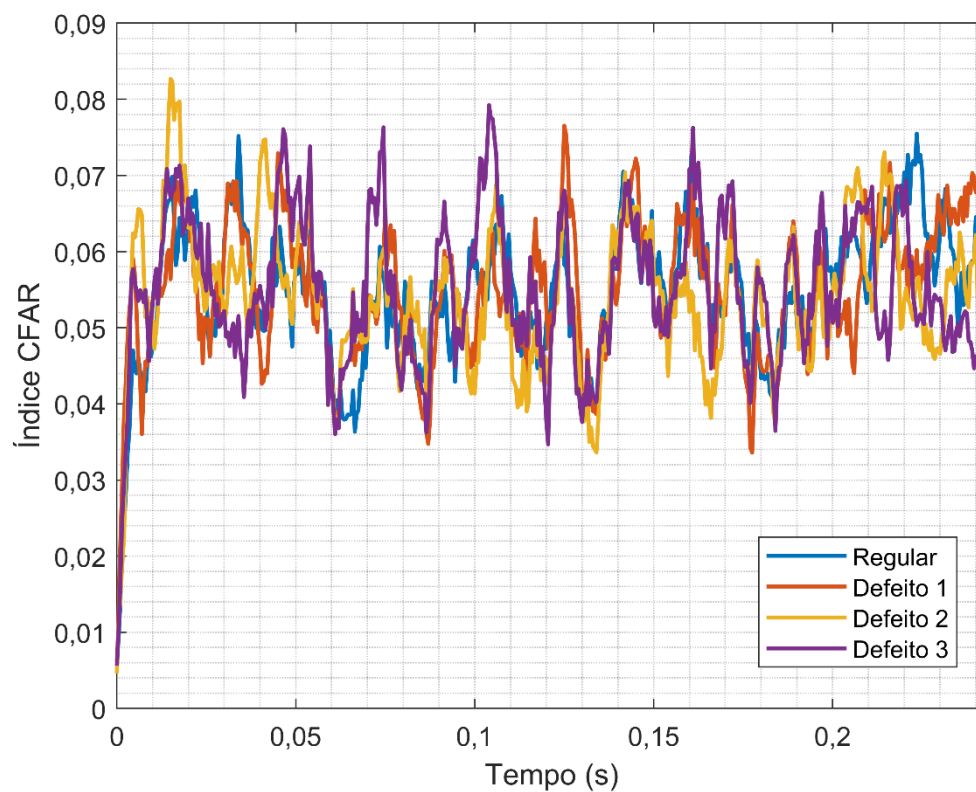
Figura 63 - CFAR: B1 ($v = 2,5 / 2048$ divisões)Figura 64 - CFAR: B1 ($v = 2,5 / 4096$ divisões)

Figura 65 - CFAR: B1 ($v = 3,0 / 2048$ divisões)Figura 66 - CFAR: B1 ($v = 3,0 / 4096$ divisões)

APÊNDICE B – Estatística MVD

Este apêndice apresenta os gráficos das variações da estatística MVD para as bases B1 e B2, que não foram utilizadas na análise principal por não apresentarem resultados compatíveis com o esperado para a técnica. No entanto, assim como observado na estatística CFAR, foi possível identificar, durante os testes com a MVD, que variações no número de divisões como ajuste dos parâmetros de cálculo resultaram em uma atenuação perceptível dos sinais processados. Embora essa atenuação não tenha gerado melhorias diretas no desempenho da técnica para a aplicação em questão, ela evidencia a sensibilidade do método às condições de configuração.

Dessa forma, ainda que os resultados obtidos com a MVD não tenham sido satisfatórios dentro do escopo desta pesquisa, os dados aqui apresentados nos gráficos das Figuras 67, 68, 69, 70 e 71 podem servir de base para investigações futuras que explorem diferentes abordagens, parâmetros e estratégias de processamento, com o objetivo de avaliar a adaptabilidade da estatística MVD em outras configurações de análise para monitoramento não-destrutivo.

Figura 67 - MVD: B1 (2048 divisões)

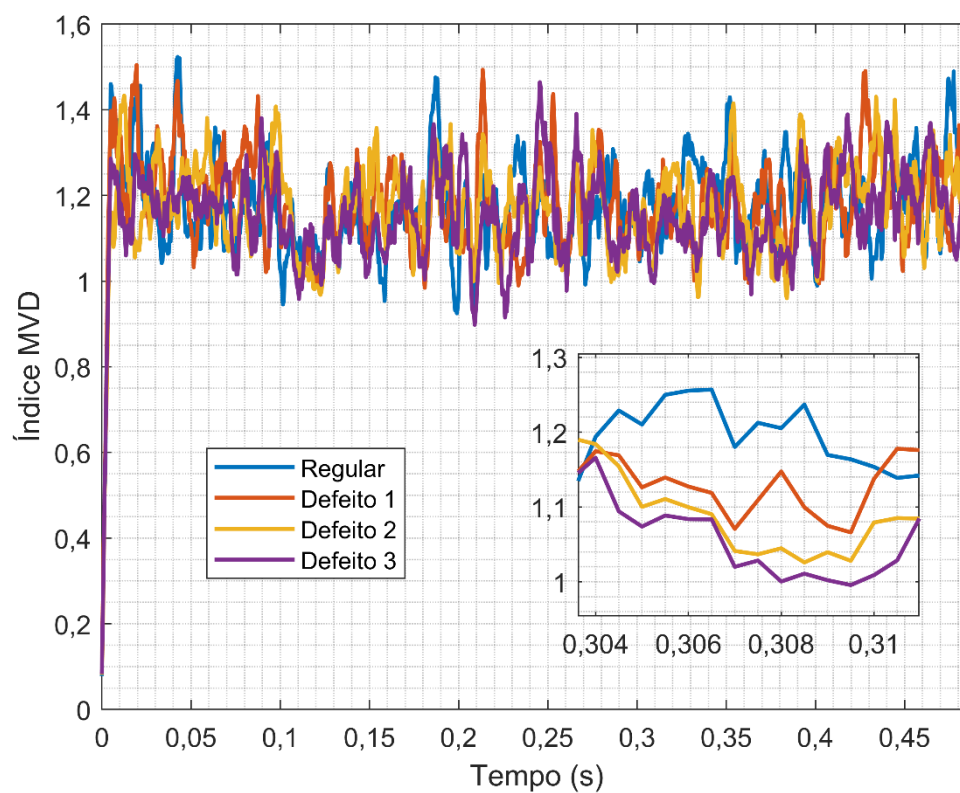


Figura 68 - MVD: B1 (4096 divisões)

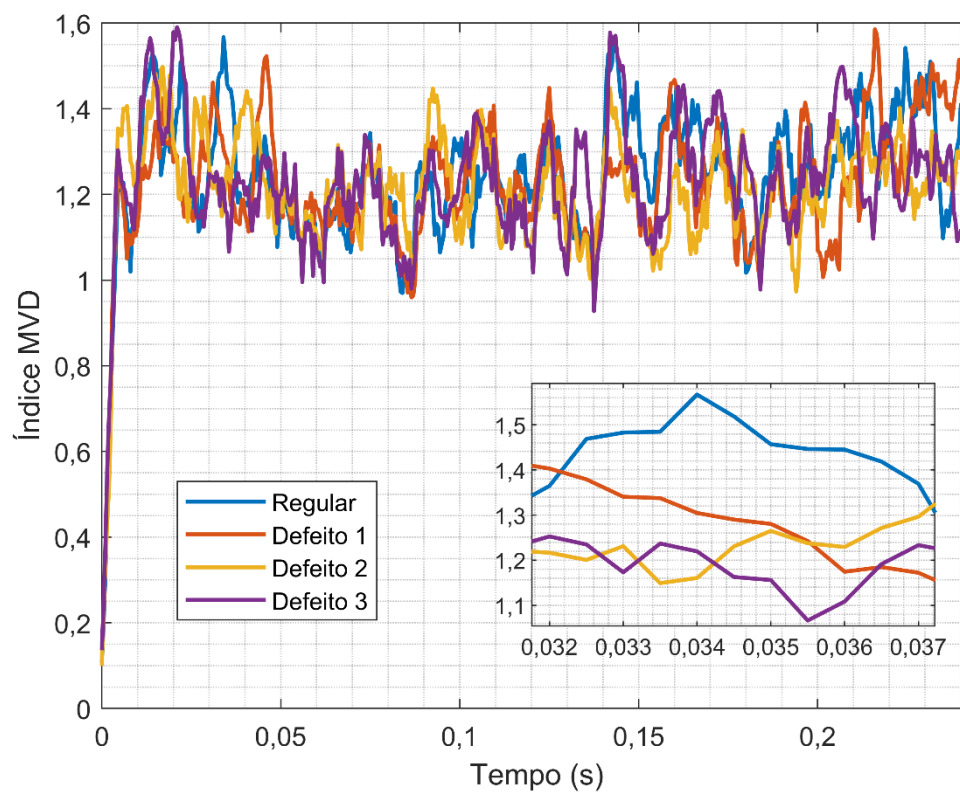


Figura 69 - MVD: B1 (8192 divisões)

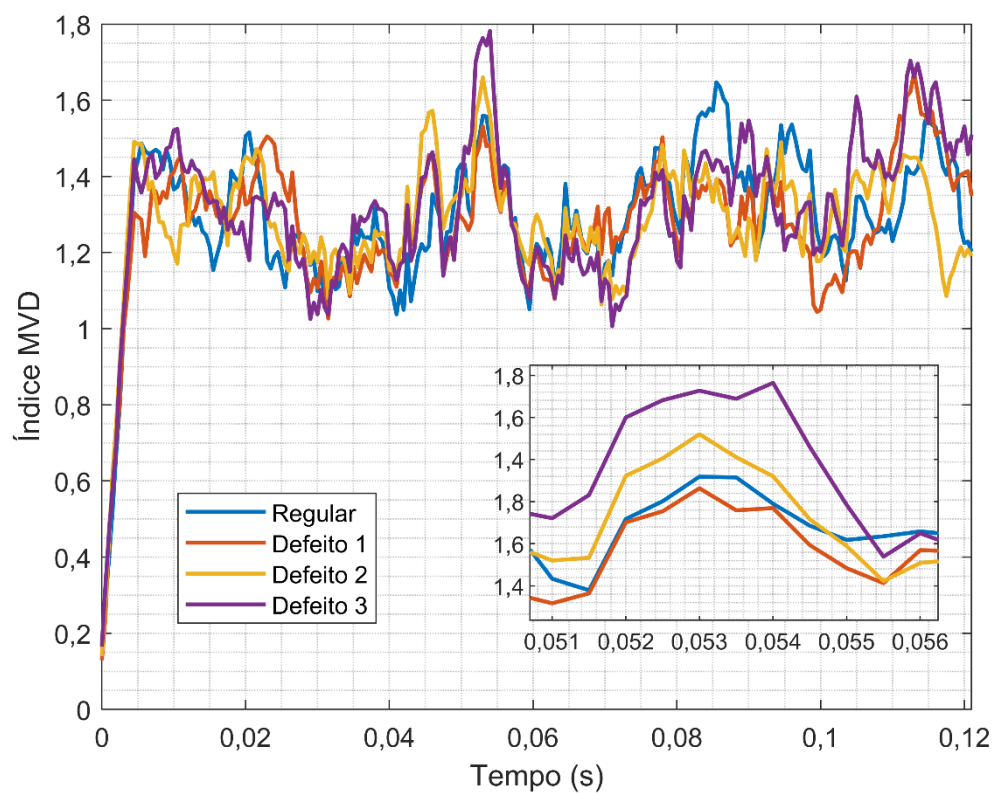


Figura 70 - MVD: B2 (2048 divisões)

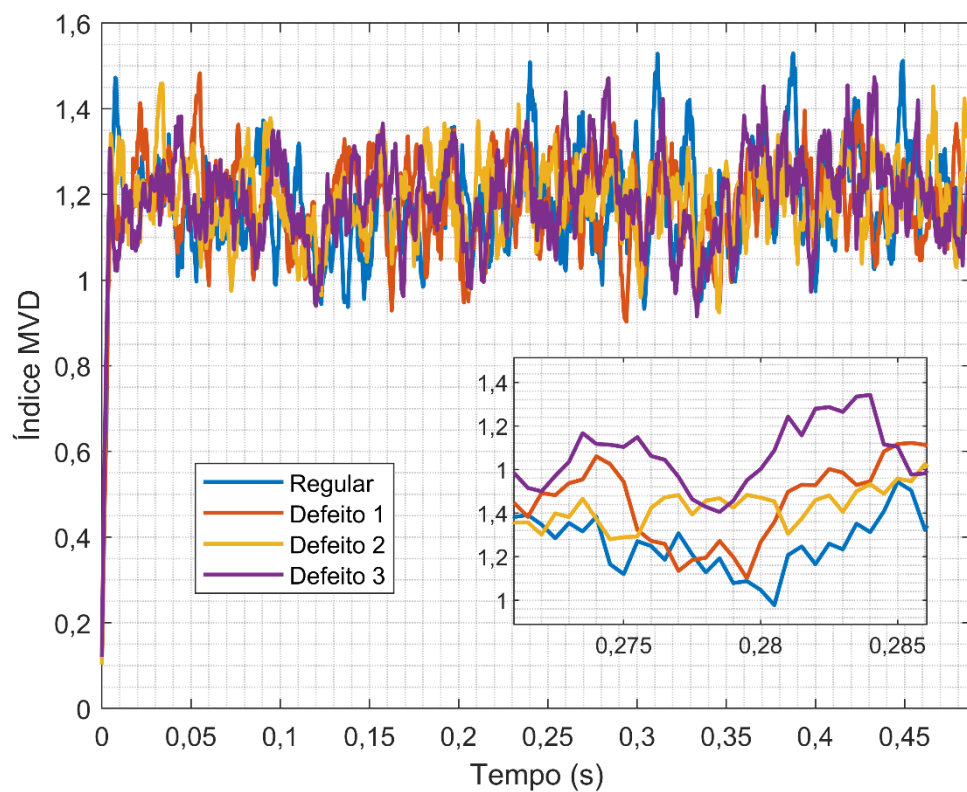


Figura 71 - MVD: B2 (4096 div)

