UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

THIAGO GLISSOI LOPES

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ANOMALIAS DURANTE O PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO POR MEIO DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS E PROCESSAMENTO DE SINAIS

Bauru
2021

THIAGO GLISSOI LOPES

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ANOMALIAS DURANTE O PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO POR MEIO DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS E PROCESSAMENTO DE SINAIS

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. Titular Paulo Roberto de Aguiar

Bauru
2021

Lopes, Thiago Glissoi
L864d Detecção e classificação de anomalias durante o processo de manufatura aditiva por fusão e deposição por meio de transdutores piezelétricos e processamento de sinais : Thiago Glissoi Lopes, 2021
219 p. :il.,tabs.,fotos

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021
Orientador: Paulo Roberto de Aguiar
Coorientador: Thiago Valle França

1.Manufatura por fusão e deposição. 2. Monitoramento. 3.Detecção de anomalias. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE THIAGO GLISSOI LOPES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de fevereiro do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de THIAGO GLISSOI LOPES, intitulada **DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ANOMALIAS DURANTE O PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO POR MEIO DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS E PROCESSAMENTO DE SINAIS**. A Comissão Examinadora foi constituida pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final:_ _ _ Aprovado _ _ _

Dedico a minha família que me apoia em tudo que está ao seu alcance para que eu seja feliz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Marcia Glissoi, por ter sempre feito tudo que estava em seu alcance por mim.

Agradeço aos meus avós, Maria e Nilton (Cabrera), por terem sempre cuidado de mim.

Agradeço ao meu tio, Reinaldo Glissoi, por ter feito tudo que fez por mim, e por ter sido o modelo de pessoa para quando estava crescendo.

Agradeço ao restante de meus familiares, por terem me incentivado e ajudado.

Agradeço a minha amada noiva, Jessyka Sanches, pelo apoio e incentivo ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Paulo Roberto de Aguiar, gostaria de agradecer profundamente pela oportunidade de poder acompanhar, ainda como aluno especial de mestrado, as atividades do laboratório. Agradeço ainda pelas oportunidades de vir e me tornar parte da equipe de pesquisa do LADAPS. Agradeço a paciência quando houve momentos difíceis, por toda orientação e ensino durante todo este tempo. Por meio de seus exemplos, conselhos e ensinamentos me tornei uma pessoa melhor.

Ao Professor Thiago Valle França, pela disposição em ensinar e orientar. Obrigado pela sinceridade, disponibilidade e por sempre buscar um meio para contribuir com a pesquisa.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB por todo ensino e atendimento prestado durante esse tempo.

Aos meus amigos de laboratório Ana Balarin, Cristiano Soares, Fábio Dotto, Gabriel David, Luanne Barbosa, Martin Auléstia, Pedro Cerri, Pedro Oliveira, Reinaldo Götz, Renata Maia, Rogério Tomazella e Zaqueu Antônio. Além deles, é necessário agradecer aos amigos de outros laboratórios de pesquisa da UNESP – Bauru, Bruno Albuquerque, Christielly Fernandes, Danilo Budoya, Guilherme Beraldi, Laura Queiroz, Leandro Campeiro, Marco Aurélio, Matheus Carmo, Renan, Verena Bombonatti, e Wallace Gabriel, vocês foram simplesmente fantásticos.

Ao meu grande amigo, Felipe Alexandre (*in memoriam*), por todo apoio e por participar de várias etapas de ensaios. Sua ajuda foi fundamental.

Aos meus amigos Adriel Senna, Breno Ortega, Erick Ruas, Igor Bazan, José Vital, e Wenderson Nascimento, pelo companheirismo e preciosos conselhos.

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

“A terra é um cenário muito pequeno em uma imensa arena cósmica.”

- Carl Sagan

RESUMO

O processo de manufatura aditiva por fusão e deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*), também conhecido como processo de impressão 3D, trata da fabricação de objetos tridimensionais por adição de camadas subsequentes de filamento plástico fundido. As camadas de filamento são depositadas seguindo determinados arquétipos de preenchimento (AP), definidos durante a fase de fatiamento por meio das características de impressão adotadas pelo operador do processo. Em cada AP, determinados parâmetros fundamentais de camada são observáveis. Dada a característica sequencial da fabricação das camadas no processo FDM, caso seja detectado uma anomalia durante a fabricação da primeira camada, o processo pode ser interrompido, evitando assim diversas perdas. Os efeitos de uma incorreta definição de características de impressão nos parâmetros fundamentais de camada têm sido estudados. O monitoramento indireto de processos de fabricação por meio do processamento digital de sinais adquiridos a partir de transdutores piezelétricos é uma prática muito comum na atualidade. A prática do monitoramento do processo FDM por sensor de emissão acústica (EA) vem sendo tema de diversos estudos. O diafragma piezelétrico (PZT) vem sendo estudado como alternativa ao sensor EA tradicional para aplicações de monitoramento *in-situ* de processos de manufatura. Os dados estatísticos obtidos da etapa de processamento digital de sinais podem ser utilizados como valores de entrada em modelos de classificação de anomalias em processos monitorados. Na construção destes modelos, diferentes métodos de classificação podem ser avaliados e comparados entre si quanto às acurácias obtidas ao classificar determinado grupo de amostras. O presente trabalho procurou estudar a viabilidade da utilização do PZT como alternativa ao sensor EA no monitoramento da fabricação de primeira camada do processo FDM, visando a detecção de anomalias nos parâmetros fundamentais de camada e na geometria obtida das peças impressas. Ademais, procurou-se a obtenção de modelos de classificação para os dados obtidos pelo sensor EA e pelo PZT. Para tal, diferentes análises estatísticas foram conduzidas nos sinais adquiridos pelos transdutores piezelétricos, e parte dos dados obtidos foram utilizados como entrada na avaliação de diferentes métodos de classificação. Como resultado do trabalho, ficou evidenciada a viabilidade da utilização do PZT como alternativa ao sensor de EA no monitoramento do processo FDM, com a detecção de anomalias nos parâmetros fundamentais de camada e obtenção de modelos de classificação capazes de identificar os diferentes modos de fabricação irregular.

Palavras-chave: manufatura por fusão e deposição, monitoramento, detecção de anomalias

ABSTRACT

The Fused Deposition Modeling (FDM) process, also known as 3D printing process, deals with the manufacture of three-dimensional objects by adding subsequent layers of fused plastic filament. The filament layers are deposited following certain filling archetypes (FA), defined during the slicing phase through the printing characteristics adopted by the process operator. In each FA, certain fundamental layer parameters are observable. Given the sequential characteristic of the fabrication of layers in the FDM process, if an anomaly is detected during the manufacture of the first layer, the process can be interrupted, thus avoiding several losses. The effects of an incorrect definition of printing characteristics on the fundamental layer parameters have been studied. Indirect monitoring of manufacturing processes through digital processing of signals acquired from piezoelectric transducers is a very common practice today. The practice of monitoring the FDM process by an acoustic emission (AE) sensor has been the subject of several studies. The piezoelectric diaphragm (PZT) has been studied as an alternative to the traditional AE sensor for *in-situ* monitoring applications of manufacturing processes. The statistical data obtained from the digital signal processing step can be used as input values in monitored anomalies classification models. In the construction of the classification models, different classification methods can be evaluated and compared with each other regarding the accuracy obtained when classifying a certain group of samples. The present work sought to study the feasibility of using PZT as an alternative to the AE sensor in monitoring the first layer fabrication of the FDM process, aiming at detecting anomalies in the fundamental parameters of the layer and in the geometry obtained from the printed parts. In addition, we sought to obtain classification models for the data obtained by the AE sensor and the PZT. To this end, different statistical analyzes were conducted on the signals acquired by piezoelectric transducers, and part of the data obtained was used as input for the evaluation of different classification methods. As a result of the work, the feasibility of using PZT as an alternative to the AE sensor in monitoring the FDM process was evidenced, with the detection of anomalies in the fundamental layer parameters and obtaining classification models capable of identifying the different modes of irregular manufacture.

Keywords: Fused deposition modeling, monitoring, anomalies detection

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **vii**

RESUMO ..... **ix**

ABSTRACT ..... **x**

SUMÁRIO ..... **xi**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES ..... **xiv**

LISTA DE TABELAS ..... **xxii**

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SÍMBOLOS ..... **xxiii**

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO **1**

1.1 BREVE ESTADO DA ARTE SOBRE MANUFATURA ADITIVA E SEU MONITORAMENTO 1

1.2 OBJETIVO 5

1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS 6

Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA **8**

2.1 PROCESSO FDM 8

2.1.1 Programa fatiador *10*

2.1.2 Estratégias de preenchimento *11*

2.1.2.1 Preenchimento tipo *raster* 13

2.1.2.2 Preenchimento tipo contorno 14

2.1.2.3 Preenchimento combinado de *raster* e contorno 14

2.1.3 Extrusor *15*

2.1.4 Impressora *16*

2.1.5 Filamento *18*

2.2 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA MANUFATURA 19

2.2.1 Monitoramento dos processos de manufatura aditiva *19*

2.2.1.1 Monitoramento do processo FDM 19

2.2.1.2 Detecção e classificação de anomalias em processos de MA 22

2.2.2 Transdutores piezelétricos *23*

2.2.3 Processamento de sinais *24*

2.2.3.1 Valor Médio Quadrático (RMS) e Contagem de Cruzamentos de Limiar (Counts) 25

2.2.3.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Razão de Potência (ROP) 29

2.2.3.3 Desvio do RMS (RMSD) e Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) 30

2.3 MÉTODO DA QUEBRA DO GRAFITE 31

2.4 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO 32

2.5 FRONTEIRA DO CONHECIMENTO 34

Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS 36

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS 36

3.1.1 Verificação da resposta dos transdutores pelo método PLB 38

3.1.1.1 Testes PLB em mesa isolada 38

3.1.1.2 Testes PLB em mesa aquecida 39

3.1.2 Testes de impressão 41

3.1.2.1 Testes com variação de velocidade de impressão 45

3.1.2.2 Testes com variação de proximidade do extrusor em relação a mesa 47

3.2 INSPEÇÃO VISUAL DE PEÇAS IMPRESSAS 49

3.2.1 Digitalização de alta resolução 49

3.2.2 Microscopia óptica 50

3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS 51

3.3.1 Análise da resposta dos transdutores piezelétricos 52

3.3.2 Análise do tempo de integração 54

3.3.3 Análise dos picos de amplitude em frequência 55

3.3.4 Análise dos arquétipos de preenchimento 57

3.3.5 Análise dos sinais adquiridos dos testes de impressão 59

3.3.5.1 Análise nos sinais dos V-VI 59

3.3.5.2 Análise nos sinais dos V-DZ 60

3.3.5.3 Classificação de dados 62

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO 65

4.1 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DDA RESPOSTA DOS TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS 65

4.1.1 Verificação da repetibilidade dos sinais no domínio do tempo 65

4.1.1.1 Análise nos testes PLB em mesa isolada 65

4.1.1.2 Análise nos testes PLB em mesa aquecida 67

4.1.2 Verificação da repetibilidade dos sinais no domínio da frequência 70

4.1.2.1 Análise nos testes PLB em mesa isolada 70

4.1.2.2 Análise nos testes PLB em mesa aquecida 72

4.1.3 Verificação da influência da fixação da mesa 75

4.1.3.1 Análise nos espectros adquiridos pelo sensor EA 75

4.1.3.2 Análise nos espectros adquiridos pelo PZT 77

4.1.4 Verificação da influência da temperatura 79

4.1.4.1 Análise nos espectros adquiridos pelo sensor EA 79

4.1.4.2 Análise nos espectros adquiridos pelo PZT 81

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO TEMPO DE INTEGRAÇÃO 83

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS PICOS DE AMPLITUDE EM FREQUÊNCIA 89

4.3.1 Análise nos espectros dos sinais adquiridos pelo sensor EA 89

4.3.2 Análise nos espectros dos sinais adquiridos pelo PZT 92

4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS ARQUÉTIPOS DE PREENCHIMENTO 94
4.4.1 Análise no domínio do tempo 94
4.4.2 Análise no domínio da frequência 100
4.5 RESULTADOS DA INSPEÇÃO VISUAL 104
4.5.1 Análise nas peças digitalizadas 104
4.5.1.1 Peças obtidas nos V-VI 104
4.5.1.2 Peças obtidas nos V-DZ 109
4.5.2 Análise por microscopia óptica 121
4.6 RESULTADOS DOS TESTES DE IMPRESSÃO 122
4.6.1 Resultados das análises nos sinais dos V-VI 122
4.6.2 Resultados das análises nos sinais dos V-DZ 125
4.6.2.1 Análise da variação em relação a IIR1 134
4.6.2.2 Análise da variação em relação a IIR2 139
4.6.3 Classificação das condições de impressão 143
4.6.3.1 Dados obtidos pelo sensor EA 143
4.6.3.2 Dados obtidos pelo PZT 145

Capítulo 5 – CONCLUSÕES 148

5.1 SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS. 149

Referências 150

APÊNDICE I 168

APÊNDICE II 173

APÊNDICE III 178

APÊNDICE IV 180

APÊNDICE V 184

APÊNDICE VI 188

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Objetivos do trabalho 5
Figura 2.1 - Representação das principais etapas do processo FDM 10
Figura 2.2 – Estratégias de preenchimento. (a) *Raster*, (b) Contorno, (c) Combinação de *raster* e contorno 12
Figura 2.3 – Exemplo de trajetórias de posição de uma camada 12
Figura 2.4 – Estratégias adicionais de preenchimento de camadas do sistema Slic3r®. (a) colmeia (*honeycomb*), (b) linha, (c) curva Hilbert, (d) acordes de Arquimedes, (e) espiral Octagram 13
Figura 2.5 – Representação de preenchimento combinado de *raster* e contorno com parâmetros fundamentais de camada 14
Figura 2.6 – Tipos de extrusores, partes e funcionamento. (a) Extrusor direto, (b) Extrusor *Bowden*, (c) Funcionamento do extrusor direto, (d) Funcionamento do extrusor *bowden* 16
Figura 2.7 – Modelos comuns de impressoras 3D 17
Figura 2.8 – Representações de camada única de filamento extrudado com os parâmetros indicados: largura do filamento (w), espessura da camada (t), *gap* (g) e distância (l) entre filamentos 18
Figura 2.9 – Diafragma piezelétrico 24
Figura 2.10 – Um exemplo de sinal EA com algumas características 28
Figura 3.1 – Sequência dos testes realizados 36
Figura 3.2 – Esquema do banco de ensaio para os PLB-I 38
Figura 3.3 – Foto do banco de ensaio para os PLB-I 39
Figura 3.4 – Esquema do banco de ensaio para os PLB-A 40
Figura 3.5 – Foto do banco de ensaio para os PLB-A 41
Figura 3.6 – Detalhamento da impressora 3D Graber i3 em relação as trilhas de movimentação 43
Figura 3.7 – Peças a serem utilizadas nos testes de impressão após terem sido fatiadas 43
Figura 3.8 – Específicações de fabricação do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) 44
Figura 3.9 – Específicações de fabricação do arquétipo de preenchimento 2 (AP2) 45
Figura 3.10 – Banco de ensaio para os testes com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI) 46
Figura 3.11 – Banco de ensaio para os V-DZ 47
Figura 3.12 – Foto do banco de ensaio para os V-DZ 48

Figura 3.13 – Banco de ensaios para a microscopia óptica. (a) Representação da base do microscópio, (b) Visão geral do microscópio com luz auxiliar acesa e câmera fotográfica acoplada 51
Figura 3.14 – Codificação para identificação dos dados oriundos dos V-DZ 52
Figura 3.15 – Sequência das análises conduzidas 52
Figura 3.16 – Algoritmo de análise dda resposta dos transdutores piezelétricos. (a) Análise da influência da fixação da mesa, (b) Análise da influência da temperatura da mesa 53
Figura 3.17 – Algoritmos de análise do tempo de integração. (a) Análise pelo primeiro critério, (b) Análise pelo segundo critério 55
Figura 3.18 – Algoritmo de análise dos picos de amplitude em frequência 56
Figura 3.19 – Algoritmo de análise dos arquétipos de preenchimento 58
Figura 3.20 – Representação da análise cruzada 59
Figura 3.21 – Algoritmo de análise nos sinais do V-DZ no domínio do tempo 61
Figura 3.22 – Algoritmo de análise nos sinais do V-DZ no domínio da frequência 62
Figura 3.23 – Métodos de classificação disponíveis no aplicativo *Classification Leaner* 63
Figura 3.24 – Fluxograma detalhado do procedimento de verificação dos métodos de classificação 64
Figura 4.1 – Sinais obtidos para o PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT 66
Figura 4.2 – Aproximação nos sinais obtidos para o PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT 67
Figura 4.3 – Sinais obtidos para os PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC 68
Figura 4.4 – Aproximação nos sinais obtidos nos PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC 69
Figura 4.5 – Espectros de frequência dos sinais obtidos para os PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT 71
Figura 4.6 – Espectros de frequência médios dos sinais obtidos para os PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT 72
Figura 4.7 – Espectros de frequência dos sinais obtidos para os PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC 73
Figura 4.8 – Espectros de frequência médios dos sinais obtidos no PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC 74
Figura 4.9 – Verificação da influência da fixação da mesa nos sinais de EA. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência 75

Figura 4.10 – Verificação da influência da fixação da mesa nos sinais de PZT. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência 77
Figura 4.11 – Verificação da influência da temperatura da mesa nos sinais de EA. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência 79
Figura 4.12 – Verificação da influência da temperatura da mesa nos sinais de PZT. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência 82
Figura 4.13 – Sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ 84
Figura 4.14 – AP1 do sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ 84
Figura 4.15 – Sinal RMS AP1 avaliado com *Ti* = 0,1 ms 85
Figura 4.16 – Aproximação nas regiões S1-L1 e S2-L1 do sinal RMS AP1 avaliado com *Ti* = 0,1 ms 86
Figura 4.17 – Aproximação na transição entre S1-L1 e S2-L1 do sinal RMS AP1 avaliado com *Ti* = 0,1 ms 87
Figura 4.18 – Tempo de subida para diferentes *Ti* avaliados 88
Figura 4.19 – Sinal RMS AP1 EA para diferentes *Ti*. (a) R1 – *Ti* = 1 ms, (b) R2 – *Ti* = 1 ms, (c) R3 – *Ti* = 1 ms, (d) R1 – *Ti* = 9 ms, (e) R2 – *Ti* = 9 ms, (f) R3 – *Ti* = 9 ms, (g) R1 – *Ti* = 15 ms, (h) R2 – *Ti* = 15 ms, (i) R3 – *Ti* = 15 ms 89
Figura 4.20 – Espectro em análise – EA 90
Figura 4.21 – Picos de amplitude em frequência – sensor EA 90
Figura 4.22 – Picos de frequência para todos os espectros obtidos a partir dos V-DZ – sensor EA 91
Figura 4.23 – Espectro em análise – PZT 92
Figura 4.24 – Picos de amplitude em frequência – PZT 93
Figura 4.25 – Picos de frequência para todos os espectros obtidos a partir dos sinais dos V-DZ – PZT 93
Figura 4.26 – Sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ. (a) AP1, (b) AP2 95
Figura 4.27 – Sinal RMS obtido a partir do sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ. (a) AP1, (b) AP2 96
Figura 4.28 – Médias RMS. (a) AP1, (b) AP2 97
Figura 4.29 – Média entre as médias RMS - blocos do AP1 97
Figura 4.30 – Counts. (a) AP1, (b) AP2 98

Figura 4.31 – Médias Counts – Blocos do AP1 99
Figura 4.32 – Médias entre as médias RMS e Médias Counts para os diferentes arquétipos de preenchimento 100
Figura 4.33 – Espectros de frequência para os diferentes arquétipos de preenchimento. (a) AP1, (b) AP2 101
Figura 4.34 – Sinais ROP. (a) AP1, (b) AP2 101
Figura 4.35 – Médias ROP. (a) AP1, (b) AP2 102
Figura 4.36 – Média ROP blocos AP1 103
Figura 4.37 – Média entre as médias ROP 103
Figura 4.38 – Análise nas peças obtidas em IR dos V-VI 104
Figura 4.39 – Análise nas peças obtidas em IIR1 dos V-VI 106
Figura 4.40 – Análise nas peças obtidas em IIR2 dos V-VI 108
Figura 4.41 – Análise nas peças obtidas em IIR1 dos V-DZ 110
Figura 4.42 – Análise nas peças obtidas em IR dos V-DZ 112
Figura 4.43 – Análise nas peças obtidas em IIR2 dos V-DZ 113
Figura 4.44 – Referência para conversão pixel-milímetro do processo de digitalização 114
Figura 4.45 – Avaliação dimensional das peças impressas em IIR1 nos V-DZ 115
Figura 4.46 – Avaliação dimensional das peças impressas em IR nos V-DZ 115
Figura 4.47 – Avaliação dimensional das peças impressas em IIR2 nos V-DZ 116
Figura 4.48 – Altura total das peças 117
Figura 4.49 – Largura total das peças 118
Figura 4.50 – Largura segmento 1 119
Figura 4.51 – Largura segmento 2 119
Figura 4.52 – Largura segmento 3 120
Figura 4.53 – Largura segmento 4 121
Figura 4.54 – Larguras de contorno médias das linhas do segmento 1 122
Figura 4.55 – Representação de três sinais brutos obtidos do V-VI. (a) Teste em IR, (b) Teste em IIR1, (c) Teste em IIR2 123
Figura 4.56 – Espectros de frequência de três sinais brutos obtidos do V-VI. (a) Teste em IR, (b) Teste em IIR1, (c) Teste em IIR2 124
Figura 4.57 – Sinais obtidos pelo sensor EA em IIR1 dos V-DZ 126
Figura 4.58 – Sinais obtidos pelo PZT em IIR1 dos V-DZ 126
Figura 4.59 – Sinais obtidos pelo sensor EA em IR dos V-DZ 127
Figura 4.60 – Sinais obtidos pelo PZT em IR dos V-DZ 128

Figura 4.61 – Sinais obtidos pelo sensor EA em IIR2 dos V-DZ 129
Figura 4.62 – Sinais obtidos pelo PZT em IIR2 dos V-DZ 130
Figura 4.63 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA representativos das fabricações com MSE. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3 131
Figura 4.64 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT representativos das fabricações com MSE. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3 132
Figura 4.65 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA representativos das fabricações com MSM. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3 133
Figura 4.66 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT representativos das fabricações com MSM. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3 134
Figura 4.67 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA para as fabricações de MSE em IIR1 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 5 kHz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição 135
Figura 4.68 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR1 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA 136
Figura 4.69 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT para as fabricações de MSE em IIR1 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 800 Hz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição 137
Figura 4.70 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR1 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT 138
Figura 4.71 – Valores resultante da análise no domónio do tempo nos sinais de MovRMS e MovROP de IIR1 e IR referentes a fabricação de S1. (a) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (b) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (c) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo PZT, (d) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo PZT 138

Figura 4.72 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA para as fabricações de MSE em IIR2 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 5 kHz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição 139
Figura 4.73 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR2 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA 140
Figura 4.74 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT para as fabricações de MSE em IIR2 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 800 Hz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição 141
Figura 4.75 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR2 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT 142
Figura 4.76 – Valores resultante da análise no domónio do tempo nos sinais de MovRMS e MovROP de IIR2 e IR referentes a fabricação de S1. (a) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (b) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (c) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo PZT, (d) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo PZT 143
Figura 4.77 – Resultado das rodadas de testes de classificação a partir dos dados obtidos pelo sensor EA 144
Figura 4.78 – Resultado das rodadas de testes de classificação a partir dos dados obtidos pelo PZT 146
Figura 6.1 - Aproximação nos sinais obtidos pelo sensor EA para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC 178
Figura 6.2 - Aproximação nos sinais obtidos pelo PZT para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC 178
Figura 6.3 - Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC 180

Figura 6.4 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com sensor EA. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC.....180
Figura 6.5 - Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC.....181
Figura 6.6 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com PZT. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC 182
Figura 6.7 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com sensor EA representado na banda de 0 Hz a 5 kHz. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC 182
Figura 6.8 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com PZT representado na banda de 0 Hz a 4 kHz. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC.....183
Figura 6.9 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR1-R1 184
Figura 6.10 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR1-R2 184
Figura 6.11 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR1-R3 185
Figura 6.12 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IR-R1.....185
Figura 6.13 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IR-R2.....185
Figura 6.14 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IR-R3.....186
Figura 6.15 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR2-R1 186
Figura 6.16 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR2-R2 186
Figura 6.17 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR2-R3 187
Figura 6.18 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3.....188
Figura 6.19 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3.....188
Figura 6.20 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3 189

Figura 6.21 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3 189
Figura 6.22 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3..... 190
Figura 6.23 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3..... 190
Figura 6.24 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3..... 191
Figura 6.25 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3..... 191
Figura 6.26 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3..... 192
Figura 6.27 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3..... 192
Figura 6.28 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3 193
Figura 6.29 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3 193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes dos extrusores de tipo normal e *bowden*.....15
Tabela 2: Métodos de classificação disponíveis no aplicativo *Classification Learner*.....33
Tabela 3: Artigos ciêntificos que avaliaram multiplos métodos de classificação por meio do aplicativo *Classification Learner* 34
Tabela 4: Características de impressão para os testes com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI).....46
Tabela 5: Características de impressão para os V-DZ.....48
Tabela 6: Definições de introdução da matriz de dados para a classificação.....63
Tabela 7: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e 105
Tabela 8: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR1 nos V-VI 107
Tabela 9: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR2 nos V-VI 109
Tabela 10: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR1 nos V-DZ 110
Tabela 11: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IR nos V-DZ.....112
Tabela 12: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR2 nos V-DZ 114
Tabela 13: Definições do modelo de classificação para os dados obtidos pelo sensor EA....145
Tabela 14: Definições do modelo de classificação para os dados obtidos pelo PZT.....147
Tabela 15: Características completas de impressão para os V-VI.....168
Tabela 16: Características completas de impressão para V-DZ.....173

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SÍMBOLOS

ºC	Unidade de medida termométrica no sistema métrico (Graus Celsius)
3DPa	Impressão 3D (*3D Printing*)
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*)
ABS-Energy	Energia do sinal
AE	Emissão Acústica (*Acoustic Emission*)
Al-Si	Alumínio-Silício
AM	Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing*)
AP	Arquétipo de preenchimento
AP1	Arquétipo de preenchimento externo
AP2	Arquétipo de preenchimento interno
ASTM	ASTM internacional (*American Society for Testing and Materials*)
CAD	Projeto Assistido por Computador (*Computer-Aided Design*)
CCDM	Métrica do Desvio do Coeficiente de Correlação (*Correlation Coefficient Deviation Metric*)
CF	Com filamento
Counts	Contagem de cruzamentos de limiar
DAQ	Dispositivo de Aquisição de Dados (*Data Acquisition*)
DFT	Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform)*
dpi	Pontos por polegada (*dots per inch*)
EA	Emissão Acústica
FDM	Manufatura por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling*)
FFE	Extrusão de Forma Livre (*Free Form Extrusion*)
FFF	Fabricação por Filamento Fundido (*Fused Filament Fabrication*)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*)
FIR	Resposta ao impulso finita (*Finite Impulse Response*)
GNU GPL	Licença Pública Geral GNU (*GNU General Public License*)
HSMM	Modelo Oculto semi-Markov (*Hidden Semi-Markov Model*)
Hz	Unidade de medida de frequência no sistema internacional (Hertz)
IIR1	Condição de impressão irregular 1
IIR2	Condição de impressão irregular 2
IR	Condição de impressão regular

ISO	Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization*)
kHz	Unidade de medida de frequência no sistema internacional (quilohertz)
L1	Linha 1
L2	Linha 2
L3	Linha 3
MA	Manufatura Aditiva
MatEx	Extrusão de material (*Material Extrusion*)
MIT	*Massachusetts Institute of Technology*
mm	Unidade de medida de comprimento no sistema métrico (milímetro)
MSE	Movimentação somente do extrusor
MSM	Movimentação somente da mesa
NTC	Termistor de coeficiente de temperatura negativo (*Negative Temperature Coefficient*)
obj	Abreviação de objeto
PCA	Análise de componentes principais (*Principal Component Analysis*)
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol (*Polyethylene Terephthalate Glycol*)
PLA	Ácido Poliático (*Polylactic Acid*)
PLB	Método da Quebra de Grafite (*Pencil Lead Break*)
PLB-A	Testes PLB em mesa aquecida
PLB-I	Testes PLB em mesa isolada
PNG	Gráficos Portáteis de Rede (*Portable Network Graphics*)
PSD	Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density)*
px	Número de pixels em uma imagem
PZT	Diafragma Piezelétrico (*Lead Zirconate Titanate*)
R1	Repetição 1
R2	Repetição 2
R3	Repetição 3
Reg	Região de análise
RepRap	Prototipagem rápida replicadora (Replicating Rapid Prototyping)
RMS	Valor Médio Quadrático (*Root Mean Square*)
RMSD	Desvio do Valor Médio Quadrático (*Root Mean Square Deviation*)
ROP	Razão de potência (*Ratio of Power*)
S1	Segmento 1

S2	Segmento 2
S3	Segmento 3
S4	Segmento 4
s	Unidade de medida de tempo no sistema internacional (segundo)
seg	Abreviação da unidade de medida segundo
SF	Sem filamento
SHM	Monitoramento da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*)
STFT	Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short Time Fourier Transform)*
SLA	Processo de fabricação por Estereolitografia (*Stereolithography*)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering*)
std	Desvio padrão
STL	Formato de Arquivo de Estereolitografia (S*tereolithography File Format*)
SVM	Máquina de Vetores de Suporte (*Support Vector Machine*)
Ti	Tempo de integração
TIF	Formato de imagem rotulada (*Tagged Image Format*)
TIFF	Formato de arquivo de imagem rotulado (*Tagged Image File Format*)
TIM	Motor de indução trifásico (*Triphasic Induction Motor*)
USB	Porta Serial Universal (*Universal Serial Bus*)
V	Volts
V-VI	Testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão
V-DZ	Testes de impressão com variação da característica defasagem no eixo Z
X	Vezes

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 BREVE ESTADO DA ARTE SOBRE MANUFATURA ADITIVA E SEU MONITORAMENTO

A nomenclatura manufatura aditiva (MA) descreve, de acordo com o padrão ISO ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2015), o processo de confecção de objetos pela união subsequente de camadas de material seguindo um modelo tridimensional (MELLOR; HAO; ZHANG, 2014; SCHNIEDERJANS, 2017). Existe ainda a definição da nomenclatura MA encontrado na ASTM 2792-12, que descreve-a como sendo processos de junção de materiais para a confecção de objetos a partir de dados digitais tridimensionais, usualmente camada sobre camada, em oposição a metodologias de fabricação subtrativas (MONZÓN *et al.*, 2014). Encontram-se variadas tecnologias de confecção em MA, como o processo de manufatura por fusão e deposição (FDM), a estereolitografia, e a sinterização seletiva a laser (LI; KUCUKKOC; ZHANG, 2017; MELLOR; HAO; ZHANG, 2014; MONZÓN *et al.*, 2014; VOLPATO, 2017).

De acordo com Schniederjans (2017), existem muitos debates acerca da utilização da nomenclatura impressão 3D (3DP) para a descrição de processos de manufatura aditiva. Alguns descrevem tais termos como sinônimos, como visto em Torrado *et al.* (2014) e Garas *et al.* (2018), outros apontam suas diferenças (KULKARNI *et al.* apud MELLOR *et al.*, 2014). É possível ainda verificar a utilização da nomenclatura impressão 3D para descrever especificamente o processo FDM, como visto em Torrado *et al.* (2014), Hall *et al.* (2017) e Lopes *et al.* (2018).

Inicialmente a nomenclatura impressão 3D fazia alusão direta a um processo de manufatura aditiva especifico desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (KRUTH, 1991). No entanto, em seu livro publicado no ano de 2017, Volpato (2017, p.18) descreve que a nomenclatura impressão 3D vem sendo mais comumente aplicado aos processos e equipamentos de manufatura aditiva por FDM de menor custo, conforme discussão contida na norma ISO/ASTM 52900:2015(E) (ISO/ASTM, 2015).

A estereolitografia (SLA) é descrita como uma técnica de fabricação de MA baseada na fotopolimerização (KLETETSCHKA *et al.*, 2018). A fotopolimerização na fabricação por SLA ocorre quando a luz ultravioleta emitida por um laser é absorvida pelo fotoinicializador, o que resulta na geração de um radical que inicializa a polimerização da resina, que em última instância resulta na cadeia polimérica estruturante do objeto (KRUTH, 1991).

Outra técnica de fabricação camada a camada é a sinterização seletiva a laser (SLS), na qual por meio da utilização de uma emissão a laser, a confecção de objetos tridimensionais

é realizada pela fusão de metais ou polímeros em camadas bidimensionais (MELLOR; HAO; ZHANG, 2014). Entretanto, de acordo com Shevchik *et al.* (2018), o número de materiais que podem ser confiavelmente processados pela técnica SLS é ainda muito limitado (ex: aço inoxidável austenítico e ligas eutéticas de Al-Si).

Para um objeto ser passível de confecção via processo FDM, este, inicialmente, deve possuir um modelo tridimensional digital (HALL *et al.*, 2017; VOLPATO, 2007). Em seguida, este modelo tridimensional digital deverá passar por um programa, o qual realizará a preparação e conversão do modelo para um formato de representação geométrica tridimensional (KOCISKO *et al.*, 2017; VOLPATO, 2017). O mais comum destes é o denominado formato de arquivo de estereolitografia (STL) (VOLPATO, 2017).

Dentre os meios pelos quais os modelos tridimensionais podem ser obtidos encontram-se: modelagem em programas de projeto assistido por computador (CAD) (HALL *et al.*, 2017), obtenção direta a partir de representação matemática (DA SILVA, 2007), ou a partir de tecnologias que permitem a obtenção de uma representação digital de um volume real, como a imagem de ressonância magnética (DA SILVA, 2007; VOLPATO, 2017; YEH; CHEN, 2018) ou digitalização tridimensional (CELANI; CANCHERINI, 2009).

O tempo de impressão e a qualidade final de um objeto obtido pelo processo FDM são de difícil padrão previsão (KOCISKO *et al.*, 2017). Isto ocorre devido a quantidade de etapas do processo nos quais alterações de fabricação são definidas. Inicialmente, o arquivo STL passa por um programa de preparo, denominado pós-processador, onde é realizada a parametrização inicial do processo. Nesta parametrização, realizada no processo denominado de fatiamento, as características de impressão são definidas. Outro fator que insere incertezas no tempo de impressão e na qualidade final de um objeto obtido pelo processo FDM é a escolha do pós-processador para a realização da parametrização inicial do processo. Cada pós-processador escolhido possui parâmetros intrínsecos, que estabelecem, entre outros fatores, quais características de impressão poderão ser definidas durante o fatiamento (DA SILVA, 2007; KOCISKO *et al.*, 2017). Que por si, insere um grau de incerteza na previsibilidade das características finais de um objeto obtido pelo processo FDM (NATH *et al.*, 2020). Estas alterações nas características finais de um objeto podem ser tão pequenas que se tornam de difícil percepção a um operador humano (HARTCHER-O'BRIEN; EVERS; TEMPELMAN, 2019).

As alterações indesejadas nas características finais de um objeto podem ser retratadas como anomalias de impressão em parâmetros fundamentais de camada (VOLPATO, 2017) ou em variações geométricas entre o objeto idealizado e o objeto impresso (LOPES *et al.*, 2020).

Segundo Volpato (2017, p.16), quanto ao início do processo FDM utilizando o arquivo

STL: “O processo tem início com o modelo 3D da peça sendo fatiado eletronicamente, obtendo-se as curvas de nível 2D que definirão, em cada camada, onde será ou não adicionado material.”

A fabricação de cada camada pelo processo FDM é alcançada por meio da deposição de filamento derretido em diferentes estratégias de fabricação ou de preenchimento (VOLPATO, 2007). A combinação de diferentes estratégias de fabricação, tais como as estratégias *raster* e contorno (*contour*), ou a variação de parâmetros de uma mesma estratégia, tal como o ângulo de *raster*, resulta na existência, em uma mesma camada, de múltiplos padrões ou arquétipos de preenchimento (AP) (WENDT *et al.*, 2016).

Dentre todo o período do processo FDM, o verificado como mais crítico para a detecção de anormalidades que podem indicar falhas é o de impressão da primeira camada (BHAVSAR *et al.*, 2020). Dentre os motivos para tal, encontra-se o fato de que no processo FDM a primeira camada é o que fornece fundação para o objeto em confecção (WU; YU; WANG, 2016).

As matérias primas utilizadas no processo FDM são escolhidas para cada necessidade de aplicação e viabilidade de emprego na impressora 3D disponível para uso (LEE; AN; CHUA, 2017; SCHNIEDERJANS, 2017). Dentre as matérias primas, encontram-se polímeros plásticos, cerâmicas, metais, e materiais inteligentes (HALL *et al.*, 2017; NGO *et al.*, 2018; VOLPATO, 2007). Para prototipagem rápida e aplicações domésticas, alguns dos polímeros plásticos disponíveis mais populares são o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), o Politereftalato de Etileno Glicol (PETG), e o Ácido Poliático (PLA) (CICALA *et al.*, 2017; KARAKURT; LIN, 2020; SANTANA *et al.*, 2018; SIVA *et al.*, 2020). O PLA possui maior alcance de utilização, dada, entre outros fatores, a sua viabilidade de utilização em impressoras 3D sem mesa aquecida (ABEYKOON; SRI-AMPHORN; FERNANDO, 2020).

Existem dois tipos principais de extrusores utilizados em FDM, extrusor direto e extrusor *Bowden*. Em impressoras que contam com extrusor *Bowden*, o aquecimento para fusão do filamento no extrusor ocorre separadamente do “ponto de movimentação” do filamento. De outra maneira, nas impressoras com extrusor direto, o aquecimento para fusão do filamento no extrusor ocorre junto ao “ponto de movimentação” do filamento (TLEGENOV; HONG; LU, 2018).

Dentre os métodos de monitoramento não invasivos, o sensoriamento por emissão acústica (EA) aplicado a um material possibilita a detecção de alterações internas como resultante de uma força externa, por meio de ondas elásticas geradas quando a energia no material ou em sua superfície é liberada rapidamente (KUMAR; VISHWAKARMA; AKHILESH, 2018). Estas ondas elásticas, detectadas pelo sensoriamento via EA, podem, após analisadas,

indicar a ocorrência de fenômenos que auxiliam a caracterização do correto funcionamento de um processo de manufatura, ou auxiliam a indicar anormalidades (ALEXANDRE *et al.*, 2018). Isto ocorre, por exemplo, quando durante o processo de interesse, em um período definido, o sistema de aquisição de dados armazena as ondas detectadas por um sensor EA, disponibilizando-as para posteriores análises por meio de técnicas de processamento digital de sinais (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016).

O diafragma piezelétrico (PZT), comumente conhecido como *buzzer*, é um componente acústico de baixo custo, utilizado em variadas aplicações eletrônicas. O PZT tem sido apresentado em diversos trabalhos como uma alternativa de baixo custo ao sensor EA tradicional, na aquisição de dados em diferentes processos para fins de monitoramento, inclusive em processos de monitoramento da integridade estrutural (SHM) (RIBEIRO *et al.*, 2017; SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016).

A análise da resposta de sensores, tal como o sensor de EA e o diafragma piezelétrico, sob determinadas condições de utilização tem o sido o tema de diferentes trabalhos (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015; LUCAS *et al.*, 2019). O método da quebra do grafite (PLB) pode ser utilizado de forma a se verificar da resposta de determinado sensor quando fixado à superfície de análise, ou quando sob influência de variáveis aquém ao processo em estudo, tal como a temperatura da superfície de análise (LOPES *et al.*, 2018a, 2019b).

As técnicas de processamento digital de sinais utilizam ferramentas de análise tais como: o Valor Médio Quadrático (RMS), Contagem de Cruzamentos de Limiar (Counts), Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), e energia do sinal (ABS-Energy) (WU; YU; WANG, 2016). Algumas destas ferramentas foram empregadas por Wu; Yu; Wang. (2016) e Liu *et al.* (2018) em sinais adquiridos por sensores EA, as quais se mostraram úteis na detecção e posterior classificação de diferentes anomalias em fabricações de peças pelo processo FDM.

A utilização da ferramenta de análise RMS em sinais no domínio do tempo requer que diferentes parâmetros sejam definidos (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996). Dentre estes, o tempo de integração (*Ti*) é um parâmetro que varia muito em relação ao processo no qual o sinal foi adquirido (JEMIELNIAK, 2001; KIM *et al.*, 2001; WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996).

A classificação de anomalias por meio de dados estatísticos oriundos do processamento digital de sinais é uma prática utilizada em trabalhos acadêmicos (GRIFFIN; CHEN, 2006, 2009; KHARRAT *et al.*, 2016; MALHI; GAO, 2004). É possível encontrar ainda a utilização de diferentes métodos de classificação em estudos visando a detecção de falhas no processo FDM (KIM *et al.*, 2018; WU; WANG; YU, 2015; WU; YU; WANG, 2016, 2017)

Ao estudar a classificação de variadas condições em um grupo de dados, diferentes métodos de classificação podem ser avaliados e comparados por meio da utilização do aplicativo *Classification Learner*, que faz parte da *toolbox* de *machine learning and deep learning* do Matlab® (MATHWORKS, 2019; YAN *et al.*, 2020). O aplicativo *Classification Learner* viabiliza ainda a obtenção de modelos de classificação de dados a partir de determinados métodos de classificação (MATHWORKS, 2019; YAN *et al.*, 2020). A utilização do aplicativo *Classification Learner* para avaliar e com

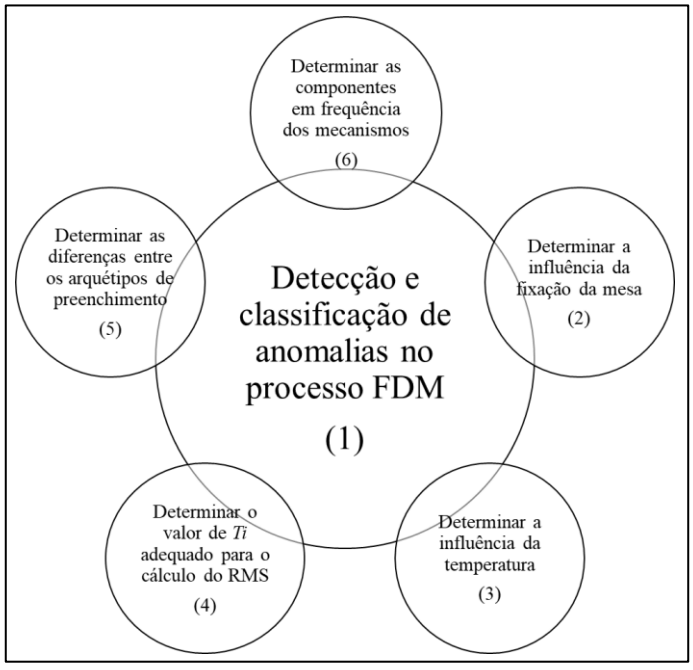
parar diferentes métodos de classificação pode ser encontrado em pesquisas na área da saúde (TUNCER; ERTAM, 2020), em estudos geológicos (AKTAS; SAN, 2019), em estudos visando a avaliação de rugosidade superficial (PANDIYAN; TJAHJOWIDODO; SAMY, 2016), e em estudos de física nuclear (GLENN *et al.*, 2021).

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um método de detecção e classificação de anomalias durante o início do processo de manufatura por fusão e deposição (FDM), empregando-se dois transdutores piezelétricos, o sensor de emissão acústica e o diafragma piezelétrico, bem como técnicas de processamento digital de sinais.

De forma a alcançar o objetivo principal do trabalho, objetivos secundários foram estabelecidos. A Figura 1.1 retrata o objetivo principal do trabalho, identificado pelo círculo central, e os demais círculos retratando os objetivos secundários.

Figura 1.1 – Objetivos do trabalho



Fonte: Autor

1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

A seguir são apresentados os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) da UNESP – Bauru, que o autor dessa dissertação publicou durante seu período de Mestrado, e que estão diretamente relacionados ao monitoramento do processo de fusão e deposição, tema central desta dissertação.

- **GLISSOI LOPES, THIAGO**.; DE AGUIAR, PAULO ROBERTO. DETECÇÃO DE FALHA NO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR MONITORAMENTO INDIRETO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS. In Proceedings of the IX Seminário de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica; de Aguiar, P.R., Baptista, F.G., Andreoli, A.L., Covolan Ulson, J.A., Eds.; Bauru: UNESP/FEB: Bauru, 2019; p. 206.

- **LOPES, THIAGO GLISSOI**.; ROCHA, RENATA MAIA.; AGUIAR, PAULO ROBERTO DE.; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO.; CONCEICAO, PEDRO DE OLIVEIRA.; VIERA, MARTIN ANTONIO AULESTIA.; FRANCA, THIAGO VALLE. Study of the Influence of Temperature on Low-Cost Piezoelectric Transducer Response for 3D Printing Process Monitoring. In Proceedings of the 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC); IEEE, 2019; p. 544–549.

- **GLISSOI LOPES, THIAGO**.; ROCHA, RENATA.; DE AGUIAR, PAULO.; ALEXANDRE, FELIPE.; FRANÇA, THIAGO. Evaluating Temperature Influence on Low-Cost Piezoelectric Transducer Response for 3D Printing Process Monitoring. Proceedings, Basel, Switzerland, v. 42, n. 1, p. 26, 2019.

- CARMO, MATHEUS GODOY FONSECA.; **LOPES, THIAGO GLISSOI**.; BOMBONATTI, VERENA SOARES.; AGUIAR, PAULO ROBERTO.; FRANÇA, THIAGO VALLE. Study of the Defects and Geometric Anomalies on Monolayer Parts Obtained by Fused Deposition Modeling Process. Proceedings, Online, v. 69, n. 1, p. 40, 2020.

- **LOPES, THIAGO GLISSOI**.; ANTONIO, ZAQUEU RICARDO FERNANDO.; JUNIOR, CRISTIANO SOARES.; RUAS, ERICK LUIZ VIEIRA.; AGUIAR, PAULO ROBERTO. A PRIMEIRA CAMADA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D. In: 2020, Bauru. Anais do XXVII SIMPEP. Bauru: [s. n.], 2020. p. 1–12.

A seguir são apresentados os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) da UNESP – Bauru, em que houve participação do autor dessa dissertação durante seu período de Mestrado, e possuem temas relacionados ao desenvolvimento deste trabalho.

- ALEXANDRE, FELIPE.; DE AGUIAR, PAULO.; GÖTZ, REINALDO.; AULESTIA VIERA, MARTIN.; **LOPES, THIAGO.**; D'ADDONA, DORIANA.; BIANCHI, EDUARDO.; SILVA, ROSEMAR BATISTA DA. Emitter-Receiver Piezoelectric Transducers Applied in Monitoring Material Removal of Workpiece during Grinding Process. Proceedings, v. 4, n. 1,9, p. 6, 2019.

- **GLISSOI LOPES, THIAGO**.; LOPES, WENDERSON NASCIMENTO.; ALEXANDRE, FELIPE.; RODRIGUES, RODRIGO.; GIROTO, PEDRO.; AGUIAR, PAULO.; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. A Influência da Determinação de Limiar a Ser Aplicado na Métrica "Counts" no Estudo do Processo de Dressagem. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Anais. p.3–7, 2019. São Carlos: ABCM.

- ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO.; AGUIAR, PAULO ROBERTO.; GÖTZ, REINALDO.; AULESTIA VIERA, MARTIN ANTONIO.; **LOPES, THIAGO GLISSOI**.; BIANCHI, EDUARDO CARLOS. A Novel Ultrasound Technique Based on Piezoelectric Diaphragms Applied to Material Removal Monitoring in the Grinding Process. Sensors, v. 19, n. 18, p. 3932, 2019

- GIROTO, PEDRO CERRI.; VIERA, MARTIN ANTONIO AULESTIA.; JUNIOR, PEDRO OLIVEIRA.; ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO.; DOTTO, FABIO ROMANO.; GOTZ, REINALDO.; **LOPES, THIAGO GLISSOI**.; AGUIAR, PAULO ROBERTO. Development of a Piezoelectric Transducer Coupling System for Structural Health Monitoring Applications. In Proceedings of the 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC); IEEE, 2019; p. 538–543.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre temas pertinentes ao trabalho. O processo FDM, bem como, seus principais parâmetros são apresentados. O monitoramento de processos de manufatura aditiva (MA) e sua importância na indústria de manufatura é discutido em conjunto com as técnicas de processamento digital de sinais. Trabalhos de pesquisa com o foco na detecção de anomalias e falhas são apresentados. O método da quebra de grafite (PLB), bem como, seus principais parâmetros são apresentados. Diferentes métodos de classificação de dados são apresentados, além de trabalhos que abordam comparações entre métodos por meio do aplicativo *Classification Learner*. Por fim, um levantamento das atuais fronteiras do conhecimento verificadas na revisão da literatura dos temas pertinentes ao trabalho será exposto.

2.1 PROCESSO FDM

O processo de manufatura por fusão e deposição (FDM), da maneira como é retratado nesta dissertação, possui diversas terminologias. A seguir estão representadas alguma destas terminologias, em português, juntamente com a referência a alguns artigos científicos, citados ao longo da dissertação, que fazem uso de tais terminologias ou de suas respectivas traduções para o inglês.

- Impressão 3D (*3D Printing*) (GLISSOI LOPES; DE AGUIAR, 2019; LI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2020; LOPES; LOOSLI; TANOMARU, 2018; LU; KUMARAVELU; OKWUDIRE, 2019; MELLOR; HAO; ZHANG, 2014; SCHNIEDERJANS, 2017; SIVA *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2018);
- Manufatura por fusão e deposição (*Fused Deposition Modelling*) (AL FARUQUE *et al.*, 2016; ALIMI; BINGWA; MEIJBOOM, 2019; COSTA; DUARTE; COVAS, 2017; GENG *et al.*, 2019; HARTCHER-O'BRIEN; EVERS; TEMPELMAN, 2019; KARAKURT; LIN, 2020; KUN, 2016; LIU *et al.*, 2018; MONZÓN *et al.*, 2014; PANDA *et al.*, 2018; SANTOS, 2016; SOLOMON; SEVVEL; GUNASEKARAN, 2020; SRINIVAS; BABU, 2017; SRINIVASAN *et al.*, 2020a, 2020b, 2020c; YU *et al.*, 2020; ZI *et al.*, 2019);
- Manufatura aditiva (*Additive Manufacturing*) (BINDU BHARGAVI; GOPALA KRISHNA SASTRY, 2017; LI; KUCUKKOC; ZHANG, 2017; LIU *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2018b; YAMPOLSKIY *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020);
- Fabricação por filamento fundido (*Fused Filament Fabrication*) (ANDEREGG *et al.*, 2019; BELLACICCA; SANTANIELLO; MILANI, 2018; ERTAY; YUEN;

ALTINTAS, 2018; GO *et al.*, 2017; NATH *et al.*, 2020; PETSIUK; PEARCE, 2020; SALUJA; XIE; FAYAZBAKHSH, 2020; SINGH *et al.*, 2020; TLEGENOV; HONG; LU, 2018);

- Extrusão 3D (*3D Extrusion*) (KUN, 2016);
- Extrusão de forma livre (*Free Form Extrusion*) (COSTA; DUARTE; COVAS, 2017);
- Extrusão de material (*Material extrusion*) (LUO *et al.*, 2020; MONZÓN *et al.*, 2014; NORTHCUTT *et al.*, 2018; POPESCU *et al.*, 2020; SRINIVAS; BABU, 2017).

O processo FDM pode ser definido como o processo no qual, por meio da deposição de diversas camadas subsequentes de filamento termoplástico fundido, seguindo uma codificação para o movimento do extrusor e para o movimento da mesa, e uma movimentação relativa a cada camada adicionada, obtém-se um objeto tridimensional com dimensões planejadas (VOLPATO, 2017). A codificação que contém as devidas movimentações a serem realizadas pelo extrusor e pela mesa de impressão é escrita em código G (G-code) (DUONG *et al.*, 2018; VOLPATO, 2017). O código G é uma linguagem de programação muito utilizada em processos de fabricação em que há comando numérico computadorizado (FAROUKI; MANJUNATHAIAH; YUAN, 1999; SHIN; SUH; STROUD, 2007).

Gibson *et al.* apud Mellor *et al.* (2014) define oito pontos sequenciais que devem ser seguidos para a obtenção e aplicação de um objeto original pelo processo FDM.

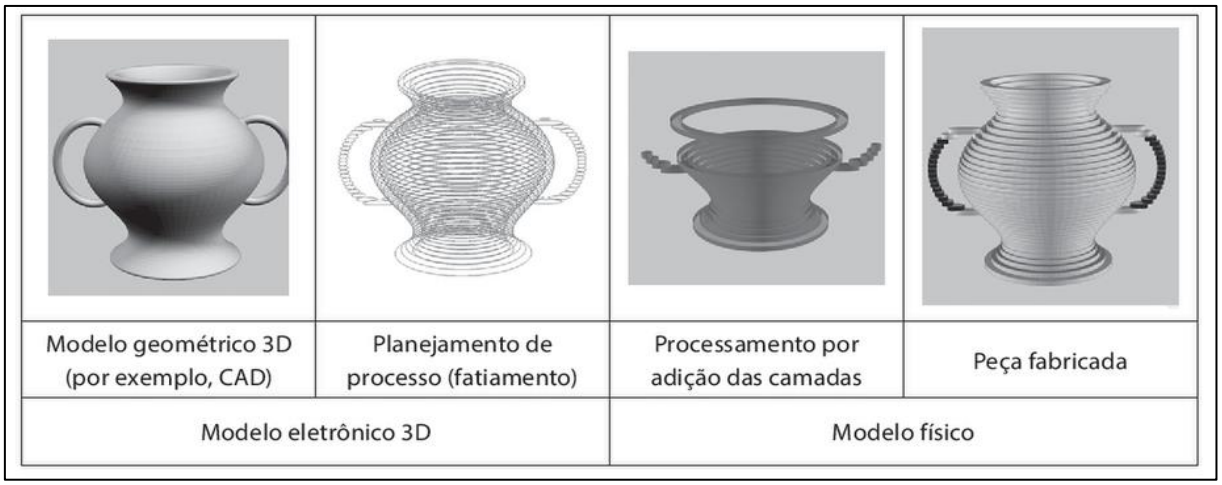
- Conceptualização e desenho CAD;
- Conversão para STL;
- Transferência e manipulação do arquivo STL no programa fatiador;
- Configuração da impressora e parametrização da impressão;
- Fabricação do objeto ou peça;
- Remoção do objeto impresso e limpeza da mesa;
- Acabamento do objeto impresso;
- Aplicação.

Uma ilustração que contém as principais etapas do processo FDM pode ser observada na Figura 2.1.

Os objetos obtidos pelo processo FDM podem ser alocados nas mais variadas aplicações (SINGH *et al.*, 2020). Exemplos de aplicação específicos, de acordo com Schniederjans (2017), são encontrados em: aviação e defesa aérea, com a construção de fuselagens leves; construção civil, com modelos topográficos; indústrias automotivas, como a construção de carrocerias aerodinâmicas. Também é verificada grande utilização de objetos obtidos pelo processo nos setores ortopédico (LIM *et al.*, 2018), ortodôntico (TAHAYERI *et al.*, 2018) e de

diagnóstico médico (FERREIRA; DOS SANTOS; DA SILVA, 2007).

Figura 2.1 - Representação das principais etapas do processo FDM



Fonte: (VOLPATO, 2017)

A adoção do processo FDM como alternativa a outros processos industriais e de prototipagem rápida vem sendo largamente estudada (AHRENS *et al.*, 2007; ATTARAN, 2017; JIANG; KLEER; PILLER, 2017; LOPES *et al.*, 2018b; SCHNIEDERJANS, 2017). Dentre os critérios identificados como enfoques para esta adoção, de acordo com Schniederjans (2017), encontram-se o aumento de performance, compatibilidade com outros processos, e condições processuais facilitadas. A respeito da porcentagem de utilização do processo FDM nas cinco maiores indústrias de manufatura, encontram-se, de acordo com Singh *et al.* (2020), as porcentagens de 35 % para automobilística e aeroespacial, 28 % para serviços ao consumidor, 17 % em biomedicina, 12 % para educação, e 8 % para outros usos.

O crescimento da utilização de processos de MA em aplicações de indústria 4.0, isto é, aplicações onde o compartilhamento de dados por meio de redes conectadas são necessárias, tem motivado o desenvolvimento de estudos que objetivam propor métodos de detecção e prevenção a cyber-ataques externos em processos de MA, tal como o processo FDM (AL FARUQUE *et al.*, 2016; YAMPOLSKIY *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2020).

2.1.1 Programa fatiador

O denominado programa fatiador é utilizado em diferentes etapas do processo FDM, e consiste primariamente de três partes: *firmware*, interface de impressão e pós-processador (KOCISKO *et al.*, 2017).

O *firmware* permite a interpretação do código G, gerado durante o processo de fatiamento, transformando-o em movimentação, controle dos motores de passo, controle da temperatura na mesa de impressão, controle da temperatura no extrusor, entre outras variáveis do

processo (KOCISKO *et al.*, 2017).

A interface de impressão consiste em um programa que roda em um computador conectado muitas das vezes via conexão tipo Porta Serial Universal (USB) ou por cabo de rede ao *hardware* de controle da impressora. A interface de impressão permite a supervisão, e, em alguns casos, a alteração de variáveis do processo FDM em tempo real (KOCISKO *et al.*, 2017).

O pós-processador é tido como uma das partes mais importantes do processo FDM (KOCISKO *et al.*, 2017). Sua principal função é a de manipular o arquivo STL (DA SILVA, 2007). Isto é, de dividir o modelo 3D em camadas que sejam dimensionalmente e geometricamente acuradas, e de gerar código G que defina em comando numérico, entre variáveis, o melhor caminho a ser percorrido pelo extrusor durante a fabricação de cada arquétipo de preenchimento (ERTAY; YUEN; ALTINTAS, 2018; KOCISKO *et al.*, 2017). Mais de um tipo de pós-processador pode ser encontrado disponível como parte de determinado programa fatiador (KOCISKO *et al.*, 2017).

Uma parcela das impressoras comercialmente disponíveis possuem programa fatiador proprietário, desenvolvido para atender especificamente as necessidades individuais de determinado dispositivo (VOLPATO, 2017). No entanto, é comum encontrar na maior parte das fabricantes de impressoras 3D, suporte a programas fatiadores desenvolvidos para diferentes impressoras. Um dos programas fatiadores mais populares, denominado Repetier-Host®, possui disponível três pós-processadores, denominados Slic3r®, Cura Engine® e Skeinforge® (KOCISKO *et al.*, 2017).

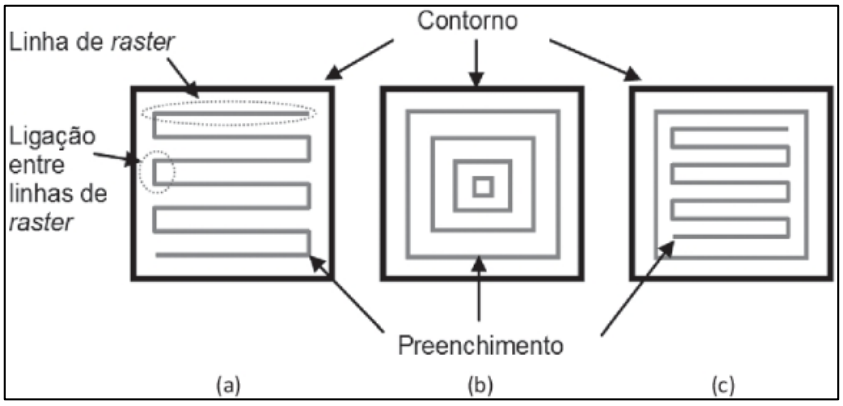
2.1.2 Estratégias de preenchimento

Durante a etapa de planejamento do processo, diferentes estratégias de preenchimento podem ser definidas (DA SILVA, 2007; WENDT *et al.*, 2016). As estratégias de preenchimento tradicionais, denominadas tipo *raster* e tipo contorno (*contour)*, podem ser utilizadas de maneira separada ou em combinação na construção dos padrões ou arquétipos de preenchimento (AP) a serem seguidos durante a fabricação de cada camada do objeto pelo processo FDM (VOLPATO, 2017), conforme representado na Figura 2.2.

Um aspecto intrínseco das diferentes estratégias de preenchimento é que, dependendo da complexidade da camada a ser fabricada, vários trechos desconectados podem ser gerados, exigindo o reposicionamento do extrusor em períodos sem deposição para permitir que estes possam ser fabricados (VOLPATO, 2017). A Figura 2.3 apresenta, em uma representação esquemática, a seção de uma única camada contendo três trechos construídos sob a estratégia de preenchimento contorno (C1, C2 e C3) e cinco conjuntos de trechos construídos sob a estratégia

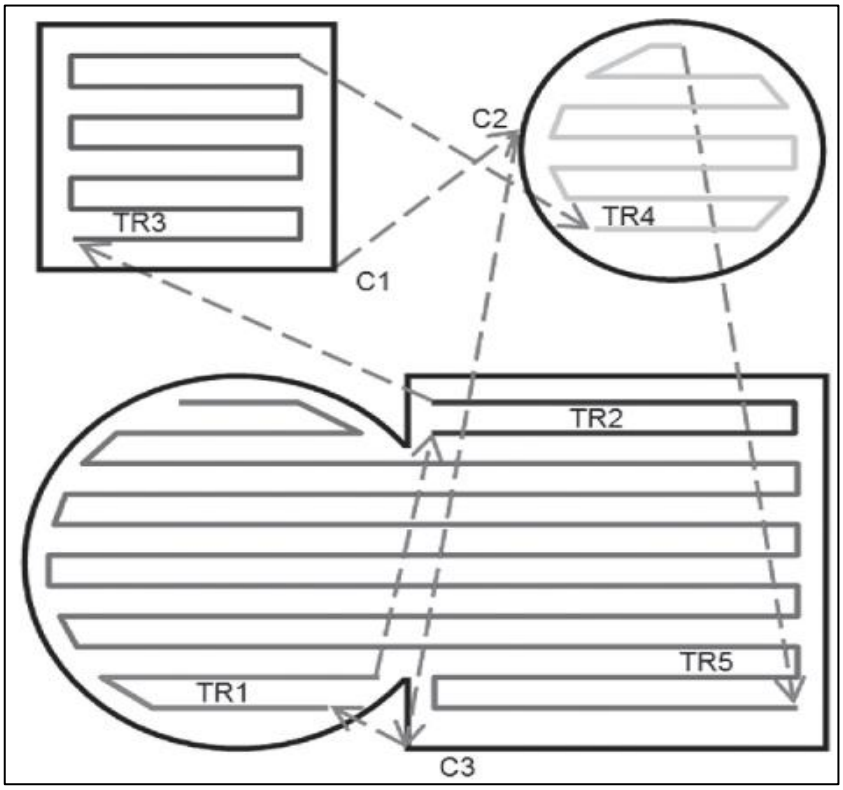
de preenchimento *raster* (TR1 a TR5), além das trajetórias de reposicionamento do extrusor.

Figura 2.2 – Estratégias de preenchimento. (a) *Raster*, (b) Contorno, (c) Combinação de *raster* e contorno



Fonte: (VOLPATO, 2017)

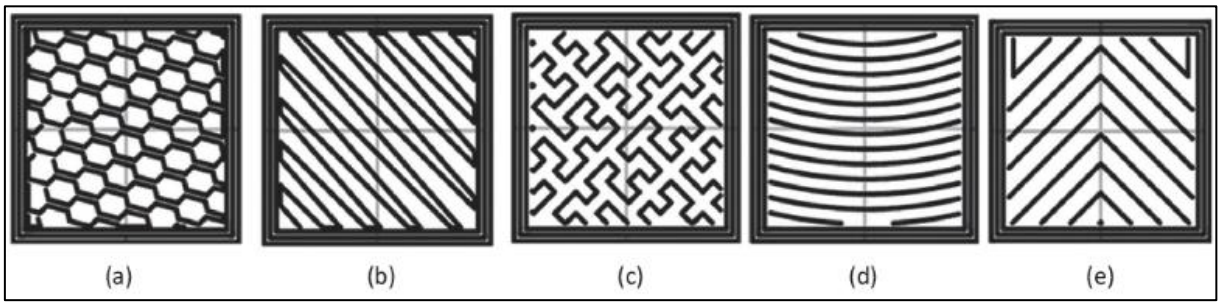
Figura 2.3 – Exemplo de trajetórias de posição de uma camada



Fonte: (VOLPATO, 2017)

Estratégias adicionais de preenchimento podem ser encontradas nos pós-processadores disponíveis no mercado para aplicações específicas (KOCISKO *et al.*, 2017). O emprego de determinada estratégia adicional de preenchimento, como a estratégia denominada colmeia (*honeycomb)* ou linha (*line)*, depende da aplicação a qual a peça final será aplicada (DIZON *et al.*, 2018; SRINIVASAN *et al.*, 2020b; WENDT *et al.*, 2016). A Figura 2.4 representa algumas das principais estratégias adicionais de preenchimento disponíveis no pós-processador Slic3r®.

Figura 2.4 – Estratégias adicionais de preenchimento de camadas do sistema Slic3r®. (a) colmeia (*honeycomb*), (b) linha, (c) curva Hilbert, (d) acordes de Arquimedes, (e) espiral Octagram



Fonte: (VOLPATO, 2017)

Diversas características de impressão podem ser definidas durante a etapa de parametrização da impressão. Algumas destas características, possuem influência direta na qualidade final da peça fabricada (COSTA; DUARTE; COVAS, 2017; PAPON; HAQUE; MULANI, 2019; SINGH *et al.*, 2020; SOLOMON; SEVVEL; GUNASEKARAN, 2020), tais como a porcentagem de preenchimento, estilo de preenchimento, número de contornos, ângulo de *raster*, estilo de *raster*, espessura de camada, velocidade de impressão, temperatura do extrusor e temperatura da mesa (PAPON; HAQUE; MULANI, 2019; SINGH *et al.*, 2020).

A qualidade final da peça obtida pode ser avaliada em relação a acurácia na reprodução dos parâmetros fundamentais de camada (CARMO *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2020), acurácia dimensional (NATH *et al.*, 2020; PAPON; HAQUE; MULANI, 2019; SINGH *et al.*, 2020), topografia superficial (ZHANG *et al.*, 2020), rugosidade superficial (HARTCHER-O'BRIEN; EVERS; TEMPELMAN, 2019; SINGH *et al.*, 2020), resistência mecânica (PAPON; HAQUE; MULANI, 2019; SINGH *et al.*, 2020; SRINIVASAN *et al.*, 2020b; WENDT *et al.*, 2016), e tempo de impressão (SINGH *et al.*, 2020).

2.1.2.1 Preenchimento tipo *raster*

No preenchimento tipo *raster* o filamento é depositado na mesa por meio de uma trajetória tipo zigue-zague, isto é, por meio de deslocamentos lineares paralelos alternados (VOLPATO, 2017). Uma representação desta estratégia de preenchimento pode ser observada na Figura 2.2(a).

A adoção do preenchimento tipo *raster* requer que alguns parâmetros fundamentais de camada sejam definidos (VOLPATO, 2017). Dentre eles, encontram-se os parâmetros, largura de preenchimento *raster*, espaço (*gap)*, e ângulo de inclinação das linhas de *raster (*ângulo de *raster)*, representados na Figura 2.5.

A estratégia tipo *raster* é escolhida por sua velocidade de construção de camada, e por

sua habilidade de alternar a direção do ângulo de *raster* dentro de uma mesma camada ou de uma camada para outra (VOLPATO, 2017). A direção do preenchimento do *raster* é usualmente alternada de 90 º a cada nova camada, com o objetivo de aumentar a resistência final da peça (VOLPATO, 2007).

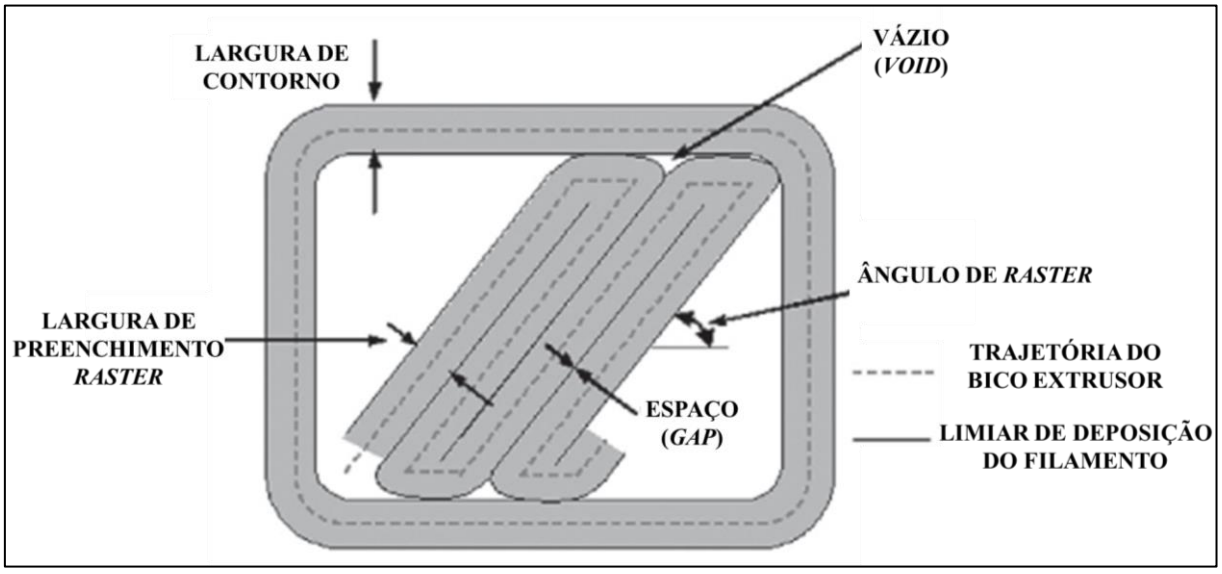
2.1.2.2 Preenchimento tipo contorno

No preenchimento tipo contorno o filamento é depositado na mesa seguindo trajetórias de contornos fechados equidistantes, obtidos a partir da geometria da camada durante o fatiamento (VOLPATO, 2017). Uma representação desta estratégia de preenchimento pode ser observada na Figura 2.2(b). A adoção do preenchimento tipo contorno requer que alguns parâmetros fundamentais de camada sejam definidos (VOLPATO, 2017). Dentre eles, encontra-se o parâmetro largura de contorno, representado na Figura 2.5.

2.1.2.3 Preenchimento combinado de *raster* e contorno

A combinação entre as estratégias de preenchimento *raster* e contorno resulta em um preenchimento que usualmente se inicia com alguns contornos equidistantes, e é finalizado com o preenchimento da área interna aos contornos com a estratégia do tipo *raster* (VOLPATO, 2007, 2017). Uma representação desta estratégia de preenchimento pode ser observada na Figura 2.2 (c).

Figura 2.5 – Representação de preenchimento combinado de *raster* e contorno com parâmetros fundamentais de camada



Fonte: Adaptado de (VOLPATO, 2017)

A adoção do preenchimento tipo combinado gera alguns parâmetros fundamentais de interface na camada de impressão (VOLPATO, 2017). Dentre eles, encontra-se o parâmetro

largura de contorno, o qual pode ser igual ou diferente da largura de preenchimento *raster*, o ângulo de *raster*, o vazio (*VOID*) existente entre o preenchimento em *raster* e do preenchimento em contorno, e o espaço (*GAP*) existente entre linhas de *raster*, representados na Figura 2.5.

2.1.3 Extrusor

A resolução de impressão obtida no processo FDM depende de características do extrusor, tal como o diâmetro do bico extrusor, além de características do filamento, tais como a viscosidade e fluxo (KARAKURT; LIN, 2020). A tecnologia FDM permite a substituição manual dos bicos empregados no extrusor (VOLPATO, 2007).

Existem dois tipos principais de extrusores empregados no processo FDM. São estes, extrusor direto e extrusor *bowden*, como representados na Figura 2.6(a) e Figura 2.6(b), respectivamente (TLEGENOV; HONG; LU, 2018). Os dois extrusores possuem semelhanças em diversos elementos, representados na Figura 2.6 e nomeados na Tabela 1.

A maior das diferenças entre os extrusores de tipo *bowden* e extrusores de tipo direto está no posicionamento do bloco de acionamento do motor em relação ao aquecedor de liquefação. O motor do extrusor de tipo direto é acoplado ao aquecedor de liquefação, conforme Figura 2.6(a), enquanto o motor do extrusor *bowden* é colocado longe do aquecedor de liquefação, conforme Figura 2.6(b). Em ambos os tipos de extrusores o aquecedor de liquefação é conectado a parte superior da barra de montagem.

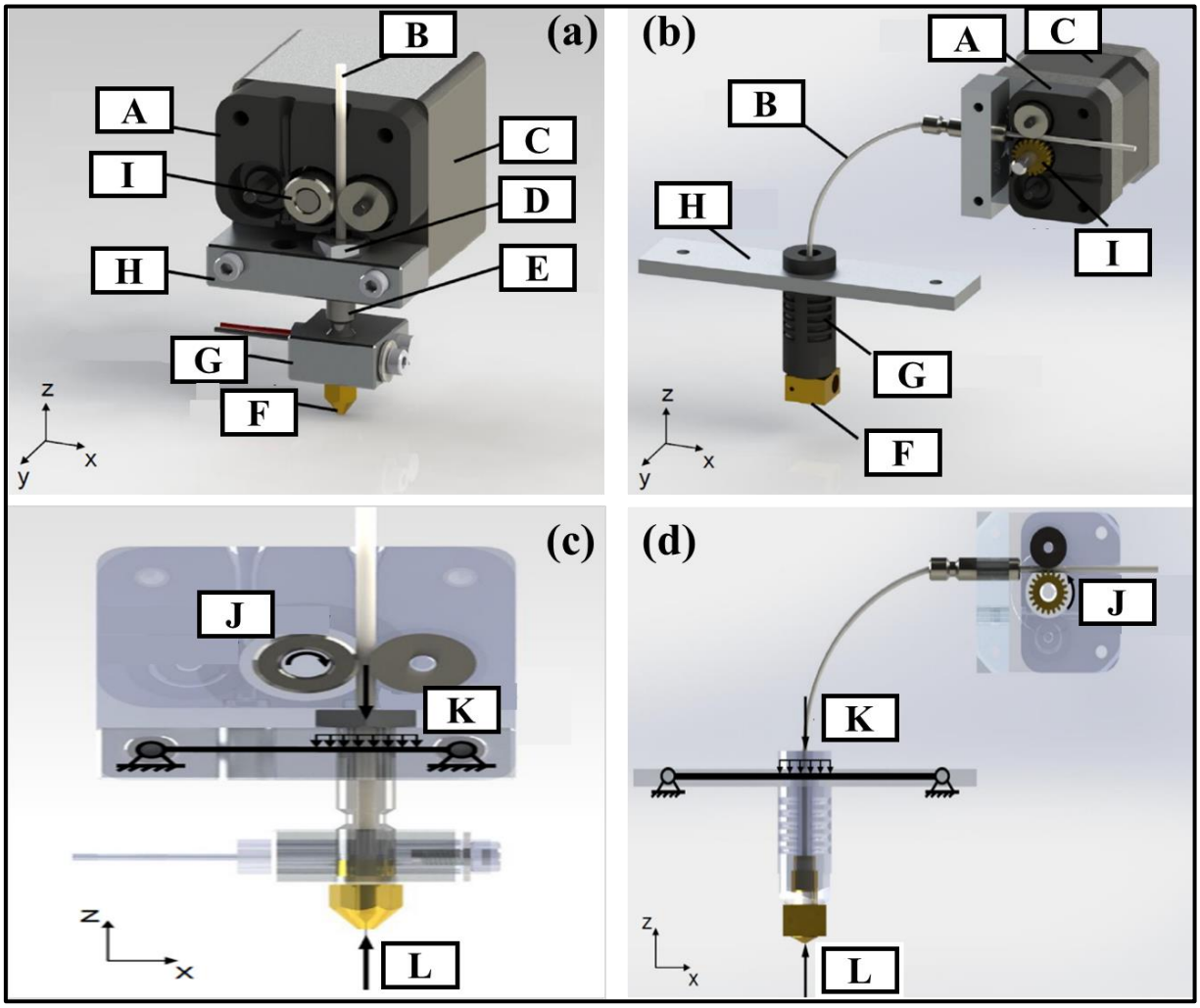
O sistema de forças aplicadas atuantes no extrusor durante o processo FDM consiste, conforme Figura 2.6(c) e Figura 2.6(d), em força de alimentação e força de contrapressão. A força de alimentação é função do torque do motor, parâmetros da engrenagem de acionamento, propriedades do filamento, e a distância entre os pontos onde o filamento é alimentado e onde este entra no aquecedor de liquefação. A força de contrapressão é uma função da queda de pressão existente dentro do aquecedor de liquefação e do bico extrusor (TLEGENOV; HONG; LU, 2018).

Tabela 1: Componentes dos extrusores de tipo normal e *bowden*

Letra	Elemento	Letra	Elemento
A	Bloco de acionamento	G	Aquecedor de liquefação
B	Filamento	H	Barra de montagem
C	Motor de passo	I	Engrenagem de acionamento
D	Porca	J	Velocidade angular de alimentação
E	Tubo térmico	K	Força de alimentação
F	Bico extrusor	L	Força de contrapressão

Fonte: Adaptado de (TLEGENOV; HONG; LU, 2018)

Figura 2.6 – Tipos de extrusores, partes e funcionamento. (a) Extrusor direto, (b) Extrusor *Bowden*, (c) Funcionamento do extrusor direto, (d) Funcionamento do extrusor *bowden*



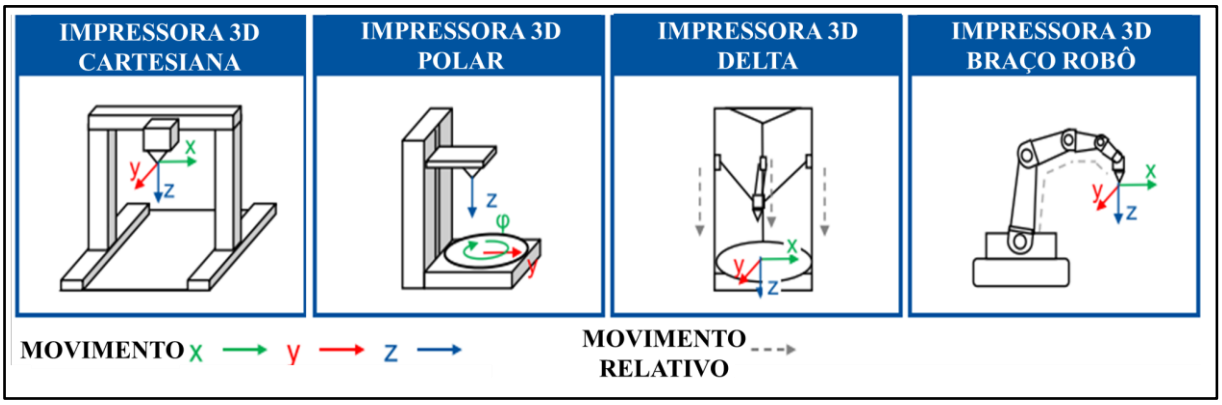
Fonte: Adaptado de (TLEGENOV; HONG; LU, 2018)

2.1.4 Impressora

Dentre as impressoras utilizadas no processo FDM para aplicações domésticas e de prototipagem rápida de pequeno porte, uma grande parte são derivadas do projeto RepRap® (VOLPATO, 2017). O projeto RepRap® é uma iniciativa que objetiva o desenvolvimento de impressoras 3D acessíveis, por meio de um conceito de prototipagem rápida replicadora (RepRap) (AZEVEDO, 2013). Desta maneira, todos os desenhos-de-produto de impressoras disponibilizadas por este projeto são públicos e distribuídos sob licenças de tipo GNU GPL (Licença Pública Geral GNU) (KOSTAKIS; PAPACHRISTOU, 2014).

Existem diferentes modelos de impressoras 3D, que se diferem basicamente em como ocorre a movimentação dos eixos X, Y e Z, e qual o movimento relativo observável durante a impressão (KAMPKER *et al.*, 2019; VOLPATO, 2017). Na Figura 2.7 estão representadas os modelos mais comuns de impressoras 3D (KAMPKER *et al.*, 2019).

Figura 2.7 – Modelos comuns de impressoras 3D



Fonte: Adaptado de (KAMPKER *et al.*, 2019)

Atualmente, diferentes fabricantes, nacionais e internacionais, desenvolvem modelos comerciais a partir destes 4 modelos base de impressoras 3D (VOLPATO, 2017). Observa-se, por exemplo, a existência de modelos derivados da impressora 3D cartesiana onde o extrusor desloca-se ao longo do eixo X, a mesa de impressão desloca-se ao longo do eixo Y, e o extrusor desloca-se ao longo do eixo Z para permitir a impressão de múltiplas camadas (KAMPKER *et al.*, 2019). Exemplos de impressoras 3D delta encontram-se nos trabalho desenvolvido por (LI *et al.*, 2021) e por (PETSIUK; PEARCE, 2020). O estudo desenvolvido por (ZI *et al.*, 2019) propõe um novo tipo de impressora 3D similar a delta, onde o alcance de impressão no processo FDM seria bem superior as tradicionais impressoras 3D.

Impressoras 3D cartesianas empregam, em suma, quatro motores de passo (AL FARUQUE *et al.*, 2016; LU; KUMARAVELU; OKWUDIRE, 2019). Três dos motores são utilizados na composição dos movimentos dos eixos X, Y e Z, de forma a obter-se o movimento relativo de impressão desejado (AL FARUQUE *et al.*, 2016). O quarto motor é utilizado para extrudar o filamento enquanto decorre-se o processo de impressão (AL FARUQUE *et al.*, 2016). Em relação ao código G desenvolvido, os motores de passo conectados a estrutura da impressora produzem sons específicos relativos a movimentação de cada eixo (AL FARUQUE *et al.*, 2016).

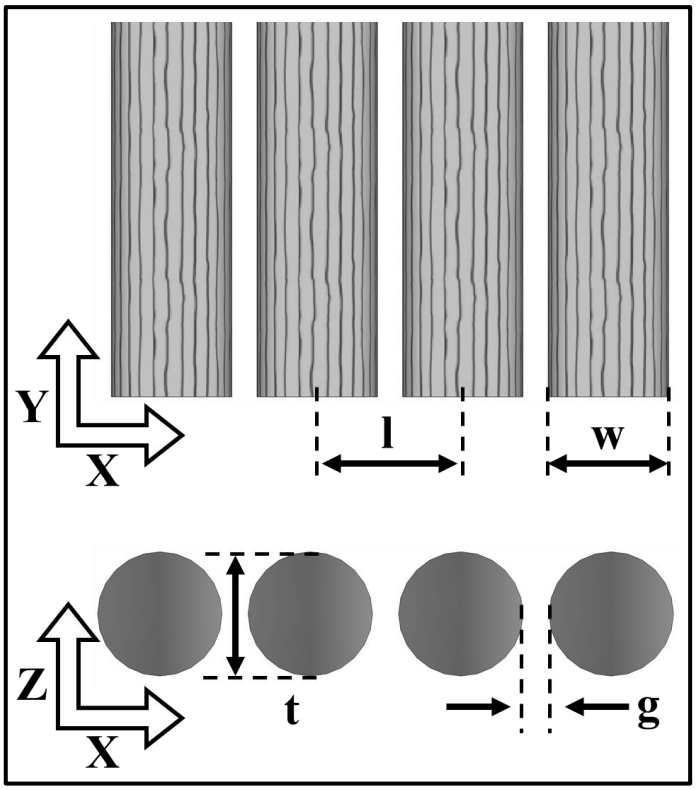
Os motores de passo são conhecidas fontes acústicas de ruídos (VIJAYRAGHAVAN; KRISHNAN, 1998). Encontram-se artigos que buscam relacionar especificamente a carga desenvolvida por cada motor de passo com as fontes acústicas geradas pela impressora 3D (AL FARUQUE *et al.*, 2016). Porém, prever os níveis vibratórios e acústicos de determinada máquina requer que sejam desenvolvidos modelos fenomenológicos de fontes vibratórias e acústicas, incluindo modelos detalhados de elementos destas máquinas, tal como ventiladores e elementos de transmissão mecânica (CHENG *et al.*, 2019). E ainda que as fontes vibratórias e

acústicas sejam propriamente modeladas, os caminhos de transmissão compreendem junções que são muito simplificadas nestes modelos (CHENG *et al.*, 2019). Além do fato de que, a alteração de somente uma característica de impressão, tal como a característica multiplicador de filamento, resulta na alteração do comportamento de um ou mais motores de passo na fabricação de uma mesma peça, tal como visto no estudo realizado por (CARMO *et al.*, 2020).

2.1.5 Filamento

O filamento empregado no processo FDM pode ser virgem, isto é, que foi produzido originalmente para o fim de impressão 3D, ou de origem em reciclagem de materiais (ZHAO *et al.*, 2018). O trabalho desenvolvido por (ZHAO *et al.*, 2018) encontrou que o PLA pode ser reciclado e reutilizado duas vezes no processo FDM; sendo que, a partir disto, deteriorações de viscosidade no material que podem influenciar negativamente na qualidade final da peça impressa foram notadas. O efeito do envelhecimento nas propriedades mecânicas de peças fabricadas por ABS foi o foco do estudo desenvolvido por (POPESCU *et al.*, 2020).

Figura 2.8 – Representações de camada única de filamento extrudado com os parâmetros indicados: largura do filamento (w), espessura da camada (t), *gap* (g) e distância (l) entre filamentos



Fonte: Autor

Durante o processo de fabricação, a largura do filamento extrudado e depositado sob a mesa ou sob camada anterior é influenciada pelo fenômeno de inchamento, conhecido nos

processos de extrusão de polímeros (VOLPATO, 2017). Resultando em valores 1,2 a 1,5 vezes menores que o diâmetro do bico extrusor empregado (AGARWALA *et al.*, 1996). Segundo Volpato (2017, p.157), “Isso ocorre em virtude da reologia do material com a liberação da energia elástica armazenada na sua estrutura ao deixar o bico extrusor.”.

Dentre os parâmetros relacionados ao filamento depositado durante a fabricação, os tidos como principais são: largura do filamento (w), espessura da camada (t), distância (l) e *gap* (g) entre filamentos (VOLPATO, 2017). Duas representações visuais de camada única podem ser verificadas na Figura 2.8, onde estão indicados estes parâmetros nos planos XY e XZ.

2.2 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA MANUFATURA

2.2.1 Monitoramento dos processos de manufatura aditiva

O monitoramento de processos de manufatura aditiva (MA) tem sido o tema de diferentes trabalhos acadêmicos. Um dos trabalhos que estudou o monitoramento de processos de MA foi o desenvolvido por (HIRSCH *et al.*, 2017), no qual a capacidade de análise não destrutiva *in-situ* de dois processos de MA por laser foram avaliadas. O trabalho desenvolvido por (YUAN *et al.*, 2018) estudou o monitoramento do processo de MA denominado *laser powder bed fusion*, por meio de técnicas de aprendizado de máquina em dados visuais adquiridos *in-situ*. Uma revisão acerca da utilização de técnicas de aprendizagem de máquina no monitoramento de processos de MA foi desenvolvida por (WANG *et al.*, 2020).

A viabilização de utilização de assinaturas acústicas no monitoramento de processos de MA foram o foco do estudo desenvolvido por (KOESTER *et al.*, 2018). A emissão acústica foi também empregada no estudo desenvolvido por (STRANTZA *et al.*, 2017), que visava a detecção de rachaduras no monitoramento de processo de MA. O uso de técnicas de inteligência artificial, aliadas ao processamento de dados de emissão acústica adquiridos durante o monitoramento de processos de MA foi o foco do trabalho desenvolvido por (WASMER *et al.*, 2017).

O monitoramento de processos de MA pode ainda se estender a determinadas variáveis do processo. Como no estudo desenvolvido por (ZHANG *et al.*, 2018), em que diferentes variáveis do processo MA denominado *power-bed fusion* foram estudadas a fim de avaliar a viabilidade do monitoramento *in-situ*.

2.2.1.1 Monitoramento do processo FDM

O monitoramento *in-situ* de processos FDM pode, com sucesso, ser alcançado por meio do processamento de dados visuais adquiridos durante o processo. O monitoramento do processo FDM a partir de dados visuais foi o tema do trabalho desenvolvido por (SALUJA; XIE; FAYAZBAKHSH, 2020). O vídeo adquirido *in-situ* durante o processo FDM foi utilizado

por (LIU *et al.*, 2019) no estudo visando o desenvolvimento de um método de controle em malha fechada baseado nas imagens adquiridas de peças em impressão. A imagem em vídeo adquirida durante o processo FDM foi também empregada por (BAUMANN; ROLLER, 2016) no estudo da detecção de erros de impressão *in-situ*. O processo FDM com impressora de tipo delta foi monitorado no trabalho desenvolvido por (PETSIUK; PEARCE, 2020) por meio de dados visuais captados por uma câmera alocada próximo a região de impressão.

O monitoramento *in-situ* durante processos FDM pode ainda ser alcançado por meio da utilização de técnicas de processamento digital de dados adquiridos indiretamente por meio de sensores. No trabalho desenvolvido por (TLEGENOV; HONG; LU, 2018), o monitoramento do processo FDM foi estudado a partir do processamento de dados de vibração adquiridos do extrusor. Dados de aceleração adquiridos do extrusor durante a fabricação pelo processo FDM foram empregados no estudo desenvolvido por (KIM *et al.*, 2018). Uma abordagem empregando diferentes sensores no monitoramento do processo FDM foi o foco do trabalho desenvolvido por (BAUMANN *et al.*, 2016). No trabalho desenvolvido por (BHAVSAR *et al.*, 2020), a fabricação da primeira camada do processo FDM foi monitorada por meio de dados vibroacústicos adquiridos por sensor PVDF (*piezoelectric polyvinylidene difluoride*). O estudo desenvolvido por (NORTHCUTT *et al.*, 2018) utilizou um espectrômetro no monitoramento *in-situ* dos efeitos de diferentes parâmetros do processo na dinâmica de cristalização das peças construídas pelo processo FDM. No trabalho desenvolvido por (LI *et al.*, 2021), o processo FDM em uma impressora de tipo delta foi monitorado a partir do uso de um acelerômetro medindo a diferença de altitude do extrusor nos eixos X, Y e Z.

Em alguns trabalhos acadêmicos, sensores de EA têm sido empregados no monitoramento *in-situ* do processo FDM. Partes das emissões acústicas observadas no processo FDM são geradas pela potência no reator do motor de passo e ondulações de torque (YU *et al.*, 2020). No trabalho desenvolvido por (KIM *et al.*, 2018), o processo FDM foi estudado a partir do processamento de dados de EA e de vibração, aliado a um algoritmo de máquina de vetores de suporte (SVM). O trabalho desenvolvido por (LIU *et al.*, 2018) empregou o sensor EA acoplado ao extrusor para o monitoramento e diagnóstico do processo FDM. Outro trabalho que empregou o sensor EA acoplado ao extrusor com fins de monitoramento do processo FDM foi o desenvolvido por (WU; YU; WANG, 2017). O sensor EA pode ainda estar alocado na mesa de impressão, como visto no trabalho desenvolvido por (WU; YU; WANG, 2016), que utilizou esta estratégia no monitoramento do processo FDM.

O monitoramento do processo FDM pode ainda se estender a determinadas variáveis do processo. No estudo desenvolvido por (LU; WANG, 2018), uma metodologia de custo reduzido para o sensoriamento das temperaturas envolvidas no processo FDM foi proposta e estudada. A transferência de calor na mesa de impressão foi o foco do estudo desenvolvido por (RAVOORI *et al.*, 2019a). O efeito do aquecimento causado pelo extrusor em camadas de filamento previamente extrudadas foi estudado por (RAVOORI *et al.*, 2019b). O estudo desenvolvido por (BÄHR; WESTKÄMPER, 2018) avaliou a influência de determinadas características de impressão na qualidade das partes impressas pelo processo FDM. Um estudo visando a otimização das características de impressão a serem definidas na etapa de fatiamento do processo FDM foi desenvolvido por (PAPON; HAQUE; MULANI, 2019). O trabalho desenvolvido por (ERTAY; YUEN; ALTINTAS, 2018) verificou as diferenças obtidas em peças fabricadas pelo processo FDM com taxas de extrusão constantes e sincronizadas. Os efeitos das características de impressão velocidade de extrusão e velocidade de impressão na qualidade de peças impressas pelo processo FDM foram estudados no trabalho desenvolvido por (GENG *et al.*, 2019).

Em relação ao monitoramento focado no extrusor, o controle de fluxo de filamento foi estudado por (GREEFF; SCHILLING, 2017). O estudo desenvolvido por (HELLER; SMITH; JACK, 2016) também visava investigar o fluxo de filamento no processo FDM, por meio do método dos elementos finitos. No estudo desenvolvido por (LUO *et al.*, 2020) os efeitos das taxas de extrusão nos perfis de temperatura e forças de extrusão foram observados em peças impressas em ABS no processo FDM. A temperatura do filamento em fluxo e a pressão observadas durante o processo FDM foram as características escolhidas no estudo desenvolvido para monitoramento *in-situ* por (ANDEREGG *et al.*, 2019). O efeito da variação da característica de impressão multiplicador de filamento nos parâmetros fundamentais de camada foi estudado no trabalho desenvolvido por (CARMO *et al.*, 2020). O efeito de diferentes alterações de uma mesma característica de impressão na regularidade dimensional de uma peça monocamada foi estudado no trabalho desenvolvido por (LOPES *et al.*, 2020).

O estudo desenvolvido por (ALIHEIDARI *et al.*, 2018) avaliou a adesão entre camadas e resistência a fraturas de peças impressas em filamento termoplástico. O efeito da aplicação de aditivos em filamentos termoplásticos previamente a impressão 3D foi o foco do estudo desenvolvido por (TORRADO *et al.*, 2015). No trabalho desenvolvido por (SHIH *et al.*, 2019), os efeitos de um tratamento de plasma frio no incremento da força da junção entre camadas depositadas no processo FDM foi avaliado. As propriedades mecânicas de peças impressas com estratégia de preenchimento colmeia foram modeladas e experimentalmente avaliadas no trabalho desenvolvido por (PANDA *et al.*, 2018). O estudo desenvolvido por (LIU *et al.*, 2020)

avaliou o efeito da troca de matérias primas durante o processo FDM na resistência resultante da peça impressa. O efeito das características de impressão definidas durante o fatiamento na força de desgaste de peças impressas com PLA de fibra de carbono foi o foco do trabalho desenvolvido por (SRINIVASAN *et al.*, 2020a). Uma comparação dos comportamentos de peças fabricadas com diferentes matérias primas (ABS e PLA com fibra de carbono), em diferentes AP foi o foco do estudo desenvolvido por (SRINIVASAN *et al.*, 2020c).

2.2.1.2 Detecção e classificação de anomalias em processos de MA

A identificação e classificação de anomalias em processos de manufatura aditiva (MA) podem ser realizadas em dois momentos. Inicialmente, com a utilização combinada do monitoramento indireto do processo de fabricação, obtendo dados do processo *in-situ*, e posterior processamento digital de tais dados, conforme utilizado por (WU; YU; WANG, 2016) em seus estudo do processo FDM, e por (WASMER *et al.*, 2017) em seu estudo do processo de manufatura por fundição seletiva a laser. Em um segundo momento, com a finalização da fabricação, pode-se estudar características dos objetos obtidos, conforme abordado por (DIZON *et al.*, 2018) em seu estudo das propriedades obtidas em objetos confeccionados por diferentes técnicas de MA, por (TORRADO *et al.*, 2015) em seu estudo das propriedades mecânicas obtidas ao utilizar-se aditivos no filamento ABS empregado no processo FDM, e por (SANTANA *et al.*, 2018) em um estudo comparativo das propriedades térmicas, mecânicas e químicas de peças obtidas pelo processo FDM com filamento PETG e PLA.

Dentre todo o período de fabricação pelo processo FDM, o mais crítico para a detecção de anormalidades que podem indicar falhas é o de impressão da primeira camada (BHAVSAR *et al.*, 2020). Isto ocorre, pois, a primeira camada é o que fornece fundação para o objeto em confecção (WU; YU; WANG, 2016). Exemplos de fabricação de peças monocamada, isto é, que possuem apenas a primeira camada depositada, para o estudo de anormalidades, podem ser encontrados nos trabalhos desenvolvidos por (CARMO *et al.*, 2020), (LOPES *et al.*, 2020), (WU; YU; WANG, 2016), (WENDT *et al.*, 2016) e (WENDT *et al.*, 2017). A primeira camada têm sido ainda o foco de estudos sobre como a parametrização da impressão afeta a qualidade estrutural da peça obtida (WENDT *et al.*, 2017, 2016).

Visando identificar e classificar os diferentes modos de entupimento do extrusor durante o processo FDM, (TLEGENOV; HONG; LU, 2018) utilizaram um sensor de vibração acoplado em um extrusor direto e em um extrusor do tipo *Bowden*, coletando os dados de vibração durante o processo de impressão em diferentes materiais (ABS, PLA e SemiFlex) para posterior processamento digital. (KIM *et al.*, 2018) estudou a utilização de um algoritmo de

aprendizado de máquina em dados coletados de EA e de aceleração, objetivando a detecção e classificação de anomalias no processo de impressão 3D. Para treinar o algoritmo, análises estatísticas por base no RMS foram utilizadas em sinais oriundos de processos de impressão regulares e de processos em que falhas puderam ser observadas.

O extrusor foi o foco do estudo desenvolvido por (TLEGENOV; WONG; HONG, 2017), no monitoramento do processo FDM visando a detecção do fenômeno de entupimento. A detecção de anomalias do extrusor no monitoramento do processo FDM foi também o foco do estudo desenvolvido por (TLEGENOV; HONG; LU, 2018). A detecção do fenômeno de quebra de filamento foi o foco do trabalho desenvolvido por (YANG *et al.*, 2018), que empregou dados de EA adquiridos durante o monitoramento do processo FDM.

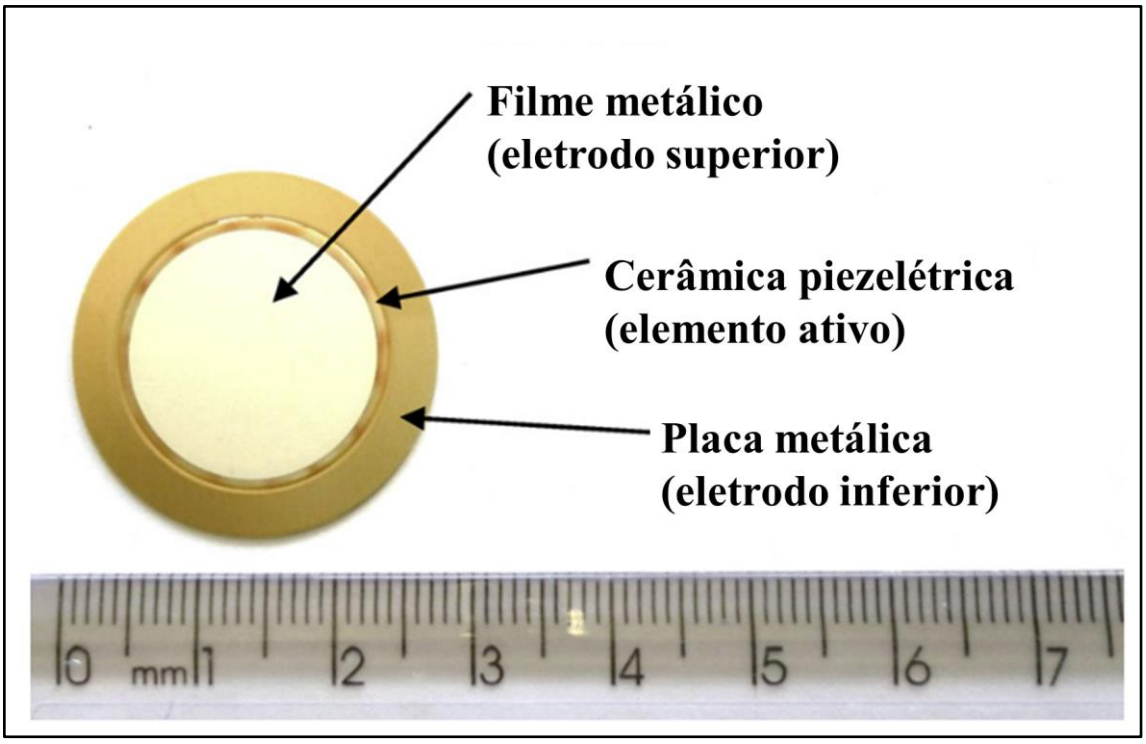
2.2.2 Transdutores piezelétricos

Os sensores de EA são transdutores de tipo ressonante (FERNANDEZ *et al.*, 2020), confeccionados em dispositivos que transformam o deslocamento dinâmico gerado por um estresse mecânico em sinais elétricos (VIERA *et al.*, 2020). Estes são geralmente constituídos por um elemento piezelétrico montado em uma armadura metálica, e são utilizados para diferentes aplicações de teste não destrutivos (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015).

Uma representação visual do diafragma piezelétrico (PZT) está representada na Figura 2.9. Diversos trabalhos utilizaram o PZT para diferentes aplicações em monitoramento por processamento digital de sinais. Por exemplo, este foi utilizado com sucesso por (ALEXANDRE *et al.*, 2019a) na modalidade sensor e atuador no estudo da remoção de material no processo de retificação. Foi também usado por (CHANG; CHIANG; LEE, 2008) como um elemento de fricção e vibração mecânica em um mecanismo de embreagem piezelétrico. Também foi usado por (LIANG; WANG, 2015) como elemento sensitivo em um design de sensor de pressão. E foi usado como sensor no estudo da queima no processo de retificação por (MARCHI *et al.*, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2017).

Como verificado no estudo realizado por (LOPES *et al.*, 2018a), a temperatura na qual o sensor EA está sob efeito afeta diretamente da resposta do sensor. Alguns estudos verificaram ainda que esta influência da resposta em virtude da temperatura também pode ser observada quando da utilização do PZT no monitoramento do processo FDM (LOPES *et al.*, 2019a, 2019b).

Figura 2.9 – Diafragma piezelétrico



Fonte: Adaptado de (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016)

2.2.3 Processamento de sinais

Sistemas em engenharia processam dados que são captadas no mundo real, por meio do uso de sensores, com o objetivo de se obter informações sobre o processo objeto de estudo. É possível associar, com pequena margem de erro, qualquer instante de tempo a uma informação relativa ao processo. A variação dessas informações conforme a passagem do tempo recebe a denominação de sinal. O processamento digital de sinais estuda como os sinais se relacionam e, principalmente, como manipular os sinais de forma a se obter um resultado desejado (NALON; 2014).

Os sinais podem ser estudados no domínio do tempo, onde cada informação, representada normalmente em valores de amplitude, recebe associação a um instante de tempo (KISHAWY *et al.*, 2018); ou no domínio da frequência, onde a partir da transformada de Fourier, cada frequência do sinal pode ser avaliada, normalmente em valores de amplitude (LOPES *et al.*, 2017).

O estudo visando o monitoramento de processos de fabricação por meio de sinais no domínio do tempo pode, em certos casos, determinar específicos períodos dentro do processo em estudo nos quais a análise por meio de ferramentas estatísticas será conduzida. Essa seleção de períodos de interesse pode ser empregada no momento da aquisição de dados, tal como nos estudos desenvolvidos por (LIU *et al.*, 2018; WU; YU; WANG, 2016), ou por meio da técnica

denominada truncamento de sinal, como utilizada nos estudos desenvolvidos por (ALEXANDRE *et al.*, 2019a, 2019b).

Nos estudos desenvolvidos por (WU; YU; WANG, 2016) e por (LIU *et al.*, 2018), um critério de amplitude foi determinado no sistema de aquisição de dados, de forma a que somente seriam adquiridas as partes do sinal que superassem e estivessem próximas do ponto onde o critério de amplitude tivesse sido atendido. Desta maneira, outras partes do sinal não seriam adquiridas, e por esta razão, não seriam consideradas para o estudo visando o monitoramento do processo em questão. O truncamento de sinal empregado nos estudos desenvolvidos por (ALEXANDRE *et al.*, 2019b) e por (ALEXANDRE *et al.*, 2019a) foi realizado entre instantes do sinal considerados de interesse para os objetivos dos estudos em questão. Desta maneira, outras partes do sinal que não contém informação de interesse seriam desconsideradas.

O estudo de determinados fenômenos em sinais torna-se mais simples de ser realizado no domínio da frequência. Como visto no trabalho desenvolvido por (ALEXANDRE *et al.*, 2019b), no qual por meio de análises no domínio da frequência, tornou-se possível encontrar bandas de frequência em que os valores de amplitude expressos estavam relacionados a remoção de material em peças metálicas. No estudo desenvolvido por (LOPES *et al.*, 2018a), o processamento realizado no sinal de PLB no domínio da frequência permitiu que por meio do índice desvio do valor médio quadrático (RMSD), a influência da temperatura da resposta do sensor EA em diferentes bandas de frequência pudesse ser avaliada. Outro exemplo é encontrado no trabalho desenvolvido por (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015), no qual por meio da utilização dos índices RMSD e métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM) em espectros de frequência de sinais adquiridos pelo método PLB, tornou-se possível detectar e quantificar danos em chapas metálicas.

2.2.3.1 Valor Médio Quadrático (RMS) e Contagem de Cruzamentos de Limiar (Counts)

O sinal no domínio do tempo pode ser estudado empregando diferentes ferramentas estatísticas, tais como o RMS (ALEXANDRE *et al.*, 2019a) e a Counts (GLISSOI LOPES *et al.*, 2019).

O RMS de um dado sinal pode ser utilizado no estudo de diferentes fenômenos. No trabalho desenvolvido por (ALEXANDRE *et al.*, 2019b), a análise empregando o RMS de um sinal filtrado a uma banda específica de frequência possibilitou levantar indiretamente a quantidade de material removido em um processo de retificação realizado a diferentes profundidades de corte. O estudo conduzido por (AGUIAR *et al.*, 2006), empregando diferentes estatísticas no processamento de sinais adquiridos durante o processo de retificação, demonstrou que o

RMS pode ser utilizado no monitoramento que vise a detecção do fenômeno de queima em peças de aço ABNT 1045. O RMS foi utilizado por (LUCAS *et al.*, 2019) no processamento digital de sinais que tinha por objetivo validar a utilização de um PZT na estimação de carga em um motor de indução trifásico (TIM). Com o objetivo de determinar os diferentes modos de ranhuramento em peças cerâmicas por meio do monitoramento indireto empregando diferentes estatísticas no processamento digital de sinais, (GIRIDHAR; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 2012) alcançou sucesso empregando o RMS junto de outras estatísticas, como o Counts.

O RMS de dado sinal a qualquer instante de tempo "t" pode ser expresso conforme Equação 2.1:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N} x^2(i)} \quad (2.1)$$

onde x é o sinal bruto, e N o número de amostras discretas (i) consideradas para o cálculo (ALEXANDRE *et al.*, 2019c).

A utilização da técnica RMS em análises no domínio do tempo requer a definição de parâmetros como o tempo de integração (*Ti*), que pode variar conforme o processo estudado (JEMIELNIAK, 2001; KIM *et al.*, 2001; WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996). Um estudo aprofundado do *Ti* a ser utilizado no cálculo RMS de sinais adquiridos de processos de retificação foi realizado por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996). O estudo foi conduzido em sinais de EA obtidos em processos de retificação interna e externa, encontrando que o ideal para estes processos é o *Ti* de 1 ms, e que caso utilizada um *Ti* superior a este valor, características importantes do sinal seriam comprometidas para análises.

O *Ti* de 1 ms, encontrado como o ideal para o cálculo do RMS de sinais de EA adquiridos do processo de retificação (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996), tem sido também empregado em estudos que visam monitorar o processo de retificação com o cálculo o RMS em sinais adquiridos pelo PZT (ALEXANDRE *et al.*, 2019b; AULESTIA VIERA *et al.*, 2019; RIBEIRO *et al.*, 2017).

Para um sinal adquirido por sensor EA no processo de corte de metal, (JEMIELNIAK, 2001) encontrou que o *Ti* a ser utilizada no cálculo do RMS não pode superar 0,1 ms, caso as análises basearem-se nos fenômenos de "*bursts*" de emissão acústica. Um estudo da constante de tempo a ser utilizada no cálculo do RMS em sinais obtidos por sensor EA no processo de retificação sem centro foi realizada por (KIM *et al.*, 2001), encontrando que um valor de 10 ms para o *Ti* é curta o bastante para permitir a análise.

No trabalho desenvolvido por (WANG; LIU, 2017), utilizou-se a estatística RMS para explorar a relação entre o sinal adquirido pelo sensor EA com a formação de cavacos e o consumo de energia de corte em usinagem de alta velocidade da liga de alumínio 7050-T7451 e da superliga Inconel 718. A constante de tempo utilizada para obter o RMS do sinal adquirido pelo sensor EA foi de 12 ms. No ensaio, o contato múltiplo da ferramenta ocorreu quando a velocidade de corte era superior a 2000 m/min, isso é, a duração de corte único para uma pastilha era superior a 12 ms. Sendo assim, a adoção desse valor para a constante de tempo foi justificada devido as restrições de hardware do conversor RMS usado na pesquisa.

Ademais, no trabalho elaborado por (PILNÝ *et al.*, 2016), a estatística RMS foi utilizada no monitoramento da superfície gerada por um robô de polimento, utilizando sinais de EA. A constante de tempo utilizada para a análise de RMS escolhida foi de 500 ms. O valor adotado deve-se ao fato de que, para a detecção do ponto final do processo de polimento, a perda de algumas informações não é crucial, uma vez que é considerado suficiente meramente a mudança relativa na energia do sinal EA ao longo de um determinado tempo de polimento.

Outrossim, na pesquisa realizada por (XIE *et al.*, 2020), o RMS foi empregado para o monitoramento do processo de remoção de ferrugem à laser a partir de sinais adquiridos por sensor EA. Neste estudo, o *Ti* utilizado no cálculo do RMS foi de 500 ms.

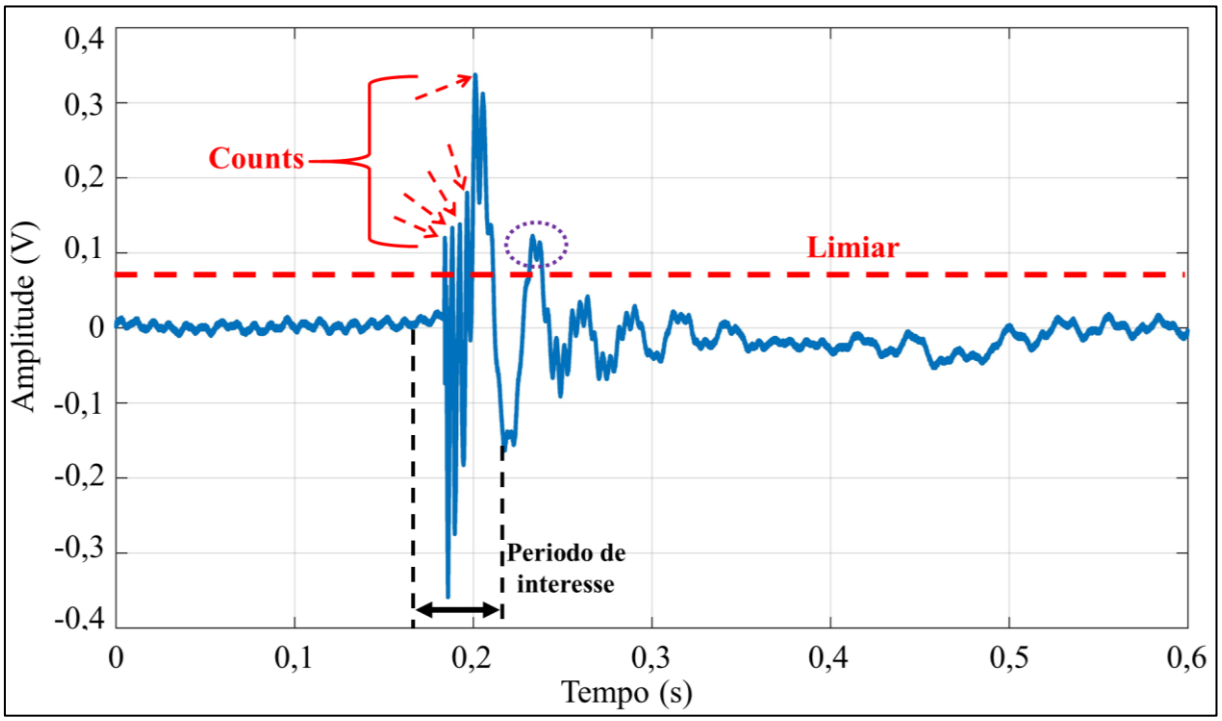
Diante dos trabalhos expostos, é possível notar a grande variação entre os valores de *Ti* aplicados no cálculo da estatística RMS. Não tendo sido encontrado pelo autor na literatura até o momento um estudo aprofundado sobre o *Ti* a ser utilizado no cálculo da estatística RMS para o estudo de sinais adquiridos do processo FDM.

Para o monitoramento do processo FDM, alguns trabalhos têm utilizado o Counts e o RMS como dado de entrada em análises que visem a detecção e classificação de anomalias e falhas. No trabalho desenvolvido por (KIM *et al.*, 2018), o RMS calculado sob os sinais obtidos de sensores de EA e de vibração durante o processo FDM foram utilizados como dados de entrada para um algoritmo de aprendizado de máquina que visava a detecção de falhas. O RMS foi empregado junto do Counts como dois dos dados de entrada no trabalho desenvolvido por (LIU *et al.*, 2018), no qual por meio do método de clusterização CFSFDP, diferentes modos de falhas do processo FDM puderam ser detectadas e classificadas. Visando a detecção e classificação de diferentes modos de falhas do processo FDM, (WU; YU; WANG, 2016) também utilizaram o Counts junto do RMS como dois dos dados de entrada de um algoritmo de clusterização K-Means. A detecção e classificação de diferentes modos de falhas do processo FDM também foi o foco do trabalho desenvolvido por (WU; YU; WANG, 2017), no qual o RMS foi

utilizado junto do Counts como dois dos dados de entrada para uma modelo oculto semi-Markov (HSMM).

A estatística Counts é descrita por (LOPES *et al.*, 2017) como o número de vezes em que um sinal cruza um determinado limiar por unidade de tempo, e tem sido empregada em estudos científicos para diferentes fins. A Figura 2.10 apresenta um exemplo de um sinal no domínio do tempo, onde é possível verificar um determinado limiar em amplitude empregado no estudo do Counts, a representação dos Counts observados, e o período de interesse que será considerado no estudo do sinal por meio de ferramentas estatísticas.

Figura 2.10 – Um exemplo de sinal EA com algumas características



Fonte: Autor

O Counts tem sido utilizado em aplicações tais como o estudo da remoção de material em processo de retificação (ALEXANDRE *et al.*, 2019b), o estudo da detecção de falhas no processo FDM (LIU *et al.*, 2018), e o estudo da condição da ferramenta empregada no processo de dressagem (DADDONA *et al.*, 2018). É importante ressaltar que, caso seja definido um período de interesse para estudo no sinal, outros pontos do sinal fora do período de interesse não serão levados em consideração ao calcular a estatística, tal como visto na região circular roxa visível na Figura 2.10. Região esta que possui pontos onde os critérios da estatística Counts são atendidos, porém, por estar situada em uma parte do sinal fora do período de interesse, delimitado na Figura 2.10 pelas linhas pontilhadas, os Counts observados não seriam contabilizados no estudo.

2.2.3.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Razão de Potência (ROP)

A obtenção do espectro de frequência de determinado sinal pode ser conduzida por meio da transformada rápida de Fourier (FFT). A FFT é uma ferramenta computacional que facilita a análise de sinais, como a análise do espectro de potência e a simulação de filtros digitais. É um algoritmo eficiente para computar a transformada discreta de Fourier (DFT) de uma série de amostras de dados. A versão mais popular do algoritmo é a Radix-2.

As maiores vantagens do algoritmo da FFT são a redução no poder computacional e tempo necessários para a obtenção da DFT. A ideia principal do algoritmo FFT é decompor uma DFT de N pontos em transformações de menor tamanho. No entanto, o algoritmo requer um número de amostras múltiplo de 2^n do bloco de dados que está sendo analisado. Por exemplo, se for obtido um algoritmo hipotético que possa decompor uma DFT de 1024 pontos em duas DFTs de 512 pontos, pode-se reduzir o número de multiplicações reais de 4.194.304 para 2.097.152. Esta é uma melhoria por um fator de dois (LYONS, 2011).

Em muitas aplicações, o cálculo da DFT é implementado com a utilização de uma janela propriamente selecionada visando suprimir a interferência causada por componentes em frequência indesejados (CANDAN, 2015), melhorando assim a caracterização espectral de determinado sinal. Um janelamento *Hanning* foi aplicado por (ALEXANDRE *et al.*, 2018) ao calcular o espectro de frequência por meio da FFT, visando a correta caracterização espectral de diferentes sinais adquiridos do processo de dressagem. Outro exemplo da utilização do janelamento *Hanning* ao calcular o espectro de frequência por meio da FFT é encontrado no trabalho desenvolvido por (RIBEIRO *et al.*, 2017), no qual a correta caracterização espectral dos sinais adquiridos no processo de retificação tornou possível a identificação de bandas de frequência em que os valores de amplitude expressos estariam mais relacionadas ao fenômeno de queima detectado nas peças.

Um sinal adquirido de determinado processo pode representar a existência de mais de um determinado período de dados, como nos sinais de retificação adquirido por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996), que continham dados antecedentes, durante e posteriores a passagem do rebolo pela peça metálica. Os espectros de frequência de um mesmo sinal podem apresentar valores distintos em amplitude quando são escolhidos determinados períodos de dados para o cálculo da FFT, como demonstrado nos resultados adquiridos por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996).

Uma estatística utilizada no estudo de sinais no domínio da frequência é a denominada razão de potência (ROP) (AGUIAR *et al.*, 2004). A ROP foi empregada no estudo desenvolvido por (ALEXANDRE *et al.*, 2017) no monitoramento visando a detecção do fenômeno de *chatter*

no processo de retificação de peças de aço SAE 1045. O estudo desenvolvido por (AGUIAR *et al.*, 2004) empregou a ROP em comparação a outras estatísticas aplicadas no domínio do tempo e no domínio da frequência, visando verificar a mais adequada para a detecção do fenômeno de queima no monitoramento do processo de retificação. Outro estudo que empregou a ROP de maneira comparativa a outras estatísticas com o objetivo de verificar a mais adequada para a detecção do fenômeno de queima no processo de retificação foi o desenvolvido por (AGUIAR *et al.*, 2006). A ROP é descrita por (MARTINS *et al.*, 2014) e utilizada por (ALEXANDRE *et al.*, 2017) conforme Equação 2.2:

$$ROP = \frac{\sum_{k=n1}^{n2} |X_k|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2} \quad (2.2)$$

onde N é o tamanho do bloco do sinal amostrado durante o processo em análise, $n1$ e $n2$ correspondem a banda de frequências a ser analisada e $\mathbf{X_k}$ a k_{th} DFT de saída.

2.2.3.3 Desvio do RMS (RMSD) e Métrica do desvio do coeficiente de correlação (CCDM)

O processamento de sinais no domínio da frequência pode ainda empregar os denominados índices de dano RMSD e CCDM (RIBEIRO *et al.*, 2017). Estes índices são largamente empregados em processamentos que visam o monitoramento da integridade estrutural (BAPTISTA *et al.*, 2014; DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015).

No entanto, podem ser encontrados trabalhos que empregam determinado índice de dano, tal como o RMSD, no processamento digital de sinais para outros fins. Tal como no trabalho desenvolvido por (LOPES *et al.*, 2018a), em que o RMSD foi utilizado para verificar a influência da temperatura da resposta do sensor EA, e o trabalho desenvolvido por (RIBEIRO *et al.*, 2017), que empregou o RMSD e o CCDM na análise visando a detecção do fenômeno de queima no processo de retificação.

O índice RMSD é baseado na norma Euclidiana (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015), e é descrito por (LOPES *et al.*, 2018a) e por (RIBEIRO *et al.*, 2017) conforme Equação 2.3:

$$RMSD = \sum_{K=\omega_i}^{\omega_f} \sqrt{\frac{[X_d(k) - X_h(k)]^2}{X_h{}^2(k)}} \quad (2.3)$$

onde $\mathbf{X_h}$ é o espectro do sinal obtido quando o processo estava sob condição de referência, $\mathbf{X_d}$ é o espectro do sinal obtido quando processo estava sob condição de alteração em relação a referência, ω_i e ω_f correspondem a banda de frequências a ser analisada, e k representa as frequências na qual ambos os espectros foram analisados.

O índice CCDM, é baseado no coeficiente de correlação (RIBEIRO *et al.*, 2017), e é descrito por (BAPTISTA *et al.*, 2014) e por (RIBEIRO *et al.*, 2017) conforme Equação 2.4:

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{k=\omega i}^{\omega f}\left[X_h(k) - \overline{X}_h\right]\left[X_d(k) - \overline{X}_d\right]}{\sqrt{\sum_{k=\omega i}^{\omega f}\left[X_h(k) - \overline{X}_h\right]^2}\sqrt{\sum_{k=\omega i}^{\omega f}\left[X_d(k) - \overline{X}_d\right]^2}} \quad (2.4)$$

onde $\mathbf{X_h}$ é o espectro do sinal obtido quando o processo estava sob condição de referência, $\mathbf{X_d}$ é o espectro do sinal obtido quando processo estava sob condição de alteração em relação a referência, ω_i e ω_f correspondem a banda de frequências a ser analisada, *k* representa as frequências na qual ambos os sinais foram analisados, e $\bar{X}_h$ e $\bar{X}_d$ os valores médios de referência e de alteração em relação a referência, respectivamente, na mesma banda de frequência.

Os índices RMSD e CCDM apresentam diferentes comportamentos. O RMSD é mais sensível a variações de amplitude nos espectros dos sinais em estudo. Por outro lado, o índice CCDM é mais sensível a variações no comportamento dos sinais em estudo, tais como deslocamento em frequência (BAPTISTA *et al.*, 2014).

2.3 MÉTODO DA QUEBRA DO GRAFITE

O método PLB é um método padronizado e estabelecido como uma fonte artificial reproduzível de emissão acústica (SAUSE, 2011). O método PLB também é referenciado como fonte de Hsu-Nielsen, como apresentado no trabalho de (HSU; N., 1981). Neste método, utilizando uma lapiseira, o grafite é firmemente pressionado contra a superfície de interesse até que, com o acúmulo de estresse ocorra a quebra do grafite. No momento em que a quebra ocorre, o estresse acumulado é rapidamente liberado, o que causa movimentações microscópicas na superfície da estrutura e a consequente liberação de ondas acústicas que são propagadas por meio da estrutura analisada. Como este tipo de fonte artificial é de fácil reprodução em ambientes laboratoriais, assim como em testes de campo, a fonte artificial obtida pelo método PLB tornou-se um dos tipos mais comuns de fonte em testes de emissão acústica (SAUSE, 2011).

Dado que o manejo da lapiseira é facilmente repetido com precisão, verifica-se que os sinais obtidos pelo método PLB são de fácil reprodução. As características recomendadas, como o diâmetro e comprimento do grafite, dureza e ângulo de quebra, visando a obtenção de um teste reprodutível, foram padronizadas pela ASTM internacional (*American Society for Testing and Materials*), sob nº E976 (ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS), 2015).

O método PLB pode ser utilizado para estimar da resposta de sensores (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016). A utilização do método PLB na caracterização

da resposta de sensores de EA pode ser encontrada em diferentes trabalhos (LOPES *et al.*, 2018a; MARCHI *et al.*, 2015). A utilização do método PLB na avaliação da resposta PZT também é encontrada em diferentes trabalhos acadêmicos (DA SILVEIRA; CAMPEIRO; BAPTISTA, 2017; LOPES *et al.*, 2019a, 2019b; LUCAS *et al.*, 2019).

Este método foi empregado por (DA SILVEIRA; CAMPEIRO; BAPTISTA, 2017), no estudo da diferença de sensibilidade obtida por um transdutor piezelétrico em resposta a diferentes métodos de acoplamento. O efeito da temperatura da resposta do sensor EA foi estudado por (LOPES *et al.*, 2018a) por meio do método PLB em peças de aço aquecidas. Alguns estudos empregaram o método PLB para avaliar da resposta do PZT no monitoramento do processo FDM, quando sob a ação de valores de temperatura próximos aos utilizados durante a confecção de peças (LOPES *et al.*, 2019a, 2019b).

2.4 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO

O aplicativo *Classification Learner*, parte da *toolbox* de *machine learning and deep learning* do Matlab®, viabiliza a obtenção de modelos de classificação a partir de determinados métodos de classificação (MATHWORKS, 2019; YAN *et al.*, 2020). A utilização do aplicativo *Classification Learner* permite maior interatividade ao explorar um conjunto de dados para fins de classificação (BONAH *et al.*, 2020). Isto torna viável, e de forma facilitada, a seleção de recursos e esquemas de validação na classificação de dados (BONAH *et al.*, 2020).

O aplicativo *Classification Learner* possui diferentes tipos de métodos de classificação disponíveis. A Tabela 2 resume os métodos de classificação.

Dentre os métodos de classificação, os métodos de árvore geram modelos de fácil interpretação, são velozes para aplicações de predição e de aproximação, consomem pouca memória, mas também possuem baixa acurácia de predição (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos de classificação de árvore pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (KHAN *et al.*, 2020).

Os métodos de classificação de análise discriminante são populares dada a sua velocidade, precisão e facilidade de interpretação de resultados. Estes métodos são adequados para análises com grande volume de dados. A análise discriminante assume que diferentes classes geram dados com base em diferentes distribuições gaussianas. Para treinar um classificador, a função de ajuste estima os parâmetros de uma distribuição gaussiana para cada classe dados (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos de classificação de análise discriminante pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (LE *et al.*, 2020).

Tabela 2: Métodos de classificação disponíveis no aplicativo *Classification Learner*

Árvores de decisão (*Decision trees*)		
Árvore fina (*Fine tree*)	Árvore média (*Medium tree*)	Árvore grossa (*Coarse tree*)
Análise discriminante (Discriminant analysis)		
Discriminante linear (*Linear discriminant*)	Discriminante quadrático (*Quadratic discriminant*)	
Classificadores de regressão logística (*Logistic regression classifiers*)		
Regressão logística (*Logistic regression*)		
Classificadores de Naive Bayes (*Naive Bayes classifiers*)		
Gaussiana de Naive Bayes (*Naive Bayes Gaussian*)	Kernel de Naive Bayes (*Naive Bayes Kernel*)	
Máquinas de Vetores de Suporte (*Support vector machines*)		
SVM Linear (*Linear SVM*)	SVM Quadrático (*Quadratic SVM*)	SVM Cúbico (*Cubic SVM*)
SVM Gaussiana fina (*Fine Gaussian SVM*)	SVM Gaussiana Média (*Medium Gaussian SVM*)	SVM Gaussiana grossa (*Coarse Gaussian SVM*)
Classificadores de vizinho mais próximo (*Nearest neighbor classifiers*)		
KNN Fina (*Fine KNN*)	KNN Média (*Medium KNN*)	KNN Grossa (*Coarse KNN*)
KNN Cossenoide (*Cosine KNN*)	KNN Cúbico (*Cubic KNN*)	KNN Pesado (*Weighted KNN*)
Classificadores de conjunto (*Ensemble classifiers*)		
Árvores impulsionadas (*Boosted trees*)	Árvores ensacadas (*Bagged trees*)	Discriminante de subespaço (*Subspace discriminant*)
KNN de subespaço (*Subspace KNN*)	Árvores impulsionadas RUS (*RUSBoosted trees*)	

Fonte: Autor

Caso o objeto de classificação contenha duas classes, a regressão logística é um método de classificação simples e popular, dada a sua facilidade na interpretação de resultados. O classificador modela as probabilidades da classe como uma função da combinação linear de preditores (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos de classificação de regressão logística pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (SARAL; PRIYA, 2021).

Os classificadores Naive Bayes são fáceis de interpretar e úteis para classificação multiclasse. O algoritmo de Naive Bayes aproveita o teorema de Bayes e faz a suposição de que os preditores são condicionalmente independentes, dada a classe (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos de classificação de Naive Bayes pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (BALAJI *et al.*, 2020).

Caso o objeto de classificação contenha duas ou mais classes, métodos de classificação de máquinas de vetores de suporte (SVM) são recomendados. Um SVM classifica os dados encontrando o melhor hiperplano que separa os pontos de dados de uma classe daqueles da outra classe. O melhor hiperplano para um SVM significa aquele com a maior margem entre as duas classes. Margem significa a distância do vetor de suporte até o hiperplano que não possui pontos de dados internos (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos de classificação SVM pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (BEHERA; RATH; SETHY, 2020).

Encontra-se, na literatura, diversos trabalhos que fizeram uso do aplicativo *Classification Learner* de forma a testar a acurácia de diferentes métodos de classificação em determinado grupo de amostras. A Tabela 3 expõe as referências aos trabalhos que fizeram uso do aplicativo *Classification Learner* da maneira retratada, além da quantidade de métodos de classificação avaliados em cada trabalho, e os referentes resultados em relação a quais métodos apresentaram melhor acurácia.

Tabela 3: Artigos ciêntificos que avaliaram multiplos métodos de classificação por meio do aplicativo *Classification Learner*

Número de métodos de classificação avaliados	Métodos de classificação que apresentaram melhor acurácia na classificação	Referência
3	SVM Quadrático SVM Cúbico	(PANDIYAN; TJAHJOWIDODO; SAMY, 2016)
15	SVM Gaussiana Média	(AKTAS; SAN, 2019)
Não especificado	SVM Gaussiana Fina	(FRASSINETI *et al.*, 2019)
24	Gaussiana de Naive Bayes Kernel de Naive Bayes SVM Quadrático Árvore Média	(HERTZ; HERTZ; JOHNSEN, 2020)
7	SVM Cúbico SVM Linear	(KATIĆ; LI; ZEILER, 2020)
23	SVM Gaussiana Fina	(TUNCER; ERTAM, 2020)
2	SVM não especificado	(BONAH *et al.*, 2020)
13	SVM Linear KNN Cúbico	(YAN *et al.*, 2020)
Não especificado	Árvores impulsionadas KNN não especificado	(GLENN *et al.*, 2021)

Fonte: Autor

Os métodos de classificação KNN normalmente têm acurácia preditiva em baixas dimensões. Diferente de outros métodos de classificação disponíveis no aplicativo *Classification Learner*, os métodos classificadores de vizinhos mais próximos usam muita memória e não são fáceis de interpretar (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos de classificação KNN pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (KHAN *et al.*, 2020).

Os métodos classificadores de conjunto combinam resultados de muitos métodos classificadores menos eficazes em um método de conjunto de alta eficácia (MATHWORKS, 2020). Um exemplo de aplicação de métodos classificadores de conjunto pode ser encontrado no trabalho desenvolvido por (KHAN *et al.*, 2020).

2.5 FRONTEIRA DO CONHECIMENTO

Como descrito nas seções anteriores, ficou evidenciado a existência de trabalhos que abordam o monitoramento do processo FDM, incluindo o monitoramento do processo por meio

do processamento digital de sinais adquiridos por sensor EA para fins de detecção e classificação de anomalias na fabricação de primeira camada. No entanto, não foi possível encontrar na literatura trabalhos que explorassem os tópicos a seguir listados em estudos relacionados ao monitoramento da primeira camada do processo FDM a partir de sinais adquiridos por transdutores piezelétricos fixados a mesa de impressão:

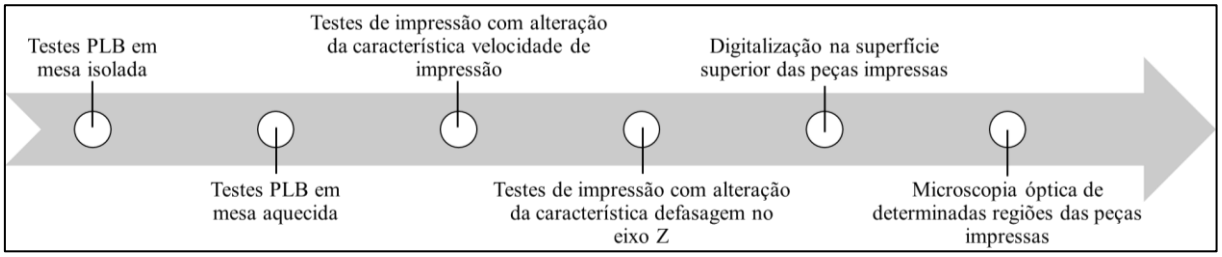
- Repetibilidade dos sinais adquiridos pelo diafragma piezelétrico;
- Influência da fixação da mesa da resposta dos transdutores piezelétricos avaliada pelos índices de dano CCDM e RMSD;
- Influência da temperatura da mesa da resposta dos transdutores piezelétricos avaliada pelos índices de dano CCDM e RMSD;
- Tempo de integração adequado para o cálculo do RMS em sinais obtidos pelos transdutores piezelétricos;
- Influências inseridas pelo acionamento dos motores de passo e pela movimentação dos eixos X, Y e Z da resposta obtida pelos transdutores piezelétricos;
- Diferenças observadas nos sinais obtidos pelos transdutores piezelétricos quando da fabricação por diferentes arquétipos de preenchimento;
- Detecção de anomalias de impressão por meio da avaliação no domínio do tempo da estatística ROP;
- Detecção de anomalias de impressão por meio da avaliação no domínio da frequência do índice de dano RMSD;
- Detecção de anomalias de impressão por meio do processamento digital dos dados adquiridos pelo diafragma piezelétrico;
- Avaliação da acurácia de diferentes métodos de classificação de anomalias do processo FDM por meio do aplicativo *Classification Learner*;

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os bancos de ensaio e os métodos para verificação da sensibilidade dos sensores EA e PZT por meio do método PLB, para os testes de impressão das peças de polímero plástico PLA virgem, para a inspeção visual das peças impressas, para análise do tempo de integração, para a seleção dos diferentes arquétipos de preenchimento e posterior separação das fabricações de contorno em segmentos e linhas, e para a análise da influências dos elementos mecânicos da impressora nos sinais adquiridos das fabricações de primeira camada. Além disso, foram descritos os métodos para análise dos sinais no domínio do tempo via RMS e Counts, e análise dos sinais no domínio da frequência por meio da FFT, da ROP, e dos índices de dano RMSD e CCDM. Assim, por meio dos resultados, seria possível depreender os eventos ocorridos no processo por meio do processamento digital de sinais.

A Figura 3.1 retrata a sequência dos testes realizados. Iniciando nos testes PLB em mesa isolada (PLB-I), detalhados no item 3.1.1.1, seguido dos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A), detalhados no item 3.1.1.2, seguido dos testes de impressão com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI), detalhados no item 3.1.2.1, seguido dos testes de impressão com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ), detalhados no item 3.1.2.2, seguido da etapa de digitalização na superfície superior das peças impressas, detalhada no item 3.2.1, seguido da etapa de microscopia óptica de determinadas regiões das peças impressas, detalhada no item 3.2.2.

Figura 3.1 – Sequência dos testes realizados



Fonte: Autor

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS

Os testes foram realizados em uma impressora cartesiana 3D doméstica, fabricante GTMax3D®, modelo Graber i3. Este modelo possui uma mesa MK2B Dual Power PCB com um sensor de temperatura do tipo termistor de coeficiente de temperatura negativo (NTC) 100k, o qual encontra-se em contato com uma chapa de vidro de 200 x 200 x 3 milímetros (mm), e um extrusor do tipo direto com Hotend Allmetal GTMax3D, com diâmetro do bico extrusor de 0,4 mm. Neste modelo de impressora, para a realização de movimentações no eixo X e Z, o

extrusor move-se, enquanto para realização de movimentações no eixo Y, a mesa move-se.

Um sensor EA de baixa frequência, modelo R.45I, com resposta em frequência prevista de 1 Hertz (Hz) a 20 quilohertz (kHz), fabricado pela Physical Acoustics®, que possui uma base para acoplamento magnético foi utilizado. Para alimentar o sensor de EA, uma fonte de alimentação de corrente contínua foi utilizada. De forma a permitir o acoplamento entre a base magnética e a mesa de vidro, um imã de neodímio foi utilizado para gerar a força magnética contrária à da base, permanecendo este afixado sob a mesa da impressora. Ademais, foi utilizado um PZT de 20 mm de diâmetro por 0,42 mm de espessura, fixado na mesa de impressão por meio de adesivos a base de cianoacrilato e a base de silicone, a distâncias de 14 x 100 mm do canto inferior direito da mesa de impressão, conforme representado na Figura 3.2. O adesivo a base de cianoacrilato foi utilizado para fixar a base de latão do PZT à mesa de impressão, e o adesivo a base de silicone foi utilizado para reforçar a fixação do PZT à mesa de impressão e tornar a ligação do PZT com o cabo de dados menos suscetível a movimentações bruscas da mesa de impressão. Um oscilógrafo, modelo DL 850, da Yokogawa®, foi utilizado como DAQ na aquisição e armazenamento de dados.

A escolha das posições do sensor de EA e do PZT na mesa de impressão visou atender a diferentes motivações. Primeiramente, a posição do PZT foi escolhida por fatores externos a este trabalho. Como o PZT foi fixado uma única vez, e não mais retirado ao longo de todos os testes, uma posição mais lateral na mesa deixou livre uma maior superfície de impressão a ser utilizada por outros alunos que porventura necessitaram utilizar a impressora em questão durante o período de desenvolvimento deste trabalho. O posicionamento frontal do sensor de EA foi escolhido de forma a impedir o contato entre o cabeçote do extrusor e o sensor de EA, e entre a trilha de movimentação no eixo X, representada na Figura 3.6, e o sensor de EA, durante a fabricação.

Em relação a modelagem tridimensional das peças a serem impressas nos testes, empregou-se o programa SketchUp® em versão Make 2017. Para a supervisão e controle de temperatura na mesa de vidro e no extrusor, além de outras variáveis do processo, empregou-se o programa fatiador Repetier-Host®. O fatiamento dos modelos tridimensionais digitais foi realizado por meio do pós-processador Slic3r®, funcionando em conjunto ao programa Repetier-Host®. Procurou-se, em relação as características de impressão insertas no fatiamento, partir sempre das características padrão fornecidas pelo programa Slic3r® para impressão com filamento PLA de 1,75 mm, bico extrusor de 0,4 mm e código G de tipo RepRap (Marlin/Sprinter), alterando as variáveis conforme a proposta para cada teste de impressão.

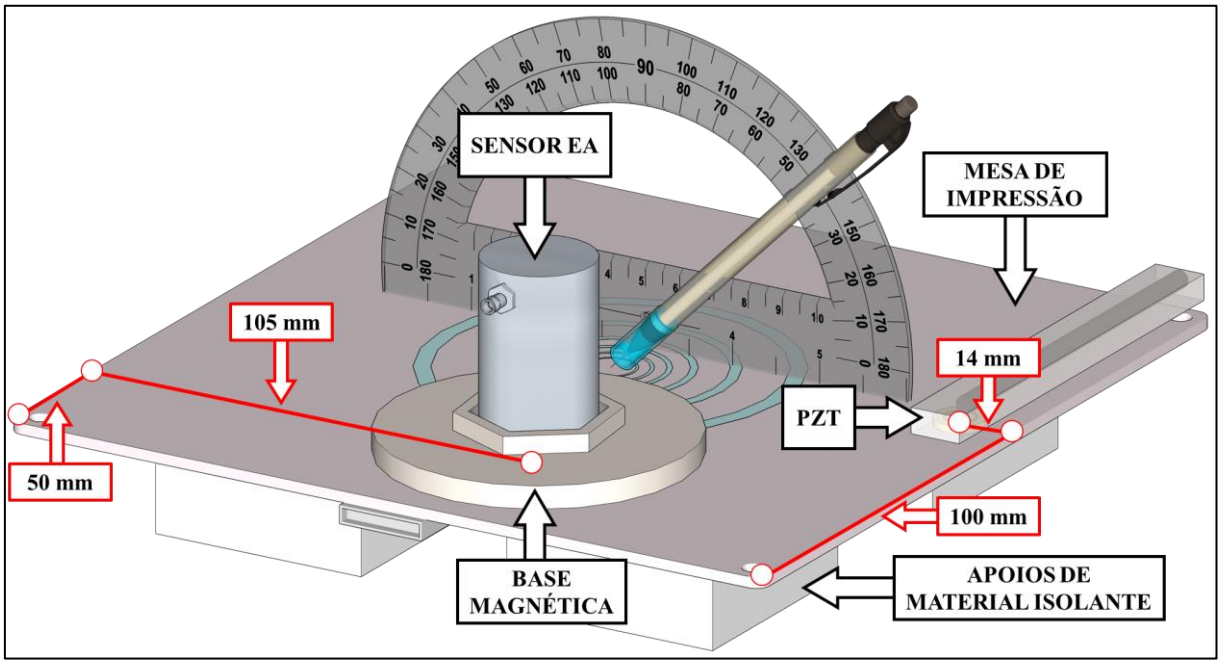
3.1.1 Verificação da resposta dos transdutores pelo método PLB

3.1.1.1 Testes PLB em mesa isolada

Inicialmente, de forma a verificar a influência dos elementos mecânicos com os quais a mesa está em contato da resposta dos transdutores que nela foram alocados, foram conduzidos testes PLB em mesa isolada (PLB-I). Para tal, a mesa foi removida da impressora e alocada sob apoios de material isolante (isopor), conforme representado na Figura 3.2.

Nos PLB-I, o sensor EA foi alocado a distâncias de 105 x 50 mm do canto inferior esquerdo da mesa de impressão, conforme representado na Figura 3.2. Foram conduzidas três repetições do teste PLB a uma temperatura ambiente de aproximadamente 26 graus celsius (ºC), mantida quase constante por meio do sistema de condicionamento de ar do laboratório no qual os testes foram conduzidos.

Figura 3.2 – Esquema do banco de ensaio para os PLB-I



Fonte: Autor

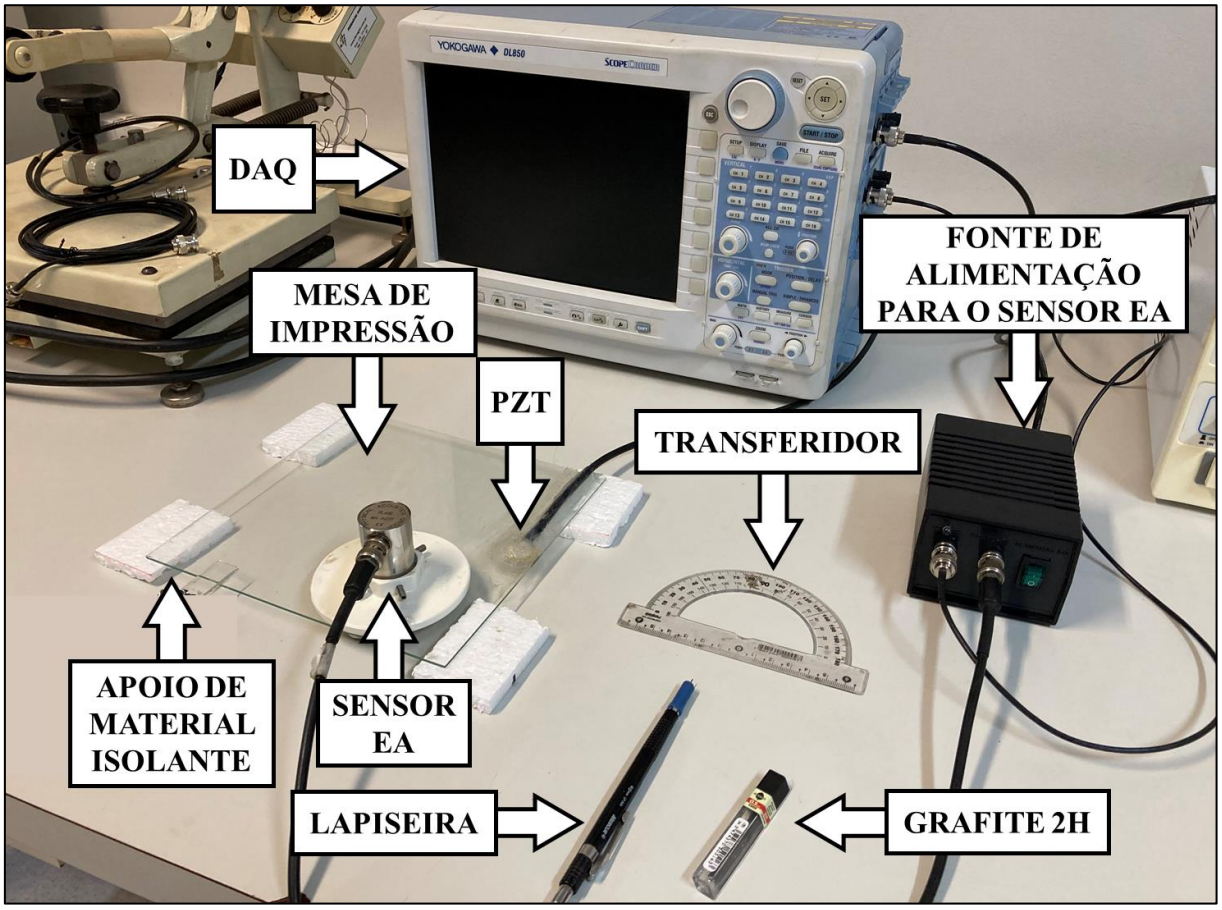
Cada um dos PLB-I teve duração adquirida pelo DAQ de 2 segundos, mantido constante entre os testes com a utilização da ferramenta *trigger* no DAQ. Para cada um dos PLB-I, o DAQ armazenou os dados a uma frequência de amostragem de 5 MS/s. O grafite utilizado para os testes PLB possuía rigidez 2H, e 0,5 mm de diâmetro.

O comprimento de ponta do grafite e o ângulo de quebra do grafite empregado pela lapiseira foram estabelecidos conforme a norma ASTM E976 (ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS), 2015). Como ilustrado na Figura 3.2, um cilindro de

borracha foi utilizado na ponta da lapiseira para evitar contatos indesejados entre a ponta metálica da lapiseira e a mesa, os quais potencialmente provocariam ricochetes, como descrito em (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015; LOPES *et al.*, 2019a).

Uma foto do banco de ensaio para os testes PLB em mesa isolada está representada na Figura 3.3. Na foto, é possível observar o posicionamento do sensor EA e do PZT na mesa de impressão, a presença da fonte de alimentação para o sensor EA, e da lapiseira, grafite e transferidor utilizados nos testes PLB.

Figura 3.3 – Foto do banco de ensaio para os PLB-I



Fonte: Autor

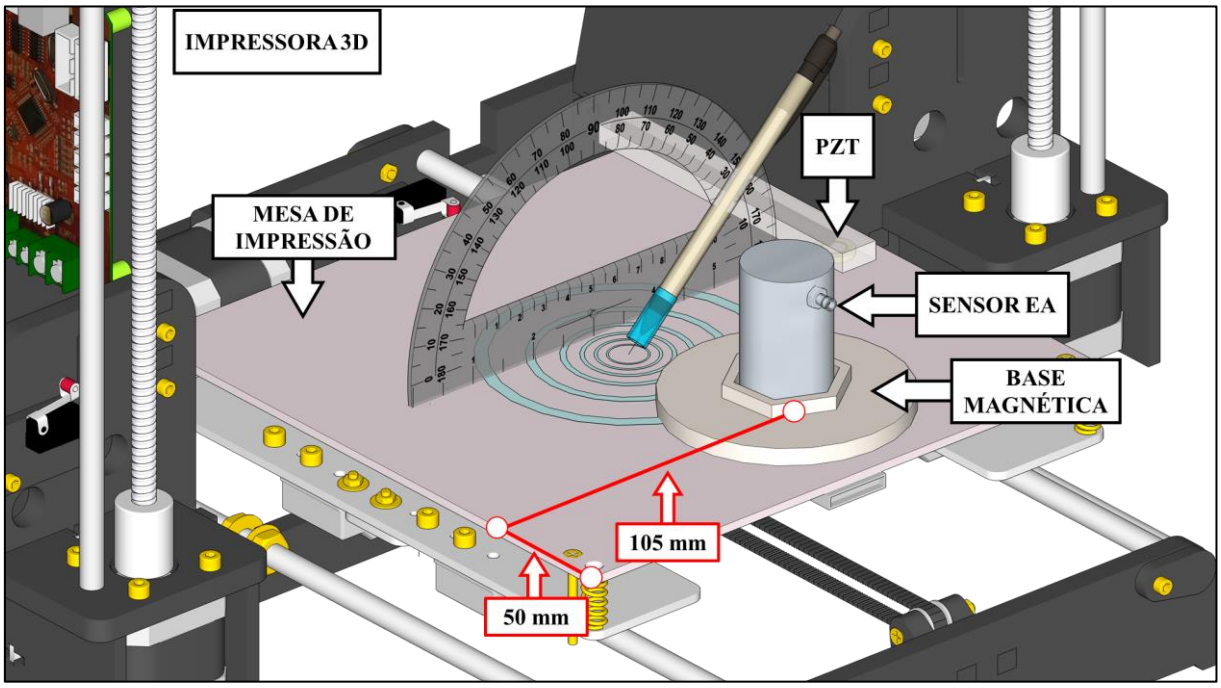
3.1.1.2 Testes PLB em mesa aquecida

Após os testes PLB em mesa isolada (PLB-I), a mesa foi realocada em sua posição original na impressora. Em seguida, de forma a verificar da resposta dos transdutores em contato com a mesa de impressão quando sob a influência de diferentes temperaturas, grupos de testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) foram realizados com variação de temperatura partindo de aproximadamente 25 ºC com um grupo de três repetições, acrescendo, no programa Repetier-Host, 5 ºC a temperatura da mesa a cada três repetições, até alcançar a temperatura de 65 ºC.

Escolheu-se levar os testes até a temperatura de 65 ºC pois esta é a temperatura recomendada pelo fabricante do filamento PLA para impressão, e pelo fato de que no manual do sensor EA empregado nos testes, especifica-se que a temperatura de operação do sensor não pode ser superior a 70 ºC. Cada um dos PLB-A teve duração de 2 segundos, mantido constante entre os testes com a utilização da ferramenta *trigger* no DAQ.

Para cada um dos PLB-A, o DAQ armazenou os dados a uma frequência de amostragem de 5 MS/s. Neste teste, o sensor EA foi alocado na mesa a distâncias de 105 x 50 mm do canto inferior esquerdo da mesa de impressão, conforme representado na Figura 3.4.

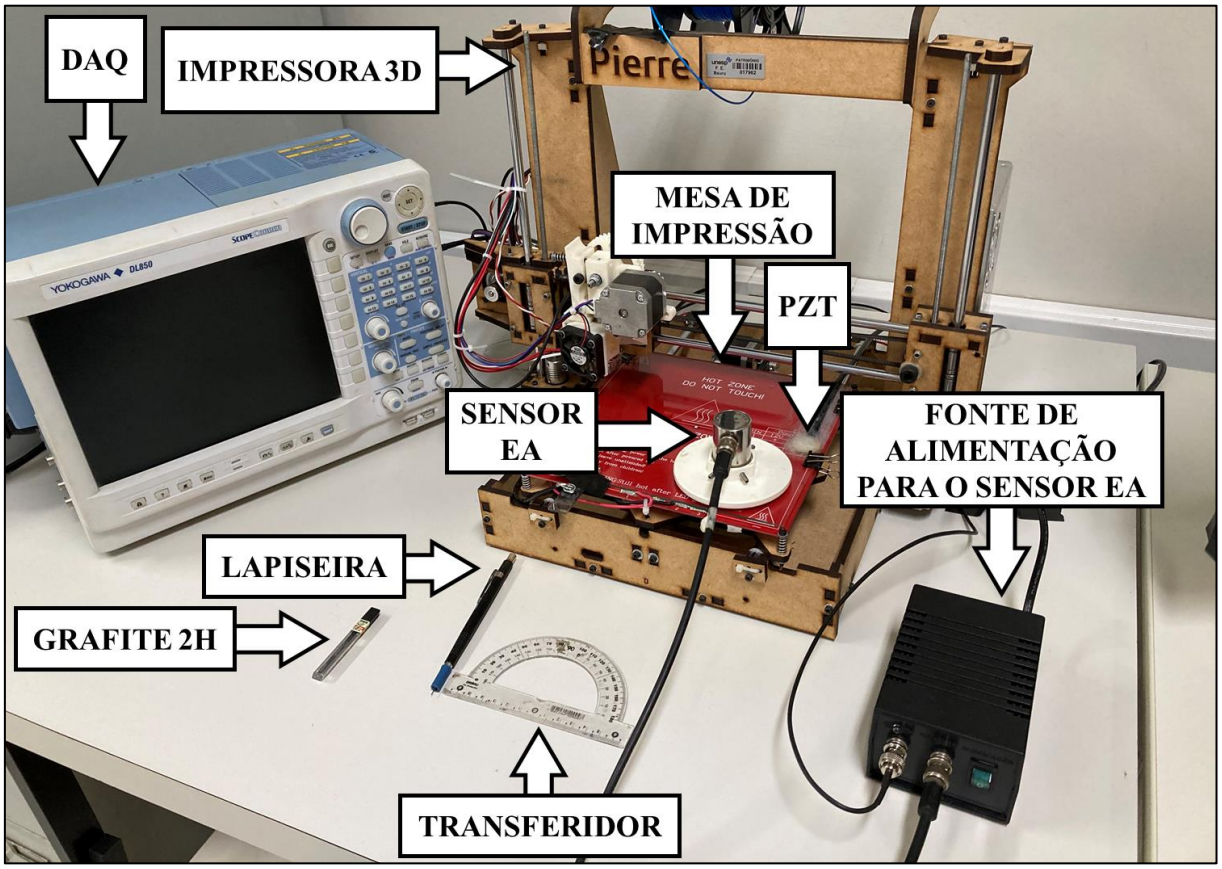
Figura 3.4 – Esquema do banco de ensaio para os PLB-A



Fonte: Autor

Uma foto do banco de ensaio para os testes PLB em mesa aquecida está representada na Figura 3.5. Na foto, é possível observar o posicionamento do sensor EA e do PZT na mesa de impressão, a presença da fonte de alimentação para o sensor EA, e da lapiseira, grafite 2H e transferidor utilizados nos testes PLB.

Figura 3.5 – Foto do banco de ensaio para os PLB-A



Fonte: Autor

3.1.2 Testes de impressão

Os testes de impressão de primeira camada foram realizados de forma que, partindo de uma condição de impressão regular (IR), gerou-se, alterando as características de impressão a serem insertas durante o fatiamento, duas condições de impressão irregulares (IIR1 e IIR2). Entende-se, no contexto deste trabalho, a IR como sendo a condição de impressão que resulte em peças com qualidade de superfície esperada, e as IIR1 e IIR2 como sendo condições de impressão que resultem em peças com anomalias na superfície.

Inicialmente, testes foram conduzidos com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI). Os valores de velocidade de impressão referentes às condições de impressão irregulares (IIR1 e IIR2) utilizados foram múltiplos do valor de velocidade de impressão referente à condição de impressão regular (IR), e foram escolhidos por experimentação empírica.

Em seguida, testes foram conduzidos com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ). Os valores de defasagem no eixo Z referentes as condições de impressão irregulares (IIR1 e IIR2) utilizados foram selecionados para representarem pequenas

variações (0,1 mm) da proximidade do extrusor em relação a mesa. Estas variações de proximidade do extrusor em relação a mesa são normalmente utilizadas para corrigir pequenas variações de calibragem no eixo Z.

Para cada condição de impressão irregular, era imperativo que a peça monocamada impressa apresentasse um ou mais anomalias nos parâmetros fundamentais de camada (número de vazios, número de espaços, largura de contorno, entre outros), e que fossem reproduzíveis e visualmente identificáveis.

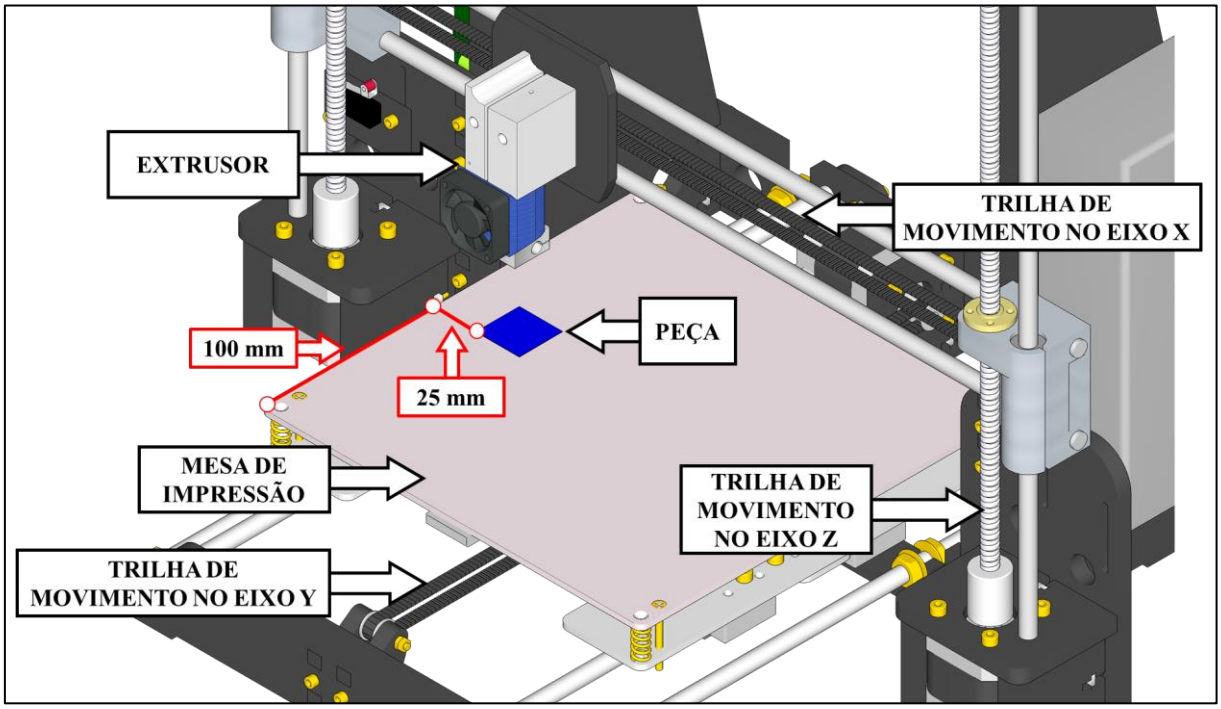
Também era imperativo que os sinais adquiridos pelos transdutores piezelétricos durante as fabricações nas condições de impressão irregulares mantivessem os requisitos mínimos necessários para permitir análises comparativas aos sinais adquiridos em condição de impressão regular por meio de técnicas de processamento digital de sinais. Dentre os requisitos, esperava-se mesmo período de fabricação, e comportamentos similares das amplitudes dos sinais ao longo das fabricações dos arquétipos de preenchimento (AP).

A peça a ser produzida nos testes de impressão foi alocada na mesa de impressão, conforme Figura 3.6. A impressão produzida pela impressora 3D Graber i3 é alcançada por meio da movimentação relativa das trilhas de movimento nos eixos X, Y e Z, conforme representado na Figura 3.6.

Desta maneira, para uma impressão que requer uma movimentação somente no eixo X, o código G faz com que somente o motor de passo relativo à trilha de movimentação afixada ao extrusor seja acionado. Por outro lado, para uma impressão que requer movimentação somente no eixo Y, o código G faz com que somente o motor de passo relativo à trilha de movimentação afixada a mesa de impressão seja acionada. Em uma fabricação que requer a movimentação em ambos os eixos X e Y, como a necessária para a fabricação de partes da peça teste, os motores de passo afixados as trilhas de movimentação de ambos extrusor e mesa de impressão são ativados de maneiras distintas, contando com acionamentos intermitentes. A posição da peça na mesa foi escolhida de forma a impedir o contato entre o extrusor e o sensor de EA, e entre a trilha de movimentação no eixo X e o sensor de EA, durante a fabricação.

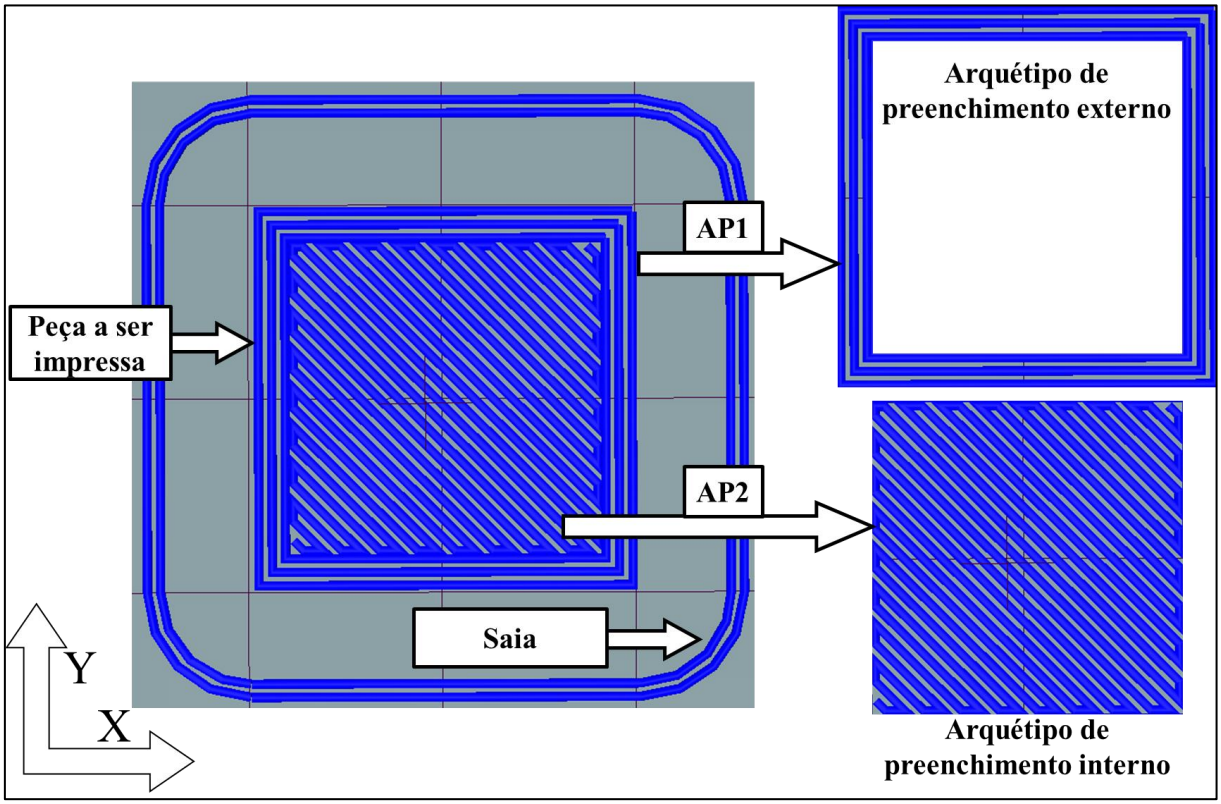
A peça a ser utilizada nos testes de impressão, após ter sido fatiada, resulta nas fabricações especificadas na Figura 3.7. Nota-se a presença de saia, elemento advindo de características de impressão definidos. O número de voltas da saia, e a distância da saia para a peça em si foram variáveis definidas durante o processo de fatiamento. A fabricação da peça em si apresenta dois arquétipos (padrões) de preenchimento (AP) muito bem definidos. Sendo estes o AP1, referente a fabricação do AP encontrado na região externa da peça, e o AP2, referente a fabricação do AP encontrado na região interna da peça.

Figura 3.6 – Detalhamento da impressora 3D Graber i3 em relação as trilhas de movimentação



Fonte: Autor

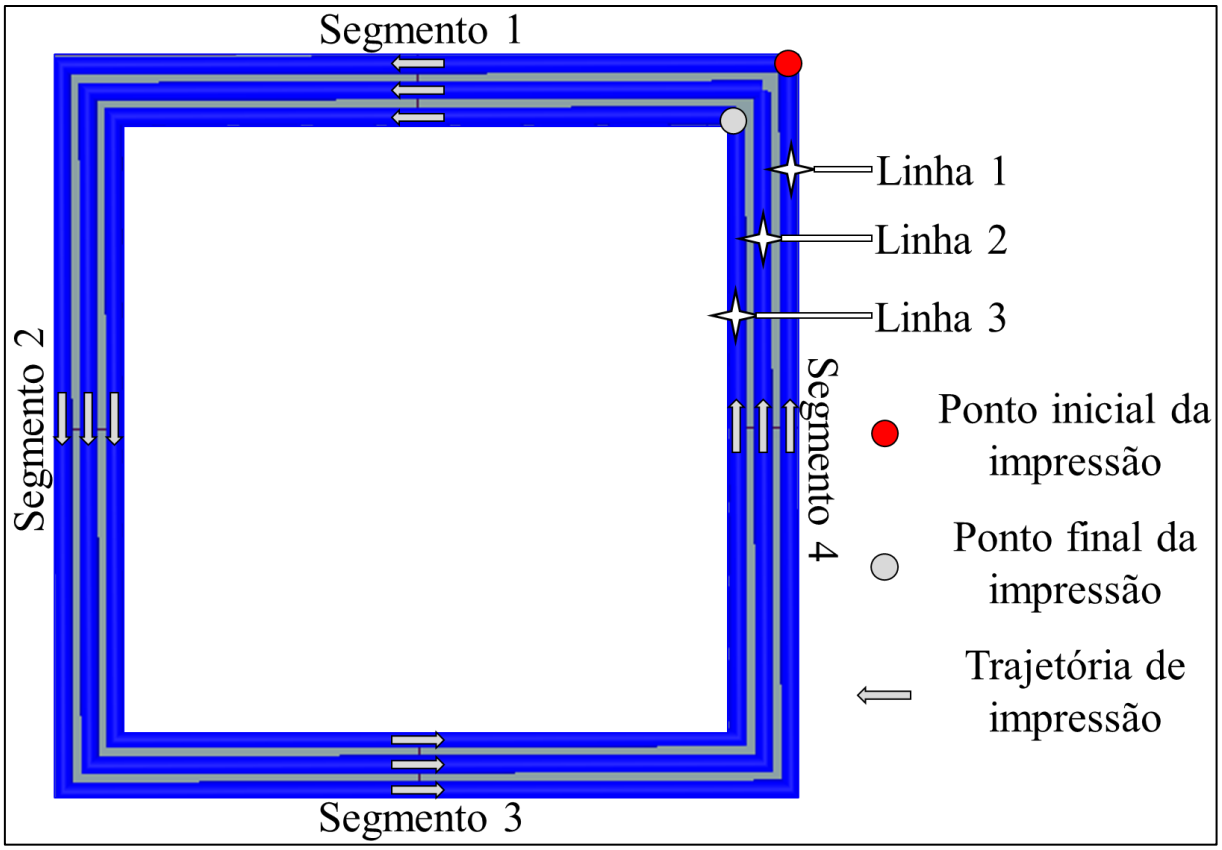
Figura 3.7 – Peças a serem utilizadas nos testes de impressão após terem sido fatiadas



Fonte: Autor

Como pode ser verificado na Figura 3.8, o AP1 é constituído da fabricação de três linhas de contorno de mesma largura de contorno, identificadas por linha 1 (L1), linha 2 (L2) e linha 3 (L3). Linhas estas que se repetem em quatro segmentos, e que diminuem de comprimento sucessivamente. As fabricações encontradas no segmento 1 (S1) e segmento 3 (S3) são produzidas pela movimentação somente no eixo X. Enquanto as fabricações encontradas no segmento 2 (S2) e segmento 4 (S4) são produzidas pela movimentação somente no eixo Y.

Figura 3.8 – Especificações de fabricação do arquétipo de preenchimento 1 (AP1)



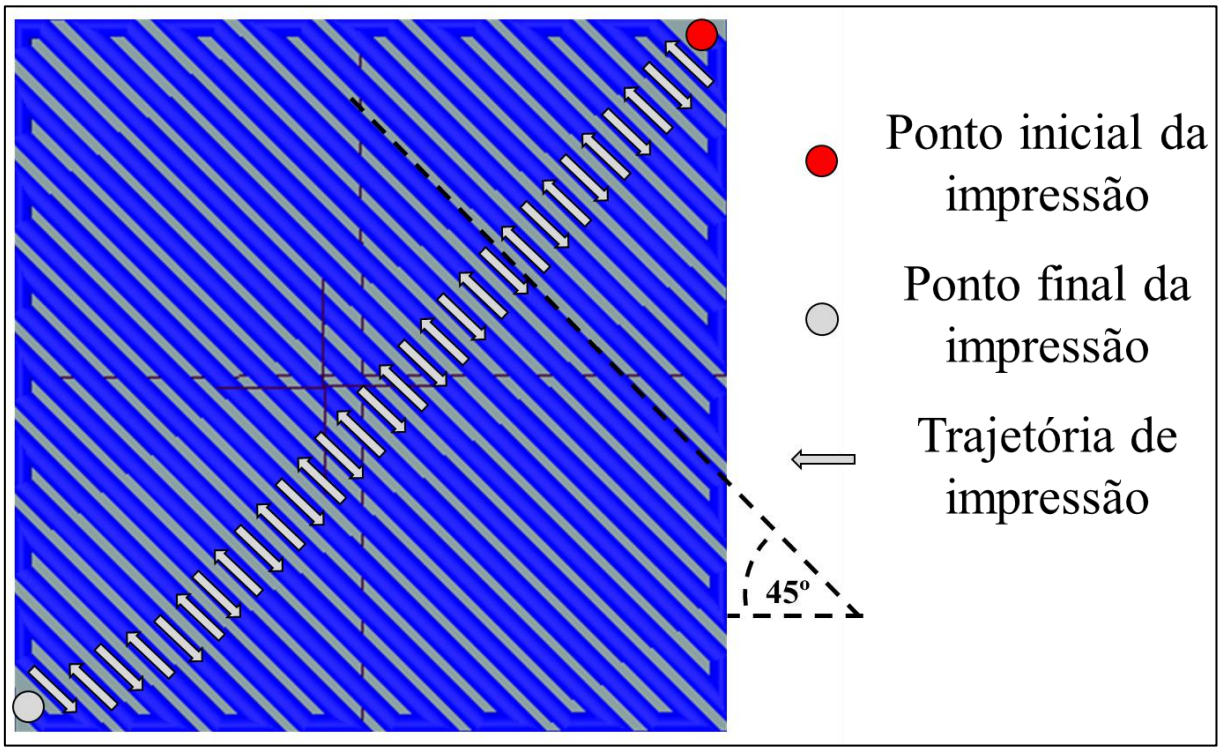
Fonte: Autor

A fabricação do AP2 é constituída de trinta blocos de fabricação de *raster* de mesma largura de *raster*, e com comprimentos de *raster* variáveis, conforme pode ser verificado na Figura 3.9. A fabricação destes trinta blocos é resultado da movimentação combinada dos eixos X e Y, de forma a obter-se trajetórias de impressão com angulação de *raster* de 45º em relação aos eixos.

Ademais, testes de impressão conduzidos sem filamento (SF) foram realizados. Isto é, para cada condição de teste a seguir especificada, três repetições adicionais foram realizadas sem a deposição de filamento. Esta prática foi realizada de forma a prover dados onde somente

os fenômenos vibratórios e acústicos resultantes da movimentação dos eixos da impressora seriam obtidos pelos transdutores piezelétricos, sem a influência do filamento sendo depositado na mesa de impressão pelo bico extrusor.

Figura 3.9 – Especificações de fabricação do arquétipo de preenchimento 2 (AP2)



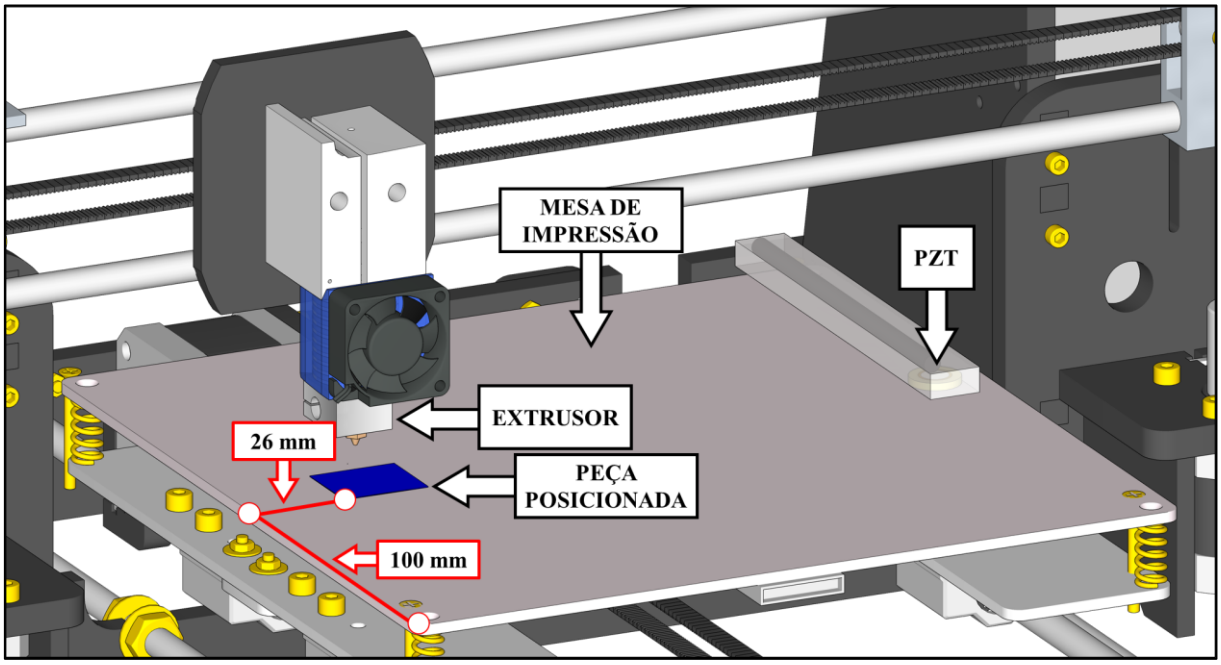
Fonte: Autor

3.1.2.1 Testes com variação de velocidade de impressão

Nos testes com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI), o DAQ armazenou os dados a uma frequência de amostragem de 1 MS/s. Uma peça retangular de 24,3 x 20,8 x 0,2 mm foi modelada tridimensionalmente, e posteriormente alocada para impressão a distâncias de 26 x 100 mm do canto inferior esquerdo da mesa de impressão, conforme Figura 3.10.

De forma a gerar a condição de impressão regular (IR), as características de impressão descritas na Tabela 4 foram empregadas no fatiamento. Para as características de impressão necessárias para o fatiamento que não foram mencionadas na Tabela 4, empregou-se as características completas de impressão descritas no APÊNDICE I, na Tabela 15.

Figura 3.10 – Banco de ensaio para os testes com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI)



Fonte: Autor

Tabela 4: Características de impressão para os testes com variação da característica de impressão velocidade de impressão (V-VI)

Características de impressão				
Altura da primeira camada	Posição de costura	Ângulo de preenchimento tipo *raster*	Velocidade para movimentações de não impressão	Largura de extrusão padrão
0,4 mm	Alinhado	45 º	130 mm/s	Automático
Velocidade de impressão da primeira camada	Arquétipos de preenchimento superior e inferior	Número de voltas da saia	Distância da saia em relação ao objeto	Altura da saia
15 mm/s	Rectlinear	2	6 mm	1 camada
Definições de filamento				
Diâmetro do filamento	Temperatura do extrusor para a primeira camada		Temperatura da mesa para a primeira camada	
1,75 mm	195 ºC		65 ºC	
Definições da impressora				
Diâmetro do bico extrusor	Defasagem no eixo Z		Comprimento da retração	
0,5 mm	0 mm		0 mm	

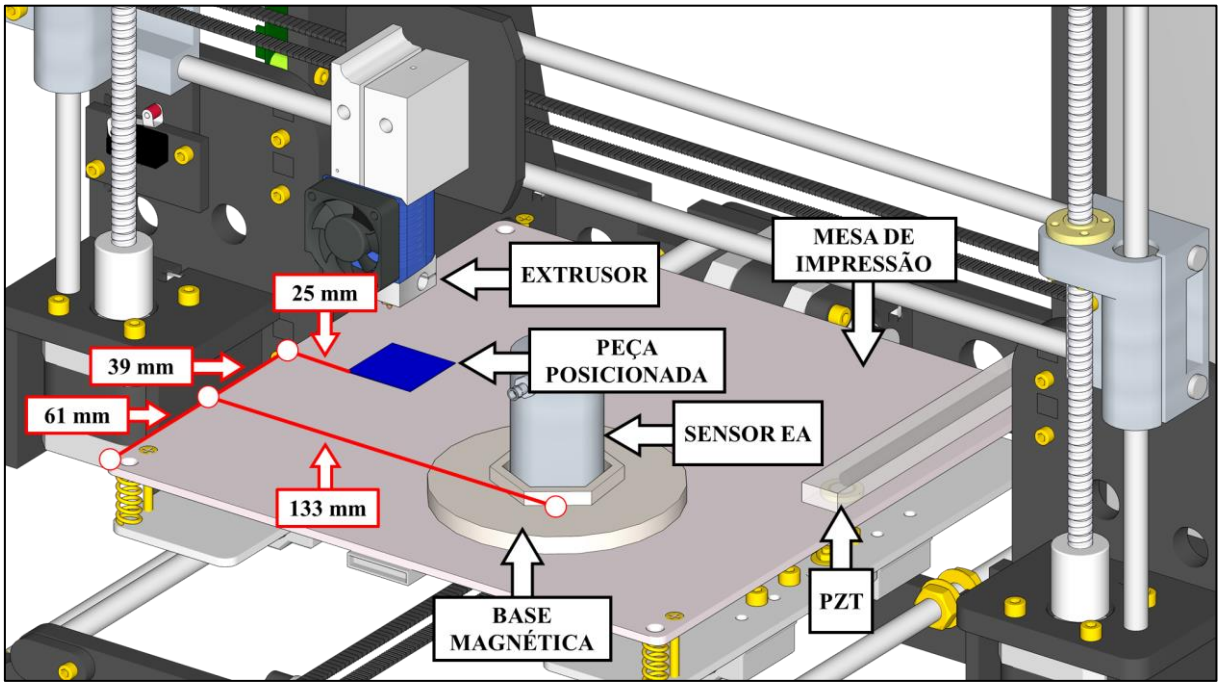
Fonte: Autor

Duas condições de impressão irregulares propostas foram alcançadas alterando o valor da característica velocidade de impressão da primeira camada para 30 mm/s e 45 mm/s, respectivamente a condição de impressão irregular 1 (IIR1), e a condição de impressão irregular 2 (IIR2). As outras características de impressão necessárias para os fatiamentos são as mesmas empregadas para a IR. Para cada condição de impressão, três peças foram impressas.

3.1.2.2 Testes com variação de proximidade do extrusor em relação a mesa

Nos testes de impressão com variação da característica defasagem no eixo Z (V-DZ), o DAQ armazenou os dados a uma frequência de amostragem de 1 MS/s. Nestes testes, o sensor EA foi alocado na mesa a distâncias de 133 x 61 mm do canto inferior esquerdo da mesa de impressão, conforme representado na Figura 3.11. Uma peça retangular de 20 x 20 x 0,3 mm foi modelada tridimensionalmente, e posteriormente alocada para impressão a distâncias de 25 x 100 mm do canto inferior esquerdo da mesa de impressão. A temperatura ambiente no qual os testes foram realizados era aferida a cada teste empregando um termômetro digital modelo MT-455, de fabricação da Minipa®.

Figura 3.11 – Banco de ensaio para os V-DZ



Fonte: Autor

De forma a gerar a condição de impressão regular (IR), as características de impressão descritas na Tabela 5 foram empregadas no fatiamento. Para as características de impressão necessárias para o fatiamento que não foram mencionadas na Tabela 5, empregou-se as características completas de impressão descritas no APÊNDICE II, na Tabela 16.

Duas condições de impressão irregulares propostas foram alcançadas alterando a característica de impressão defasagem no eixo Z para -0,1 mm e 0,1 mm, respectivamente a condição de impressão irregular 1 (IIR1), e a condição de impressão irregular 2 (IIR2). As outras características de impressão necessárias para os fatiamentos são as mesmas empregadas para a condição de impressão regular (IR). Para cada condição de impressão, três peças foram impressas.

Tabela 5: Características de impressão para os V-DZ

Características de impressão				
Altura da primeira camada	Posição de costura	Ângulo de preenchimento tipo *raster*	Velocidade para movimentações de não impressão	Largura de extrusão padrão
0,3 mm	Alinhado	45 º	50 mm/s	Automático
Velocidade de impressão da primeira camada	Arquétipos de preenchimento superior e inferior	Número de voltas da saia	Distância da saia em relação ao objeto	Altura da saia
20 mm/s	Rectlinear	2	4 mm	1 camada

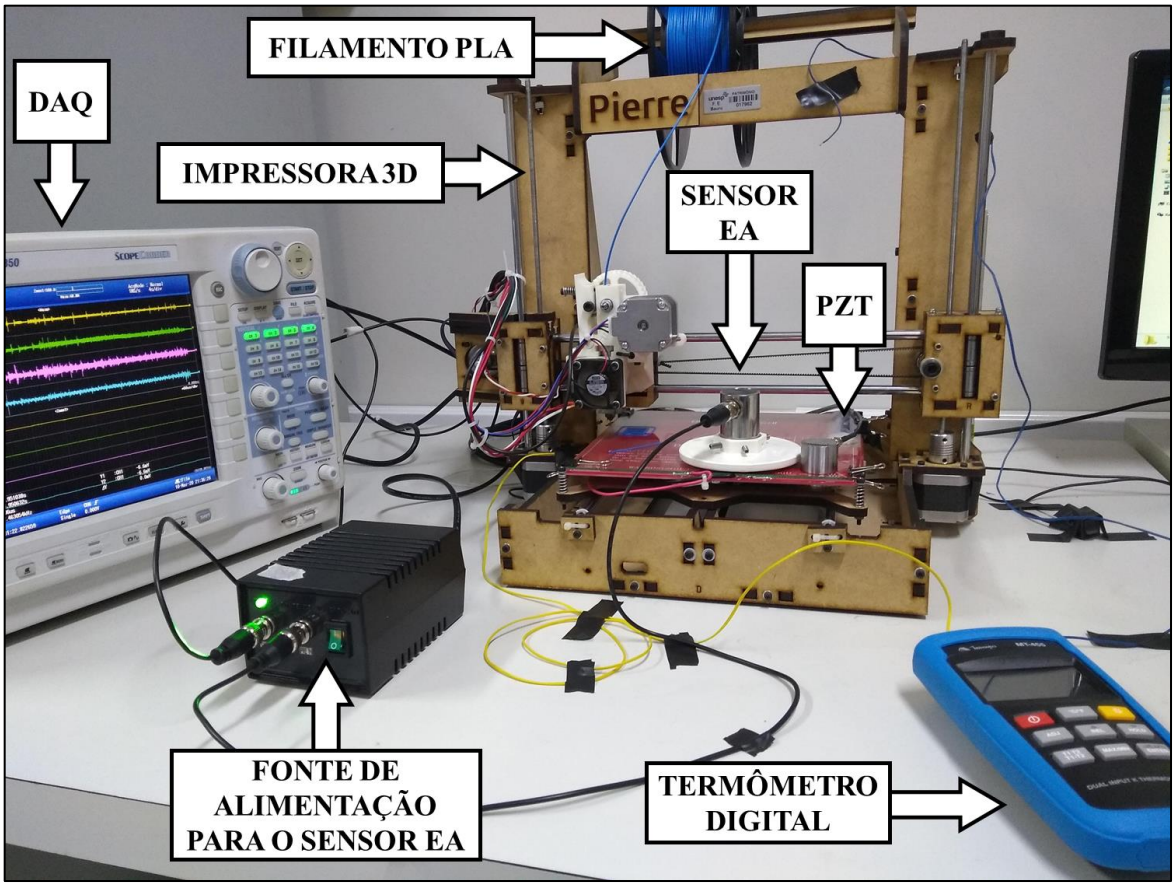
Definições de filamento		
Diâmetro do filamento	Temperatura do extrusor para a primeira camada	Temperatura da mesa para a primeira camada
1,75 mm	190 ºC	65 ºC

Definições da impressora		
Diâmetro do bico extrusor	Defasagem no eixo Z	Comprimento da retração
0,4 mm	0 mm	0 mm

Fonte: Autor

Uma foto do banco de ensaio para os testes está representada na Figura 3.12. Na foto, é possível observar o posicionamento do sensor EA e do PZT na mesa de impressão, e a presença da fonte de alimentação para o sensor EA.

Figura 3.12 – Foto do banco de ensaio para os V-DZ



Fonte: Autor

3.2 INSPEÇÃO VISUAL DE PEÇAS IMPRESSAS

De forma a realizar a inspeção visual das peças impressas, dois métodos de obtenção de representações gráficas das superfícies das peças impressas foram empregados. Os dois métodos são: a digitalização de alta resolução, que fornece uma representação gráfica geral da superfície de cada peça impressa, e a microscopia óptica, que permite, por meio do emprego de lentes de aproximação, a obtenção de representações gráficas aproximadas de regiões de interesse nas peças impressas.

As representações gráficas das peças foram primeiramente analisadas quanto aos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, além do posicionamento do início e do fim da impressão de cada arquétipo de preenchimento. Para executar estas análises, o programa Microsoft Powerpoint® foi utilizado.

Em seguida, diferentes medidas das peças foram obtidas e analisadas a fim de determinar anomalias geométricas a partir das representações gráficas. Para executar as análises e medidas, aplicativo ImageViewer®, parte da *toolbox* de processamento de imagem e visão computacional no programa Matlab® (GONZALES; WOODS; EDDINS, 2009), foi empregado. Desta maneira, cada imagem foi analisada separadamente, e a ferramenta denominada *Measure Distance* foi utilizada. Esta ferramenta mede, em duas dimensões (X e Y), a quantidade de pixels entre dois pontos selecionados (GONZALES; WOODS; EDDINS, 2009).

3.2.1 Digitalização de alta resolução

Para permitir a inspeção visual, um escâner modelo DCP-L240DW, fabricante Brother, foi utilizado na digitalização da superfície superior de cada peça impressa em imagens de alta resolução. Como, nas imagens digitalizadas, as informações visuais estão representadas em pixels (px), e com o objetivo de estudá-las em valores de milímetros, as peças foram posicionadas e fixadas temporariamente em um papel milimetrado por meio do uso de um adesivo, antes de serem digitalizadas, possibilitando uma segura conversão de pixel para milímetro.

A digitalização foi conduzida no programa Brother Utilities®, em configuração formato cartão de visita (90 x 60 mm) com resolução de 1.200 x 1.200 pontos por polegada (dpi). Este procedimento resultou em arquivos no formato gráficos portáteis de rede (PNG) com dimensões de 3.968 x 2.551 pixels.

De posse das representações visuais das peças, um primeiro processo de inspeção visual foi conduzido nas superfícies digitalizadas das peças no programa Microsoft Powerpoint®.

Após isso, medidas específicas foram realizadas por meio do programa Matlab®, com o propósito de extrair as informações geométricas das peças digitalizadas. Dentre as informações obtidas, dimensões das peças tais como a largura e altura total, e a largura entre segmentos foram extraídas. Após as informações terem sido extraídas, as imagens digitalizadas das peças, junto das medidas realizadas, foram salvas em formato de arquivo de imagem rotulado (TIFF), com a intenção de obter-se representações gráficas de alta resolução. Todas as informações dimensionais extraídas, após terem sido convertidas para valores em milímetros, foram organizadas em células no programa Matlab®, o que permitiu uma comparação de dados entre repetições para cada condição.

3.2.2 Microscopia óptica

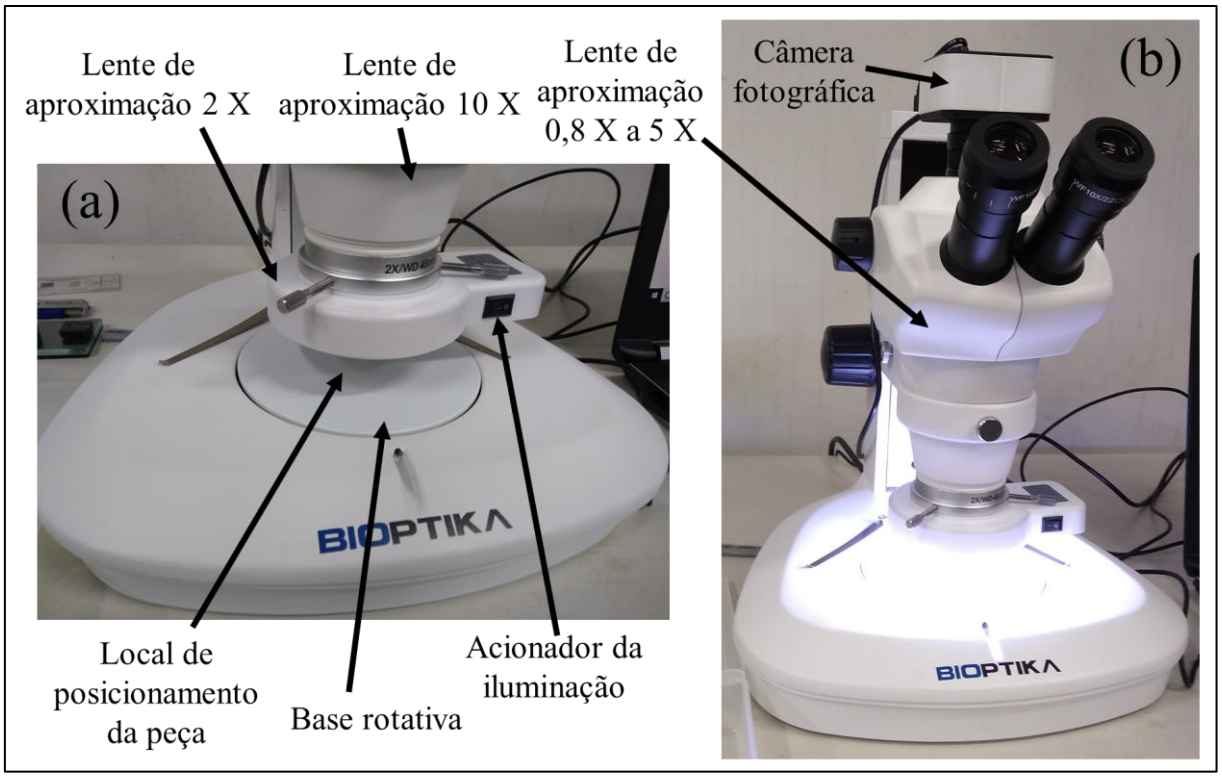
A microscopia foi conduzida em um microscópio óptico Bioptika, modelo L60T Estereomicroscópio Profissional Trinocular LED. Utilizou-se, durante a microscopia, uma aproximação de 20 vezes (X), produzida pela associação de uma lente fixa de 2 X, com uma lente interna de 10 X, e com uma lente ajustável de 0,8 X a 5 X, selecionada para uma aproximação de 1 X. Este modelo de microscópio possui uma base rotativa para posicionamento da peça, conforme representado na Figura 3.13(a). Isto permite que a superfície da peça seja fotografada em ângulos específicos. Adicionalmente, uma iluminação circular, modelo LED 54A, foi acoplada em suporte específico ao microscópio, de forma a fornecer maior iluminação a área de análise. Uma câmera fotográfica modelo CMOS digital colorida 12. MP PLUS foi acoplada a parte superior do microscópio, conforme representado na Figura 3.13(b), o que possibilitou a obtenção de fotografias com mesma aproximação que a produzida pela associação de lentes do microscópio.

A microscopia foi conduzida por meio do programa Bioptika Capture, versão 2.0.4.1, em configuração padrão com resolução de 96 dpi. Este procedimento resultou em arquivos no formato de imagem rotulada (TIF) com dimensões de 4.000 x 3.000 pixels. Uma reta de referência equivalente a 1 mm foi alocada por meio do programa Bioptika Capture em cada uma das imagens, de forma a permitir uma conversão pixel para milímetros acurada. Para cada peça impressa, foram fotografadas amostras de regiões centrais do segmento 1 (S1) do arquétipo de preenchimento 1 (AP1). Após isso, medidas específicas foram realizadas por meio do programa Matlab®, com o propósito de extrair informações geométricas das regiões fotografadas.

Após as informações terem sido extraídas, as fotografias das regiões, junto das medidas realizadas, foram salvas em formato TIFF, com a intenção de obter-se representações grá-

ficas de alta resolução. Todas as informações dimensionais extraídas, após terem sido convertidas para valores em milímetros, foram organizadas em células no programa Matlab®, o que permitiu uma comparação de dados entre repetições para cada condição.

Figura 3.13 – Banco de ensaios para a microscopia óptica. (a) Representação da base do microscópio, (b) Visão geral do microscópio com luz auxiliar acesa e câmera fotográfica acoplada

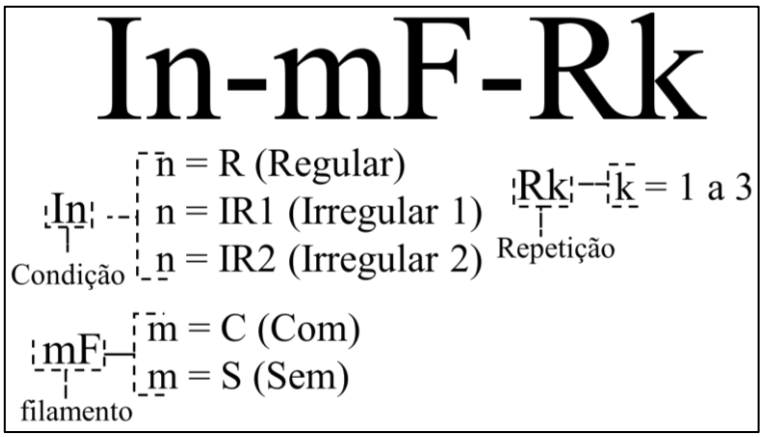


Fonte: Autor

3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

O conjunto de dados dos ensaios foram processados digitalmente no ambiente Matlab®. Os sinais de impressão brutos foram inicialmente submetidos a um filtro digital passa baixa de tipo *Butterworth* de ordem 5, com frequência de corte de 50 kHz, e posteriormente reamostrados para uma frequência de amostragem de 200 kHz. Desta forma, cada vetor de impressão que originalmente continha 90 milhões de pontos, passou a possuir somente 18 milhões de pontos. Um fator de redução de 5. Isso permitiu que os sinais brutos de impressão fossem analisados em conjunto e com maior rapidez no Matlab®. Em razão da quantidade de dados de impressão dos V-DZ, uma codificação, representada na Figura 3.14, foi estabelecida e seguida na identificação dos testes.

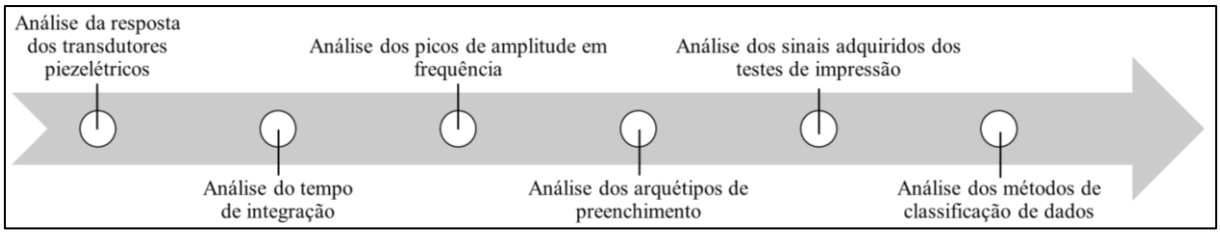
Figura 3.14 – Codificação para identificação dos dados oriundos dos V-DZ



Fonte: Autor

A Figura 3.15 apresenta a sequência das análises conduzidas. Iniciando na análise da resposta dos transdutores piezelétricos, detalhados no item 3.3.1, seguido da análise do tempo de integração, detalhado no item 3.3.2, seguido das análises dos picos de amplitude em frequência, detalhados no item 3.3.3, seguido das análise dos arquétipos de preenchimento, detalhados no item 3.3.4, seguido das análise dos sinais adquiridos dos testes de impressão, detalhada nos itens 3.3.5.1 e 3.3.5.2, seguido da análise dos métodos de classificação de dados, detalhada no item 3.3.5.3.

Figura 3.15 – Sequência das análises conduzidas



Fonte: Autor

3.3.1 Análise da resposta dos transdutores piezelétricos

A análise da resposta dos transdutores piezelétricos foi conduzida no domínio do tempo e no domínio da frequência. No domínio do tempo, da resposta dos transdutores foi analisada nos sinais brutos coletados nos testes PLB em mesa isolada (PLB-I) e nos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A). Os sinais brutos foram avaliados quanto a seus valores de amplitude e relacionados instantes de tempo.

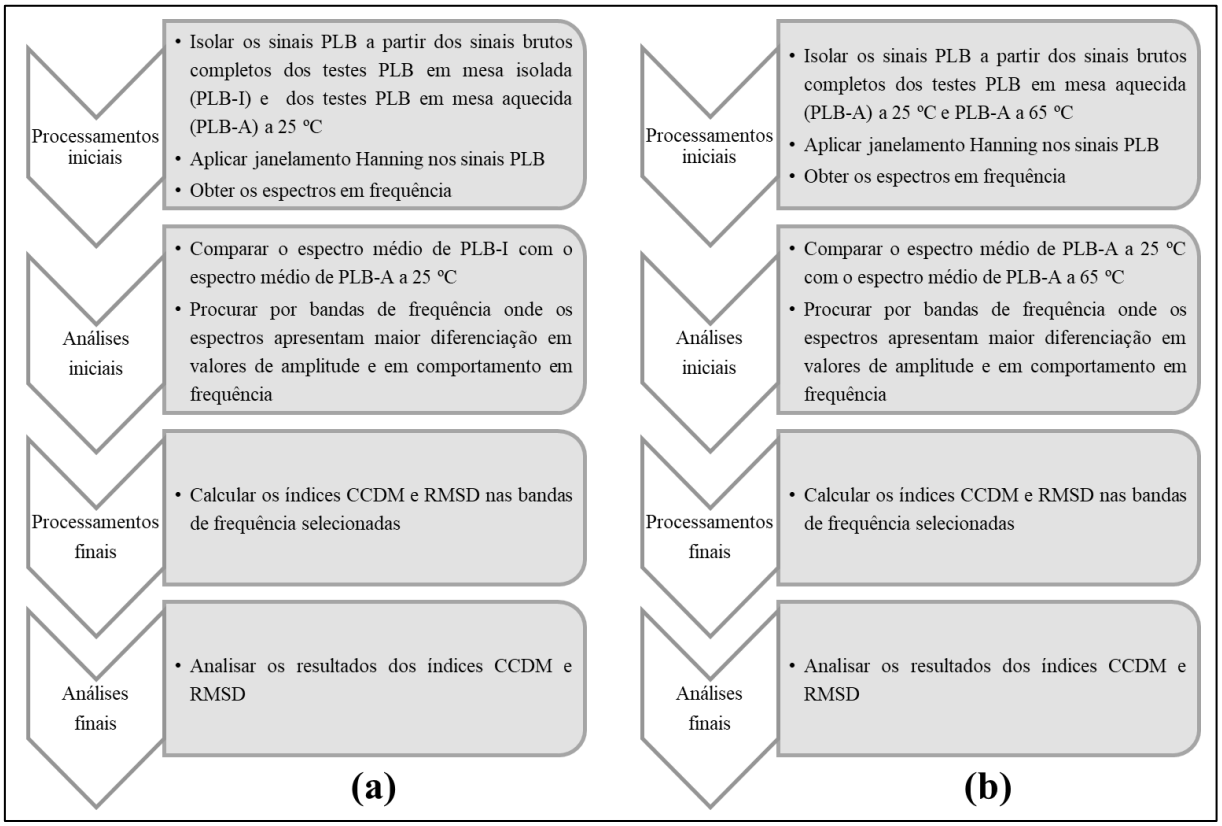
De forma a permitir as análises no domínio da frequência, os espectros de frequência dos sinais brutos coletados nos PLB-I e nos PLB-A foram obtidos por meio da ferramenta FFT. Para tal, um janelamento *Hanning* foi empregado em cada sinal bruto antes do cálculo pela

ferramenta FFT. No domínio da frequência, da resposta dos transdutores foi analisada, primeiramente, na banda de frequência que compreende os valores entre 1 Hz e 20 kHz. Esta banda de frequência foi escolhida devido a ser esta a banda de sensibilidade informada pela Physical Acoustics® para o sensor EA modelo R.45I.

Em primeira análise, a repetibilidade dos sinais adquiridos pelo método PLB por ambos os sensores EA e PZT foi avaliada. Caso fosse verificada repetibilidade entre os espectros de frequência dos sinais, espectros médios representativos dos testes PLB em mesa isolada (PLB-I) e de testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) em cada temperatura eram obtidos.

De posse dos espectros representativos de PLB-I e de PLB-A a cada temperatura, a influência da fixação da mesa da resposta dos transdutores piezelétricos foi avaliada em determinadas bandas de frequência. Para tal, os índices de dano RMSD e CCDM foram empregados nos estudos comparativos entre o espectro representativo de mesa isolada e o espectro representativo de mesa aquecida a temperatura ambiente (25 ºC), considerando como *baseline* o espectro representativo de mesa isolada. O algoritmo de análise da influência da fixação da mesa da resposta dos transdutores piezelétricos está representado na Figura 3.16(a).

Figura 3.16 – Algoritmo de análise dda resposta dos transdutores piezelétricos. (a) Análise da influência da fixação da mesa, (b) Análise da influência da temperatura da mesa



Fonte: Autor

Por fim, a influência da temperatura da resposta dos transdutores piezelétricos foi analisada em determinadas bandas de frequência. Para tal, os índices de dano RMSD e CCDM foram empregados nos estudos comparativos entre o espectro representativo de mesa aquecida a temperatura ambiente (25 ºC) e o espectro representativo de mesa aquecida a temperatura de processo (65 ºC), considerando como *baseline* o espectro representativo de mesa aquecida a temperatura ambiente (25 ºC). O algoritmo de análise da influência da temperatura da mesa da resposta dos transdutores piezelétricos está representado na Figura 3.16(b).

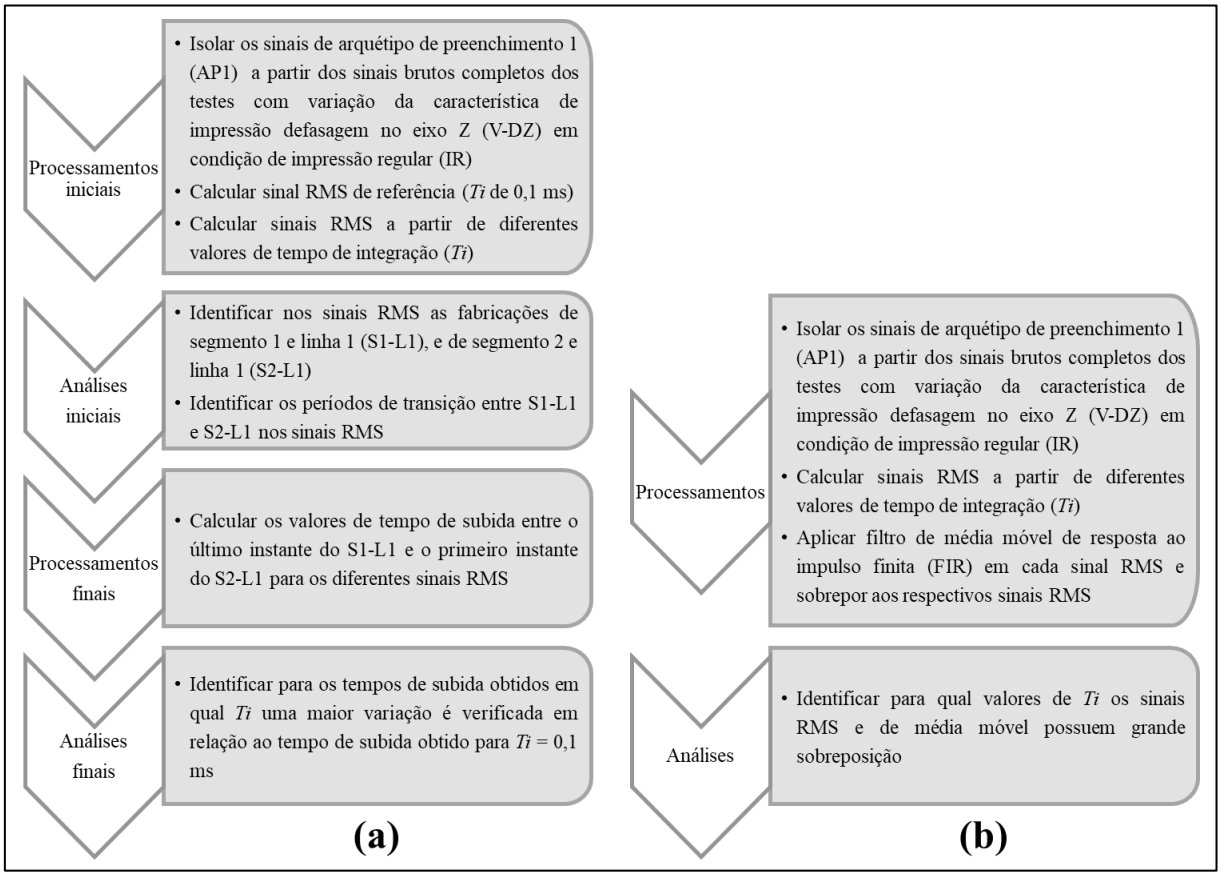
3.3.2 Análise do tempo de integração

Em relação a análise do tempo de integração (*Ti*) mais adequado para emprego no processamento com RMS com sinais adquiridos do processo FDM, critérios similares aos adotados por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996) no estudo do *Ti* para o cálculo do RMS em sinais adquiridos em processos de retificação foram utilizados. A análise do *Ti* foi conduzida nos três sinais de impressão em condição de impressão regular (IR) com filamento (CF), oriundos dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ).

O primeiro dos critérios utilizados na análise do *Ti* foi o denominado tempo de subida (*rise time*). O tempo de subida é definido como o tempo entre 10 % e 90 % do intervalo que leva o sinal a transitar entre um estado e outro. Neste estudo, o tempo de subida foi avaliado no período de transição entre o bloco de impressão da primeira linha do primeiro segmento (S1-L1) do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) e o bloco de impressão da primeira linha do segundo segmento (S2-L1) do AP1. A escolha deste período para análise está baseada em critérios similares de transição entre diferentes estados de amplitude no sinal, adotados por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996). O algoritmo de análise do tempo de integração pelo primeiro critério está representado na Figura 3.17(a).

O segundo critério foi uma análise por inspeção visual do comportamento dos gráficos RMS obtidos para diferentes *Ti*. Um filtro digital de média móvel com resposta ao impulso finita (FIR), com coeficientes de numerador iguais a [1 1 1 1]*0,25, e com coeficientes de denominador igual a 1, foi empregado, de forma a facilitar a avaliação das diferenças entre os sinais RMS obtidos a diferentes *Ti*. Os valores de tempo de subida encontrados para o *Ti* de 0,1 ms foram considerados como referência de comparação, seguindo critério realizado por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996). O algoritmo de análise do tempo de integração pelo segundo critério está representado na Figura 3.17(b).

Figura 3.17 – Algoritmos de análise do tempo de integração. (a) Análise pelo primeiro critério, (b) Análise pelo segundo critério



Fonte: Autor

3.3.3 Análise dos picos de amplitude em frequência

É conhecido que os motores de passos empregados nas movimentações dos eixos X, Y e Z possuem influência nos fenômenos vibratórios e acústicos observados no processo FDM (AL FARUQUE *et al.*, 2016; BHAVSAR *et al.*, 2020; YU *et al.*, 2020). Também é reconhecida a influência do acionamento dos motores de passo, e das movimentações dos eixos X, Y e Z nos sinais adquiridos por sensores empregados no monitoramento do processo FDM (BHAVSAR *et al.*, 2020). Como, no processo FDM, o acionamento dos motores de passo e a movimentação dos eixos X, Y e Z são intrinsicamente relacionados a geometria da peça e ao processo de fatiamento, e este, por sua vez, apresenta diversas características de impressão selecionáveis, temos que as influências inseridas pelo acionamento dos motores de passo e pela movimentação dos eixos X, Y e Z são únicas para cada geometria de peça e arquétipo de fatiamento adotado.

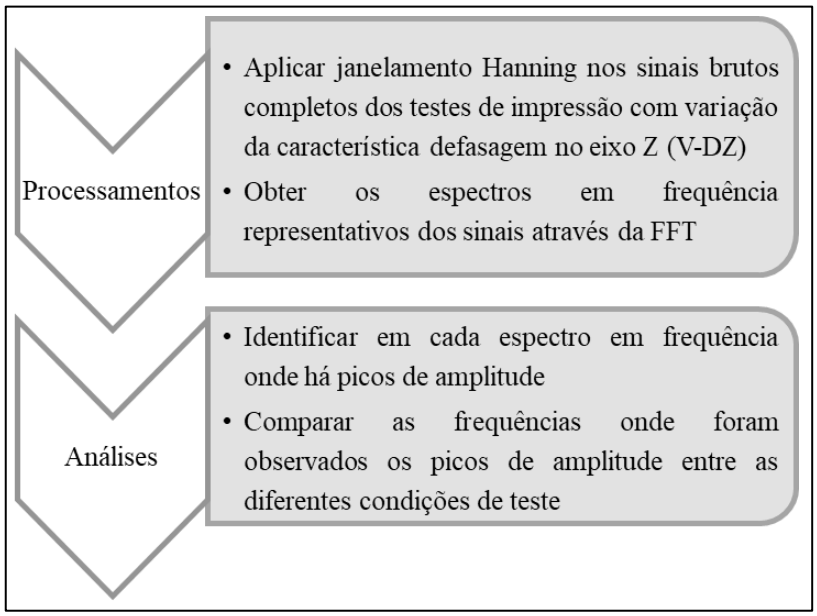
De forma a verificar as influências inseridas pelo acionamento dos motores de passo e pela movimentação dos eixos X, Y e Z da resposta obtida pelos transdutores piezelétricos utilizados neste trabalho, uma análise da repetição dos picos de amplitude em frequência ao longo

dos espectros em frequência dos sinais obtidos a diferentes condições de impressão (regular, irregular 1 e irregular 2) e nos estados de impressão com filamento (CF) e impressão sem filamento (SF), dos sinais oriundos do testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ), foi realizada. A inclusão da análise das condições de impressão realizadas com o estado SF visa verificar se os picos de amplitude observados não são relacionados per si ao fenômeno de deposição do filamento, e sim se são resultantes das influências inseridas pelo acionamento dos motores de passo e pela movimentação dos eixos X, Y e Z nos sinais adquiridos pelos transdutores piezelétricos.

A análise dos picos de amplitude em frequência foi conduzida no domínio da frequência. De forma a permitir as análises no domínio da frequência, os espectros de frequência dos sinais brutos coletados por ambos os sensores EA e PZT foram calculados por meio da ferramenta FFT. Para tal, um janelamento *Hanning* foi empregado em cada sinal bruto antes do cálculo pela ferramenta FFT. O algoritmo de análise dos picos de amplitude em frequência está representado na Figura 3.18.

No domínio da frequência, a análise dos picos de amplitude em frequência foi realizada inicialmente na banda de frequência que compreende os valores entre 1 Hz e 20 kHz. Esta banda de frequência foi escolhida devido a ser esta a banda informada de trabalho pela Physical Acoustics® para o sensor EA modelo R.45I.

Figura 3.18 – Algoritmo de análise dos picos de amplitude em frequência



Fonte: Autor

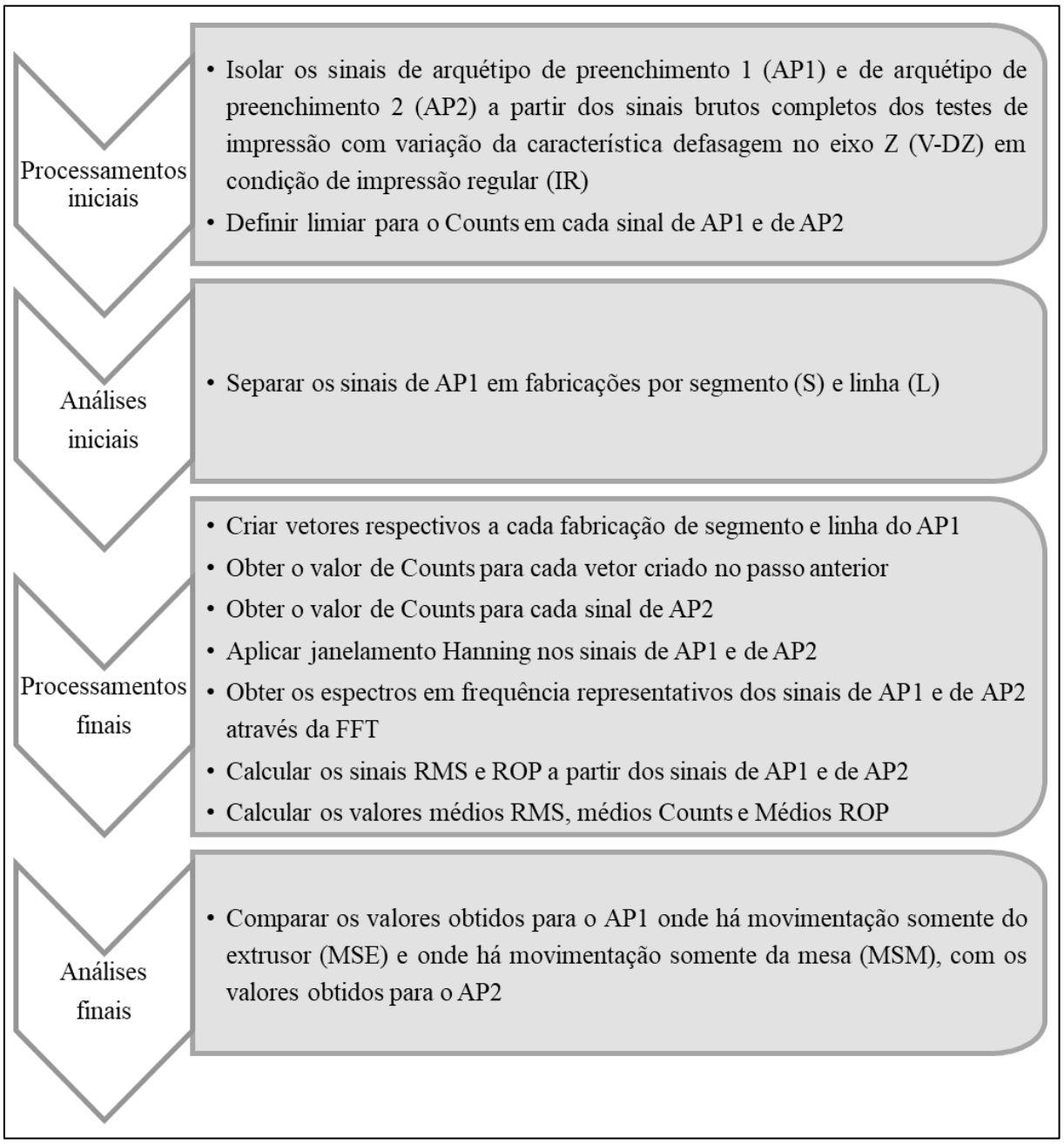
3.3.4 Análise dos arquétipos de preenchimento

A peça empregada nos testes de impressão possui dois arquétipos de preenchimento (AP) definidos. No AP1, existem segmentos e linhas onde a impressão do contorno se deu pela movimentação somente da mesa (MSM) ou pela movimentação somente do extrusor (MSE). Enquanto no AP2, a impressão das linhas de *raster* se dá pela movimentação combinada de ambos mesa de impressão e extrusor. Como, nos testes de impressão, os transdutores piezelétricos estão afixados na mesa de impressão, faz-se necessário verificar as diferenças nos sinais obtidos para os segmentos e linhas do AP1 e para os sinais adquiridos durante a impressão do AP2.

Os três sinais brutos adquiridos pelo sensor EA em condição de impressão regular (IR) com filamento (CF) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) foram analisados no domínio do tempo. Os sinais foram truncados, de maneira a permitir a separação das partes dos sinais referentes ao AP1 e as partes referentes ao AP2. Foram aplicadas as estatísticas Counts e RMS para permitir a análise das diferenças entre os sinais AP1 e AP2 no domínio do tempo. O cálculo do RMS empregou o valor de *Ti* encontrado no item 4.2. O limiar necessário para a ferramenta Counts foi definido como cinco vezes o valor médio da amplitude do sinal bruto contido em todo o período em análise. Este valor foi escolhido pois permite a definição de um limiar que atende as amplitudes das partes do sinal onde há AP1 e AP2. Para permitir a análise comparativa entre os AP, respeitando as devidas particularidades, foram empregadas as ferramentas Counts e RMS de maneira a obter valores médios destes resultados.

O algoritmo de análise dos arquétipos de preenchimento está representado na Figura 3.19. Em razão das repetições realizadas no teste, foi utilizada a técnica de análise cruzada para as análises no domínio do tempo e no domínio da frequência, da maneira como exposta na Figura 3.20.

Figura 3.19 – Algoritmo de análise dos arquétipos de preenchimento

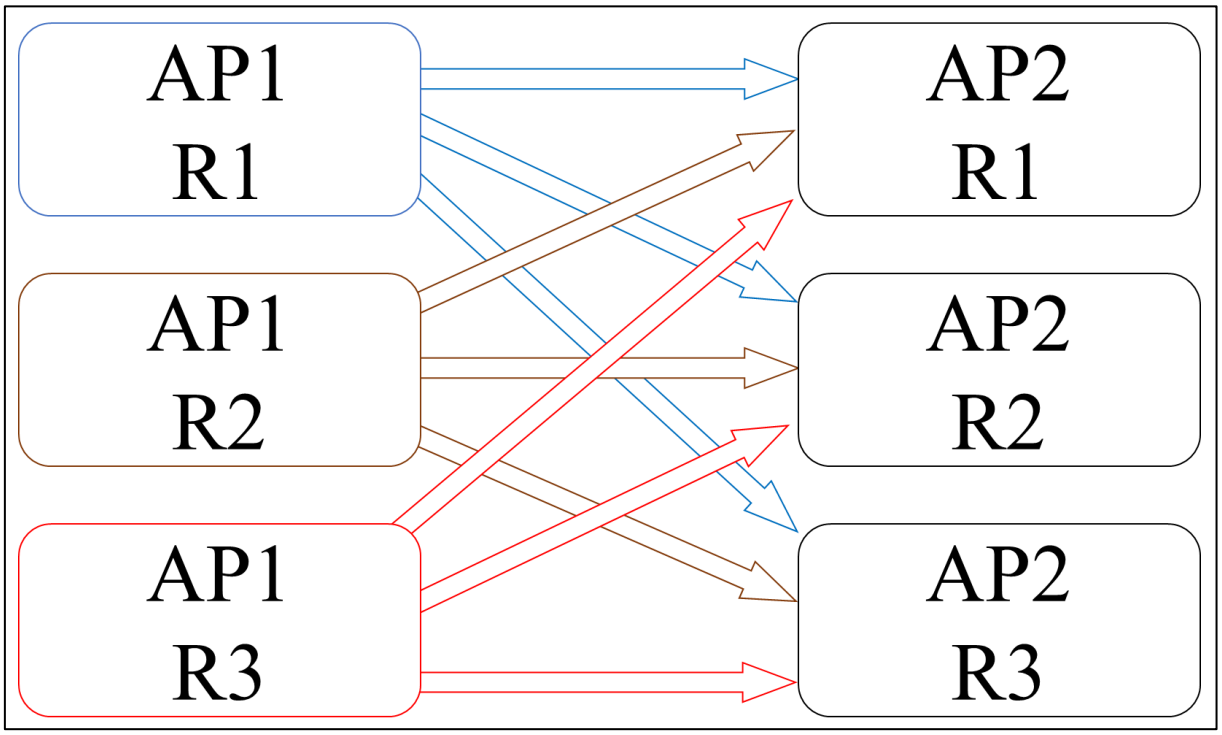


Fonte: Autor

A análise no domínio da frequência empregou a ferramenta estatística ROP. Os sinais brutos foram janelados em blocos com tamanho especificado pelo valor de tempo de integração (*Ti*) encontrado no item 4.2. Em cada bloco, um janelamento *Hanning* foi aplicado, seguido do cálculo do espectro de frequência pela FFT, e finalizando com o espectro de frequência obtidos servindo de base para o cálculo da ROP. Foram analisadas as bandas de frequência dos espectros dos sinais AP1 e AP2, em busca de regiões onde as amplitudes dos sinais possuem maior

diferença. Para permitir a análise comparativa entre os AP, respeitando as devidas particularidades, foram empregadas as ferramentas ROP de maneira a obter valores médios destes resultados.

Figura 3.20 – Representação da análise cruzada



Fonte: Autor

3.3.5 Análise dos sinais adquiridos dos testes de impressão

3.3.5.1 Análise nos sinais dos V-VI

Os sinais adquiridos nos testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão (V-VI) em estado com filamento (CF) foram estudados em ambos os domínios do tempo e da frequência. No domínio do tempo, os sinais brutos foram avaliados quanto a seus valores de amplitude e relacionados instantes de tempo.

De forma a permitir as análises no domínio da frequência, os espectros de frequência dos sinais brutos coletados nos V-VI foram obtidos por meio da ferramenta FFT. Para tal, um janelamento *Hanning* foi empregado antes do cálculo pela ferramenta FFT. No domínio da frequência, os espectros foram analisados, primeiramente, na banda de frequência que compreende os valores entre 1 Hz e 20 kHz. Esta banda de frequência foi escolhida devido a ser esta a banda de sensibilidade informada pela Physical Acoustics® para o sensor EA modelo R.45I.

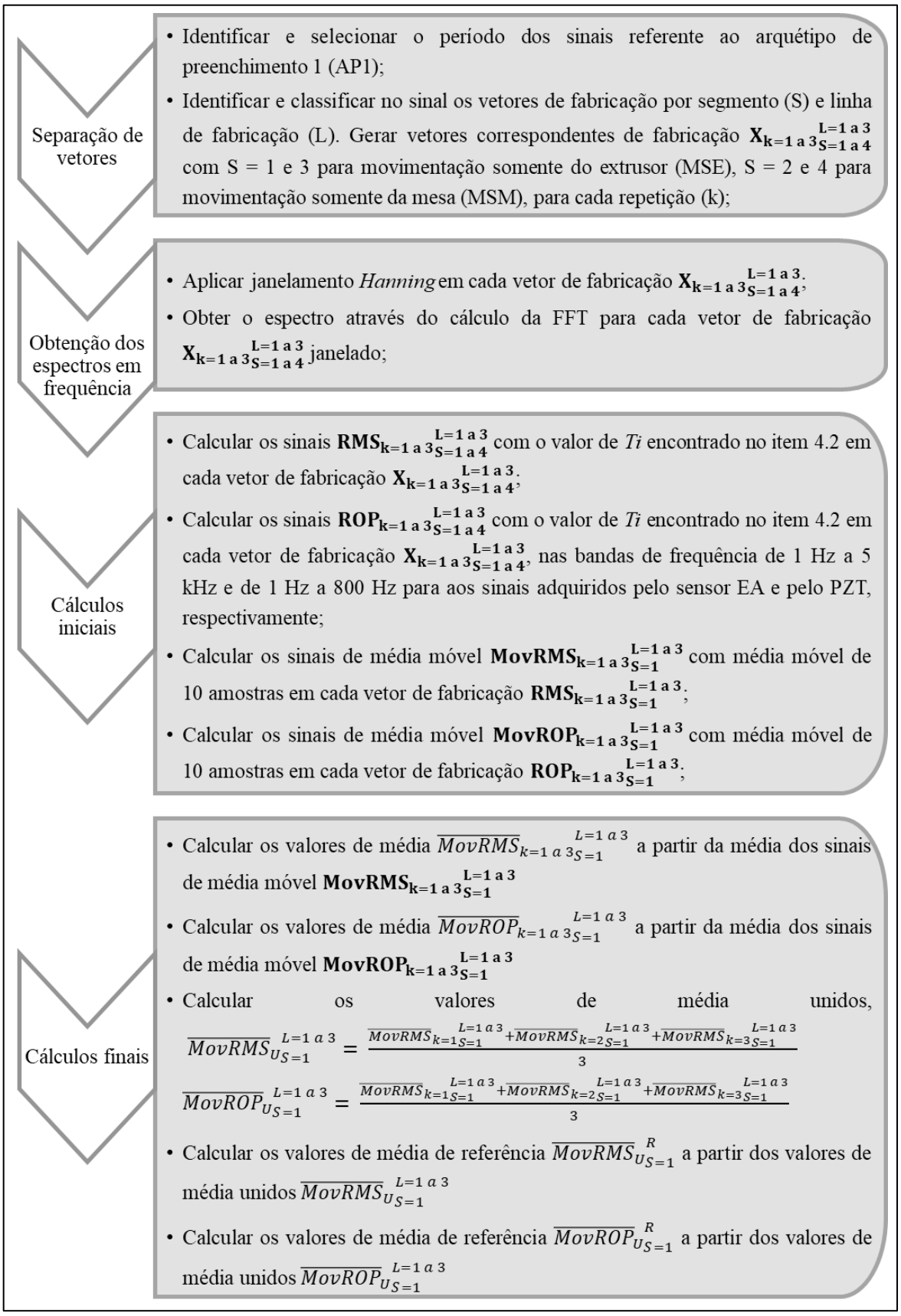
A análise foi conduzida de forma a verificar a viabilidade de estudos por meio de técnicas de processamento digital dos sinais adquiridos nos V-VI. Para tal, os sinais de diferentes condições de impressão foram comparados e seus atributos foram discutidos.

3.3.5.2 Análise nos sinais dos V-DZ

Os sinais adquiridos nos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) em estado com filamento (CF) foram estudados em ambos os domínios do tempo e da frequência. No domínio do tempo, em primeira análise, a repetibilidade dos sinais brutos adquiridos nos V-DZ por ambos os sensores EA e PZT foi avaliada. Em seguida, foram conduzidas as análises detalhadas no algoritmo representado na Figura 3.21, com o objetivo de obter-se valores médios de referência RMS e ROP das fabricações com MSE para as diferentes condições de impressão (regular, irregular 1 e irregular 2).

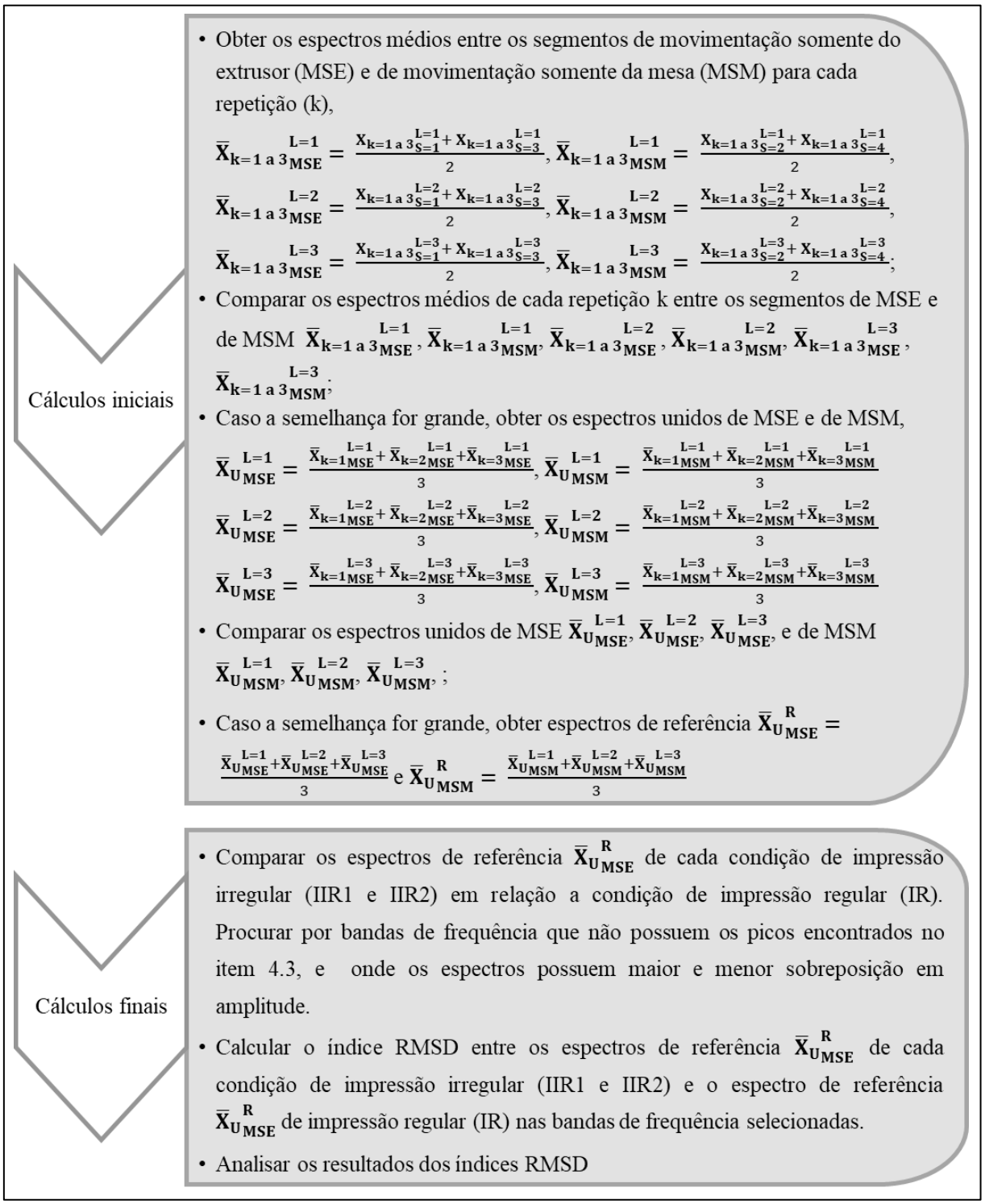
Outrossim, no domínio da frequência, foram conduzidas as análises detalhadas no algoritmo representado na Figura 3.22, com o objetivo de obter-se os índices RMSD em determinadas bandas de frequência representativos das fabricações com MSE para as diferentes condições de impressão irregulares (IIR1 e IIR2) em relação a condição de impressão regular (IR).

Figura 3.21 – Algoritmo de análise nos sinais do V-DZ no domínio do tempo



Fonte: Autor

Figura 3.22 – Algoritmo de análise nos sinais do V-DZ no domínio da frequência



Fonte: Autor

3.3.5.3 Classificação de dados

A classificação dos dados foi conduzida no aplicativo *Classification Learner*, que faz parte da *toolbox* de *machine learning and deep learning* do Matlab®. Como dados de entrada,

foram utilizados os valores de referência média RMS e média ROP de cada condição de impressão (irregular 1, regular e irregular 2) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) com movimentação somente do extrusor (MSE), obtidos da análise realizada no item 3.3.5.2.

Os dados foram alocados no Matlab® em uma matriz 3x3, onde nas duas primeiras colunas estavam, respectivamente, a média RMS e a média ROP, obtidas para cada condição de impressão. Na última coluna da matriz foi inserida a identificação numérica “1”, “2”, e “3’, referentes as condições de impressão. Inicialmente, por meio do aplicativo *Classification Learner*, a matriz de dados foi introduzida com as seguintes definições, conforme Tabela 6.

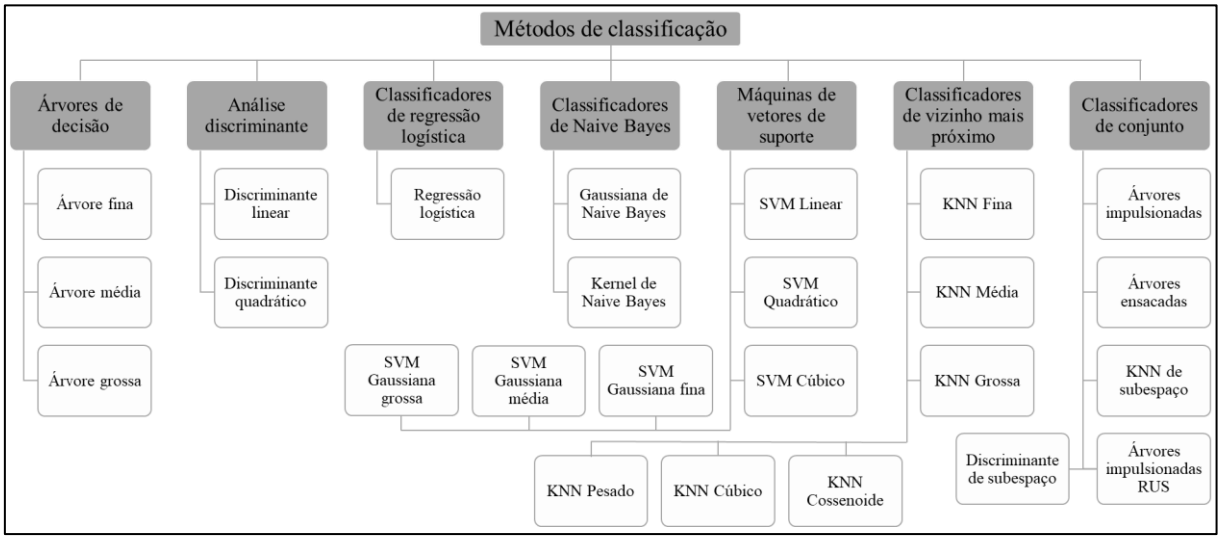
Tabela 6: Definições de introdução da matriz de dados para a classificação

Variável do *Workspace*	Usar colunas ou linhas como variáveis
Matriz de média RMS ou matriz de média ROP	Colunas
Coluna de resposta	Preditores
Coluna 3	Coluna 1 e coluna 2
Validação	Número de dobras de validação cruzada
Validação cruzada	3

Fonte: Autor

Após isso, por meio da utilização da ferramenta *train* com a opção dos tipos de modelo *all* ativa, diferentes métodos de classificação de dados foram testados para a obtenção de um modelo de classificação eficaz. A Figura 3.23 apresenta os métodos de classificação disponíveis no aplicativo *Classification Learner*, os quais foram avaliados neste estudo.

Figura 3.23 – Métodos de classificação disponíveis no aplicativo *Classification Leaner*

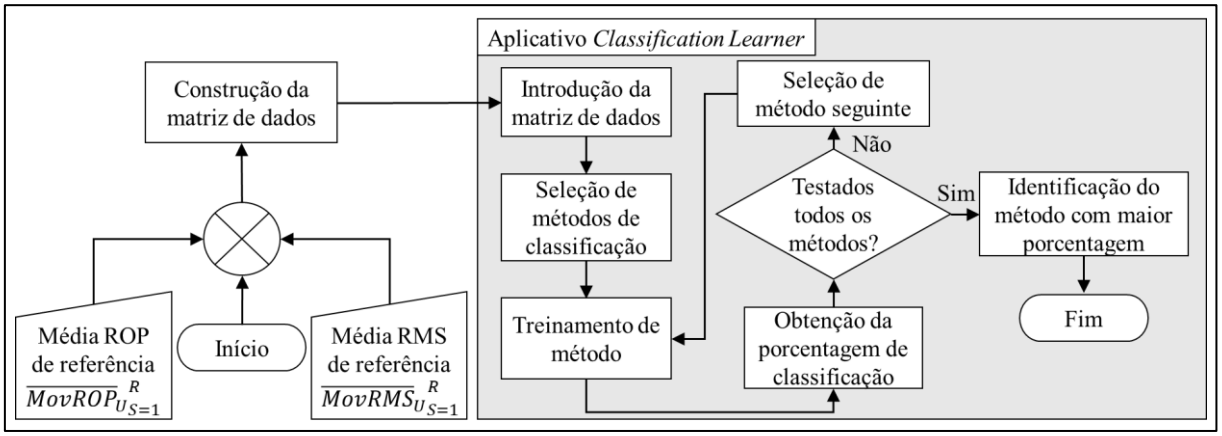


Fonte: Autor

Na ocasião em que um método de classificação apresentou melhor acurácia na classificação em relação aos demais, diferentes parâmetros do método de classificação foram testados

a fim de se verificar a possibilidade de aprimoramento do modelo de classificação obtido. A Figura 3.24 retrata, em forma de fluxograma, e de maneira detalhada, o procedimento de verificação dos métodos de classificação.

Figura 3.24 – Fluxograma detalhado do procedimento de verificação dos métodos de classificação



Fonte: Autor

CAPÍTULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais, sendo consideradas seis etapas. Inicialmente, são apresentados e discutidos os ensaios realizados para a verificação da resposta dos transdutores piezelétricos empregados no monitoramento. Na segunda etapa, são apresentados e discutidos os resultados da análise do tempo de integração utilizado no cálculo do RMS em sinais adquiridos do processo FDM. Na terceira etapa, são apresentados e discutidos os resultados da análise dos picos de amplitude em frequência dos sinais adquiridos nos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ). Na quarta etapa, são apresentados e discutidos os resultados da análise das diferenças entre os arquétipos de preenchimento (AP) existentes nos sinais adquiridos nos V-DZ. Na quinta etapa, são apresentados e discutidos os resultados da análise da inspeção visual realizada nas peças impressas. Por fim, na sexta etapa, são apresentados e discutidos os resultados da análise das diferentes condições de impressão.

4.1 RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DDA RESPOSTA DOS TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS

4.1.1 Verificação da repetibilidade dos sinais no domínio do tempo

4.1.1.1 Análise nos testes PLB em mesa isolada

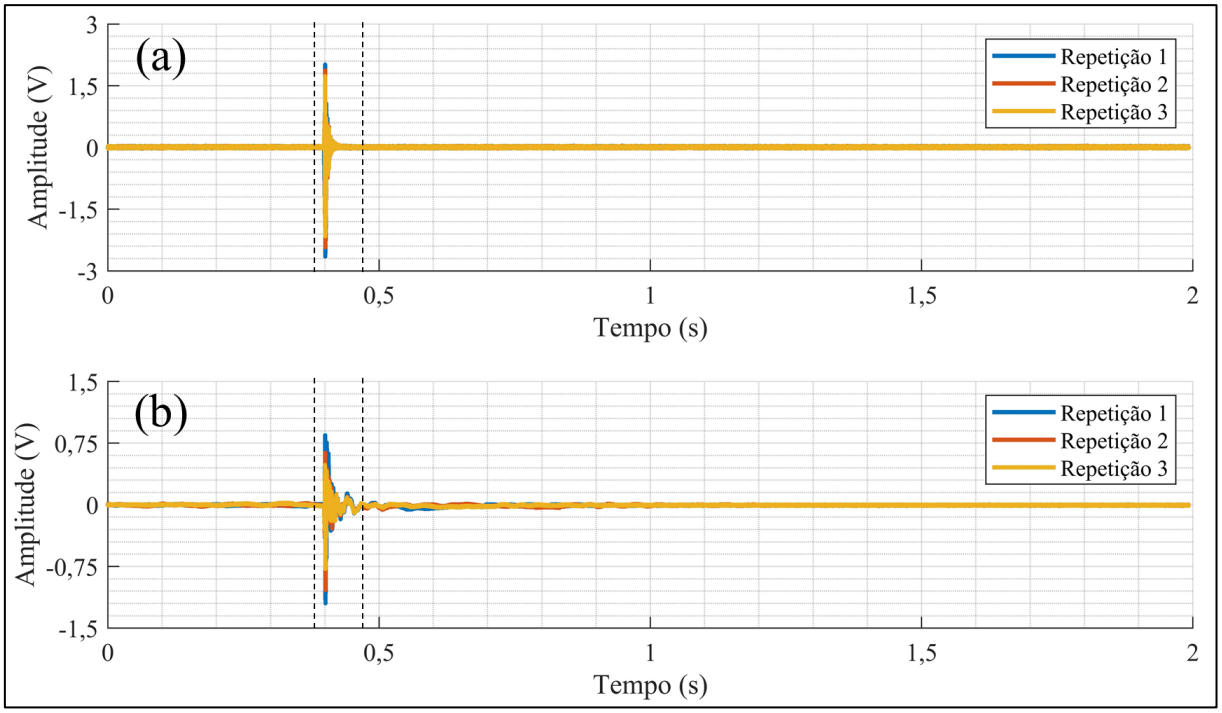
Os três sinais gerados pelo método PLB, e obtidos por ambos os sensores EA e PZT nos testes PLB em mesa isolada (PLB-I) estão representados na Figura 4.1. É possível observar na Figura 4.1 que, devido a utilização da ferramenta *trigger* no momento da aquisição dos dados no DAQ, as repetições dos sinais adquiridos por ambos os transdutores estão em sincronia.

Nota-se ainda que, para os sinais adquiridos pelo sensor EA, representados na Figura 4.1(a), as menores amplitudes observadas se encontram entre os valores de -1,8 volts (V) e -2,7 V. Enquanto as maiores amplitudes observadas nos sinais encontram-se entre os valores de 1,8 V e 2,1 V. Para os sinais adquiridos pelo PZT, representados na Figura 4.1(b), é possível observar que as menores amplitudes observadas nos sinais se encontram entre os valores de -0,75 V e -1,2 V. Enquanto as maiores amplitudes observadas nos sinais encontram-se entre os valores de 0,45 V e 0,90 V.

Outro aspecto visível nos sinais representados na Figura 4.1 é que a parte dos sinais que contém o PLB em si está compreendida entre os instantes 0,38 segundos (s) e 0,42 s, aproximadamente. Por esta razão, e de modo a facilitar a discussão de outros aspectos dos sinais PLB, tais sinais foram truncados de modo a só conter o período entre os instantes 0,38 s e 0,42

s, gerando assim uma aproximação da visualização representada na Figura 4.1. Os sinais truncados estão representados na Figura 4.2.

Figura 4.1 – Sinais obtidos para o PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT

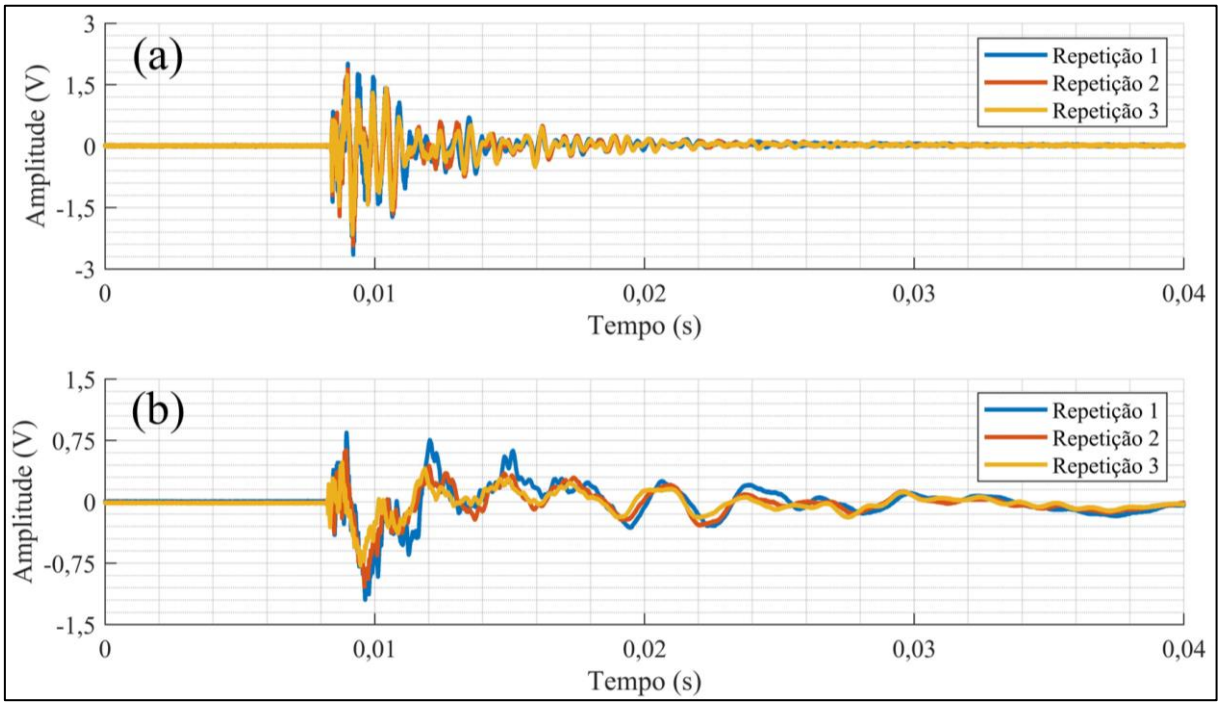


Fonte: Autor

A visualização aproximada nos sinais obtidos pelo sensor EA nos testes PLB em mesa isolada (PLB-I), representada na Figura 4.2(a), revela que os sinais PLB adquiridos apresentam repetibilidade. Isto é evidenciado com os sinais de repetição sobrepondo-se na maior parte do período observado entre o instante da quebra do grafite e do instante onde as ondas acústicas dissipam-se. É possível observar ainda variações de amplitude entre as repetições, o que pode ser atribuída a pequenas variações na força empregada ao quebrar o grafite.

Por outro lado, a visualização aproximada nos sinais obtidos pelo PZT nos PLB-I, representada na Figura 4.2(b), revela que os sinais PLB adquiridos apresentam repetibilidade, com os sinais de repetição sobrepondo-se na maior parte do período observado entre o instante da quebra do grafite e do instante onde as ondas acústicas dissipam-se. É possível observar ainda variações de amplitude entre a repetição 2 (R2) e repetição 3 (R3), o que pode ser atribuída a pequenas variações na força empregada ao quebrar o grafite. Para a repetição 1 (R1), no entanto, nota-se que entre os instantes 0,011 s e 0,016 s, aproximadamente, o sinal adquirido apresenta valores de amplitude que mais se diferem em relação as outras repetições.

Figura 4.2 – Aproximação nos sinais obtidos para o PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT



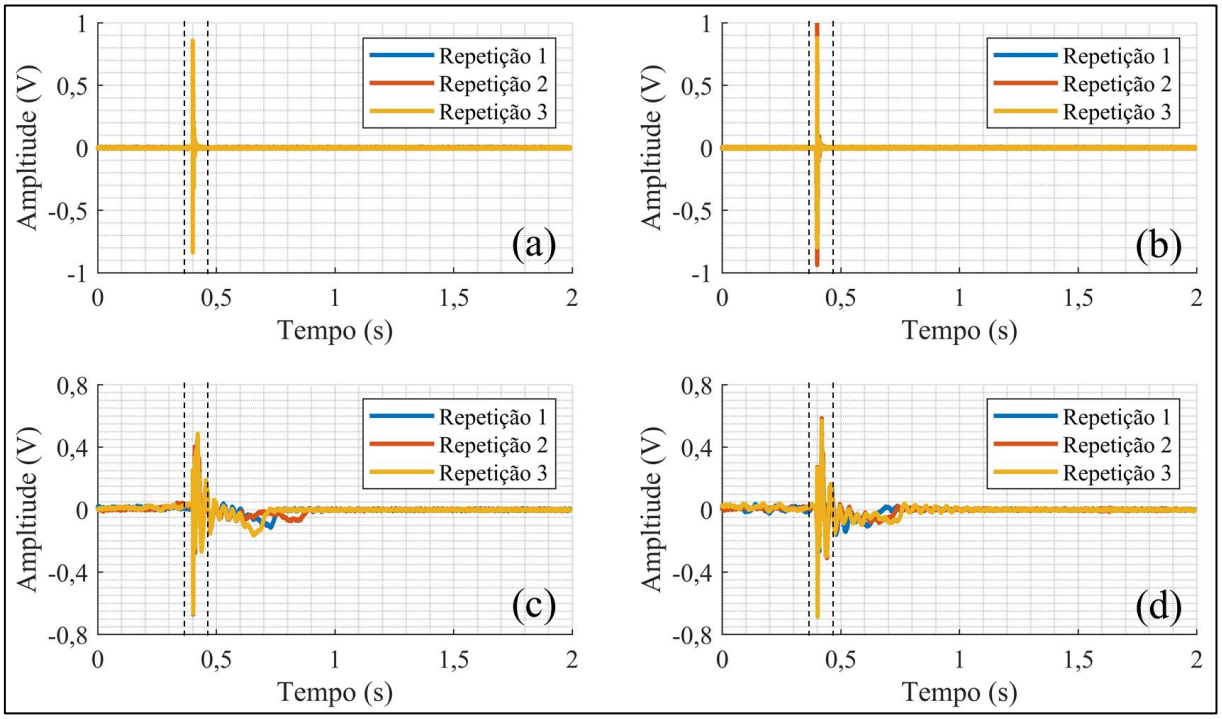
Fonte: Autor

4.1.1.2 Análise nos testes PLB em mesa aquecida

Os três sinais gerados pelo método PLB, e obtidos por ambos os sensores EA e PZT nos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) a temperatura de 25 ºC e a temperatura de 65 ºC estão representados na Figura 4.3. É possível observar que, devido a utilização da ferramenta *trigger* no momento da aquisição dos dados no DAQ, as repetições dos sinais obtidos por ambos os transdutores para as temperaturas de teste de 25 ºC e de 65 ºC estão em sincronia.

Nota-se ainda que, para os sinais adquiridos pelo sensor EA para a temperatura de 25 ºC, representados na Figura 4.3(a), as menores amplitudes observadas se encontram entre os valores de -0,7 V e -0,8 V. Enquanto as maiores amplitudes observadas nos sinais encontram-se entre os valores de 0,8 V e 0,9 V. para os sinais adquiridos pelo sensor EA para a temperatura de 65 ºC, representados na Figura 4.3(b), por outro lado, as menores amplitudes observadas se encontram entre os valores de -0,8 V e -1,0 V. Enquanto as maiores amplitudes observadas nos sinais encontram-se entre os valores de 0,8 V e 1,0 V. Desta maneira, uma das influências da variação de temperatura da resposta do sensor EA para os sinais representados nas Figura 4.3(a) e Figura 4.3(b) fica evidenciada na variação dos valores mínimos e máximos de amplitude nos sinais.

Figura 4.3 – Sinais obtidos para os PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC



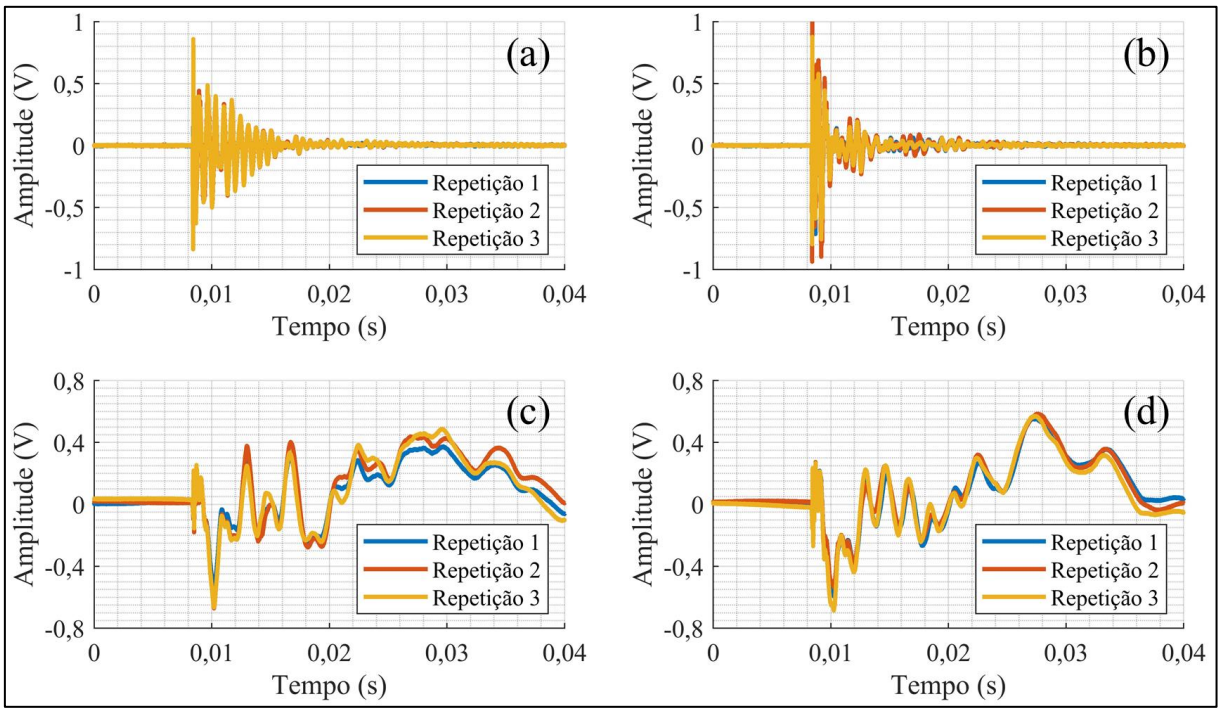
Fonte: Autor

Para os sinais adquiridos pelo PZT para a temperatura de 25 ºC, representados na Figura 4.3(c), as menores amplitudes observadas se encontram entre os valores de -0,65 V e -0,7 V. Enquanto as maiores amplitudes observadas nos sinais encontram-se entre os valores de 0,45 V e 0,5 V. Para os sinais adquiridos pelo PZT para a temperatura de 65 ºC, representados na Figura 4.3(d), por outro lado, as menores amplitudes observadas se encontram entre os valores de -0,65 V e -0,7 V. Enquanto as maiores amplitudes observadas nos sinais encontram-se entre os valores de 0,55 V e 0,6 V. Desta maneira, é verificada a influência da variação de temperatura da resposta do sensor EA para os sinais representados nas Figura 4.3(c) e Figura 4.3(d), evidenciada pela variação dos valores mínimos e máximos de amplitude nos sinais.

Outro aspecto visível nos sinais representados na Figura 4.3 é que a parte dos sinais que contém o PLB em si está compreendida entre os instantes 0,38 s e 0,42 s, aproximadamente. Por esta razão, e de modo a facilitar a discussão de outros aspectos dos sinais PLB, tais sinais foram truncados de modo a só conter o período entre os instantes 0,38 s e 0,42 s, gerando assim uma aproximação da visualização representada na Figura 4.3. Os sinais truncados estão representados na Figura 4.4. Os sinais obtidos nos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) para todas as temperaturas testadas, e truncados entre os instantes 0,38 s e 0,42 s estão representados no APÊNDICE III, na Figura 6.1 e Figura 6.2 para os sinais adquiridos pelo sensor EA e PZT, respectivamente.

A visualização aproximada nos sinais obtidos pelo sensor EA nos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) a temperatura de 25 ºC, representada na Figura 4.4(a), revela que os sinais obtidos nos PLB-A apresentam repetibilidade, com os sinais de repetição sobrepondo-se em quase todo o período observado entre o instante da quebra do grafite e do instante onde as ondas acústicas dissipam-se. É possível observar ainda pequenas variações de amplitude entre as repetições, o que pode ser atribuída a pequenas variações na força empregada ao quebrar o grafite.

Figura 4.4 – Aproximação nos sinais obtidos nos PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC



Fonte: Autor

A visualização aproximada nos sinais obtidos pelo sensor EA nos PLB-A a temperatura de 65 ºC, representada na Figura 4.4(b), por outro lado, revela que os sinais PLB apresentam repetibilidade, com os sinais de repetição sobrepondo-se em quase todo o período observado entre o instante da quebra do grafite e do instante onde as ondas acústicas dissipam-se. É possível observar ainda variações de amplitude entre a R1 e R3, o que pode ser atribuída a pequenas variações na força empregada ao quebrar o grafite. Para a R2, no entanto, nota-se que entre os instantes 0,016 s e 0,018 s, aproximadamente, o sinal adquirido apresenta valores de amplitude que mais se diferem em relação as outras repetições.

As visualizações aproximadas obtidas nos sinais adquiridos pelo sensor EA nos PLB-A as temperaturas de 25 ºC e 65 ºC, representados na Figura 4.4(a) e Figura 4.4(b), respectivamente, revelam outra influência da variação da temperatura da resposta do sensor. Entre os

instantes 0,008 s e 0,010 s, os sinais adquiridos em ambas as condições apresentam comportamento similar. No entanto, para o restante do período observado, os sinais adquiridos a temperatura de 65 ºC apresentam comportamento que se difere grandemente dos sinais adquiridos a temperatura de 25 ºC.

A visualização aproximada nos sinais obtidos pelo PZT nos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) a temperatura de 25 ºC, representada na Figura 4.4(c), revela que os sinais PLB apresentam repetibilidade, com os sinais de repetição sobrepondo-se em quase todo o período observado entre o instante da quebra do grafite e do instante onde as ondas acústicas dissipam-se. É possível observar ainda pequenas variações de amplitude entre as repetições, mais evidenciadas entre os instantes 0,02 s e 0,04 s, o que pode ser atribuída a pequenas variações na força empregada ao quebrar o grafite.

A visualização aproximada nos sinais obtidos pelo PZT nos PLB-A a temperatura de 65 ºC, representada na Figura 4.4(d), por outro lado, revela que os sinais PLB apresentam repetibilidade, com os sinais de repetição sobrepondo-se em quase todo o período observado entre o instante da quebra do grafite e do instante onde as ondas acústicas dissipam-se. É possível observar ainda pequenas variações de amplitude entre os sinais, o que pode ser atribuída a pequenas variações na força empregada ao quebrar o grafite.

As visualizações aproximadas obtidas nos sinais adquiridos pelo PZT nos PLB-A as temperaturas de 25 ºC e 65 ºC, representados na Figura 4.4(a) e Figura 4.4(b), respectivamente, revelam outra influência da variação da temperatura da resposta do PZT. Entre os instantes 0,008 s e 0,011 s, os sinais adquiridos em ambas as condições apresentam comportamento similar. No entanto, para o restante do período observado, os sinais adquiridos a temperatura de 65 ºC apresentam comportamento que se difere grandemente dos sinais adquiridos a temperatura de 25 ºC.

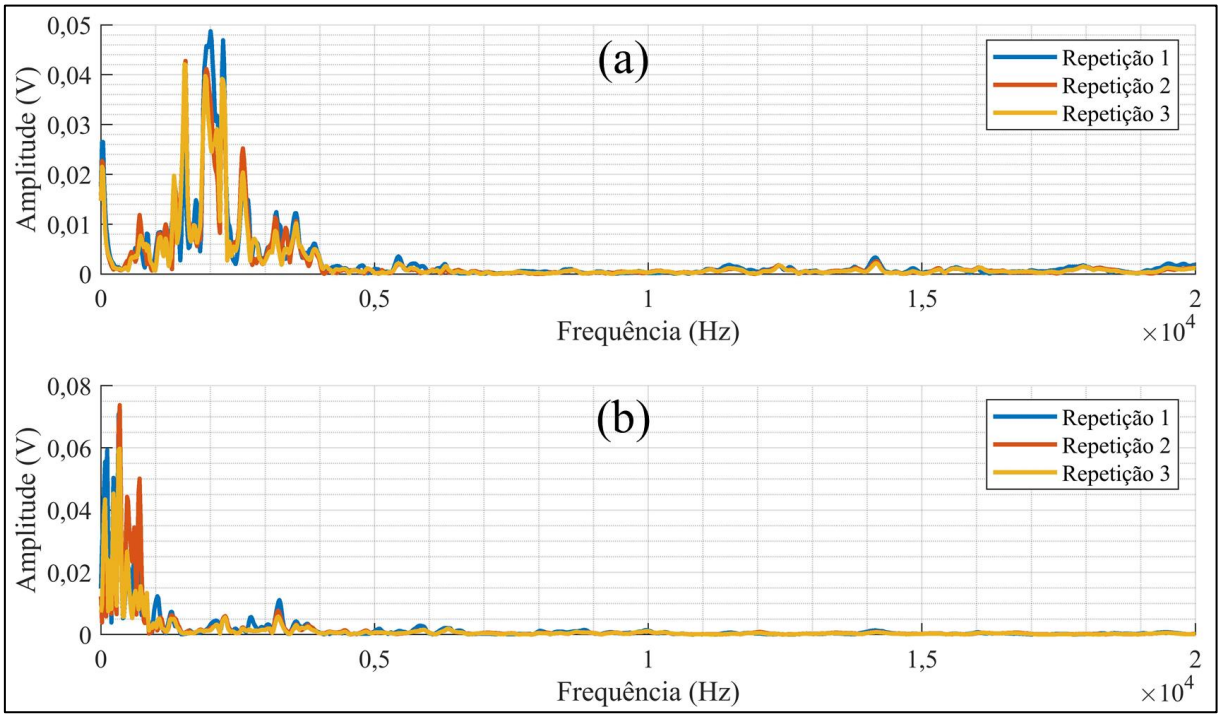
4.1.2 Verificação da repetibilidade dos sinais no domínio da frequência

4.1.2.1 Análise nos testes PLB em mesa isolada

Os espectros de frequência dos sinais referentes aos testes PLB em mesa isolada (PLB-I) estão representados na Figura 4.5. A análise da repetibilidade nos espectros de frequência dos sinais adquiridos pelo sensor EA, representados na Figura 4.5(a), revela que existe repetibilidade caracterizada pela sobreposição em amplitude dos espectros. Os espectros de frequência relativos a R2 e a R3 estão sobrepostos na maior parte das frequências contidas na banda observada, apresentando valores de amplitude máximos entre 0,42 V e 0,44 V. O espectro re-

lativo a R1, por outro lado, apresenta sobreposição com os espectros relativos as outras repetições em quase todas as frequências contidas na banda observada, salvo a banda do espectro diretamente anterior e sequente a 1 kHz, apresentando nesta um valor máximo de amplitude próximo a 0,48 V, superior aos verificados nas outras repetições.

Figura 4.5 – Espectros de frequência dos sinais obtidos para os PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT



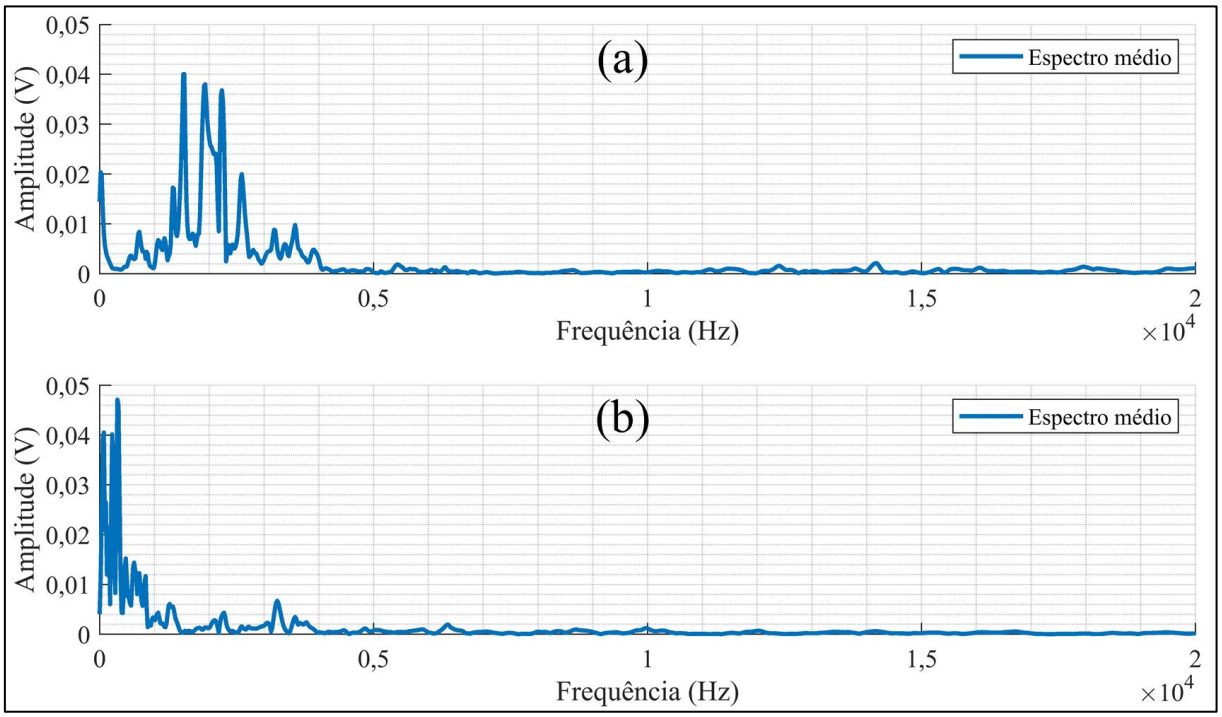
Fonte: Autor

Por outro lado, a análise da repetibilidade nos espectros de frequência dos sinais adquiridos nos PLB-I pelo PZT, representados na Figura 4.5(b), revela que existe repetibilidade caracterizada pela sobreposição em amplitude dos espectros. Os espectros de frequência relativos a R1 e a R3 estão sobrepostos na maior parte das frequências contidas na banda observada, salvo a banda diretamente sequente a 1 Hz, apresentando valores de amplitude máximos entre 0,060 V e 0,068 V. O espectro relativo a R2, por outro lado, apresenta sobreposição com os espectros relativos as outras repetições em quase todas as frequências contidas na banda observada, salvo a parte do espectro relativa à banda que compreende entre 500 Hz e 700 Hz, apresentando nesta um valor máximo de amplitude próximo a 0,046 V, superior aos verificados nas outras repetições.

Os espectros médios obtidos entre as repetições estão representados na Figura 4.6. O espectro representativo da resposta obtida pelo sensor EA para os testes PLB em mesa isolada (PLB-I) está representado na Figura 4.6(a). A análise neste espectro revela que da resposta obtida pelo sensor EA está compreendida, aproximadamente, na banda de 1 Hz a 5 kHz, e

apresenta valor máximo próximo a 0,04 V. Por esta razão, em verificações seguintes que utilizem o espectro de frequência representativo da resposta obtida pelo sensor EA para a condição de PLB-I, uma aproximação na banda de espectro que compreende as frequências de 1 Hz a 5 kHz foi realizada.

Figura 4.6 – Espectros de frequência médios dos sinais obtidos para os PLB-I. (a) Sensor EA, (b) PZT



Fonte: Autor

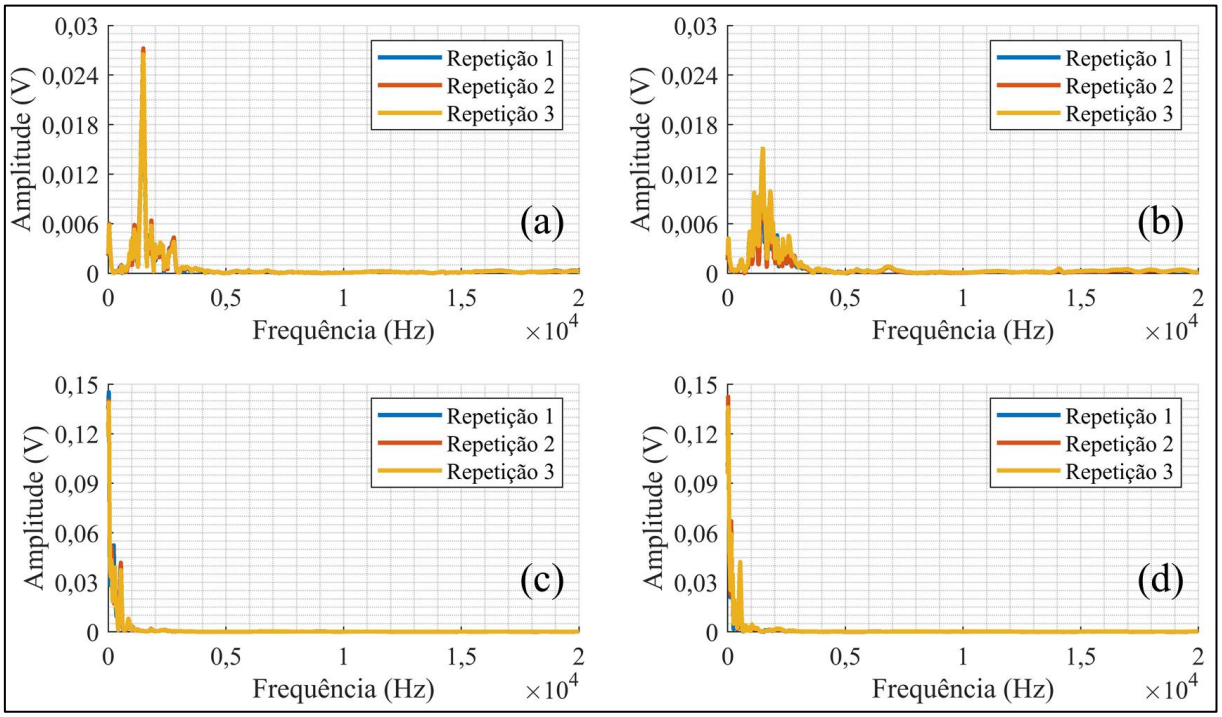
O espectro representativo da resposta obtida pelo PZT para os PLB-I está representado na Figura 4.6(b). A análise neste espectro revela que da resposta obtida pelo PZT está compreendida, aproximadamente, na banda de 1 Hz a 4 kHz, e apresenta valor máximo próximo a 0,048 V. Por esta razão, em verificações seguintes que utilizem o espectro de frequência representativo da resposta obtida pelo PZT para a condição de PLB-I, uma aproximação na banda de espectro que compreende as frequências de 1 Hz a 4 kHz foi realizada.

4.1.2.2 Análise nos testes PLB em mesa aquecida

Os espectros de frequência dos sinais referentes aos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) as temperaturas de 25 ºC e 65 ºC estão representados na Figura 4.7. Os espectros de frequência dos sinais referentes aos PLB-A para todas as temperaturas testadas estão representados no APÊNDICE IV, na Figura 6.3 e Figura 6.5 para os sinais adquiridos pelo sensor EA e PZT, respectivamente.

A análise da repetibilidade nos espectros de frequência dos sinais adquiridos pelo sensor EA nos PLB-A a temperatura de 25 ºC, representados na Figura 4.7(a), revela que existe repetibilidade caracterizada pela sobreposição em amplitude dos espectros. Os espectros de frequência relativos às R1, R2 e R3 estão sobrepostos na maior parte das frequências contidas na banda observada, apresentando valores máximos de amplitude próximos a 0,027 V.

Figura 4.7 – Espectros de frequência dos sinais obtidos para os PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC



Fonte: Autor

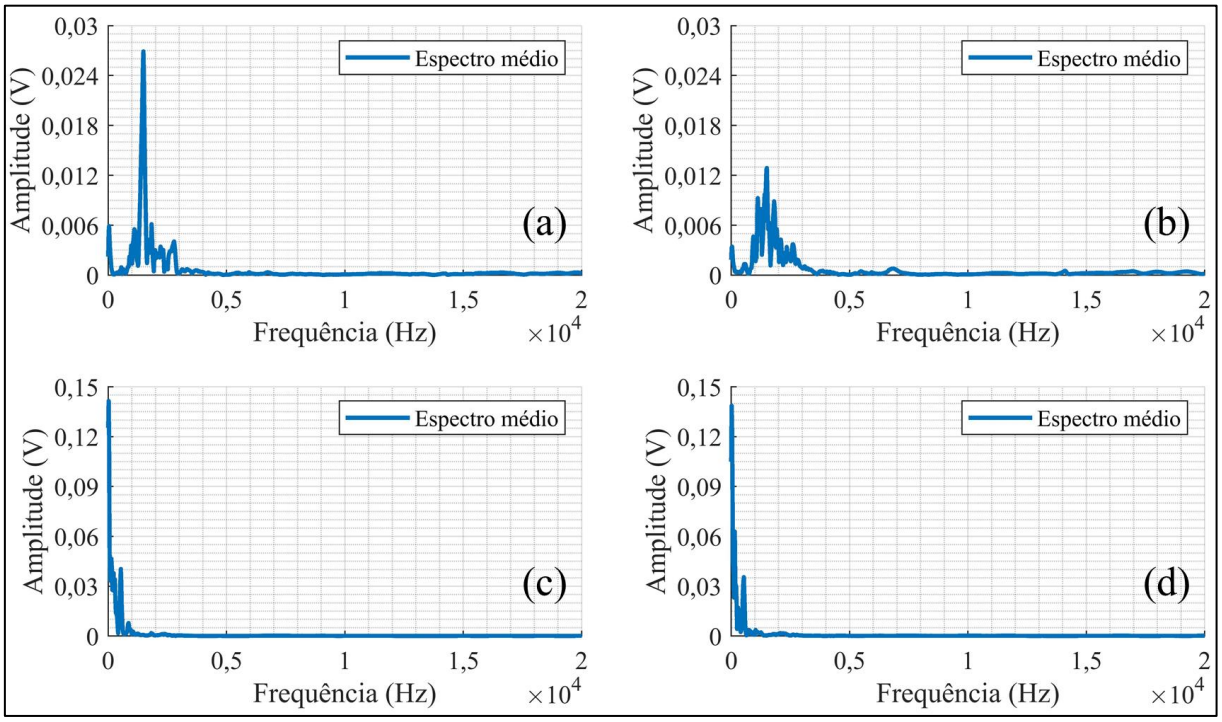
A análise da repetibilidade nos espectros de frequência dos sinais adquiridos pelo sensor EA nos PLB-A a temperatura de 65 ºC, representados na Figura 4.7(b), revela que existe repetibilidade caracterizada pela sobreposição em amplitude dos espectros. Os espectros de frequência relativos às R1, R2 e R3 estão sobrepostos na maior parte das frequências contidas na banda observada, apresentando valores de amplitude máximos próximos a 0,015 V. O espectro relativo à R2, no entanto, apresenta para a banda de frequências entre 1 kHz e 3 kHz valores em amplitude inferiores às encontradas nas outras repetições.

Por outro lado, a análise da repetibilidade nos espectros de frequência dos sinais adquiridos pelo PZT nos PLB-A a temperatura de 25 ºC, representados na Figura 4.7(c), revela que existe repetibilidade caracterizada pela sobreposição em amplitude dos espectros. Os espectros de frequência relativos às R1, R2 e R3 estão sobrepostos na maior parte das frequências contidas na banda observada, apresentando valores de amplitude máximos entre 0,1425 V e 0,15 V.

A análise da repetibilidade nos espectros de frequência dos sinais adquiridos pelo sensor EA nos testes PLB em mesa aquecida (PLB-A) a temperatura de 65 ºC, representados na Figura 4.7(b), revela que existe repetibilidade caracterizada pela sobreposição em amplitude dos espectros. Os espectros de frequência relativos às R1, R2 e R3 estão sobrepostos na maior parte das frequências contidas na banda observada, apresentando valores de amplitude máximos entre 0,1425 V e 0,15 V.

Os espectros médios obtidos entre as repetições estão representados na Figura 4.8. Os espectros de frequência médios dos sinais referentes aos PLB-A para todas as temperaturas testadas estão representados no APÊNDICE IV, nas Figura 6.4 e Figura 6.7, e nas Figura 6.6 e Figura 6.8 para os sinais adquiridos pelo sensor EA e PZT, respectivamente.

Figura 4.8 – Espectros de frequência médios dos sinais obtidos no PLB-A. (a) Sensor EA – 25 ºC, (b) Sensor EA – 65 ºC, (c) PZT – 25 ºC, (d) PZT – 65 ºC



Fonte: Autor

O espectro representativo da resposta obtida pelo sensor EA para os PLB-A a 25 ºC está representado na Figura 4.8(a). A análise neste espectro revela que da resposta obtida pelo sensor EA está compreendida, aproximadamente, na banda de 1 Hz a 5 kHz, e apresenta valor máximo de amplitude próximo a 0,02625 V. Em seguida, a análise do espectro representativo da resposta obtida pelo sensor EA para os PLB-A a 65 ºC, representado na Figura 4.8(b), revela que da resposta obtida pelo sensor EA está compreendida, aproximadamente, na banda de 1 Hz a 5 kHz, e apresenta valor máximo de amplitude próximo a 0,01275 V.

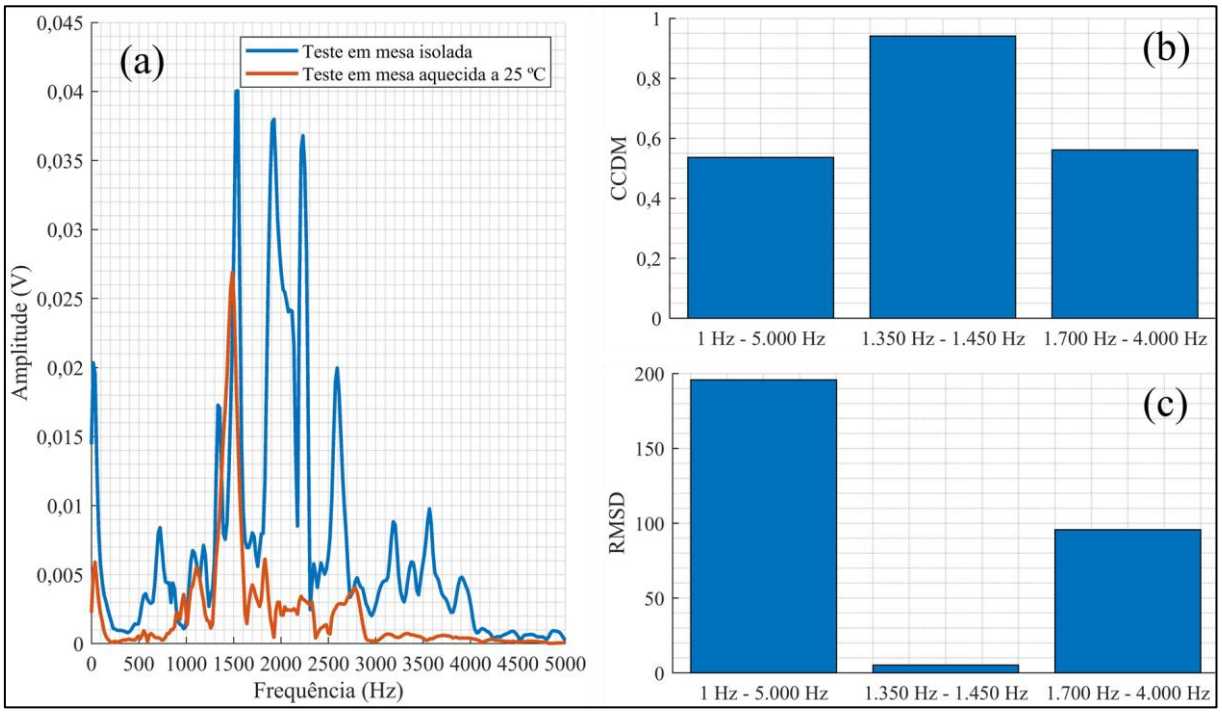
O espectro representativo da resposta obtida pelo PZT para os PLB-A a 25 ºC está representado na Figura 4.8(c). A análise neste espectro revela que da resposta obtida pelo sensor EA está compreendida, aproximadamente, na banda de 1 Hz a 1,5 kHz, e apresenta valor máximo de amplitude próximo a 0,13875 V. Por outro lado, o espectro representativo da resposta obtida pelo PZT para os PLB-A a 65 ºC está representado na Figura 4.8(d). A análise neste espectro revela que da resposta obtida pelo PZT está compreendida, aproximadamente, na banda de 1 Hz a 1,5 kHz, e apresenta valor máximo de amplitude próximo a 0,13875 V.

4.1.3 Verificação da influência da fixação da mesa

4.1.3.1 Análise nos espectros adquiridos pelo sensor EA

Para permitir a análise da influência da fixação da mesa de impressão no conjunto da impressora da resposta adquirida pelo sensor EA, os espectros médios representativos das condições de teste PLB em mesa isolada (PLB-I) e de teste PLB em mesa aquecida (PLB-A) a 25 ºC foram comparados. A Figura 4.9(a) apresenta os espectros médios representados na banda de frequência de 0 Hz a 5 kHz. Esta foi verificada no item 4.1.2 como sendo a banda em que o espectro de frequência apresenta valores em amplitude significativos.

Figura 4.9 – Verificação da influência da fixação da mesa nos sinais de EA. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência



Fonte: Autor

A análise realizada nos espectros médios representados na Figura 4.9(a), revela que estes apresentam valores em amplitude e comportamentos em frequência majoritariamente distintos. Entre a banda de 1 Hz até aproximadamente 400 Hz, os espectros médios apresentam comportamentos similares em frequência, porém, com visível atenuação das amplitudes para o espectro representativo dos PLB-A a 25 ºC. Essa atenuação em amplitude no espectro é também visível em quase todas as outras frequências observadas, salvo entre as bandas de frequência de 900 Hz a 1.600 Hz, 2.700 Hz a 2.900 Hz e 4.000 Hz a 5.000 Hz, onde os espectros apresentam valores em amplitude contíguos.

A comparação entre os espectros representativos das condições de PLB-I e de PLB-A a 25 ºC por meio dos índices de dano RMSD e CCDM foi realizada nas bandas de frequência de 1 Hz a 5.000 Hz, 1.350 Hz a 1.450 Hz e 1.700 Hz a 4.000 Hz. A primeira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1 Hz a 5.000 Hz, representa o segmento dos espectros de frequência em que a análise da influência da fixação da mesa da resposta do sensor EA está sendo investigada. A segunda banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1.350 Hz a 1.450 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a variação da amplitude entre os espectros é menor. Por fim, a terceira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1.700 Hz a 4.000 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a alteração da amplitude entre os espectros é maior.

O resultado do cálculo do índice CCDM entre os espectros de frequência para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.9(b). O CCDM calculado de aproximadamente 0,54 para a banda de 1 Hz a 5.000 Hz evidencia que a influência da fixação da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo sensor EA é presente ao longo do espectro observado, apresentando variações e deslocamentos entre as frequências. Para a banda de 1.350 Hz a 1.450 Hz, por outro lado, o CCDM calculado de aproximadamente 0,96 revela que nesta banda a influência da fixação da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo sensor EA é maior, acentuada pelas variações e deslocamentos entre as frequências contidas na banda. Por fim, o CCDM calculado de aproximadamente 0,56 para a banda de 1.700 Hz a 4.000 Hz revela que nesta banda a influência da fixação da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelos sensores é ligeiramente maior do que no restante do espectro observado.

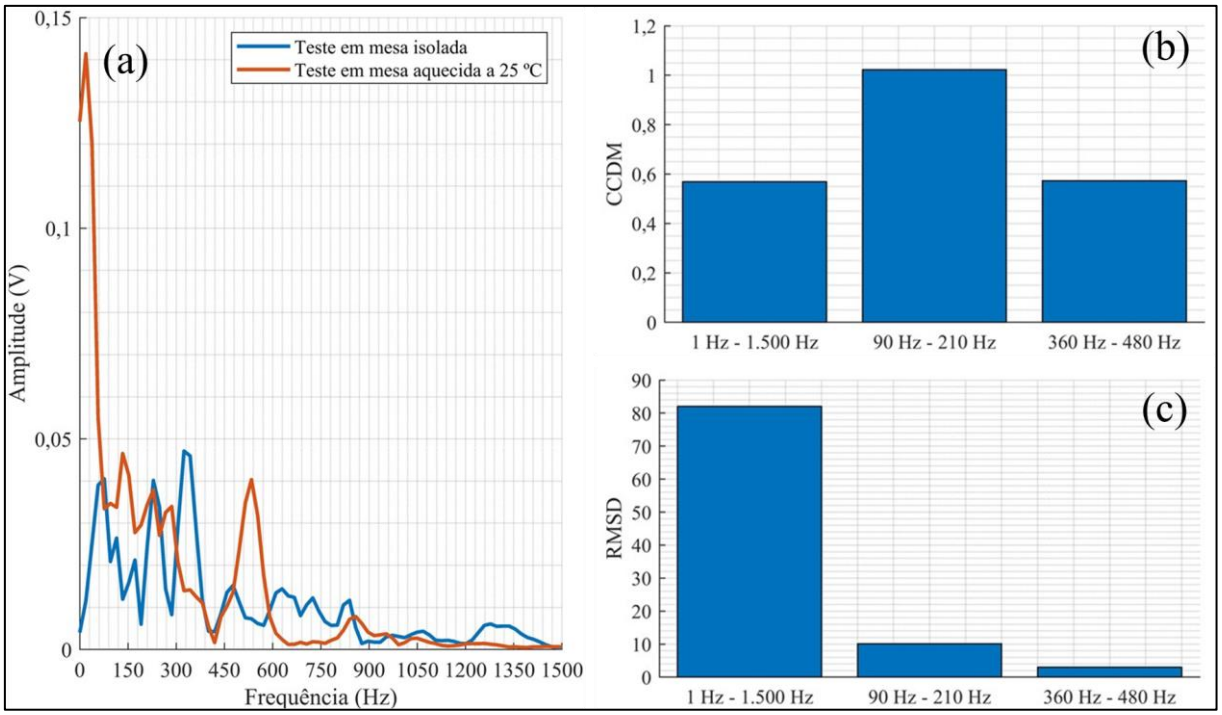
O resultado do cálculo do índice RMSD entre os espectros de frequência para verificação da influência da fixação da mesa nos sinais de EA para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.9(c). Para a banda de 1 Hz a 5.000 Hz, que compreende o espectro observado, o RMSD calculado de aproximadamente 195 indica que a fixação da mesa confere grande variação da resposta do sensor EA, representado pela atenuação nas

amplitudes observadas. O RMSD calculado de aproximadamente 5 indica que a influência da fixação da mesa da resposta do sensor EA, representada pela atenuação nas amplitudes observadas, é muito menor na banda do espectro entre 1.350 Hz e 1.450 Hz. Na banda de 1.700 Hz a 4.000 Hz, no entanto, a influência da fixação na mesa da resposta do sensor EA, representada pela atenuação nas amplitudes observadas, é significativa, conforme revela o RMSD calculado de aproximadamente 95.

4.1.3.2 Análise nos espectros adquiridos pelo PZT

Para permitir a análise da influência da fixação da mesa de impressão no conjunto da impressora da resposta adquirida pelo PZT, os espectros médios representativos das condições de teste PLB em mesa isolada (PLB-I) e de teste PLB em mesa aquecida (PLB-A) a 25 ºC foram comparados. A Figura 4.10(a) apresenta os espectros médios representados na banda de frequência de 0 Hz a 1,5 kHz. Esta foi verificada no item 4.1.2 como sendo a banda em que o espectro de frequência apresenta valores em amplitude significativos.

Figura 4.10 – Verificação da influência da fixação da mesa nos sinais de PZT. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência



Fonte: Autor

A análise realizada nos espectros médios representados na Figura 4.10(a), revela que estes apresentam valores em amplitude e comportamentos em frequência majoritariamente distintos. Na banda que compreende os valores em frequência de 1 Hz a 300 Hz, é perceptível verificar uma acessão geral dos valores em amplitude quando da fixação da mesa no conjunto

da impressora, representada no espectro representativo dos PLB-A a 25 ºC. Essa conjuntura, no entanto, altera-se na banda que compreende os valores de 300 Hz a 390 Hz, onde uma atenuação nos valores em amplitude quando da fixação da mesa no conjunto da impressora é perceptível. Essa variação no comportamento dos espectros de frequência continua ocorrendo no restante do espectro observado, com bandas onde existe uma atenuação em amplitude, e bandas onde verifica-se um acrescentamento em amplitude. Salvo nas bandas de 60 Hz a 90 Hz, 200 Hz a 220 Hz, 390 Hz a 480 Hz, 840 a 1.230 Hz e 1.410 Hz a 1.500 Hz, onde as amplitudes verificadas nos espectros são contíguas.

A comparação entre os espectros representativos das condições de PLB-I e de PLB-A a 25 ºC por meio dos índices de dano RMSD e CCDM foi realizada nas bandas de frequência de 1 Hz a 1.500 Hz, 90 Hz a 120 Hz e 360 Hz a 480 Hz. A primeira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1 Hz a 1.500 Hz, representa o segmento dos espectros de frequência em que a análise da influência da fixação da mesa da resposta do PZT está sendo investigada. A segunda banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 90 Hz a 210 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a variação da amplitude entre os espectros é maior. Por fim, a terceira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 360 Hz a 480 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a alteração da amplitude entre os espectros é menor.

O resultado do cálculo do índice CCDM entre os espectros de frequência para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.10(b). O CCDM calculado de aproximadamente 0,58 para a banda de 1 Hz a 1.500 Hz evidencia que a influência da fixação da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo PZT é presente ao longo do espectro observado, apresentando variações e deslocamentos entre as frequências. Para a banda de 90 Hz a 210 Hz, por outro lado, o CCDM calculado de aproximadamente 1,2 revela que nesta banda a influência da fixação da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo PZT é maior, acentuada pelas variações e deslocamentos entre as frequências contidas na banda. Por fim, o CCDM calculado de aproximadamente 0,58 para a banda de 360 Hz a 480 Hz revela que nesta banda a influência da fixação da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelos sensores é equivalente a ressaltada no restante do espectro observado, apresentando variações e deslocamentos entre as frequências.

O resultado do cálculo do índice RMSD entre os espectros de frequência para verificação da influência da fixação da mesa nos sinais adquiridos pelo PZT para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.10(c). Para a banda de 1 Hz a 1.500 Hz, que compreende o espectro observado, o RMSD calculado de aproximadamente 82 indica que a fixação da mesa confere grande variação da resposta do PZT, representado pela atenuação

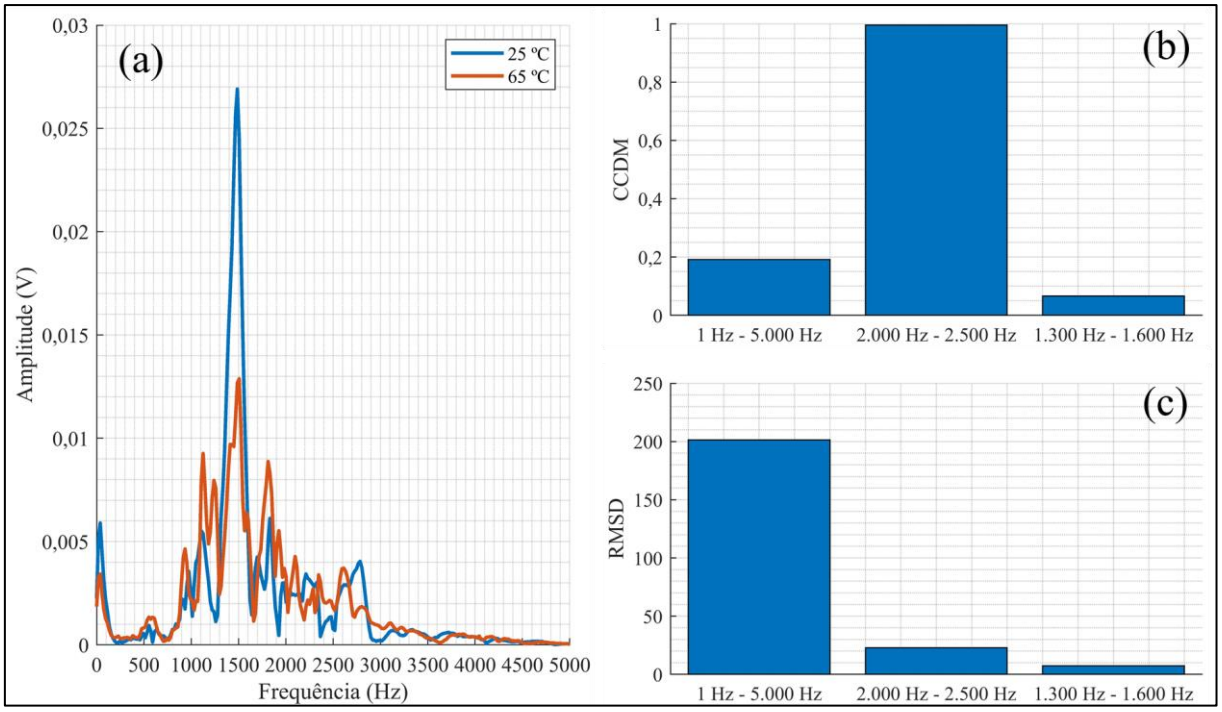
nas amplitudes observadas. O RMSD calculado de aproximadamente 10 indica que a influência da fixação da mesa da resposta do PZT, representada pelo acrescentamento nas amplitudes observadas, é menor na banda do espectro entre 90 Hz e 210 Hz. Na banda de 360 Hz a 480 Hz, no entanto, a influência da fixação na mesa da resposta do PZT, representada pela proximidade entre as amplitudes observadas, é muito pequena, conforme revela o RMSD calculado de aproximadamente 3.

4.1.4 Verificação da influência da temperatura

4.1.4.1 Análise nos espectros adquiridos pelo sensor EA

Para permitir a análise da influência da temperatura da resposta adquirida pelo sensor EA, os espectros médios representativos das condições de teste PLB em mesa aquecida (PLB-A) a 25 ºC e de PLB-A a 65 ºC foram comparados. A Figura 4.11(a) apresenta os espectros médios representados na banda de frequência de 0 Hz a 5 kHz. Esta foi verificada no item 4.1.2 como sendo a banda em que o espectro de frequência apresenta valores em amplitude significativos.

Figura 4.11 – Verificação da influência da temperatura da mesa nos sinais de EA. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência



Fonte: Autor

A análise realizada nos espectros médios representados na Figura 4.11(a), revela que estes apresentam valores em amplitude e comportamentos em frequência distintos para determinadas bandas de frequência. Entre a banda de 1 Hz até aproximadamente 900 Hz, os espectros médios apresentam comportamentos similares em frequência, além de valores em amplitude contíguos. Na banda de frequência de 900 Hz até 1.300 Hz, no entanto, o espectro médio para a temperatura de 65 ºC apresenta comportamento dissimilar em frequência e amplitude superior ao espectro médio para a temperatura de 25 ºC, revelando que nesta banda a influência da temperatura da resposta do sensor EA é maior. A influência a temperatura da resposta do sensor EA também é perceptível na banda de frequência de 1.300 Hz até 1.600 Hz, porém, com um comportamento inverso ao visto na banda de 900 Hz até 1.300 Hz, com o espectro médio para a temperatura de 65 ºC apresentando comportamento ligeiramente dissimilar em frequência e amplitude inferior ao espectro médio para a temperatura de 25 ºC. Na banda de frequência de 1.600 Hz até 3.100 Hz, a influência da temperatura da resposta do sensor EA também é perceptível. O comportamento em frequência de ambos os espectros sofre grandes variações na banda de 1.600 Hz até 3.100 Hz, com frequências onde a amplitude do espectro para a temperatura de 65 ºC é superior a amplitude do espectro para a temperatura de 25 ºC, e frequências onde esta situação se inverte.

A comparação entre os espectros representativos das condições de PLB-A a 25 ºC e de PLB-A a 65 ºC por meio dos índices de dano RMSD e CCDM foi realizada nas bandas de frequência de 1 Hz a 5.000 Hz, 2.000 Hz a 2.500 Hz e 1.300 Hz a 1.600 Hz. A primeira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1 Hz a 5.000 Hz, representa o segmento dos espectros de frequência em que a análise da influência da temperatura da mesa da resposta do sensor EA está sendo investigada. A segunda banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 2.000 Hz a 2.500 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde existe uma grande variação entre os comportamentos dos espectros de frequência. Por fim, a terceira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1.300 Hz a 1.600 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a alteração da amplitude entre os espectros é maior.

O resultado do cálculo do índice CCDM entre os espectros de frequência para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.11(b). O CCDM calculado de aproximadamente 0,19 para a banda de 1 Hz a 5.000 Hz evidencia que a influência da variação da temperatura da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo sensor EA é pouco presente ao longo do espectro observado, apresentando pequenas variações e deslocamentos entre as

frequências. Para a banda de 2.000 Hz a 2.500 Hz, por outro lado, o CCDM calculado de aproximadamente 1,00 revela que nesta banda a influência da variação da temperatura da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo sensor EA é significativamente maior, acentuada pelas grandes variações e deslocamentos entre as frequências contidas na banda. Por fim, o CCDM calculado de aproximadamente 0,06 para a banda de 1.300 Hz a 1.600 Hz revela que nesta banda a influência da temperatura da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo sensor EA é extremamente pequena.

O resultado do cálculo do índice RMSD entre os espectros de frequência para verificação da influência da fixação da mesa nos sinais de EA para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.11 (c). Para a banda de 1 Hz a 5.000 Hz, que compreende o espectro observado, o RMSD calculado de aproximadamente 200 indica que o acrescimento da temperatura na mesa confere grande variação da resposta do sensor EA, representado pelas variações nas amplitudes observadas. O RMSD calculado de aproximadamente 22 indica que a influência da temperatura da mesa da resposta do sensor EA, representada pela variação das amplitudes observadas para ambos os espectros, é muito menor na banda do espectro entre 2.000 Hz e 2.500 Hz. Na banda de 1.300 Hz a 1.600 Hz, no entanto, a influência da temperatura na mesa da resposta do sensor EA, representada pela atenuação nas amplitudes observadas, é pouco significativa, conforme revela o RMSD calculado de aproximadamente 9.

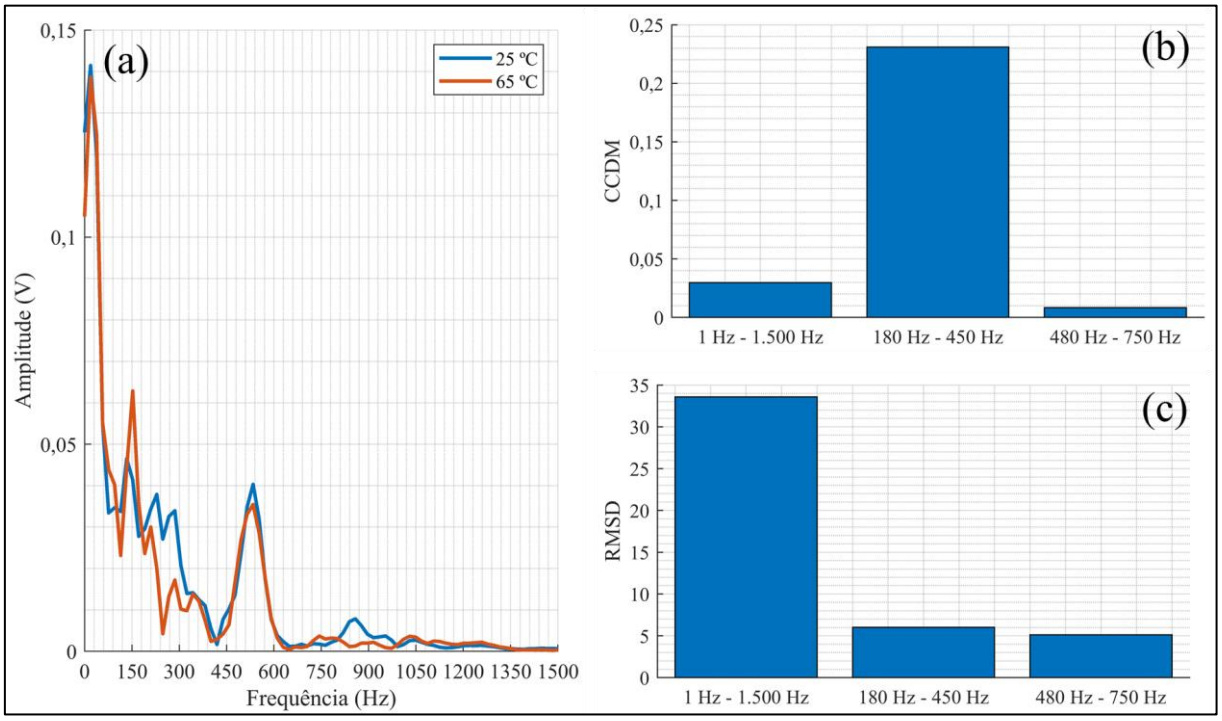
4.1.4.2 Análise nos espectros adquiridos pelo PZT

Para permitir a análise da influência da variação da temperatura da mesa de impressão da resposta adquirida pelo PZT, os espectros médios representativos das condições de teste PLB em mesa aquecida (PLB-A) a 25 ºC e de PLB-A a 65 ºC foram comparados. A Figura 4.12(a) apresenta os espectros médios representados na banda de frequência de 0 Hz a 1,5 kHz. Esta foi verificada no item 4.1.2 como sendo a banda em que o espectro de frequência apresenta valores em amplitude significativos.

A análise realizada nos espectros médios representados na Figura 4.12(a), revela que estes apresentam valores em amplitude e comportamentos em frequência majoritariamente similares. Na banda que compreende os valores em frequência de 1 Hz a 60 Hz, pouca influência da temperatura da resposta do PZT é notada, com os espectros de ambos os sinais apresentando comportamentos em frequência sumariamente contíguos e valores em amplitude muito próximos. A banda que compreende os valores em frequência de 60 Hz até 180 Hz, por outro lado, representa um segmento do espectro onde a influência da temperatura da mesa da resposta do PZT é perceptível por meio da variação do comportamento em frequência e das amplitudes dos

espectros. A influência da temperatura da mesa da resposta do PZT também é evidente na banda que compreende os valões em frequência de 180 Hz até aproximadamente 470 Hz, onde as amplitudes observadas para o espectro obtido a temperatura de 65 ºC são menores do que as contidas no espectro obtido a temperatura de 25 ºC. Na banda de frequência que compreende as frequências de 450 Hz até 810 Hz, verifica-se uma menor influência da temperatura da resposta do PZT.

Figura 4.12 – Verificação da influência da temperatura da mesa nos sinais de PZT. (a) Espectros em frequência, (b) CCDM avaliado em determinadas bandas de frequência, (c) RMSD avaliado em determinadas bandas de frequência



Fonte: Autor

A comparação entre os espectros representativos das condições de PLB-A a 25 ºC e de PLB-A a 65 ºC por meio dos índices de dano RMSD e CCDM foi realizada nas bandas de frequência de 1 Hz a 1.500 Hz, 90 Hz a 120 Hz e 360 Hz a 480 Hz. A primeira banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 1 Hz a 1.500 Hz, representa o segmento dos espectros de frequência em que a análise da influência da fixação da mesa da resposta do PZT de 480 Hz a 750 está sendo investigada. A segunda banda de frequência escolhida, que compreende os valores de 180 Hz a 450 Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a variação da amplitude entre os espectros é maior. Por fim, a terceira banda de frequência escolhida, que compreende os valores Hz, representa um segmento dos espectros de frequência onde a alteração da amplitude entre os espectros é menor.

O resultado do cálculo do índice CCDM entre os espectros de frequência para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.12(b). O CCDM calculado de aproximadamente 0,03 para a banda de 1 Hz a 1.500 Hz evidencia que a influência da temperatura da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo PZT é pequena ao longo do espectro observado, apresentando poucas variações e deslocamentos entre as frequências. Para a banda de 180 Hz a 450 Hz, por outro lado, o CCDM calculado de aproximadamente 0,23 revela que nesta banda a influência da fixação da temperatura da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo PZT é maior, acentuada pelas variações e deslocamentos entre as frequências contidas na banda. Por fim, o CCDM calculado de aproximadamente 0,01 para a banda de 480 Hz a 750 Hz revela que nesta banda a influência da temperatura da mesa da resposta dos sinais adquiridos pelo PZT é pouco menor a observada no restante do espectro observado, apresentando ínfimas variações e deslocamentos entre as frequências.

O resultado do cálculo do índice RMSD entre os espectros de frequência para verificação da influência da temperatura da mesa nos sinais adquiridos pelo PZT para diferentes bandas de frequência selecionadas está representado na Figura 4.12(c). Para a banda de 1 Hz a 1.500 Hz, que compreende o espectro observado, o RMSD calculado de aproximadamente 34 indica que o acréscimo da temperatura da mesa confere significativa variação da resposta do PZT, representada pela atenuação nas amplitudes observadas. O RMSD calculado de aproximadamente 6 indica que a influência da fixação da mesa da resposta do PZT, representada pelo acrescentamento nas amplitudes observadas, é menor na banda do espectro entre 180 Hz e 450 Hz. Na banda de 480 Hz a 750 Hz, a influência da fixação na mesa da resposta do PZT, representada pela proximidade entre as amplitudes observadas, é muito pequena, conforme revela o RMSD calculado de 5.

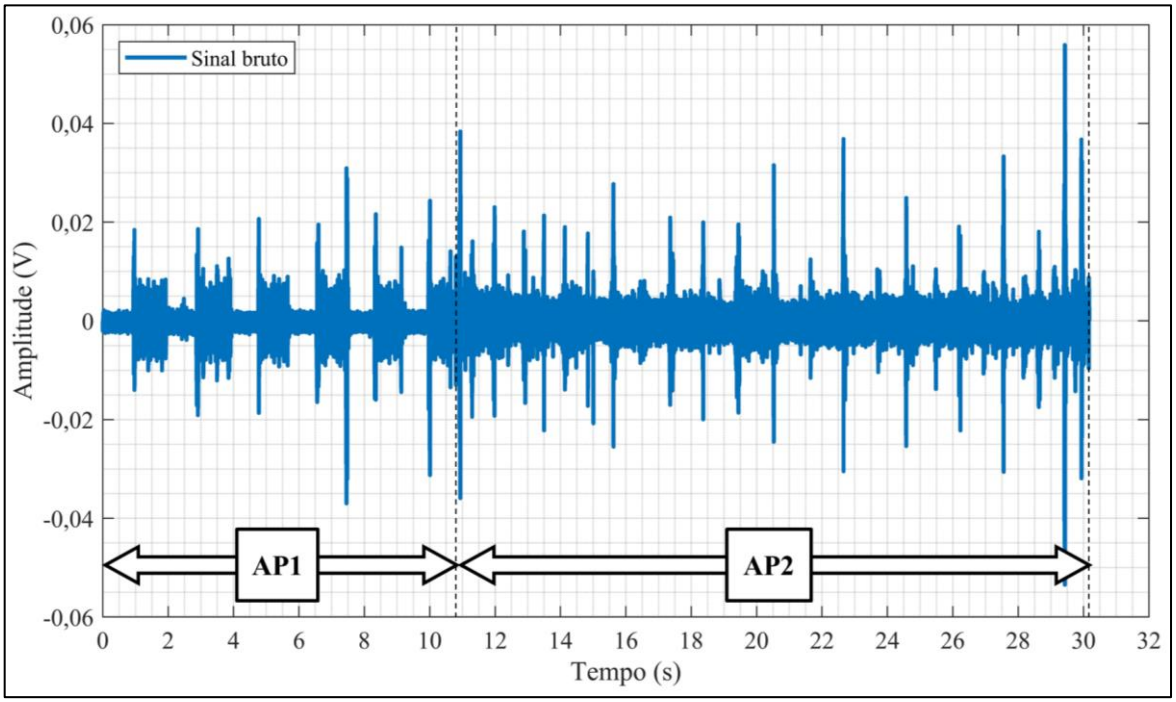
4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO TEMPO DE INTEGRAÇÃO

Inicialmente, apresentar-se-á os resultados da análise do tempo de integração (*Ti*) pelo primeiro critério utilizado. O desenvolvimento da análise do tempo de subida para *Ti* de 0,1 ms, incluindo o cálculo do tempo de subida resultante, foi apresentado para um dos sinais testados. Ademais, foram apresentados os valores de tempo de subida calculados para os *Ti* testados nos três sinais em estudo. Por fim, o resultado da análise pelo segundo método foi demonstrado para três valores de *Ti* distintos nos três sinais em estudo.

A Figura 4.13 apresenta um dos sinais brutos coletados pelo sensor EA durante os testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) em condição de impressão regular (IR), truncado de maneira a eliminar o período do sinal coletado referente

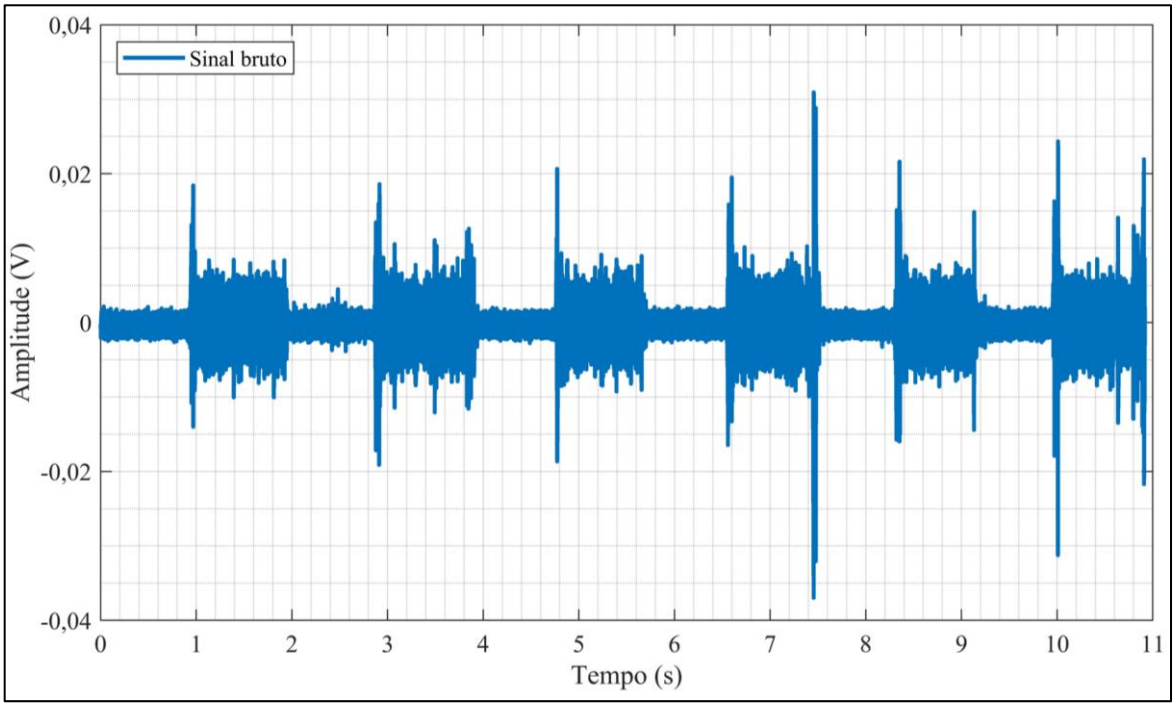
a fabricação da saia e de movimentações executadas até o momento de início da fabricação do AP1, com indicação dos diferentes AP (arquétipo de preenchimento) gerados durante o fatiamento do modelo.

Figura 4.13 – Sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ



Fonte: Autor

Figura 4.14 – AP1 do sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ

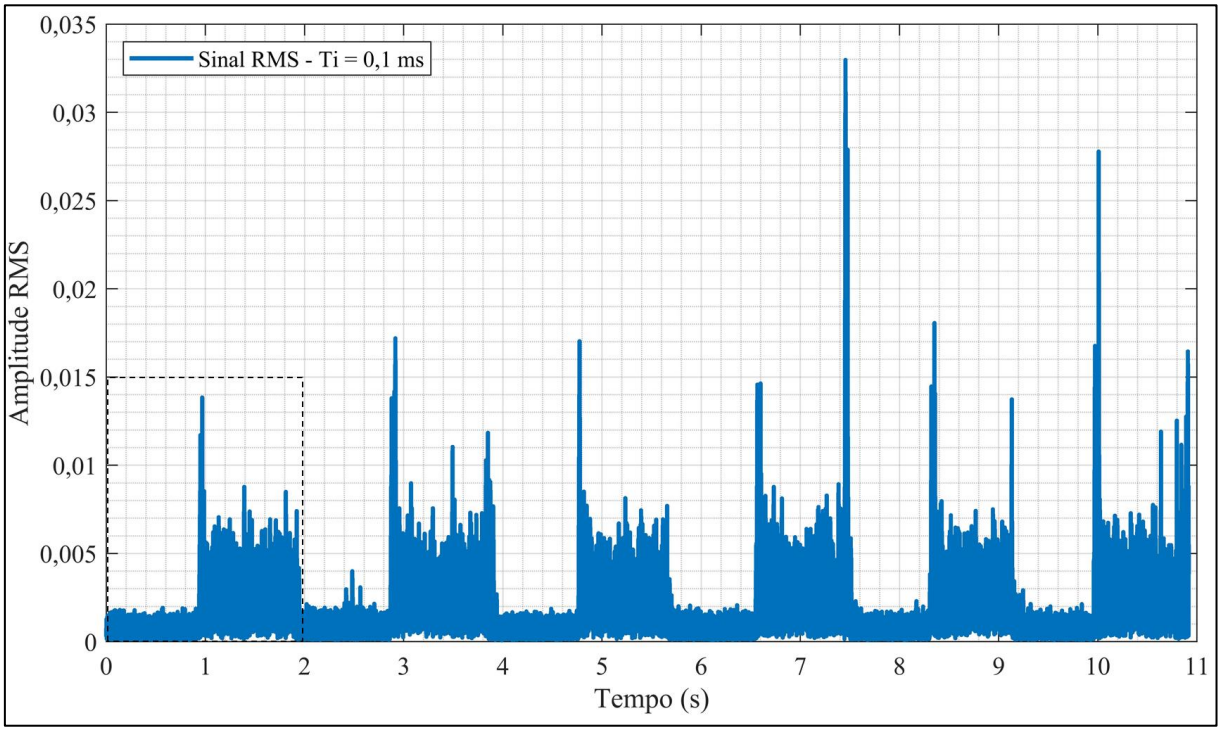


Fonte: Autor

Como a análise do tempo de integração foi conduzida na parte do sinal referente a fabricação do AP1, o sinal bruto foi novamente truncado. A Figura 4.14 apresenta o sinal bruto de fabricação do AP1, no qual são visíveis os blocos de sinais referentes as fabricações de contorno S1-L1 (segmento 1–linha 1), S2-L1, S3-L1, S4-L1, S1-L2, S2-L2, S3-L2, S4-L2, S1-L3, S2-L3, S3-L3 e S4-L3.

O sinal RMS calculado com *Ti* de 0,1 ms para o período referente a fabricação do AP1 está representado na Figura 4.15. A zona destacada com o retângulo pontilhado, entre os instantes 0 s e 2 s, representa a fabricação dos dois primeiros blocos do AP1. Isto é, a fabricação do bloco S1-L1, onde somente o extrusor se movimenta, e do bloco S2-L1, onde somente a mesa se movimenta. Como, nesta zona, existem dois estados de fabricação bem distintos quanto a movimentação relativa de impressão, a transição entre estes estados foi empregada no estudo do tempo de subida.

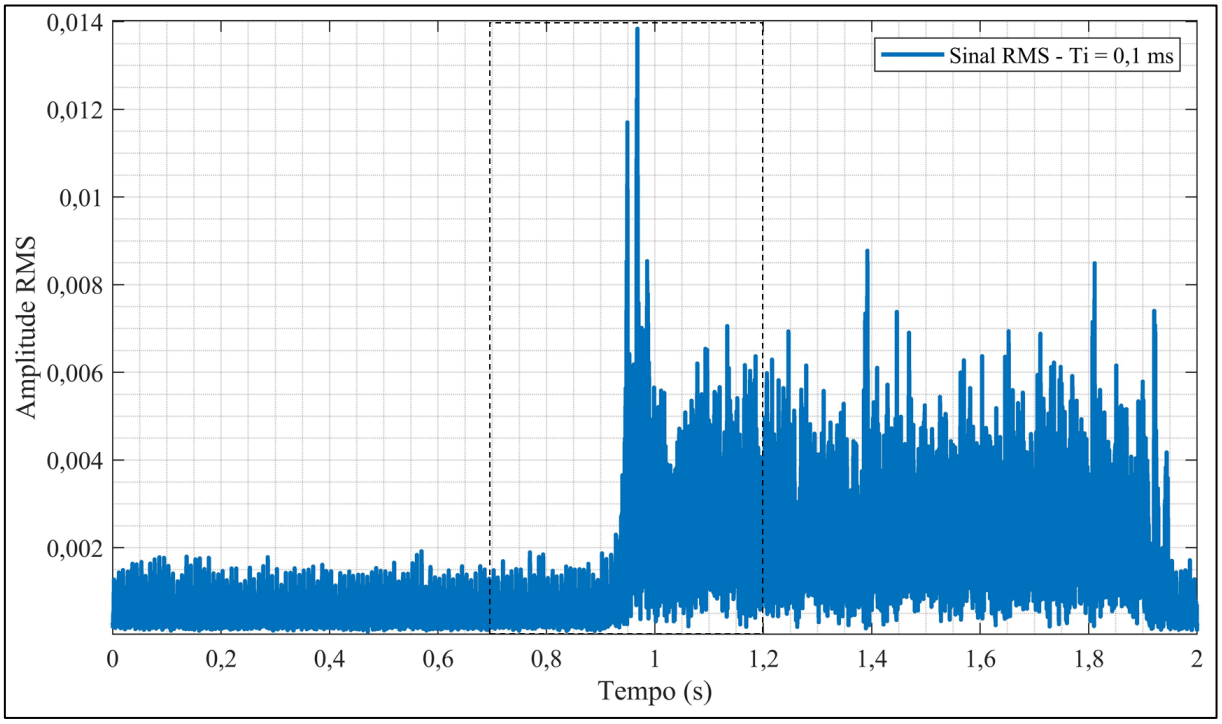
Figura 4.15 – Sinal RMS AP1 avaliado com *Ti* = 0,1 ms



Fonte: Autor

O sinal RMS calculado com *Ti* de 0,1 ms, referente as fabricações dos blocos S1-L1 e S2-L1, está representada na Figura 4.16. A zona destacada com o retângulo pontilhado, entre os instantes 0,7 s e 1,2 s, representa a região onde existe a transição entre as fabricações dos blocos S1-L1 e S2-L1.

Figura 4.16 – Aproximação nas regiões S1-L1 e S2-L1 do sinal RMS AP1 avaliado com *Ti* = 0,1 ms

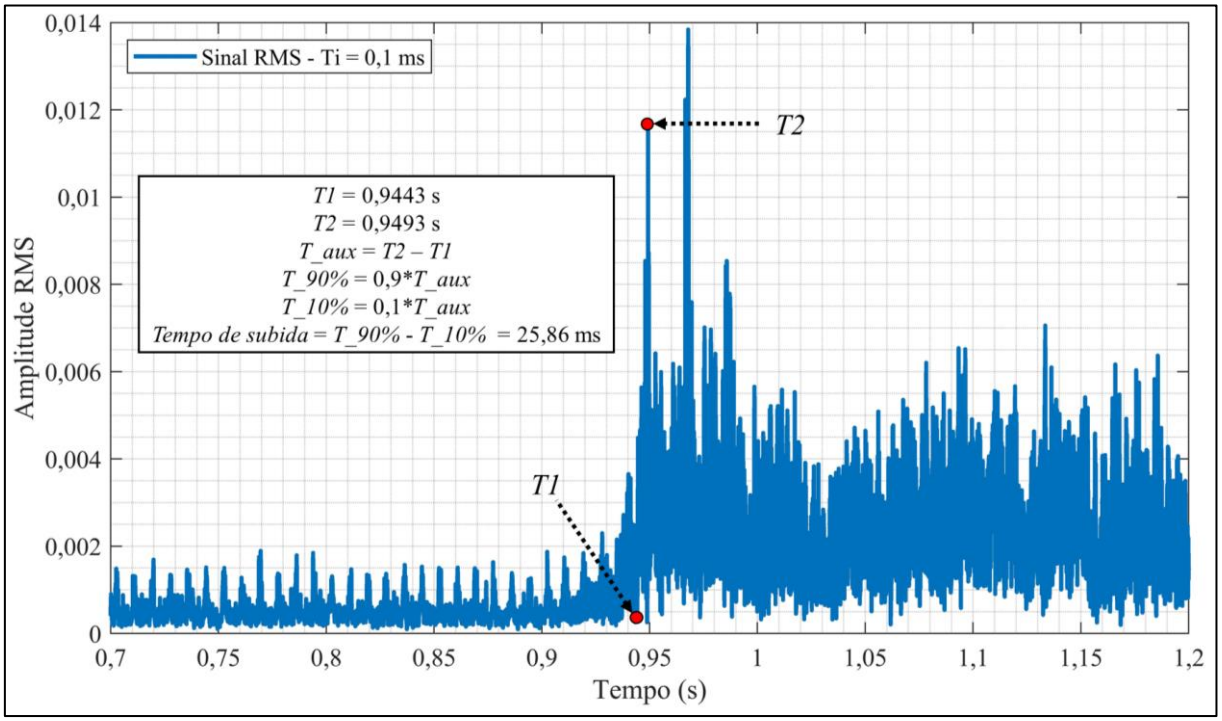


Fonte: Autor

O período do sinal RMS calculado com tempo de integração (*Ti*) de 0,1 ms referente a região onde decorre-se a transição entre as duas primeiras fabricações do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) está representada na Figura 4.17. A Figura 4.17 apresenta ainda os instantes de tempo T1 e T2, indicados por círculos vermelhos, além da avaliação do tempo de subida de 25,86 ms para o sinal RMS calculado com *Ti* de 0,1 ms.

O tempo de subida foi ainda avaliado nas transições entre S1-L1 e S2-L1 para diferentes valores de tempo de integração (*Ti*) nos três sinais de impressão em estudo. A Figura 4.18 apresenta os valores de *Ti* testados em milissegundos, e os respectivos valores de tempo de subida obtidos em milissegundos. É possível observar que, para as três repetições, os valores de tempo de subida obtidos para os *Ti* testados entre 0,1 ms e 0,9 ms foram bem próximos, conforme verificado nas regiões representadas por retângulos pontilhados pretos na Figura 4.18(a), variando pouco dos valores de tempo de subida obtidos para o *Ti* de 0,1 ms. Também é observado que os valores de tempo de subida obtidos para os *Ti* testados entre 1 ms e 9 ms sofreram alteração em relação ao valor de tempo de subida obtido para ao *Ti* de 0,1 ms, com uma diferença média aproximada de 6,13 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 9 ms nos três sinais de estudo.

Figura 4.17 – Aproximação na transição entre S1-L1 e S2-L1 do sinal RMS AP1 avaliado com *Ti* = 0,1 ms



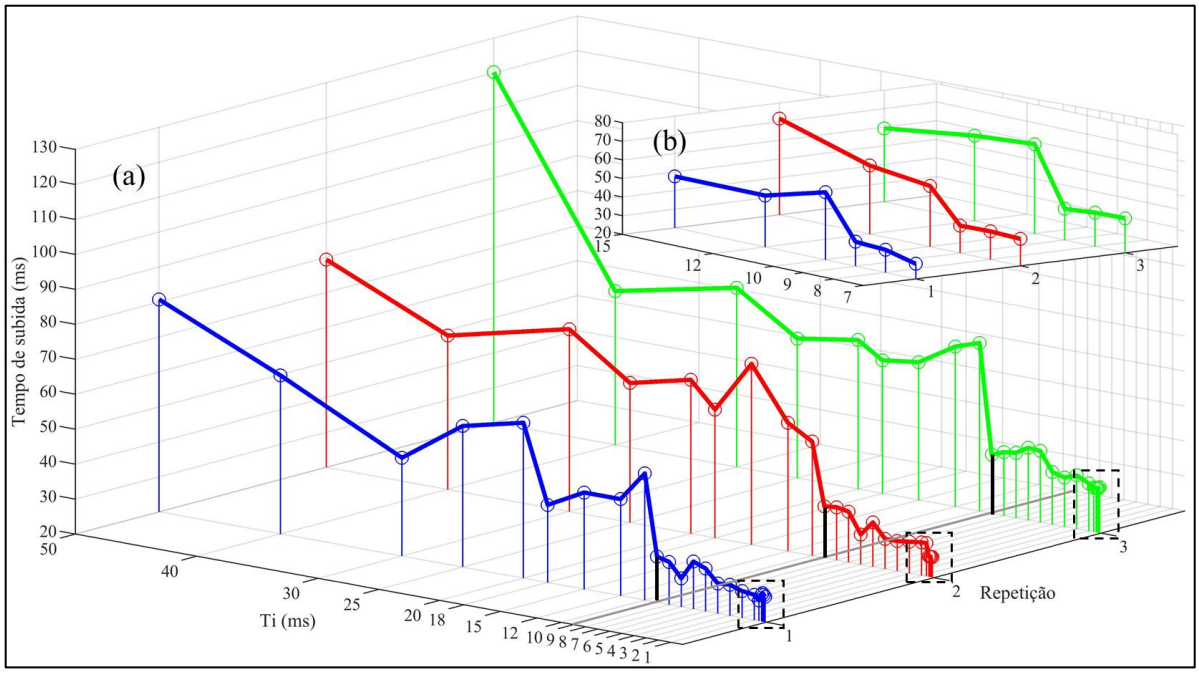
Fonte: Autor

Os valores de tempo de subida calculados para os *Ti* seguintes, no entanto, estão mais distantes do valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms. Apresentando, para o sinal referente a repetição 1 (R1), inicialmente uma variação de 29,04 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 10 ms, e chegando a máxima variação de 53,54 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 50 ms.

Para o sinal referente a repetição 2 (R2), por outro lado, é verificada inicialmente uma variação de 26,78 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o tempo de integração (*Ti*) de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 10 ms, e chegando a máxima variação de 53,54 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 50 ms.

Por fim, para o sinal referente a repetição 3 (R3), inicialmente apresentando uma variação de 34,97 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 10 ms, e chegando a máxima variação de 87,11 ms entre o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 0,1 ms e o valor de tempo de subida encontrado para o *Ti* de 50 ms.

Figura 4.18 – Tempo de subida para diferentes *Ti* avaliados



Fonte: Autor

Por meio da análise seguindo o primeiro critério, infere-se, conforme Figura 4.18(b), que o *Ti* de 9 ms seria o mais adequado a ser empregado no cálculo do sinal RMS para o monitoramento do processo FDM com filamento PLA. Visto que o sinal RMS calculado com *Ti* de 9 ms apresenta valor de tempo de subida mais próximo ao valor encontrado para o *Ti* de 0,1 ms, caracterizado pela variação média de 6,13 ms, inferior às verificadas para os valores de *Ti* subsequentes.

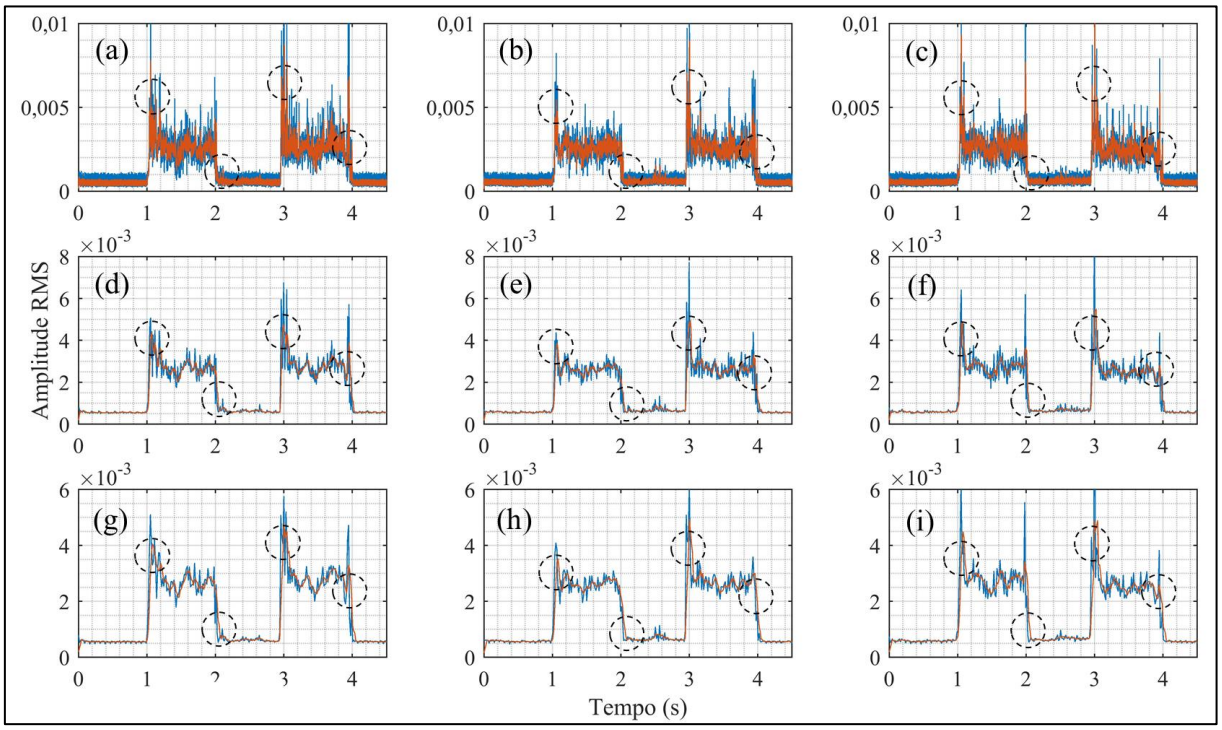
De forma a validar o tempo de integração (*Ti*) de 9 ms por meio do segundo critério, os três sinais RMS referentes a fabricação do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) calculados para o *Ti* de 1 ms, *Ti* de 9 ms e *Ti* de 15 ms, juntamente com suas respectivas médias móveis foram comparados na Figura 4.19. Observando as regiões nos sinais identificadas por círculos pontilhados, percebe-se que os sinais RMS AP1 calculados com *Ti* de 1 ms apresentam grande quantidade de informações, e que a média móvel acompanha no tempo as variações de amplitude do sinal RMS.

Para os sinais RMS AP1 calculados com *Ti* de 9 ms, é notável a diminuição na quantidade de informações nos sinais. No entanto, ainda é perceptível, conforme verificado na Figura 4.19 nas regiões identificadas por círculos pontilhados, que as médias móveis acompanham no tempo as variações de amplitude dos sinais RMS. Por fim, a observação das regiões identificadas pelos círculos pontilhados revela que os sinais RMS AP1 calculados com *Ti* de 15 ms apresentam uma diminuição ainda maior da quantidade de informações no sinal, e é notável

que as médias móveis não mais acompanham no tempo as variações de amplitude dos sinais RMS.

Pelos fatores mencionados, conclui-se por meio do segundo critério que o *Ti* de 9 ms é adequado para utilização no cálculo do sinal RMS para o monitoramento do processo FDM com filamento PLA, o que valida o resultado encontrado pelo primeiro critério.

Figura 4.19 – Sinal RMS AP1 EA para diferentes *Ti*. (a) R1 – *Ti* = 1 ms, (b) R2 – *Ti* = 1 ms, (c) R3 – *Ti* = 1 ms, (d) R1 – *Ti* = 9 ms, (e) R2 – *Ti* = 9 ms, (f) R3 – *Ti* = 9 ms, (g) R1 – *Ti* = 15 ms, (h) R2 – *Ti* = 15 ms, (i) R3 – *Ti* = 15 ms



Fonte: Autor

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS PICOS DE AMPLITUDE EM FREQUÊNCIA

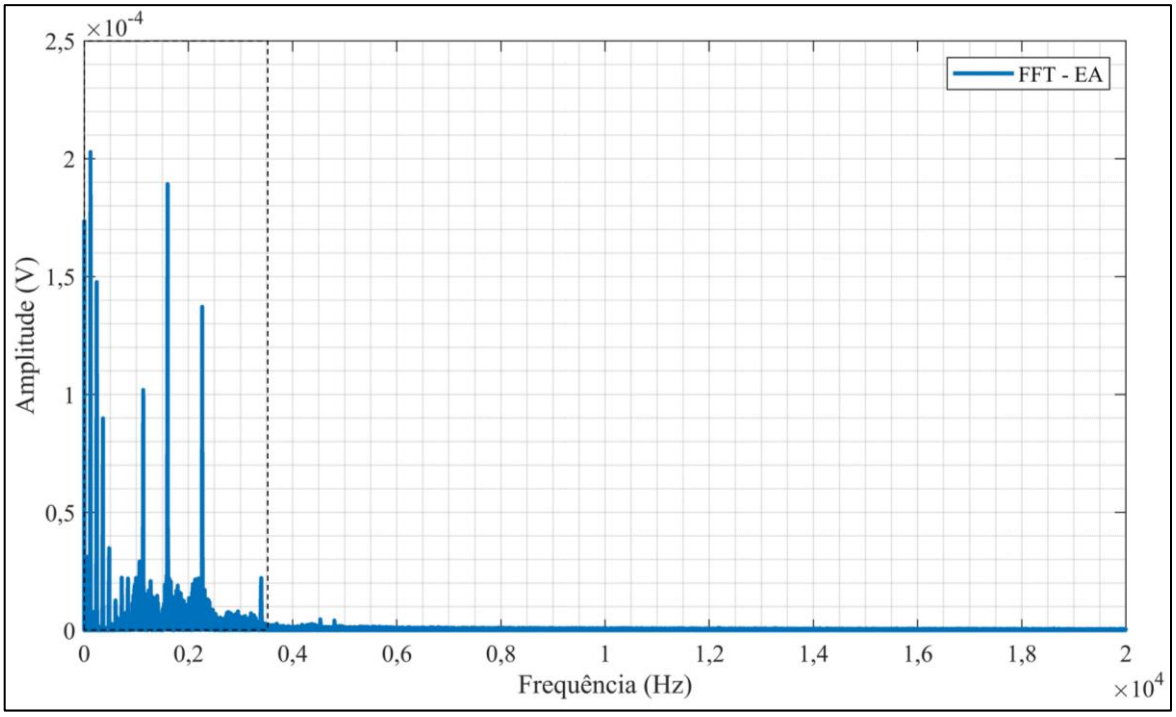
4.3.1 Análise nos espectros dos sinais adquiridos pelo sensor EA

O espectro de frequência referente a um sinal de impressão em condição de impressão regular (IR) adquirido pelo sensor EA está representado na Figura 4.20. É possível verificar que a totalidade dos picos de amplitude em frequência está contida na banda do espectro que compreende as frequências de 1 Hz a 3.500 Hz. Por esta razão, e de forma a permitir a análise dos picos de amplitude em frequência, este e os demais espectros dos sinais adquiridos pelo sensor EA foram analisados na banda de 1 Hz a 3.500 Hz.

A Figura 4.21 apresenta um espectro de frequência de sinal de impressão adquirido pelo sensor EA na banda de 1 Hz a 3.500 Hz. O resultado da análise dos picos de amplitude em

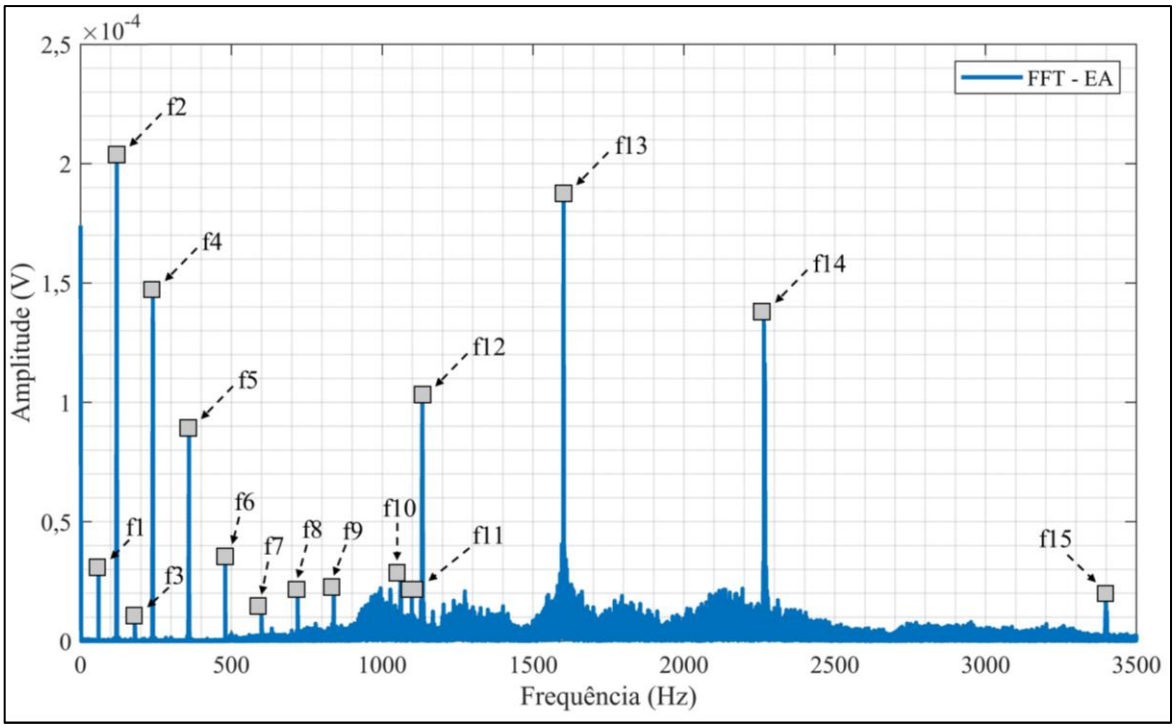
frequência nesta banda do espectro revela a existência de quinze picos, identificados pelos retângulos cinzas, e enumerados de 1 a 15.

Figura 4.20 – Espectro em análise – EA



Fonte: Autor

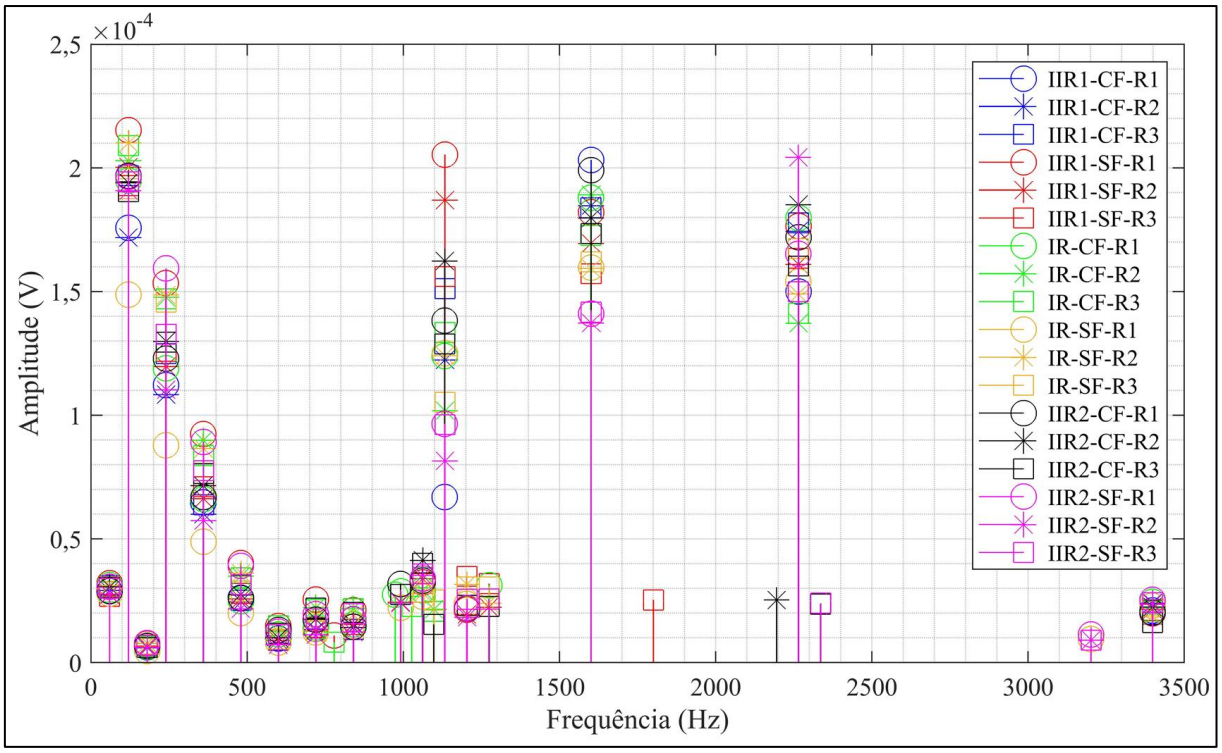
Figura 4.21 – Picos de amplitude em frequência – sensor EA



Fonte: Autor

A Figura 4.22 apresenta a totalidade dos picos de amplitude em frequência avaliados dos espectros de frequência dos sinais de impressão adquiridos pelo sensor EA na banda de 1 Hz a 3.500 Hz. É possível verificar que o número de picos de amplitude em frequência varia muito entre os testes de impressão realizados. No entanto, também é verificado que a maior parte dos testes realizados apresenta picos de amplitude nas frequências aproximadas de 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 360 Hz, 480 Hz, 600 Hz, 720 Hz, 840 Hz, 991 Hz, 1.062 Hz, 1.098 Hz, 1.133 Hz, 1.204 Hz, 1.275 Hz, 1.601 Hz, 2.265 Hz, e 3.398 Hz.

Figura 4.22 – Picos de frequência para todos os espectros obtidos a partir dos V-DZ – sensor EA



Fonte: Autor

Por fim, verifica-se que determinados testes apresentam picos em valores de frequência que não constam em outros testes, tais como: o pico de amplitude referente ao teste IIR1-SF-R3 na frequência aproximada de 1.801 Hz, o pico de amplitude referente ao teste IIR2-CF-R2 na frequência aproximada de 2.195 Hz, e o pico de amplitude referente ao teste IIR2-SF-R3 na frequência de 2.337 Hz. Atribui-se a existência destes picos em amplitude a influência de fatores externos, ocasionados unicamente nas condições informadas.

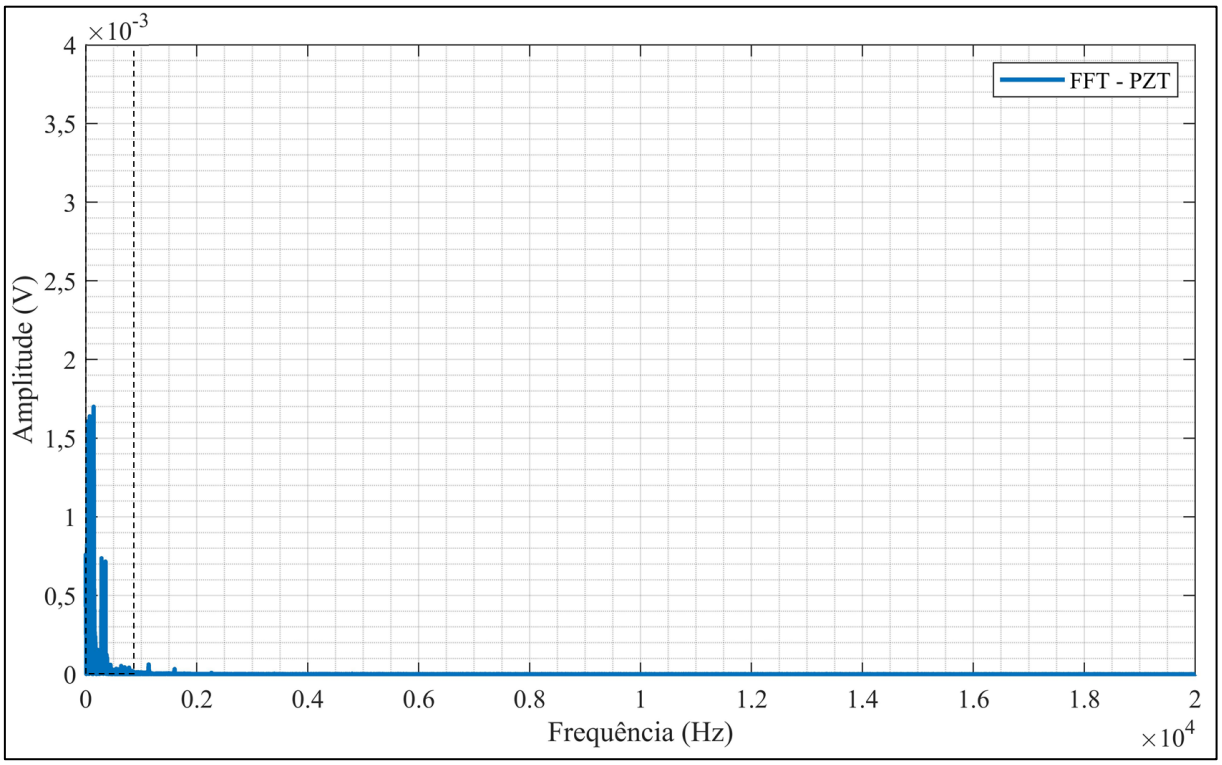
Sendo assim, os testes que utilizem os espectros de frequência dos sinais de impressão adquiridos pelo sensor EA foram realizados somente nas bandas de frequência onde os picos

de amplitude em frequência não são observados. Desta forma procurando minimizar a influência gerada pelo acionamento dos motores de passo, pelas movimentações dos eixos X, Y e Z durante a impressão.

4.3.2 Análise nos espectros dos sinais adquiridos pelo PZT

O espectro de frequência referente a um sinal de impressão em condição de impressão regular (IR) adquirido pelo PZT está representado na Figura 4.23. É possível verificar que a totalidade dos picos de amplitude em frequência está contida na banda do espectro que compreende as frequências de 1 Hz a 700 Hz. Por esta razão, e de forma a permitir a análise dos picos de amplitude em frequência, o espectro foi analisado na banda de 1 Hz a 700 Hz.

Figura 4.23 – Espectro em análise – PZT



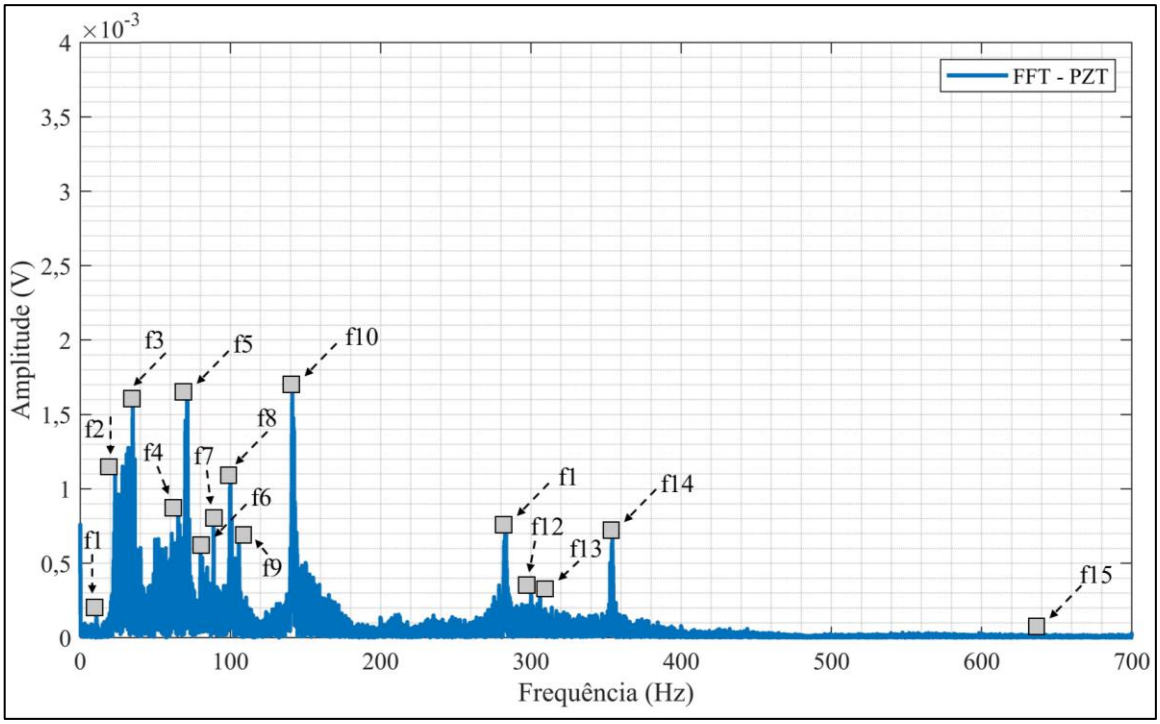
Fonte: Autor

A Figura 4.24 apresenta um espectro de frequência de sinal de impressão adquirido pelo PZT na banda de 1 Hz a 700 Hz. A análise dos picos de amplitude em frequência nesta banda do espectro revela a existência de 15 picos, identificados pelos retângulos cinzas, e enumerados de 1 a 15.

A Figura 4.25 apresenta a totalidade dos picos de amplitude em frequência avaliados dos espectros de frequência dos sinais de impressão adquiridos pelo PZT na banda de 1 Hz a 700 Hz. É possível verificar que o número de picos de amplitude em frequência varia muito entre os testes de impressão realizados. No entanto, também é verificado que a maior parte dos

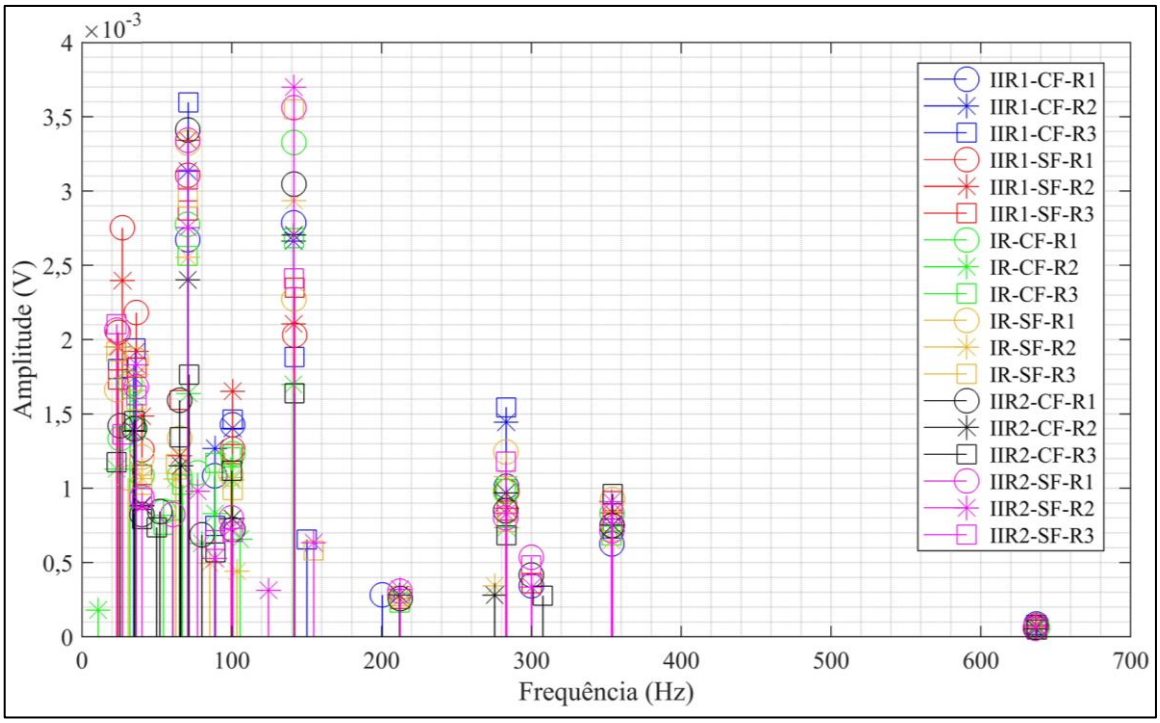
testes realizados apresenta picos de amplitude nas frequências aproximadas de 24 Hz, 36 Hz, 40 Hz, 65 Hz, 71 Hz, 89 Hz, 101 Hz, 141 Hz, 212 Hz, 283 Hz, 300 Hz, 354 Hz, e 637 Hz.

Figura 4.24 – Picos de amplitude em frequência – PZT



Fonte: Autor

Figura 4.25 – Picos de frequência para todos os espectros obtidos a partir dos sinais dos V-DZ – PZT



Fonte: Autor

Por fim, verifica-se que determinados testes apresentam picos em valores de frequência que não constam em outros testes, tais como: o pico de amplitude referente ao teste IR-CF-R2 na frequência aproximada de 11 Hz, o pico de amplitude referente ao teste IIR2-SF-R2 na frequência aproximada de 125 Hz, o pico de amplitude referente ao teste IIR1-CF-R1 na frequência de 201 Hz, e o pico de amplitude referente ao teste IIR2-CF-R3 na frequência de 308 Hz. Atribui-se a existência destes picos em amplitude a influência de fatores externos, ocasionados unicamente nas condições informadas.

Sendo assim, os testes que utilizem os espectros de frequência dos sinais de impressão adquiridos pelo PZT foram realizados somente nas bandas de frequência onde os picos de amplitude em frequência não são observados. Desta forma procurando minimizar a influência gerada pelo acionamento dos motores de passo, pelas movimentações dos eixos X, Y e Z durante a impressão.

4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS ARQUÉTIPOS DE PREENCHIMENTO

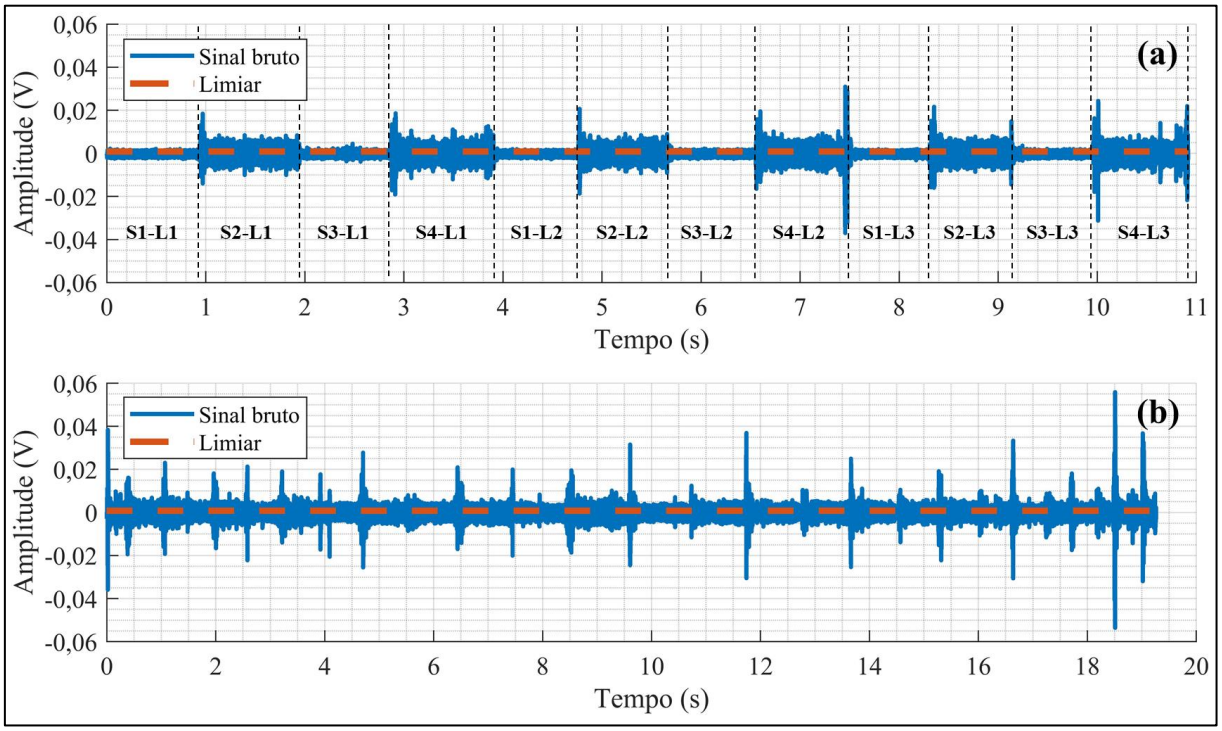
4.4.1 Análise no domínio do tempo

A Figura 4.26 apresenta um dos sinais brutos coletados pelo sensor EA durante o processo FDM em condição de impressão regular (IR) em estado com filamento (CF), truncado de maneira a eliminar o período do sinal coletado referente a fabricação da saia e de movimentações executadas pelo extrusor até o momento de início da fabricação do arquétipo de preenchimento 1 (AP1), e dividido em sinais parciais referentes ao período de impressão do AP1 e ao período de impressão do AP2.

Pode-se perceber que, o período do sinal referente a impressão do AP1, representado na Figura 4.26(a), é significativamente menor do que o período referente a impressão do AP2, representado na Figura 4.26(b). Nota-se ainda que, o período do sinal referente a impressão do AP1 contém 12 blocos com comportamento em amplitude bem definidos, referentes a fabricação das linhas de contorno S1-L1, S2-L1, S3-L1, S4-L1, S1-L2, S2-L2, S3-L2, S4-L2, S1-L3, S2-L3, S3-L3 e S4-L3. Enquanto no período do sinal referente a impressão do AP2, não é verificado comportamento similar.

O limiar necessário para a ferramenta Counts está representado nas Figura 4.26(a) e Figura 4.26(b), para os sinais representativos dos períodos AP1 e AP2, respectivamente. O cálculo do sinal RMS foi realizado em blocos de 1.800 amostras, o que representa o tempo de integração (*Ti*) de 9 ms, verificado como mais apropriado no item 4.2.

Figura 4.26 – Sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ. (a) AP1, (b) AP2



Fonte: Autor

Os sinais RMS obtidos estão representados na Figura 4.27. Observações nos sinais RMS revelam comportamentos similares aos observados nos sinais brutos representados na Figura 4.26, com o período do sinal referente a impressão do AP1 sendo significativamente menor do que o AP2, e com a existência de 12 blocos com comportamento em amplitude bem definidos referentes a fabricação das linhas de contorno no AP1 S1-L1, S2-L1, S3-L1, S4-L1, S1-L2, S2-L2, S3-L2, S4-L2, S1-L3, S2-L3, S3-L3 e S4-L3.

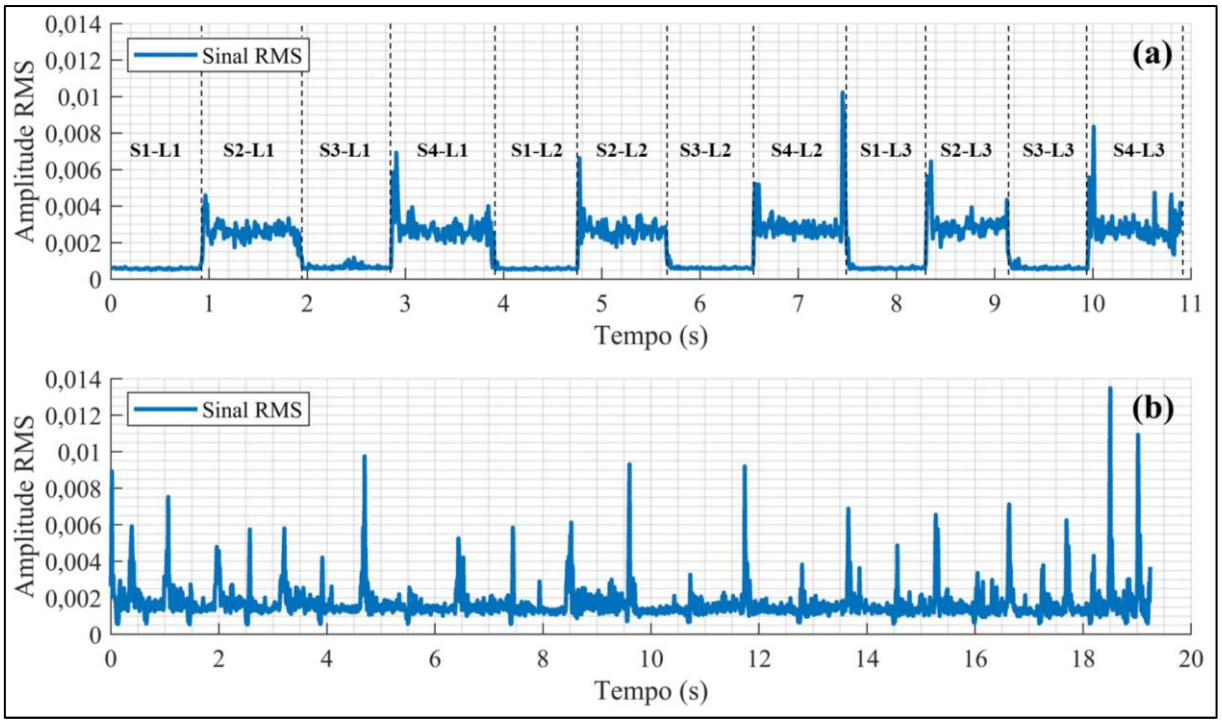
O cálculo da média RMS foi realizado nos 12 blocos de fabricação observados no sinal RMS AP1. Como não foi possível distinguir as linhas de impressão de *raster* do AP2 no sinal RMS AP2, o período de impressão foi truncado em 12 blocos de mesmo número de amostras, e a média RMS foi calculada em cada bloco. As médias RMS obtidas para ambos os sinais RMS AP1 e RMS AP2 estão representadas na Figura 4.28 para as três repetições.

A análise na Figura 4.28(a), quanto as médias RMS para as linhas de impressão do arquétipo de preenchimento 1 (AP1), revela que as médias RMS dos blocos de fabricação com movimentação somente do extrusor (MSE) são significativamente menores do que as médias RMS dos blocos com movimentação somente da mesa (MSM). Sendo possível verificar que para os sinais adquiridos enquanto há MSE, os valores da média RMS ficam próximos a 0,5 x 10^{-3}, enquanto para os sinais adquiridos enquanto há MSM, os valores da média RMS ficam entre 2,5 x 10^{-3} e 3 x 10^{-3}. Devido a esta considerável variação, caso sejam calculados o valor

médio entre as médias RMS, um também considerável desvio padrão deve ser esperado. O cálculo do valor médio entre as médias RMS, além do desvio padrão, podem ser observados na Figura 4.29 para cada repetição.

A análise da Figura 4.29 revela que o desvio padrão obtido inviabiliza a obtenção de um único valor médio entre as médias RMS dos 12 blocos de fabricação do AP1. Por esta razão, as análises sequentes de média RMS foram conduzidas de maneira separada nos períodos dos sinais em que há MSE, e nos períodos dos sinais em que há MSM.

Figura 4.27 – Sinal RMS obtido a partir do sinal bruto coletado pelo sensor EA em IR dos V-DZ. (a) AP1, (b) AP2

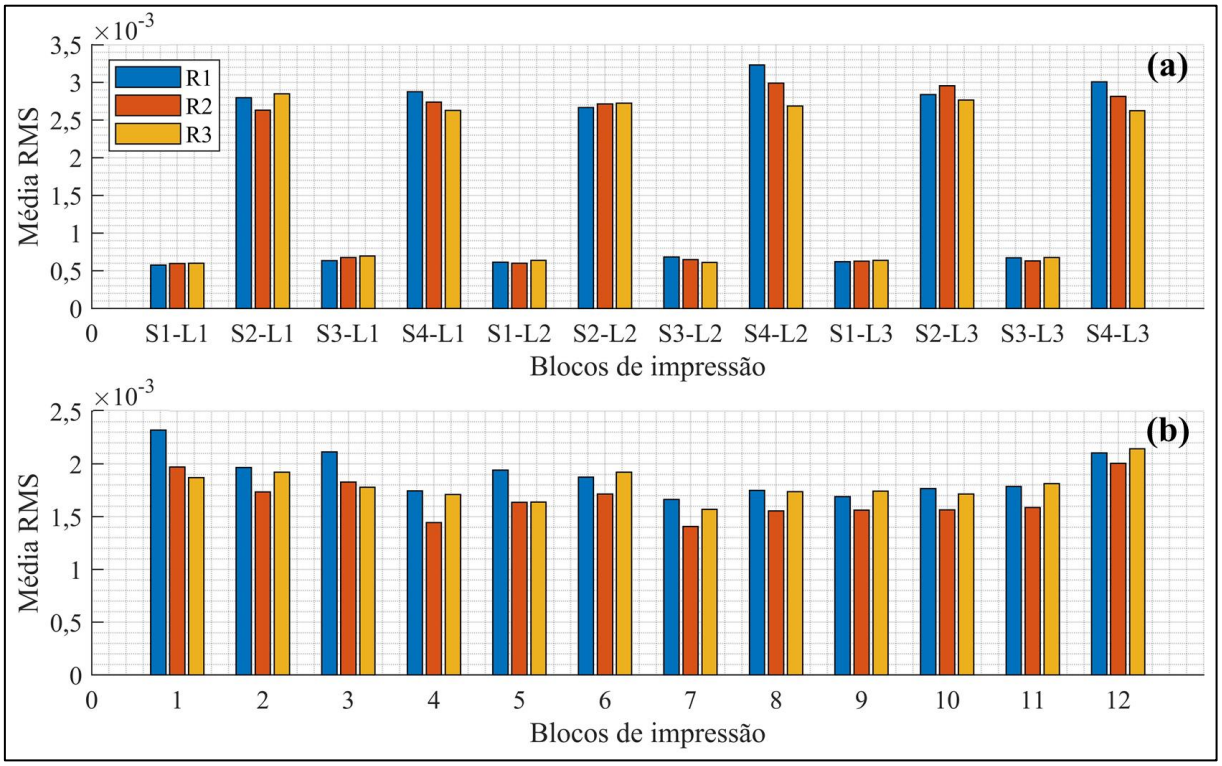


Fonte: Autor

A análise na Figura 4.28(b), quanto as médias RMS para os blocos de impressão do AP2, revela que as médias RMS decaem entre o primeiro e sétimo bloco, seguindo de recuperação entre o sétimo e decimo segundo blocos. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que, ao longo da fabricação do AP2, existe um número muito maior de movimentações de extrusor e de mesa próximo ao início e finalização da impressão do AP2.

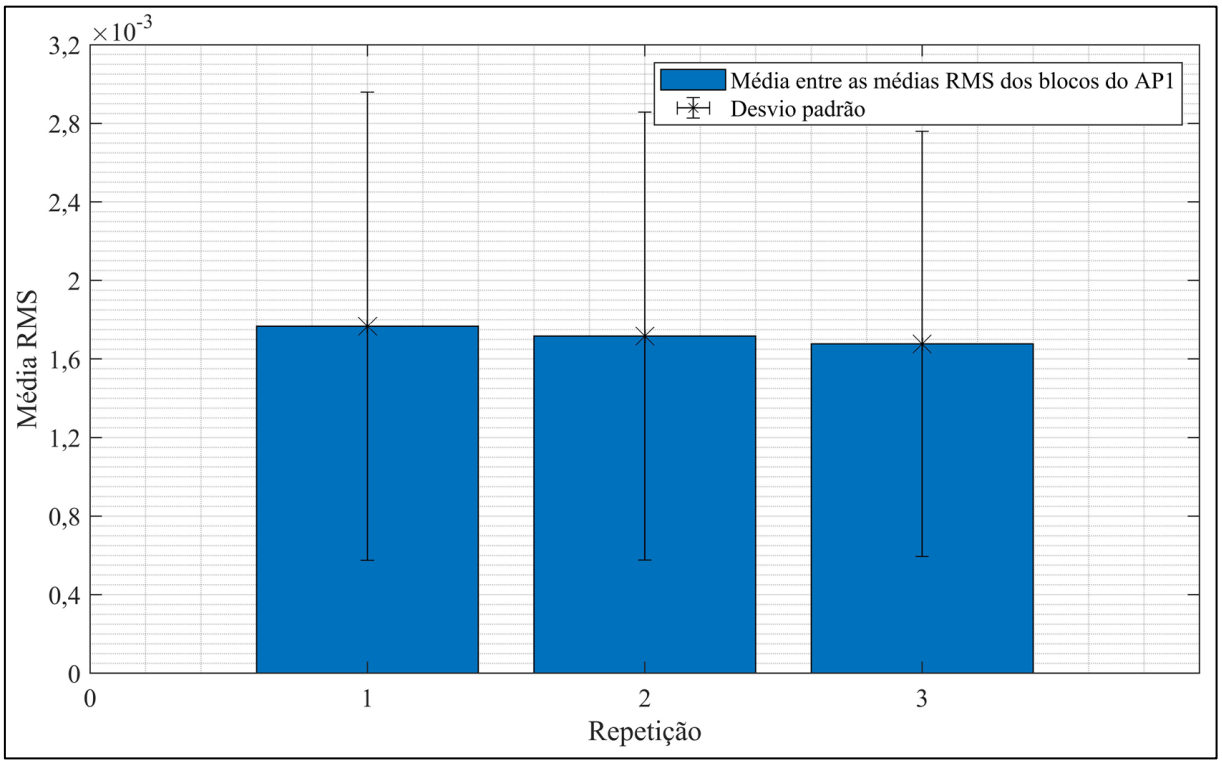
O cálculo do Counts foi realizado nos 12 blocos observados no sinal truncado AP1. Como não foi possível distinguir as linhas de impressão do AP2 no sinal truncado AP2, o período foi truncado em 12 blocos de mesmo número de amostras, e o Counts foi calculado em cada bloco. Os valores Counts obtidos estão representados na Figura 4.30 para as três repetições.

Figura 4.28 – Médias RMS. (a) AP1, (b) AP2



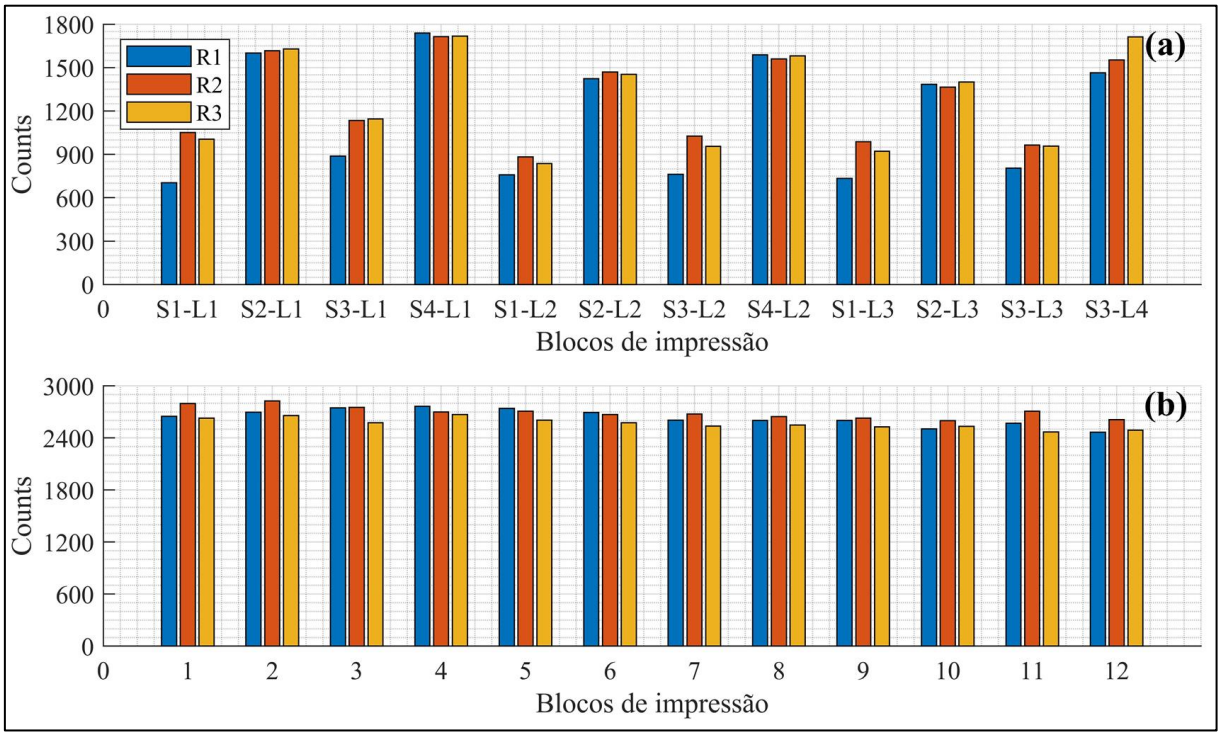
Fonte: Autor

Figura 4.29 – Média entre as médias RMS - blocos do AP1



Fonte: Autor

Figura 4.30 – Counts. (a) AP1, (b) AP2

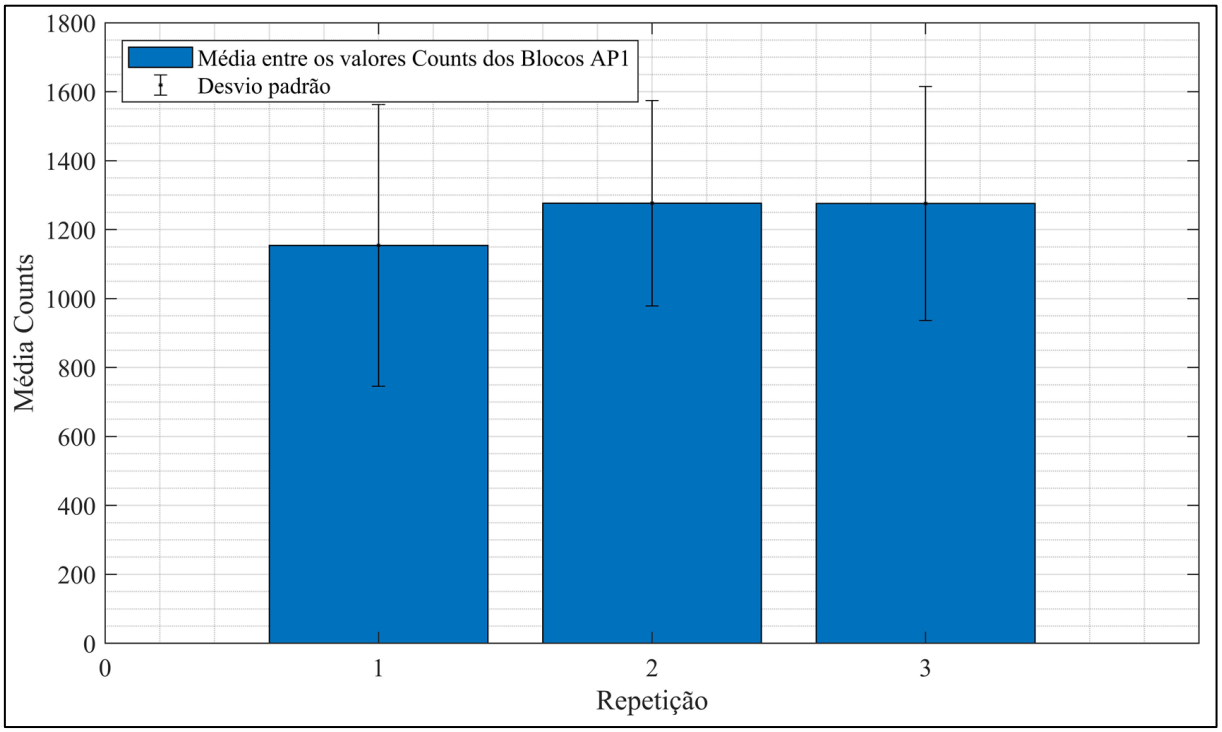


Fonte: Autor

A análise na Figura 4.30(a), quanto ao valor Counts para as linhas de impressão do AP1, revela que os valores Counts dos sinais MSE são relativamente menores do que os valores Counts dos sinais MSM. Sendo possível verificar que para os sinais MSE, os valores Counts ficam próximos a 900, enquanto para os sinais MSM, os valores Counts ficam próximos a 2.600. Devido a esta considerável variação, caso sejam calculados o valor médio entre os valores Counts, um também considerável desvio padrão deve ser esperado. O cálculo do valor médio entre as os valores Counts, além do desvio padrão, podem ser observados na Figura 4.31 para cada repetição. A análise da Figura 4.31 revela que o desvio padrão obtido inviabiliza a obtenção de um único valor médio entre os valores Counts dos 12 blocos de fabricação do AP1. Por esta razão, as análises sequentes de valor médio Counts foram conduzidas de maneira separada nos períodos dos sinais em que há MSE, e nos períodos dos sinais em que há MSM.

A análise na Figura 4.30(b), quanto aos valores Counts para os blocos de impressão do arquétipo de preenchimento 2 (AP2), revela que os valores Counts obtidos possuem pouca variação em relação aos doze blocos considerados, com os valores de Counts obtidos variando pouco entre 2.500 e 2.700.

Figura 4.31 – Médias Counts – Blocos do AP1



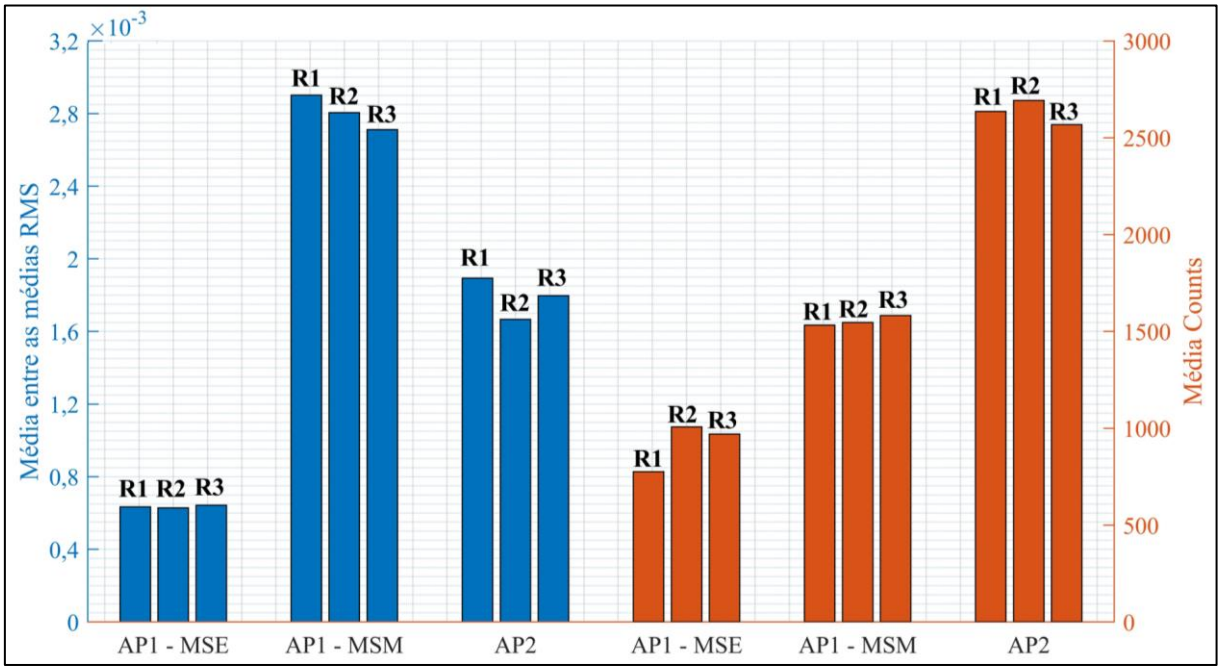
Fonte: Autor

O cálculo do valor médio entre as médias RMS, e do valor médio Counts podem ser observados na Figura 4.32 para as fabricações com movimentação somente do extrusor (MSE) do arquétipo de preenchimento 1 (AP1), fabricações com movimentação somente da mesa (MSM) do AP1, e para o AP2, para as três repetições. Para o valor médio entre as médias RMS, nota-se que existe grande variação entre os valores encontrados para as fabricações MSE e MSM do AP1, além dos valores encontrados para o AP2. A análise dos valores Counts revela que também existe grande variação entre os valores encontrados para as fabricações MSE e MSM do AP1, além dos valores encontrados para o AP2.

A comparação cruzada entre os valores médios RMS das fabricações MSE do AP1, e valores médios RMS do AP2, revela que existe uma divergência de aproximadamente 1,00 x 10^3 a mais para as fabricações MSE do AP1. Entre os valores médios RMS das fabricações MSM do AP1, e valores médios RMS do AP2, a comparação cruzada revela que existe uma divergência de aproximadamente 1,30 x 10^3 a menos para as linhas MSM do AP1.

A comparação cruzada entre os valores médios Counts das fabricações MSM do AP1, e valores médios Counts do AP2, revela que existe uma divergência de aproximadamente 1.100 a menos para as fabricações MSM do AP1. Entre os valores médios Counts das fabricações MSE do AP1, e valores médios Counts do AP2, a comparação cruzada revela que existe uma divergência de aproximadamente 1.700 a menos para as linhas MSE do AP1.

Figura 4.32 – Médias entre as médias RMS e Médias Counts para os diferentes arquétipos de preenchimento



Fonte: Autor

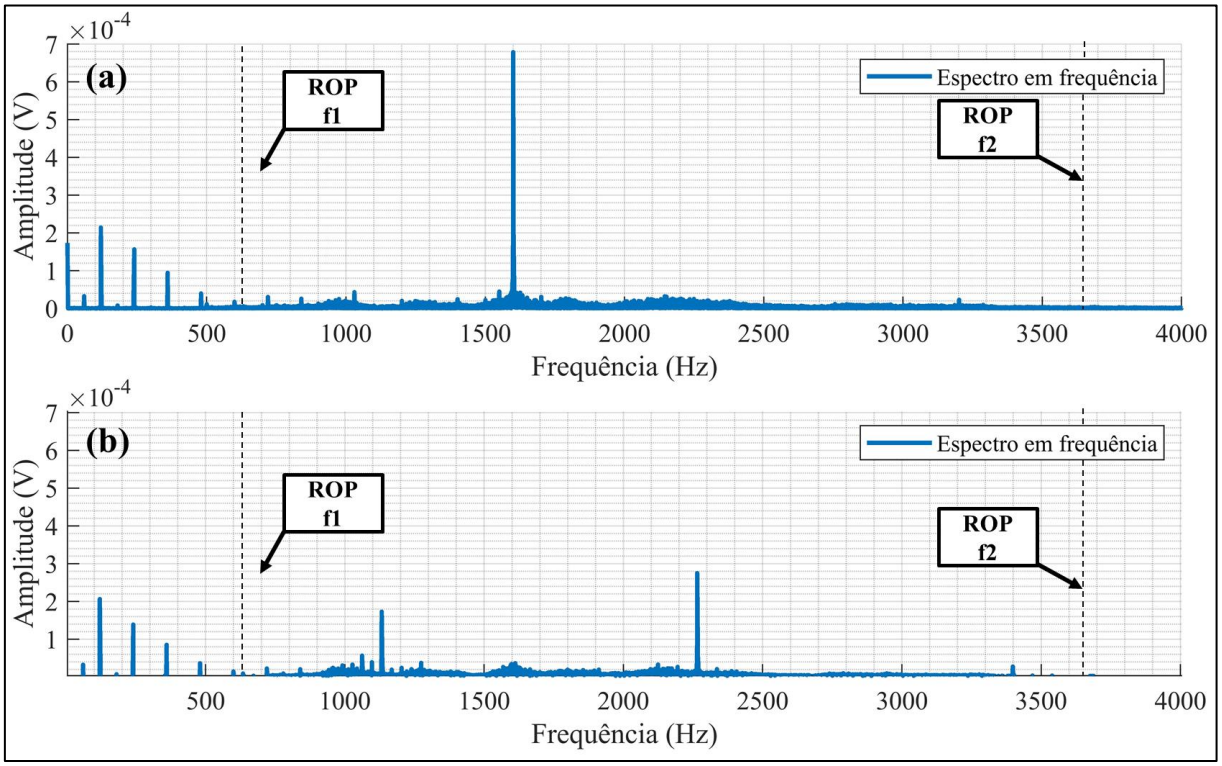
4.4.2 Análise no domínio da frequência

Os espectros de frequência dos sinais brutos referentes as fabricações do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) e do AP2 estão representados na Figura 4.33. A banda de frequências em que os espectros estão representados, isto é, de 1 Hz a 4.000 Hz, é a banda onde uma maior atividade em amplitude é observada nos espectros de ambos os sinais. Nota-se ainda que, o espectro de frequência para o sinal AP1 possui um valor pico de amplitude em frequência próximo a 1.600 Hz. Enquanto no espectro de frequência para o sinal AP2, dois picos de amplitude em frequência são observados próximos as frequências de 1.200 Hz e 2.300 Hz, respectivamente.

Para o cálculo do sinal ROP, foi escolhida a banda de frequências que compreende entre 800 Hz e 3.500 Hz, devido aos espectros de frequência apresentarem maior variação em amplitude quando comparados entre si.

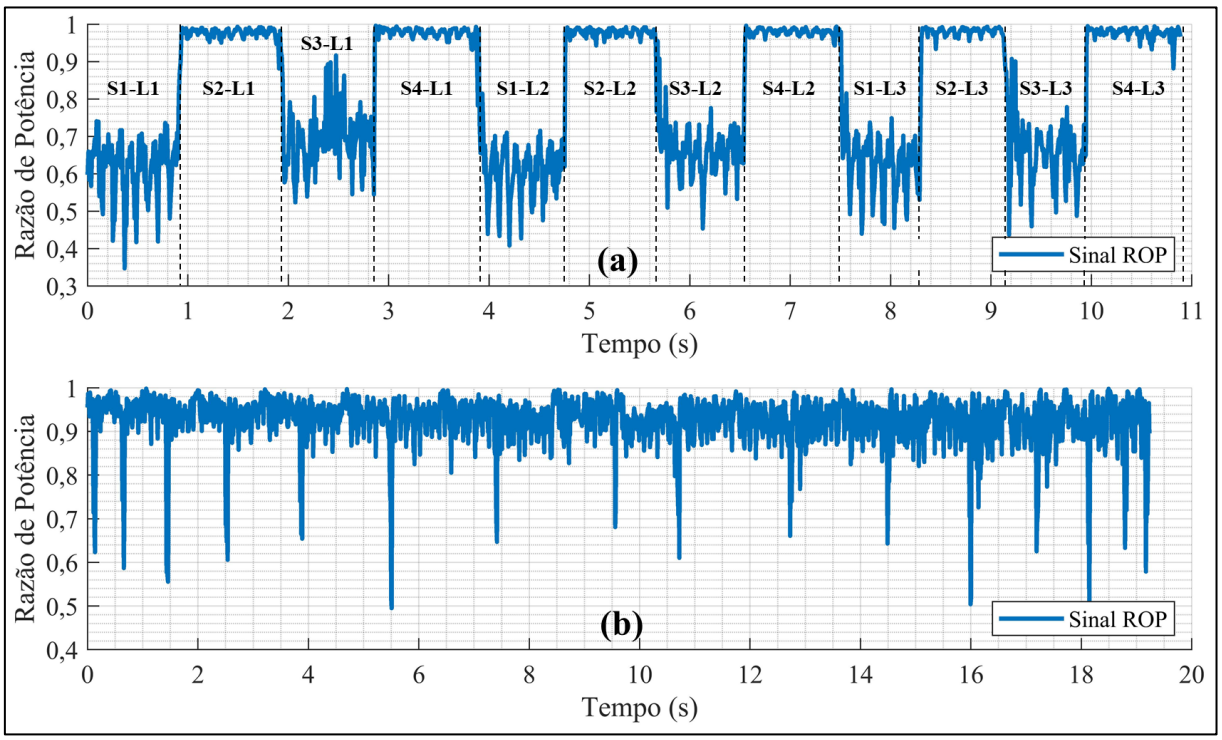
O cálculo do sinal ROP foi realizado em blocos de 1.800 amostras, o que representa o *Ti* de 9 ms encontrado no item 4.2. Os sinais ROP obtidos estão representados na Figura 4.34. Observações nos sinais ROP revelam comportamentos similares aos observados nos sinais brutos e RMS, com o período do sinal referente a impressão do AP1 sendo significativamente menor do que o AP2, e com a existência de 12 blocos com comportamento em amplitude bem definidos referentes a fabricação das linhas de contorno no arquétipo de preenchimento 1 (AP1).

Figura 4.33 – Espectros de frequência para os diferentes arquétipos de preenchimento. (a) AP1, (b) AP2



Fonte: Autor

Figura 4.34 – Sinais ROP. (a) AP1, (b) AP2



Fonte: Autor

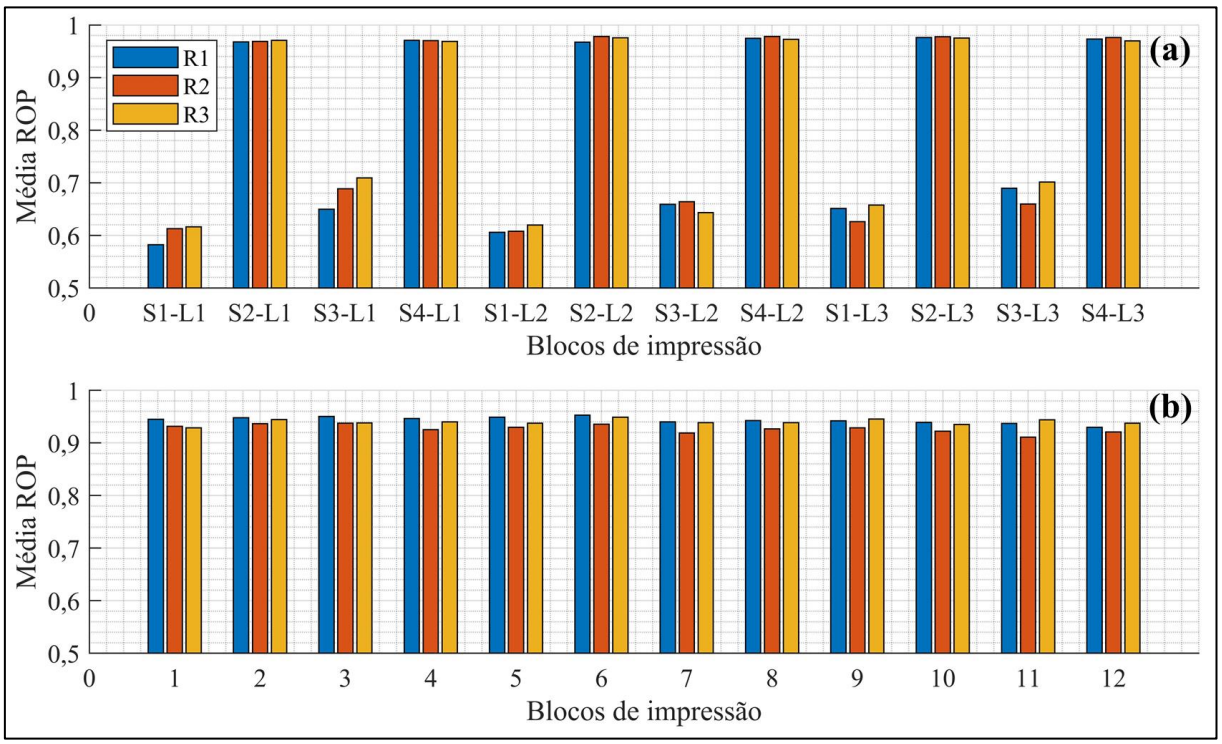
Como não foi possível distinguir as linhas de impressão do AP2 no sinal ROP AP2, o período foi truncado em 12 blocos de mesmo número de amostras, e a média ROP foi calculada

em cada bloco. As médias ROP obtidas estão representadas na Figura 4.35 para as três repetições.

A análise na Figura 4.35(a), quanto ao valor médio ROP para as linhas de impressão do AP1, revela que os valores médios ROP dos sinais com movimentação somente do extrusor (MSE) são significativamente menores do que os valores médios ROP dos sinais com movimentação somente da mesa (MSM). Sendo possível verificar que para os sinais MSE, os valores médios ROP ficam entre 0,55 e 0,70, enquanto para os sinais MSM, os valores médios ROP ficam próximos a 0,97. Devido a esta considerável variação, caso sejam calculados o valor médio entre os valores médios ROP, um também considerável desvio padrão deve ser esperado.

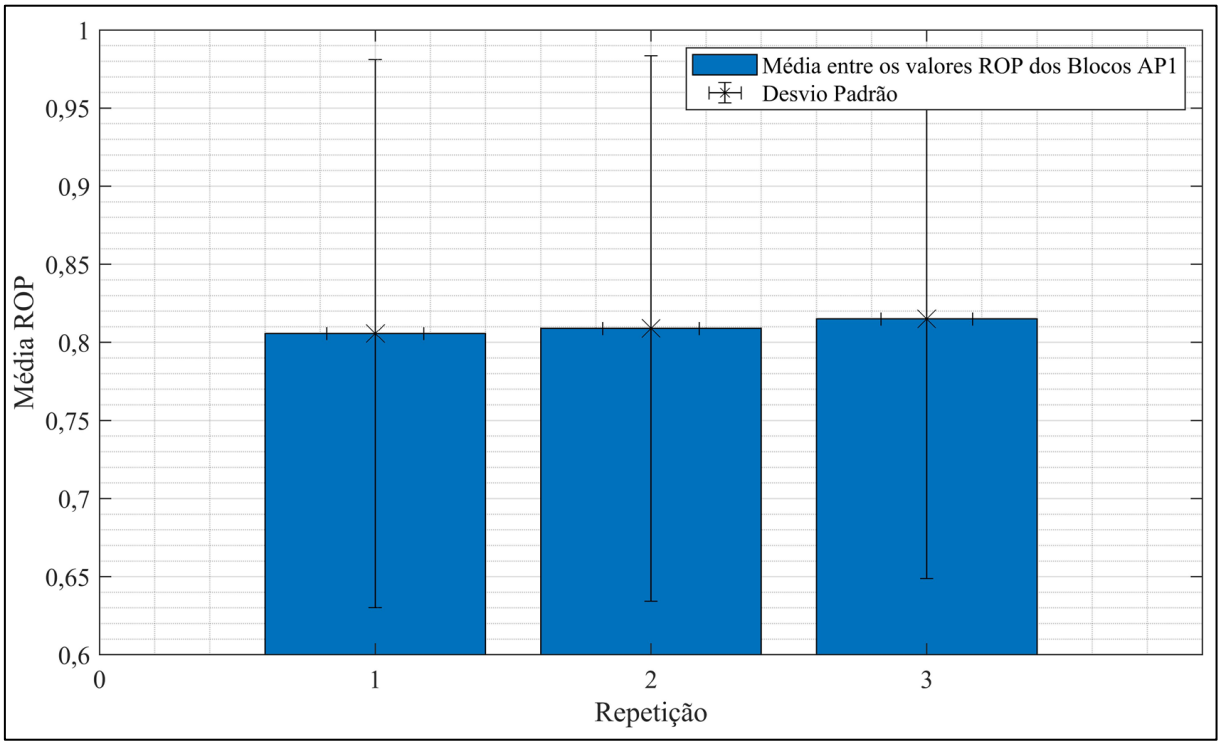
O cálculo do valor médio entre as os valores médios ROP, além do desvio padrão, podem ser observados na Figura 4.36 para cada repetição. A análise da Figura 4.36 revela que o desvio padrão obtido inviabiliza a obtenção de um único valor médio entre os valores médios ROP dos 12 blocos de fabricação do AP1. Por esta razão, as análises sequentes de média ROP foram conduzidas de maneira separada nos períodos dos sinais em que há MSE, e nos períodos dos sinais em que há MSM. A análise na Figura 4.35(b), quanto aos valores médios ROP para os blocos de impressão do AP2, revela que os valores médios ROP se mantêm aproximadamente entre 0,92 e 0,97.

Figura 4.35 – Médias ROP. (a) AP1, (b) AP2



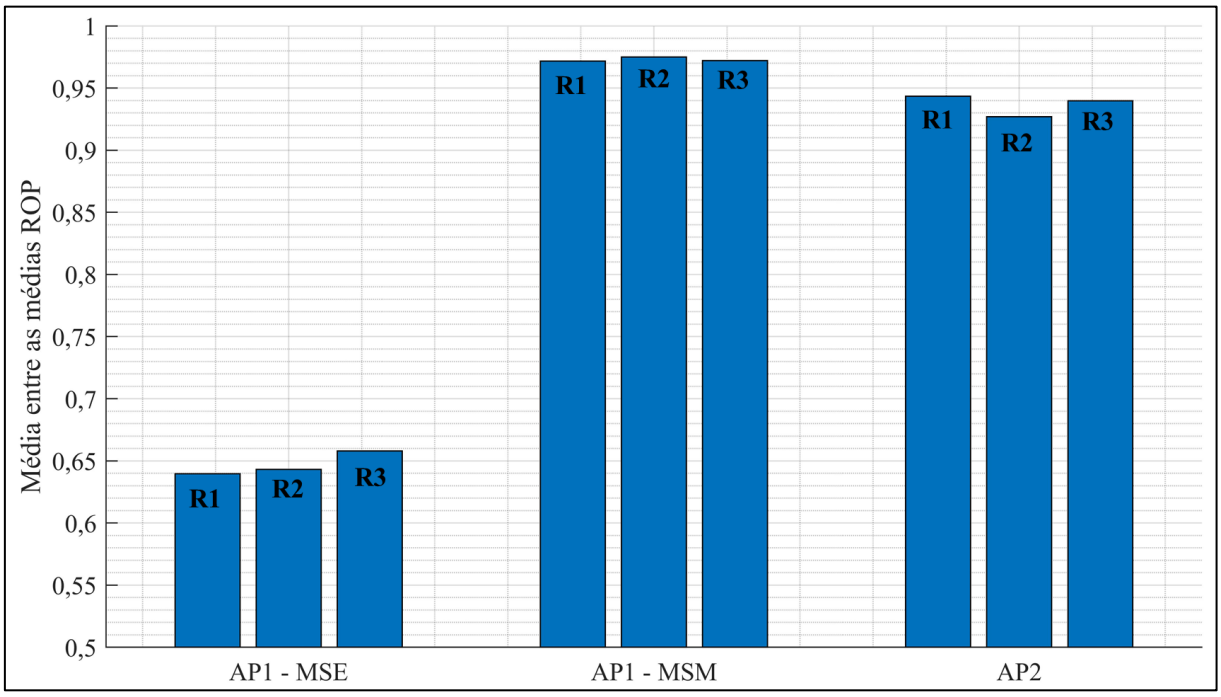
Fonte: Autor

Figura 4.36 – Média ROP blocos AP1



Fonte: Autor

Figura 4.37 – Média entre as médias ROP



Fonte: Autor

O cálculo do valor médio entre as médias ROP pode ser observado na Figura 4.37 para as fabricações MSE do AP1, fabricações MSM do AP1, e para o AP2, para as três repetições.

A comparação cruzada entre os valores médios ROP das fabricações MSM do AP1, e

valores médios RMS do AP2, revela que existe uma divergência de aproximadamente 0,03 a mais para as fabricações MSM do AP1. Entre os valores médios RMS das fabricações MSE do AP1, e valores médios RMS do AP2, a comparação cruzada revela que existe uma divergência de aproximadamente 0,3 a menos para as fabricações MSE do AP1.

4.5 RESULTADOS DA INSPEÇÃO VISUAL

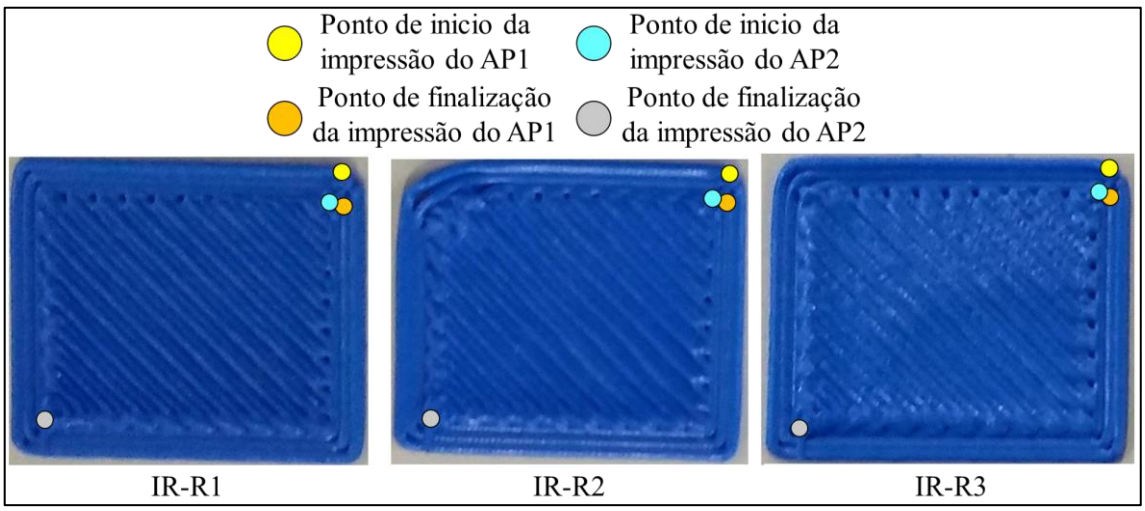
4.5.1 Análise nas peças digitalizadas

4.5.1.1 Peças obtidas nos V-VI

As três peças obtidas em condição de impressão regular (IR) dos testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão (V-VI) estão representadas na Figura 4.38. Em relação a análise de anomalias superficiais, inicialmente é possível observar que a repetição 2 (R2) apresenta uma deformação no canto superior esquerdo da peça. Esta deformação não é observada nas outras repetições, e pode ser atribuída a algum fator externo ocorrido durante os testes.

Também é possível observar que em relação as fabricações de *raster* observadas no arquétipo de preenchimento 2 (AP2), as peças representadas na Figura 4.38 apresentam repetibilidade, com a R2 apresentando certa deformação no ângulo de *raster* definido de 45º em algumas fabricações do AP2.

Figura 4.38 – Análise nas peças obtidas em IR dos V-VI



Fonte: Autor

Em relação a anomalias verificadas nos pontos de início e de finalização da impressão do AP1, as três repetições, representadas na Figura 4.38, apresentam repetibilidade. Evidenciada pela localização dos pontos de início das impressões do AP1 no canto superior direito das peças, e dos pontos de finalização das impressões do AP1 posicionados no lado direito das

peças, relativamente deslocados na vertical em relação aos pontos de início das impressões do AP1, e diretamente ao lado dos pontos de início das impressões do AP2.

Além disso é verificada repetibilidade entre as três repetições, representadas na Figura 4.38, em relação aos pontos de início e de finalização da impressão do AP2. Isto é evidenciado pela localização dos pontos de início das impressões do AP2 diretamente ao lado dos pontos de finalização das impressões do AP1, no canto superior direito do AP2, e os pontos de finalização das impressões do AP2, posicionados no canto inferior esquerdo do AP2.

Em relação a verificação de anomalias nos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, os resultados da análise realizada nas peças representadas na Figura 4.38 estão dispostos na Tabela 7. É possível observar que em relação ao número de vazios, não existe repetibilidade entre o número de vazios observados na interface entre o segmento 1 (S1) do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) e as fabricações do AP2. Também é possível observar que existe repetibilidade entre o número de vazios observados nas interfaces entre o S2 do AP1 e fabricações do AP2, S3 do AP1 e fabricações do AP2, e S4 do AP1 e fabricações do AP2. A análise realizada nas peças representadas na Figura 4.38 não revelaram a existência de espaços entre as fabricações do AP1, e entre as fabricações do AP2.

Tabela 7: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IR nos V-VI

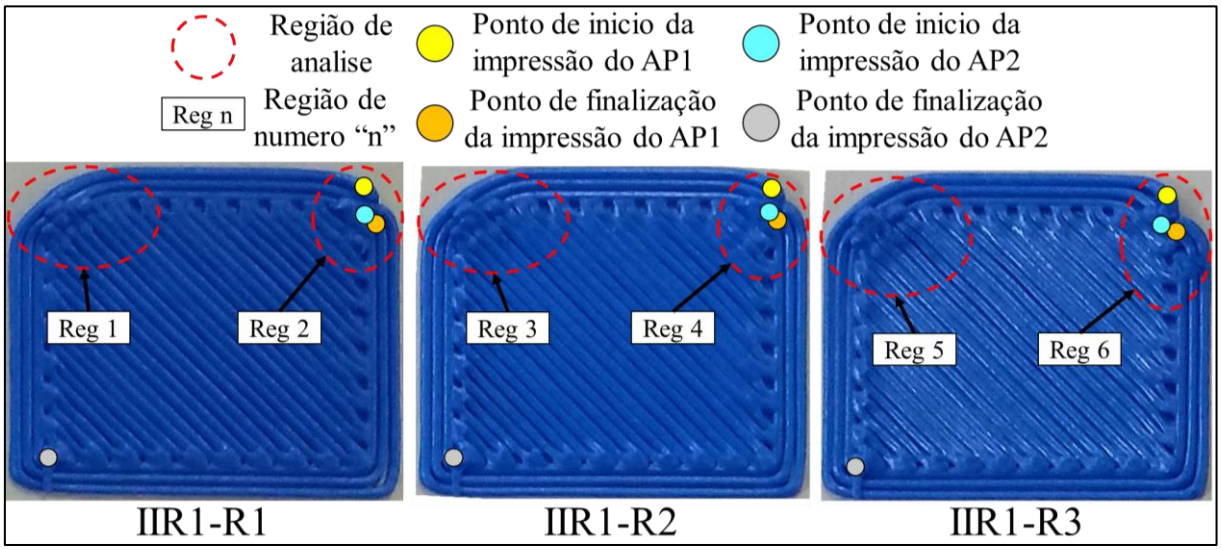
IR nos V-VI											
Número de vazios											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
5	0	0	6	3	0	0	6	8	0	0	6
Número de espaços no AP1											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de espaços no AP2											
R1				R2				R3			
0				0				0			

Fonte: Autor

As três peças obtidas em condição de impressão irregular 1 (IIR1) dos testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão (V-VI) estão representadas na Figura 4.39. É possível observar, conforme destacado nas regiões 1, 3 e 5, que houve alterações dimensionais consideráveis nos cantos superiores esquerdos das peças impressas, quando comparadas as peças representadas na Figura 4.38, com o surgimento de uma curvatura entre o S1 e S2 do AP1, e com a sobreposição de parte das fabricações do AP2 com as fabricações do S1 e S2 do AP1. Tal variação é atribuída a variação da característica velocidade de impressão de

15 mm/s para 30 mm/s entre as IR e IIR1. Também é possível observar que em relação as fabricações de *raster* observadas no AP2, as peças representadas na Figura 4.39 apresentam repetibilidade.

Figura 4.39 – Análise nas peças obtidas em IIR1 dos V-VI



Fonte: Autor

Em relação a anomalias verificadas nos pontos de início e de finalização da impressão do arquétipo de preenchimento 1 (AP1), as três repetições, representadas na Figura 4.39, apresentam repetibilidade. Evidenciada pela localização dos pontos de início das impressões do AP1 no canto superior direito das peças e pelos pontos de finalização das impressões do AP1 posicionados no lado direito das peças, relativamente deslocados na vertical em relação aos pontos de início das impressões do AP1, e diretamente ao lado dos pontos de início das impressões do AP2 nas R1 e R2. Em relação a R3, é verificada uma maior variação no posicionamento dos pontos de início e finalização das impressões do AP1. Também é visível a variação no posicionamento do ponto de início e de finalização das impressões do AP1, destacados nas regiões de análise 2, 4, e 6, em relação aos posicionamentos observados nas peças representadas na Figura 4.38. Tal variação, que evidencia uma alteração dimensional nas peças, é atribuída a variação da característica velocidade de impressão de 15 mm/s para 30 mm/s entre as condições de teste IR e IIR1.

Além disso é verificada repetibilidade entre as três repetições, representadas na Figura 4.39, em relação aos pontos de início e de finalização da impressão do arquétipo de preenchimento 2 (AP2). Isto é evidenciado, na repetição 1 (R1) e repetição 2 (R2), pela localização dos pontos de início das impressões do AP2 diretamente ao lado dos pontos de finalização das impressões do AP1, no canto superior direito do AP2, e os pontos de finalização das impressões

do AP2, posicionados no canto inferior esquerdo do AP2. Em relação a R3, é verificada uma maior variação no posicionamento dos pontos de início e finalização das impressões do AP2.

Em relação a verificação de anomalias nos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, os resultados da análise realizada nas peças representadas na Figura 4.39 estão dispostos na Tabela 8. É possível observar que em relação ao número de vazios, não existe repetibilidade entre o número de vazios observados nas interfaces entre o S1 do AP1 e as fabricações do AP2, S2 do AP1 e as fabricações do AP2, e S3 do AP1 e as fabricações do AP2. Também é possível observar que existe repetibilidade entre o número de vazios observados nas interfaces entre o S4 do AP1 e fabricações do AP2. A análise realizada nas peças representadas na Figura 4.38 revelaram a existência de espaços apenas no S4 da R1 entre as fabricações do AP1, e entre as fabricações do AP2.

Tabela 8: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR1 nos V-VI

IIR1 nos V-VI											
Número de vazios											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
6	7	9	7	6	6	8	7	7	3	2	7
Número de espaços no AP1											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de espaços no AP2											
R1				R2				R3			
0				0				0			

Fonte: Autor

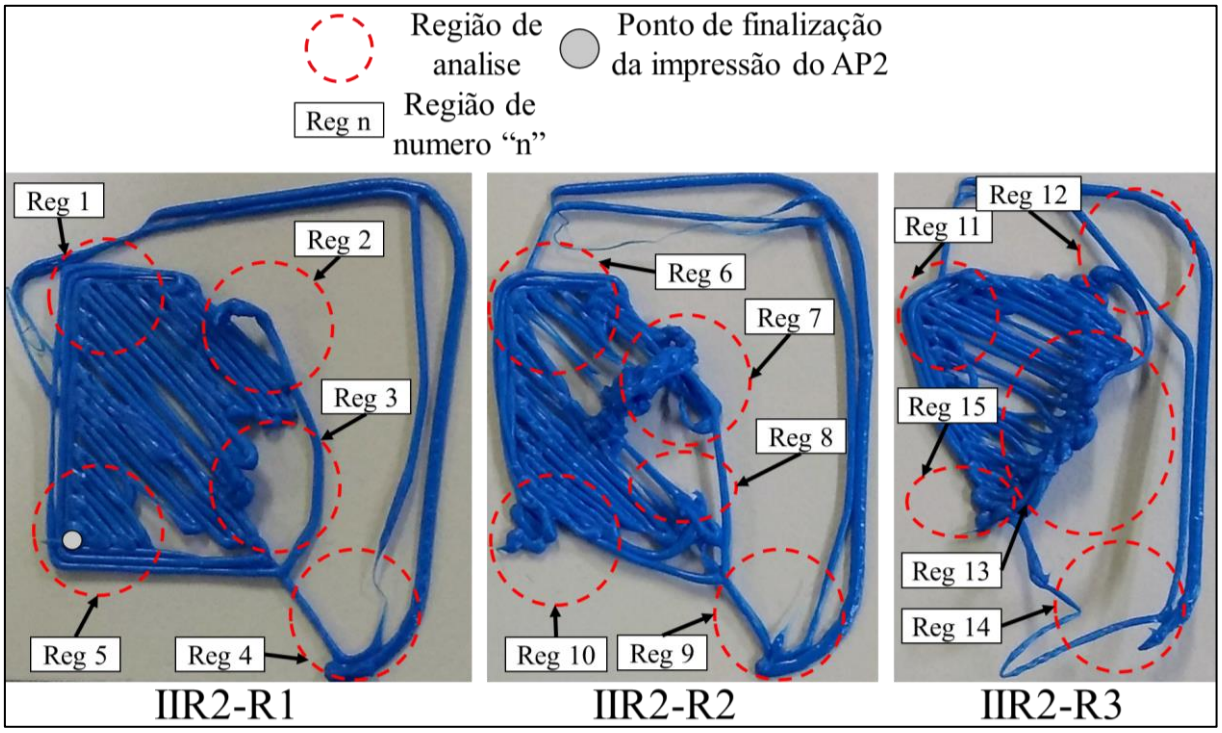
As três peças obtidas em condição de impressão irregular 2 (IIR2) dos testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão (V-VI) estão representadas na Figura 4.40. É possível observar, conforme destacado nas regiões de análise 1, 6 e 11 que houve alterações dimensionais consideráveis nos cantos superiores esquerdos das peças impressas, quando comparadas as peças representadas na Figura 4.38, com visíveis uniões entre as peças impressas e a respectivas saias. Deformações geométricas muito proeminentes também são verificadas nos cantos superiores direitos das peças impressas, como destacado nas regiões de análise 2, 7 e 12, quando comparados as peças representadas na Figura 4.38. Deformações estas que tornam impossível a delimitação dos pontos de início e fim da impressão do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) e do início da impressão do AP2. Em relação aos cantos inferiores direitos das peças, deformações geométricas consideráveis também são observadas, como destacado nas regiões de análise 4, 9 e 14. Em relação ao canto inferior esquerdo das peças, existem

deformações muito proeminentes na repetição 2 (R2) e repetição 3 (R3), tal como evidenciado nas regiões de análise 10 e 15, o que impossibilita a determinação do ponto de finalização da impressão do AP2. Somente na R1 que é possível delimitar o ponto de finalização do AP2, tal como apresentado na região de análise 5. Tais variações geométricas são atribuídas a variação da característica velocidade de impressão de 15 mm/s para 45 mm/s entre as IR e IIR2.

Também é possível observar que em relação as fabricações de *raster* observadas no AP2, as peças representadas na Figura 4.40 não apresentam repetibilidade seja em relação a largura ou ângulo de *raster*, tal como evidenciado nas regiões de análise 3, 8 e 13, onde grandes deformações geométricas entre as fabricações de *raster* são observadas.

Em relação aos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, os resultados da análise realizada nas peças representadas na Figura 4.40 estão dispostos na Tabela 9. Observa-se, conforme resultados da análise, que não foi possível delimitar o número de vazios e de espaços nos dois AP das três repetições, dado as grandes deformações geométricas ocasionadas pela variação da característica de impressão velocidade de impressão.

Figura 4.40 – Análise nas peças obtidas em IIR2 dos V-VI



Fonte: Autor

Tabela 9: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR2 nos V-VI

IIR2 nos V-VI											
Número de vazios											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Impossível delimitar				Impossível delimitar				Impossível delimitar			
Número de espaços no AP1											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Impossível delimitar				Impossível delimitar				Impossível delimitar			
Número de espaços no AP2											
R1				R2				R3			
Impossível delimitar				Impossível delimitar				Impossível delimitar			

Fonte: Autor

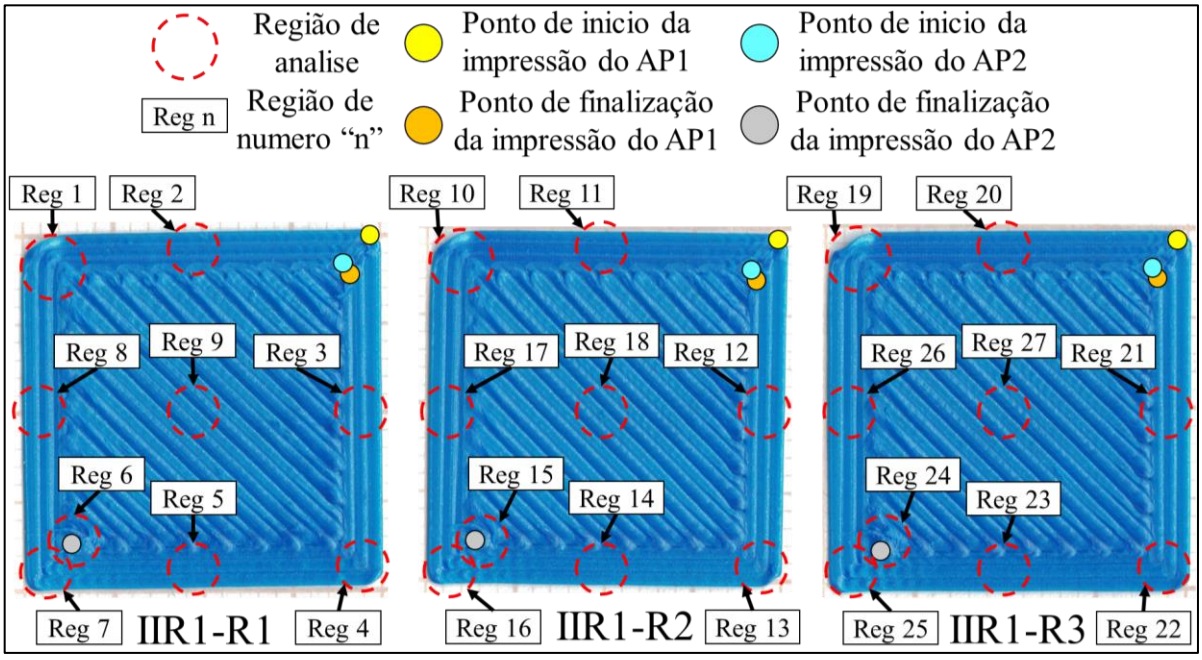
4.5.1.2 Peças obtidas nos V-DZ

As três peças obtidas em condição de impressão irregular 1 (IIR1) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) estão representadas na Figura 4.41. Em relação a análise de anomalias superficiais, inicialmente é possível observar que existe repetibilidade entre as peças obtidas para a IIR1. Isto é evidenciado pelas deformações geométricas observadas de mesmo tipo ao longo da superfície das peças. Nas regiões de análise 1, 10 e 19, referentes a fabricação dos cantos superiores esquerdos das peças impressas, é possível observar a existência de deformações geométricas em forma de curvas entre as fabricações do segmento 1 (S1) e S2 do arquétipo de preenchimento 1 (AP1). Nas regiões de análise 7, 16 e 25 o mesmo tipo de deformação geométrica é observada entre as fabricações do S2 e S3 do AP1. Por fim, nas regiões de análise 4, 13 e 22, deformações geométricas de mesmo tipo são observadas entre as fabricações S3 e S4 do AP1.

Outras evidencias da repetibilidade observada entre as peças representadas na Figura 4.41 estão evidenciadas no posicionamento dos pontos de início e fim da impressão do AP1, e pontos de início e fim da impressão do AP2. É possível observar que, para as três repetições, o ponto de início da impressão do AP1 está localizado no canto superior direito da peça, enquanto o ponto de finalização da impressão do AP1 está deslocado vertical e horizontalmente em relação ao ponto de início da impressão do AP1, em distâncias equivalentes a largura dos S1 e S4, respectivamente. Em relação ao AP2, o posicionamento dos pontos de início da impressão deste AP apresenta excelente repetibilidade, estando estes deslocados ligeiramente na vertical e ho-

rizontal em relação ao ponto de finalização do AP1. Outrossim, os pontos finalização da impressão do AP2 também apresenta excelente repetibilidade, estando estes posicionados no canto inferior esquerdo do AP2.

Figura 4.41 – Análise nas peças obtidas em IIR1 dos V-DZ



Fonte: Autor

Tabela 10: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR1 nos V-DZ

IIR1 nos V-DZ											
Número de vazios											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de espaços no AP1											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de espaços no AP2											
R1				R2				R3			
0				0				0			

Fonte: Autor

Em relação a verificação de anomalias nos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, os resultados da análise realizada nas peças representadas na Figura 4.41 estão dispostos na Tabela 10. Observa-se, conforme resultados da análise, que não foram encontrados vazios ou espaços nos dois AP das três repetições. Isto é atribuído as deformações geométricas

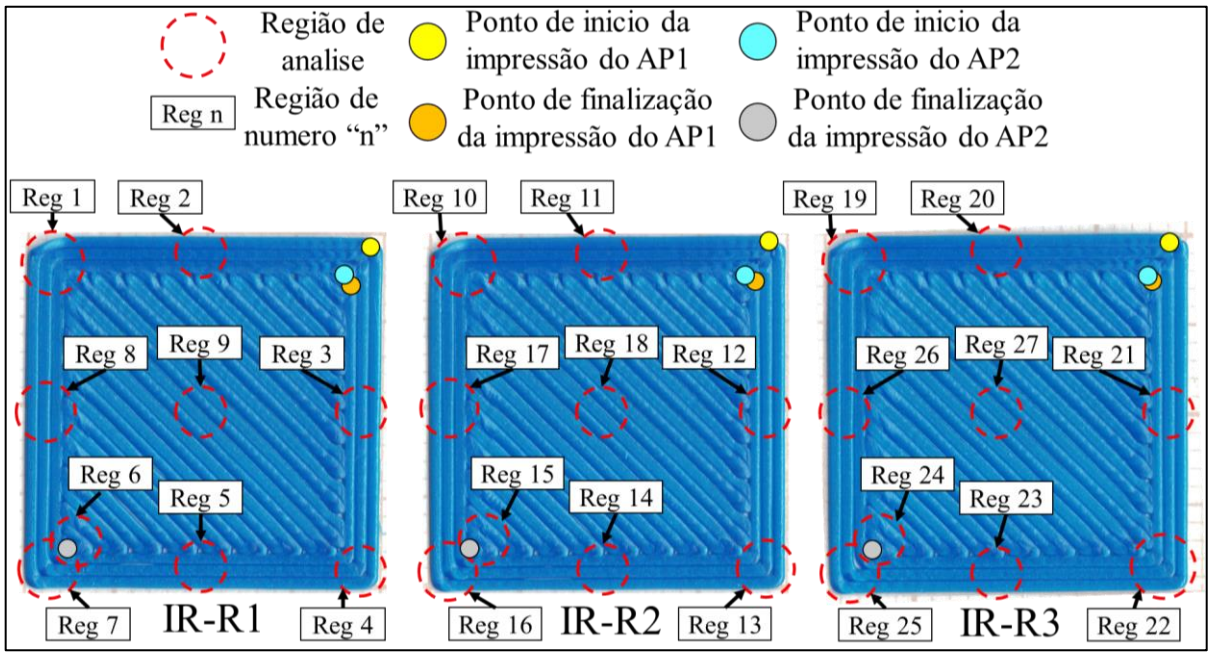
ocasionadas pela variação da característica de deslocamento do extrusor no eixo Z para um valor negativo.

As três peças obtidas em condição de impressão regular (IR) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) estão representadas na Figura 4.42. Inicialmente, é possível observar que existe repetibilidade entre as peças obtidas para a IR. Isto é evidenciado na análise comparada entre as regiões de análise 1, 10 e 19, referente a transição entre as fabricações segmento 1 (S1) e S2 do arquétipo de preenchimento 1 (AP1), regiões de análise 7, 16 e 25, referente a transição entre as fabricações S2 e S3 do AP1, e regiões de análise 4, 13 e 22, referente a transição entre as fabricações S3 e S4 do AP1. Outrossim, também é possível observar repetibilidade no AP1 entre as fabricações do S1, verificadas nas regiões de análise 2, 11 e 20, fabricações do S2, verificada nas regiões de análise 8, 17 e 26, fabricações do S3, verificada nas regiões de análise 5, 14 e 23, e fabricações do S4, verificada nas regiões de análise 3, 12 e 21.

As análises realizadas em relação as anomalias superficiais no posicionamento dos pontos de início e de finalização da impressão do AP1 e do AP2, representadas na Figura 4.42, revelam que existe excelente repetibilidade entre as peças obtidas. É possível observar que, para as três repetições, o ponto de início da impressão do AP1 está localizado no canto superior direito da peça, enquanto o ponto de finalização da impressão do AP1 está deslocado vertical e horizontalmente em relação ao ponto de início da impressão do AP1, em distâncias equivalentes a largura dos S1 e S4, respectivamente. Em relação ao AP2, o posicionamento dos pontos de início da impressão deste AP apresenta excelente repetibilidade, estando estes deslocados ligeiramente na vertical e horizontal em relação ao ponto de finalização do AP1; outrossim, os pontos finalização da impressão do AP2 também apresenta excelente repetibilidade, estando estes posicionados no canto inferior esquerdo do AP2, nas regiões de análise 6, 15 e 24.

Em relação as anomalias verificadas nos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, os resultados da análise realizada nas peças representadas na Figura 4.42 estão dispostos na Tabela 11. Observa-se, conforme resultados da análise, que existe excelente repetibilidade entre as peças obtidas. Isto está evidenciado pelo número igual de vazios encontrados nos 4 segmentos das 3 peças, e pelo posicionamento destes serem também análogos. Outrossim, é percebida a existência de 1 espaço no AP2 da R1, e a existência de 1 espaço no AP2 da R2. Devido ao posicionamento e tamanho dos espaços serem distintos, o surgimento destes são atribuídos a pequenas interferências externas ao processo, e não resultado direto de uma incorreta parametrização da impressão.

Figura 4.42 – Análise nas peças obtidas em IR dos V-DZ



Fonte: Autor

Tabela 11: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IR nos V-DZ

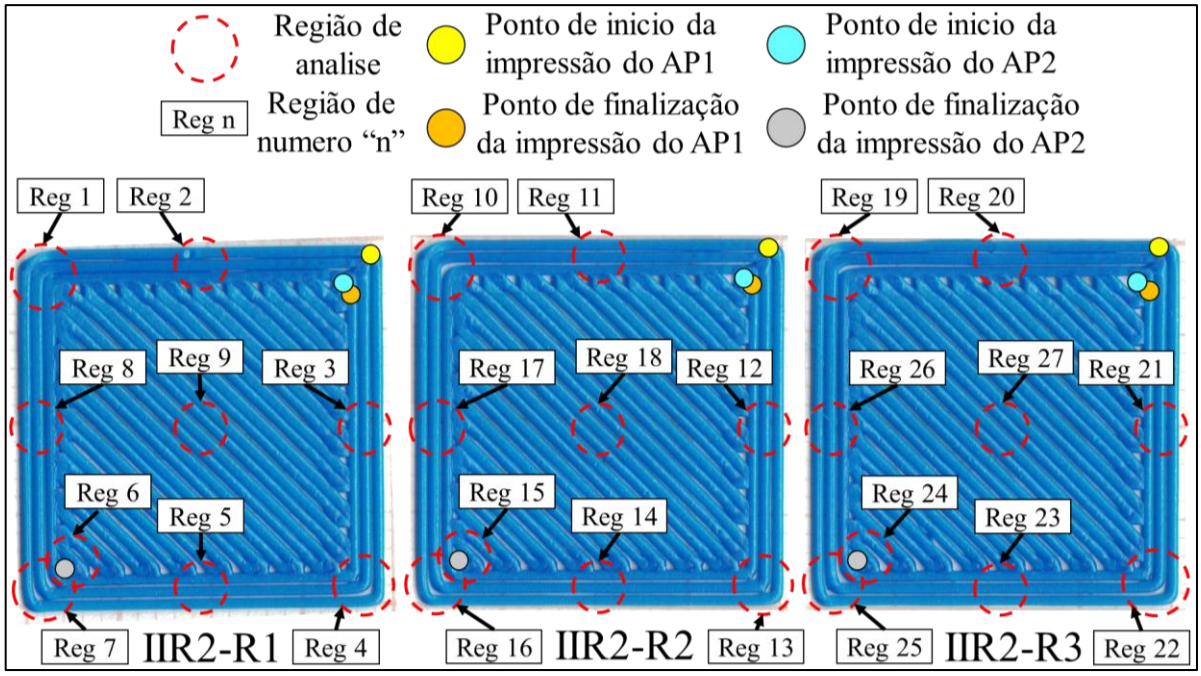
IR nos V-DZ											
Número de vazios											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
7	0	8	5	7	0	8	5	7	0	8	5
Número de espaços no AP1											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Número de espaços no AP2											
R1				R2				R3			
1				1				0			

Fonte: Autor

As três peças obtidas em condição de impressão irregular 2 (IIR2) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) estão representadas na Figura 4.43. Inicialmente, é possível observar que existe repetibilidade entre as peças obtidas para a IIR2. Isto é evidenciado pelas deformações geométricas observadas de mesmo tipo ao longo da superfície das peças. Nas regiões de análise 1, 10 e 19, referentes a fabricação dos cantos superiores esquerdos das peças impressas, é possível observar a existência de deformações geométricas em forma de curvas entre as fabricações do segmento 1 (S1) e S2 do arquétipo de preenchimento 1 (AP1). Nas regiões de análise 7, 16 e 25 o mesmo tipo de deformação geométrica é observada entre as fabricações do S2 e S3 do AP1. Por fim, nas regiões de análise 4, 13

e 22, deformações geométricas de mesmo tipo são observadas entre as fabricações S3 e S4 do AP1.

Figura 4.43 – Análise nas peças obtidas em IIR2 dos V-DZ



Fonte: Autor

Outras evidencias da repetibilidade observada entre as peças representadas na Figura 4.43 estão evidenciadas no posicionamento dos pontos de início e fim da impressão do AP1, e pontos de início e fim da impressão do AP2. É possível observar que, para as três repetições, o ponto de início da impressão do AP1 está localizado no canto superior direito da peça, enquanto o ponto de finalização da impressão do AP1 está deslocado vertical e horizontalmente em relação ao ponto de início da impressão do AP1, em distâncias equivalentes a largura dos segmentos 1 e 4, respectivamente. Em relação ao AP2, o posicionamento dos pontos de início da impressão deste AP apresenta excelente repetibilidade, estando estes deslocados ligeiramente na vertical e horizontal em relação ao ponto de finalização do AP1. Outrossim, os pontos finalização da impressão do AP2 também apresenta excelente repetibilidade, estando estes posicionados no canto inferior esquerdo do AP2.

Em relação a verificação de anomalias nos parâmetros fundamentais de camada vazio e espaço, os resultados da análise realizada nas peças representadas na Figura 4.43 estão dispostos na Tabela 12. Observa-se, conforme resultados da análise, que existe excelente repetibilidade entre as peças obtidas. Isto está evidenciado pelo número igual de vazios encontrados nos 4 segmentos do AP1 das 3 peças, e pelo posicionamento destes serem também análogos. Outrossim, outro fator que indica a excelente repetibilidade das peças é a existência de número

de espaços iguais no AP1 e no AP2 das três peças. Devido ao posicionamento e tamanho dos espaços serem majoritariamente os mesmos, a existência destes é atribuída a defasagem positiva no eixo Z, única das IIR2 dos V-DZ.

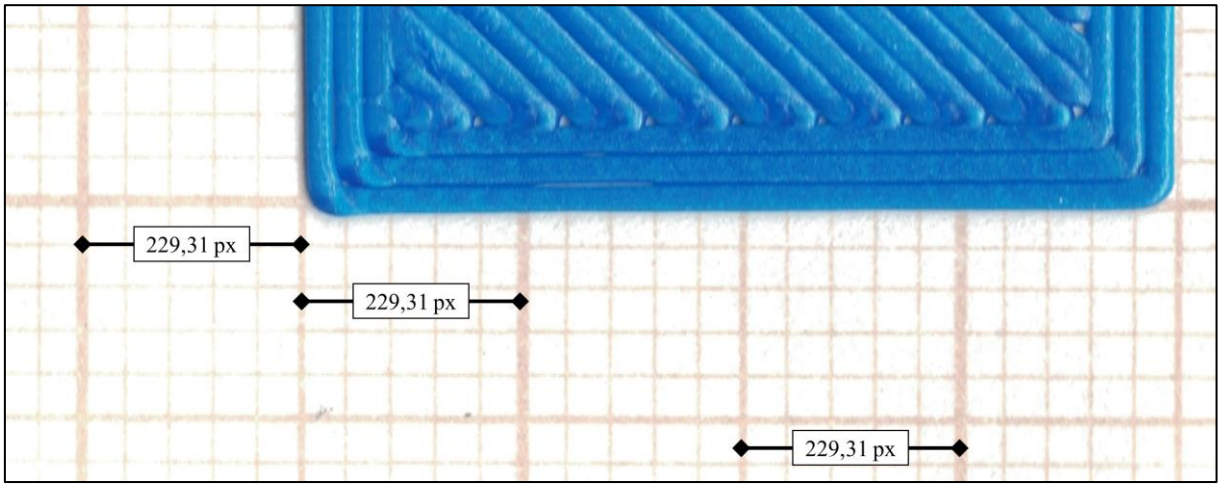
O resultado da análise visando a obtenção de referência para conversão pixel-milímetro do processo de digitalização está representado na Figura 4.44. É possível verificar com o auxílio da ferramenta *measure distance* no Matlab®, que a referência de 5 mm, análogo a cada quadrado composto de cinco quadrados menores de 1 mm cada, equivale a aproximadamente 229,31 pixels. Esta referência foi confirmada em três diferentes conjuntos de quadrados, conforme representado na Figura 4.44.

Tabela 12: Resultados da análise em relação aos parâmetros fundamentais de camada vázio e espaço nas peças fabricadas em IIR2 nos V-DZ

IIR2 nos V-DZ											
Número de vazios											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
8	7	8	7	8	7	8	7	8	7	8	7
Número de espaços no AP1											
R1				R2				R3			
S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Número de espaços no AP2											
R1				R2				R3			
14				14				14			

Fonte: Autor

Figura 4.44 – Referência para conversão pixel-milímetro do processo de digitalização

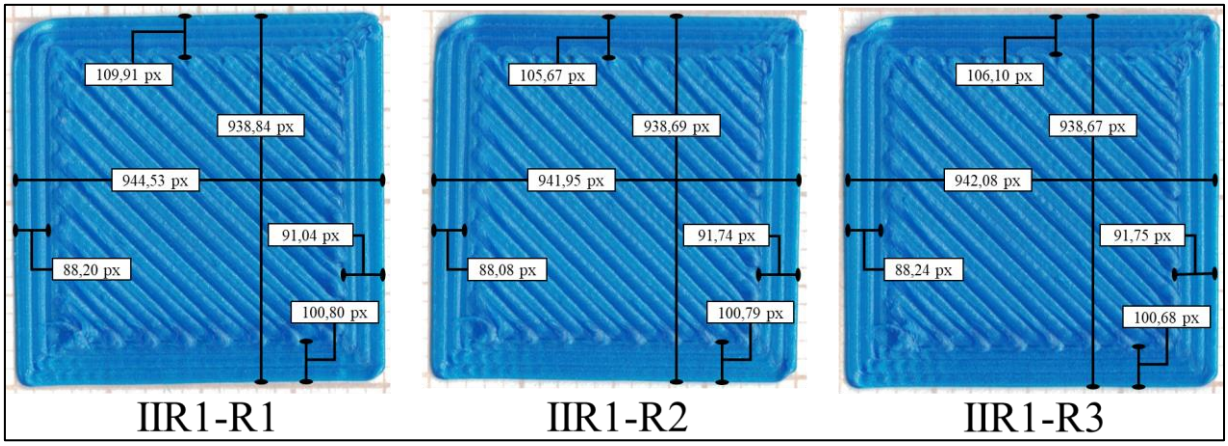


Fonte: Autor

O resultado da medição realizada nas imagens digitalizadas das peças impressas em condição de impressão irregular 1 (IIR1) estão representadas na Figura 4.45 em número de

pixels. É possível verificar que existe repetibilidade entre as medidas obtidas das peças impressas, com a maior parte das variações geométricas presentes somente na primeira casa após a virgula. Somente na largura total das peças, e na fabricação do segmento 1 (S1) do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) é que se verifica uma variação mais significativa entre as medidas realizadas para as três peças.

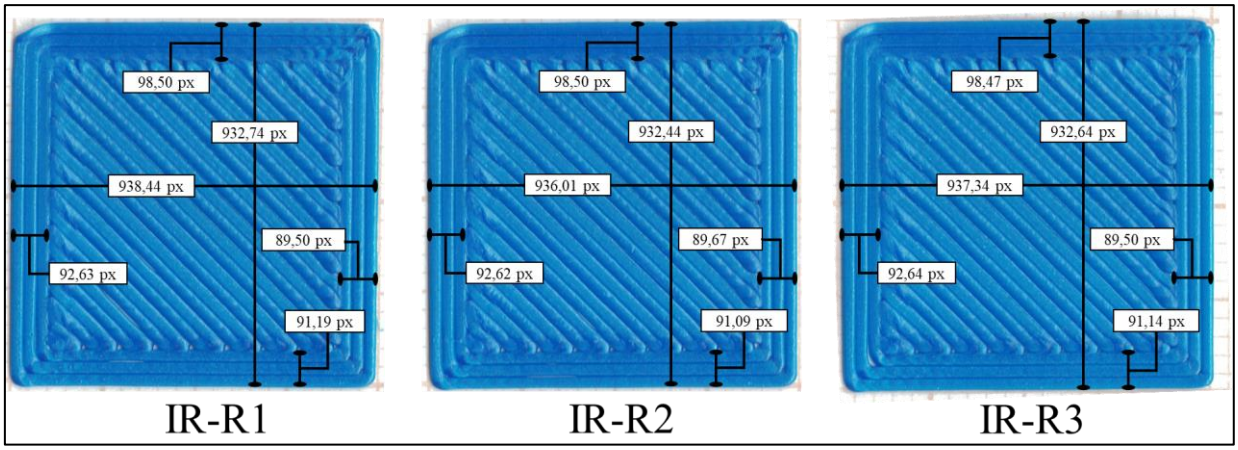
Figura 4.45 – Avaliação dimensional das peças impressas em IIR1 nos V-DZ



Fonte: Autor

O resultado da medição realizada nas imagens digitalizadas das peças impressas em condição de impressão regular (IR) estão representadas na Figura 4.46 em número de pixels. É possível verificar que existe excelente repetibilidade entre as medidas obtidas das peças impressas, com a maior parte das variações geométricas presentes somente na primeira casa após a virgula. Somente na largura total das peças é que se verifica uma variação maior entre as medidas realizadas para as três peças, e mesmo esta, apresenta uma variação de aproximadamente 2 pixels.

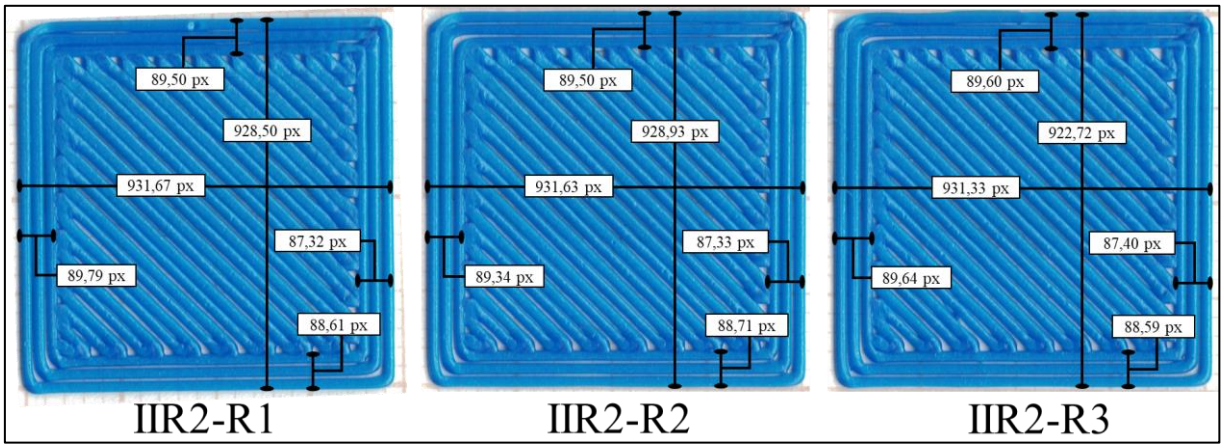
Figura 4.46 – Avaliação dimensional das peças impressas em IR nos V-DZ



Fonte: Autor

O resultado da medição realizada nas imagens digitalizadas das peças impressas em condição de impressão irregular 2 (IIR2) estão representadas na Figura 4.47 em número de pixels. É possível verificar que existe excelente repetibilidade entre as medidas obtidas das peças impressas, com todas as variações de medida acontecendo somente na primeira casa após a virgula.

Figura 4.47 – Avaliação dimensional das peças impressas em IIR2 nos V-DZ



Fonte: Autor

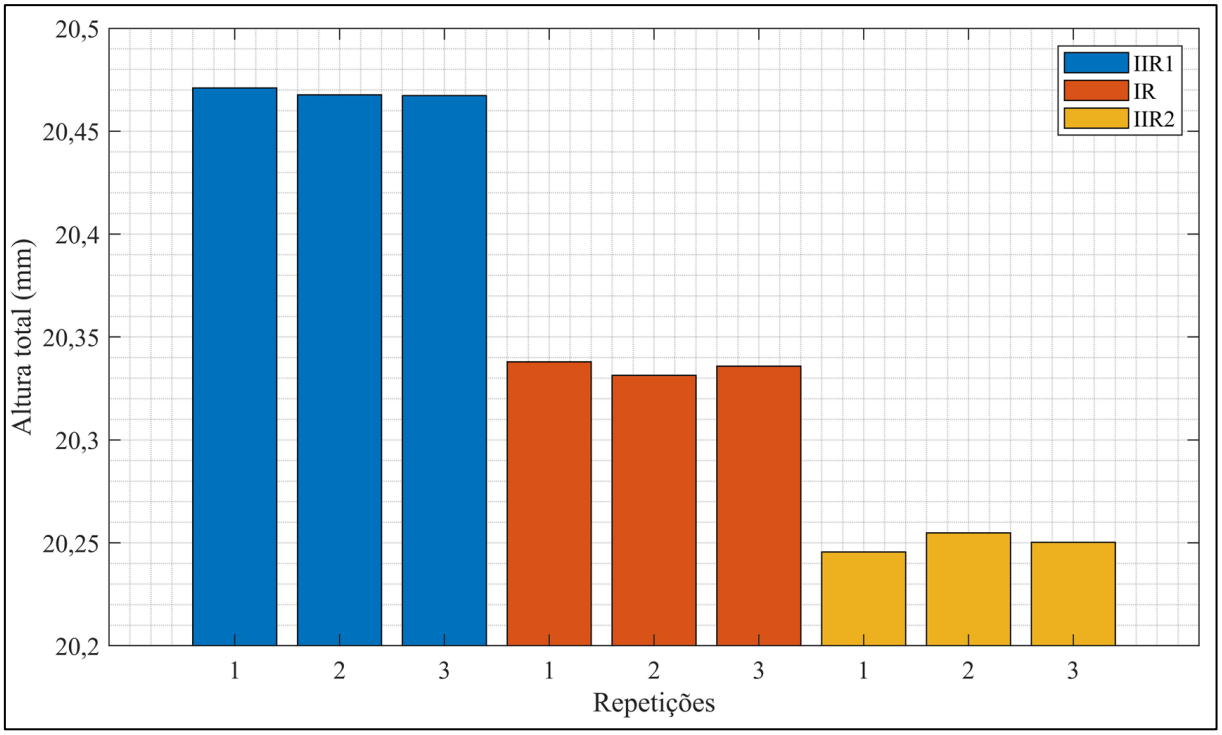
As medidas de altura total das peças, após terem sido convertidas para milímetros, estão representadas na Figura 4.48 para as três repetições de cada condição de impressão dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ). A análise na Figura 4.48 revela que existe excelente repetibilidade na altura total das peças entre as repetições para cada condição de teste, com poucas variações entre as medidas obtidas para cada condição.

Outrossim, é possível verificar na Figura 4.48 que as deformações geométricas oriundas da variação da característica de impressão defasagem no eixo Z estão representadas pelas variações na altura total das peças, com as peças impressas em condição de impressão regular (IR) apresentando valores de altura total entre 20,32 mm e 20,34 mm, as peças impressas em condição de impressão irregular 1 (IIR1) apresentando valores de altura total entre 20,46 mm e 20,48 mm, e as peças impressas em condição de impressão irregular 2 (IIR2) apresentando valores de altura total entre 20,24 mm e 20,27 mm.

As medidas de largura total das peças, após terem sido convertidas para milímetros, estão representadas na Figura 4.49 para as três repetições de cada condição de impressão dos V-DZ. A análise na Figura 4.49 revela que existe repetibilidade na largura total das peças entre as repetições para cada condição de teste, com poucas variações entre as medidas obtidas para

cada condição. Valores de variação um pouco maiores são perceptíveis na repetição 1 (R1) da IIR1 e da IR.

Figura 4.48 – Altura total das peças



Fonte: Autor

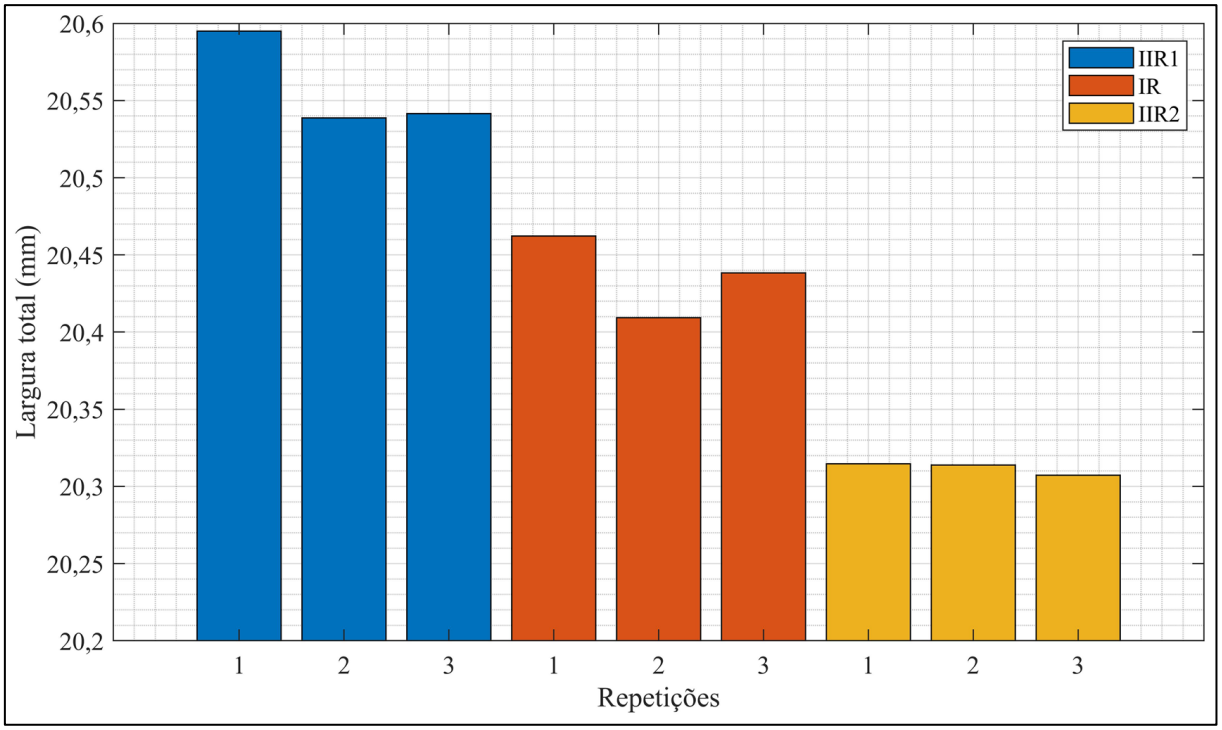
Outrossim, é possível verificar na Figura 4.49 que as deformações geométricas oriundas da variação da característica de impressão defasagem no eixo Z estão representadas pelas variações na largura total das peças, com as peças impressas em IR apresentando valores de largura total entre 20,40 mm e 20,47 mm, as peças impressas em IIR1 apresentando valores de largura total entre 20,53 mm e 20,60 mm, e as peças impressas em IIR2 apresentando valores de largura total entre 20,30 mm e 20,32 mm.

As medidas de largura do S1 das peças, após terem sido convertidas para milímetros, estão representadas na Figura 4.50 para as três repetições de cada condição de impressão dos V-DZ. A análise na Figura 4.50 revela que existe excelente repetibilidade na largura do segmento 1 (S1) das peças entre as repetições para cada condição de teste, com poucas variações entre as medidas obtidas para cada condição.

Outrossim, é possível verificar na Figura 4.50 que as deformações geométricas oriundas da variação da característica de impressão defasagem no eixo Z estão representadas pelas variações na largura do S1 das peças, com as peças impressas em IR apresentando valores de largura de S1 entre 2,14 mm e 2,15 mm, as peças impressas em IIR1 apresentando valores de

largura de S1 entre 2,30 mm e 2,40 mm, e as peças impressas em IIR2 apresentando valores de largura de S1 entre 1,95 mm e 1,96 mm.

Figura 4.49 – Largura total das peças

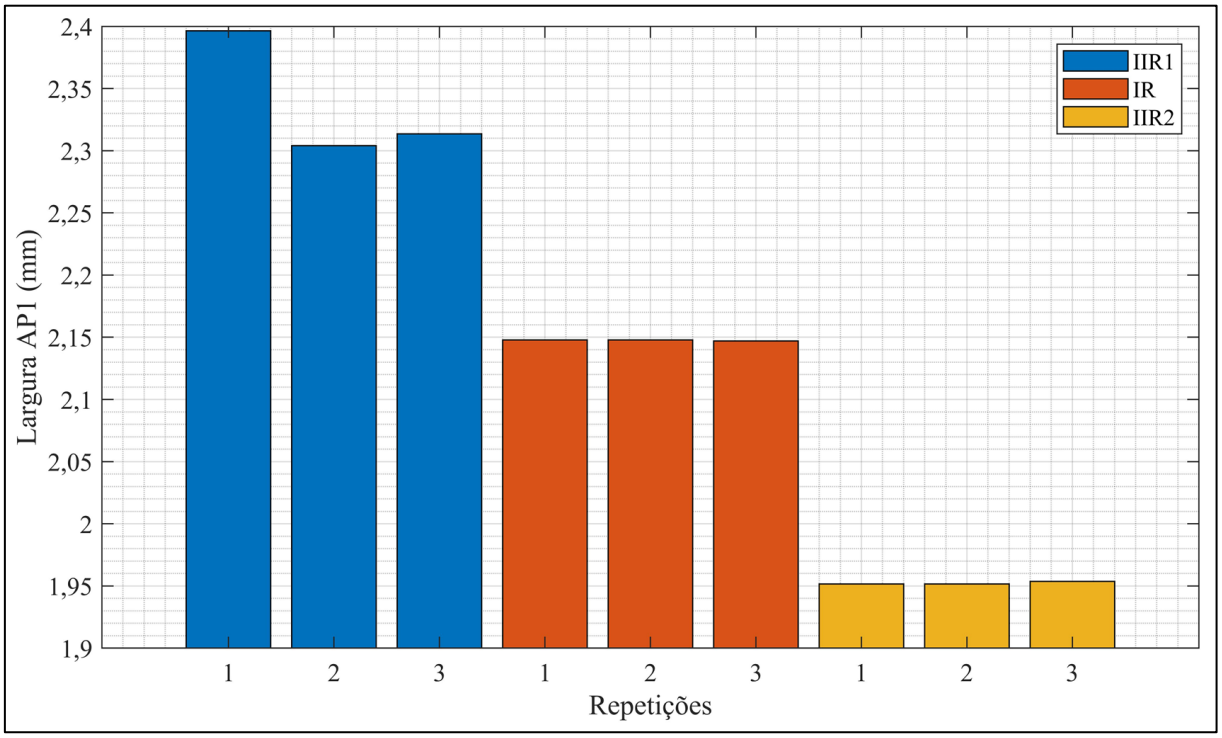


Fonte: Autor

As medidas de largura do S2 das peças, após terem sido convertidas para milímetros, estão representadas na Figura 4.51 para as três repetições de cada condição de impressão dos V-DZ. A análise Figura 4.51 revela que existe repetibilidade na largura do S2 das peças entre as repetições para cada condição de teste, com poucas variações entre as medidas obtidas para cada condição. Valores de variação um pouco maiores são perceptíveis na R2 da IIR1 e na R1 da IIR2.

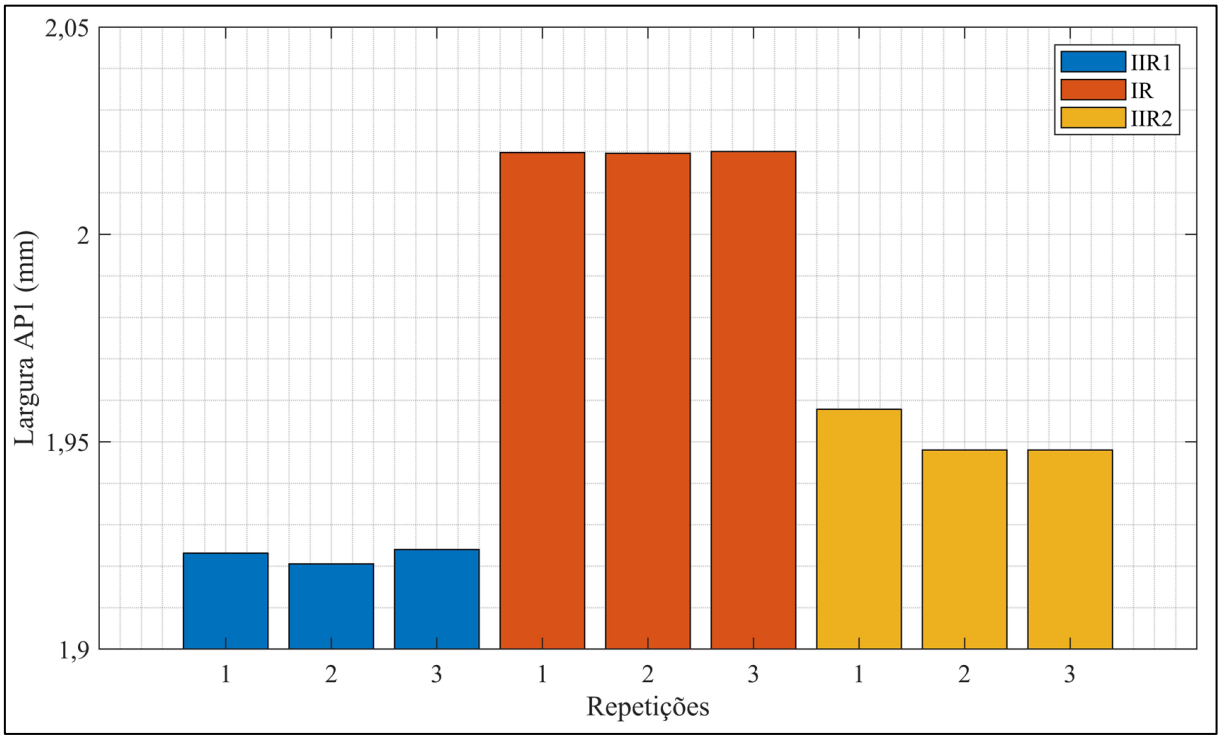
Outrossim, é possível verificar Figura 4.51 que as deformações geométricas oriundas da variação da característica de impressão defasagem no eixo Z estão representadas pelas variações na largura do S2 das peças, com as peças impressas em IR apresentando valores de largura de S2 próximos a 2,02 mm, as peças impressas em IIR1 apresentando valores de largura de S2 entre 1,92 mm e 1,93 mm, e as peças impressas em IIR2 apresentando valores de largura de S2 entre 1,94 mm e 1,96 mm.

Figura 4.50 – Largura segmento 1



Fonte: Autor

Figura 4.51 – Largura segmento 2

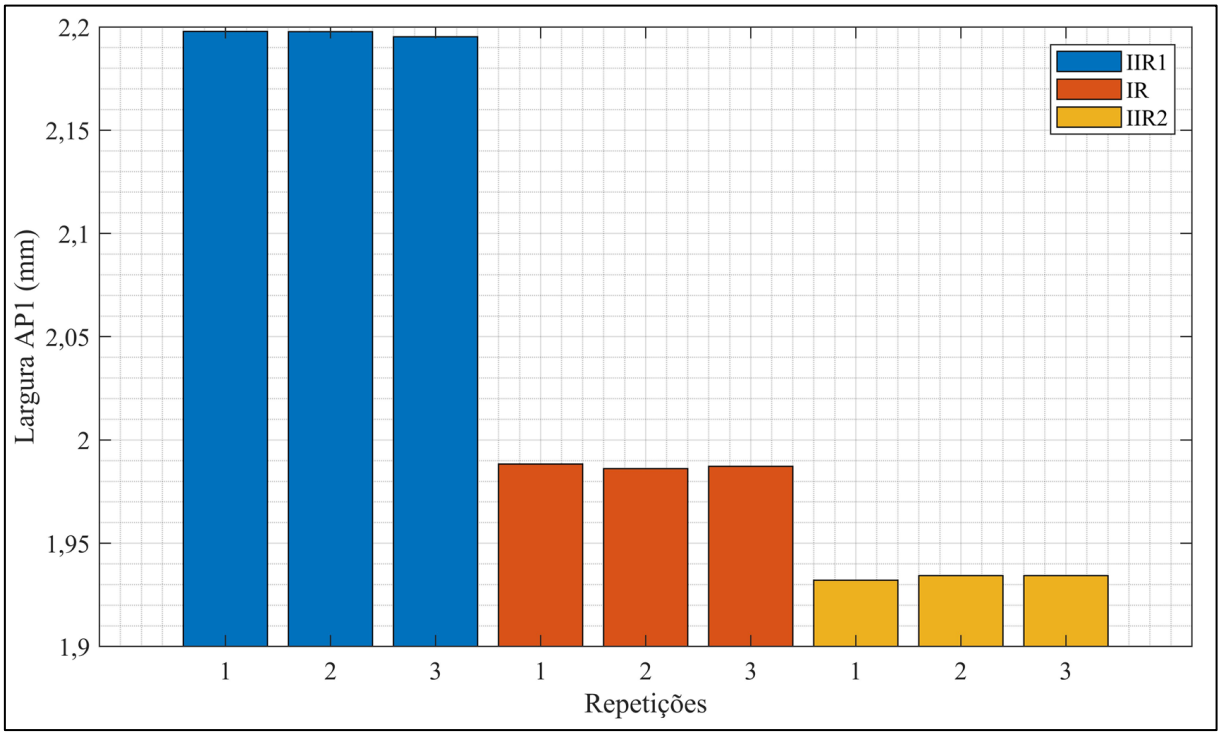


Fone: Autor

As medidas de largura do segmento 3 (S3) das peças, após terem sido convertidas para milímetros, estão representadas na Figura 4.52 para as três repetições de cada condição de impressão dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ). A

análise na Figura 4.52 revela que existe repetibilidade na largura do S3 das peças entre as repetições para cada condição de teste, com poucas variações entre as medidas obtidas para cada condição. Valores de variação um pouco maiores são perceptíveis na repetição 2 (R2) da condição de impressão irregular 1 (IIR1) e na R1 da condição de impressão irregular 2 (IIR2).

Figura 4.52 – Largura segmento 3

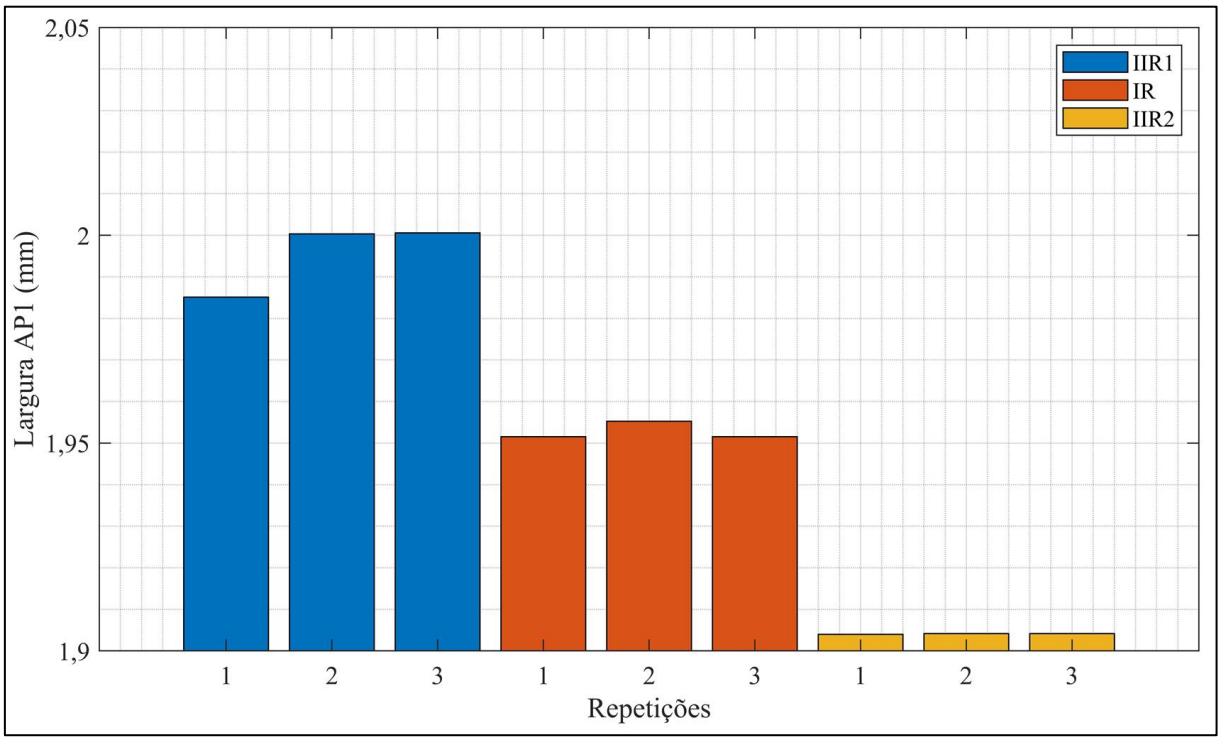


Fonte: Autor

Outrossim, é possível verificar na Figura 4.52 que as deformações geométricas oriundas da variação da característica de impressão defasagem no eixo Z estão representadas pelas variações na largura do S3 das peças, com as peças impressas em condição de impressão regular (IR) apresentando valores de largura de S3 entre 1,98 mm e 1,99 mm, as peças impressas em IIR1 apresentando valores de largura de S3 entre 2,19 mm e 2,20 mm, e as peças impressas em IIR2 apresentando valores de largura de S3 entre 1,93 mm e 1,94 mm.

As medidas de largura do S4 das peças, após terem sido convertidas para milímetros, estão representadas na Figura 4.53 para as três repetições de cada condição de impressão dos V-DZ. A análise na Figura 4.53 revela que existe repetibilidade na largura do S4 das peças entre as repetições para cada condição de teste, com poucas variações entre as medidas obtidas para cada condição. Valores de variação um pouco maiores são perceptíveis na R1 da IIR1.

Figura 4.53 – Largura segmento 4



Fonte: Autor

Outrossim, é possível verificar na Figura 4.53 que as deformações geométricas oriundas da variação da característica de impressão defasagem no eixo Z estão representadas pelas variações na largura do S4 das peças, com as peças impressas em IR apresentando valores de largura de S4 entre 1,95 mm e 1,96 mm, as peças impressas em IIR1 apresentando valores de largura de S4 entre 1,98 mm e 2,00 mm, e as peças impressas em IIR2 apresentando valores de largura de S4 entre 1,90 mm e 1,91 mm.

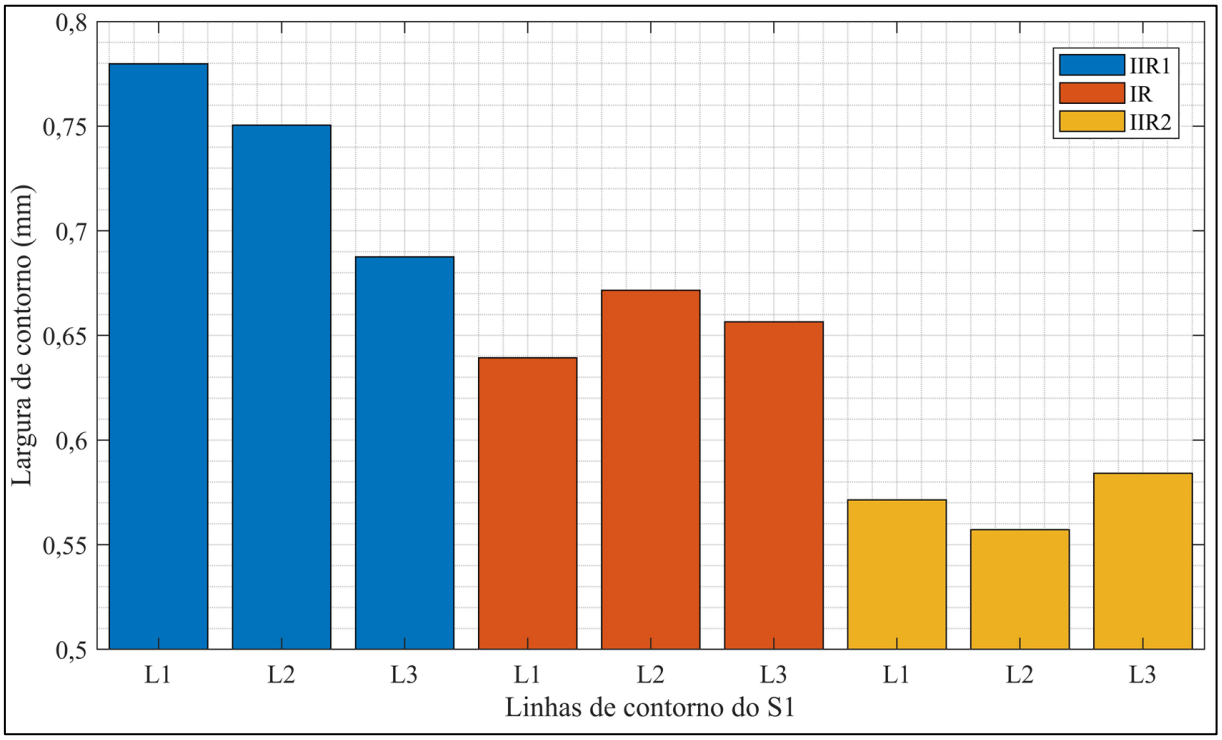
Pelos resultados expostos, fica evidente a existência de deformações geométricas de diferentes características em todos os segmentos do AP1 nas IIR1 e IIR2.

4.5.2 Análise por microscopia óptica

Os resultados da análise por microscopia óptica nas linhas de contorno do segmento 1 (S1), para as três repetições das três condições dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ), estão representados em totalidade no APÊNDICE V.

Os valores médios obtidos entre as larguras de contorno do S1 das três repetições de cada condição de impressão estão representados na Figura 4.54. É possível observar que os valores médios de larguras de contorno do S1, obtidas em condição de impressão irregular 1 (IIR1), apresentam um comportamento decrescente ao longo das três linhas fabricadas, com valores entre 0,68 mm e 0,79 mm.

Figura 4.54 – Larguras de contorno médias das linhas do segmento 1



Fonte: Autor

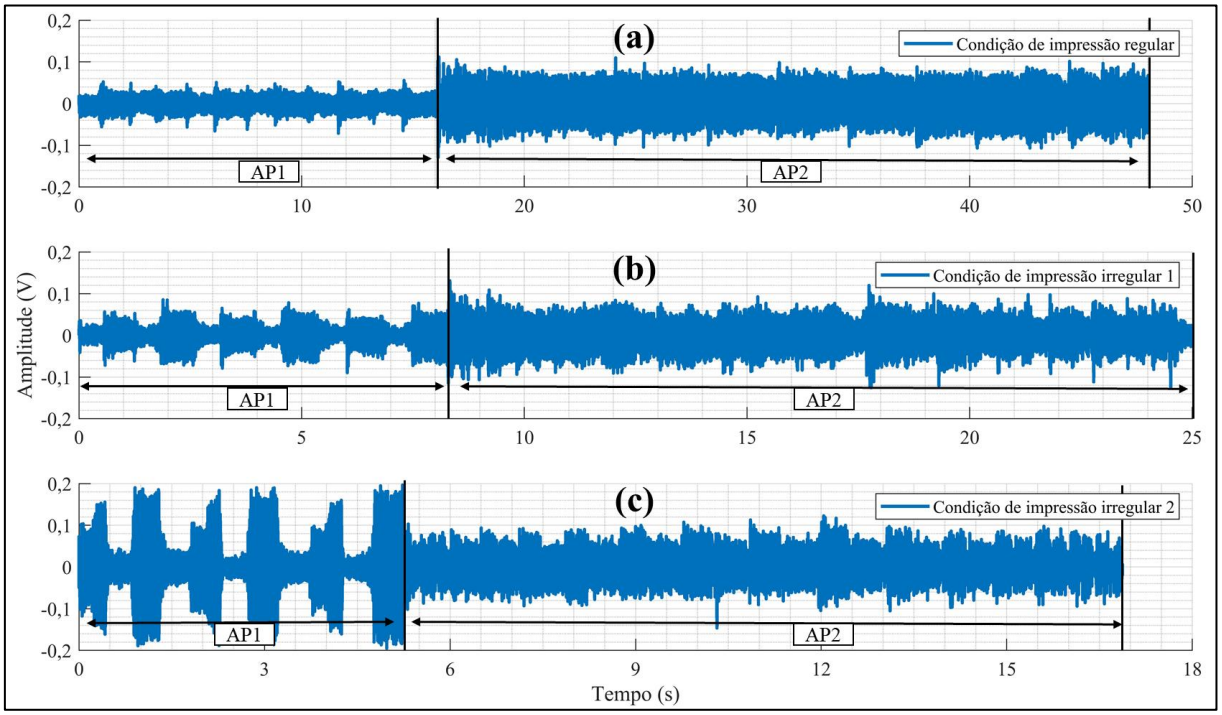
Os valores médios de largura de contorno do S1, obtidas em condição de impressão regular (IR), apresentam valores mais próximos entre si, e menores do que os vistos para a IIR1, com valores entre 0,63 mm e 0,68 mm. Por fim, os valores médios de largura de contorno do S1, obtidas em condição de impressão irregular 2 (IIR2), valores mais próximos entre si, e menores do que os vistos para a IR, com valores entre 0,55 mm e 0,58 mm.

4.6 RESULTADOS DOS TESTES DE IMPRESSÃO

4.6.1 Resultados das análises nos sinais dos V-VI

A Figura 4.55 apresenta três sinais brutos, relativos à condição de impressão irregular 1 (IIR1), condição de impressão regular (IR) e condição de impressão irregular 2 (IIR2), coletados pelo PZT durante os testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão (V-VI). Uma primeira análise nos sinais revela que as durações dos sinais obtidos são distintas, com o sinal relativo à IR, representado na Figura 4.55(a), apresentando a maior duração. Os sinais brutos relativos a IIR1 e IIR2, representados nas na Figura 4.55 (b) na Figura 4.55(c), respectivamente, apresentam, por outro lado, valores de duração inferiores ao obtido em IR. Além de serem sucessivamente decrescentes. Esta variação na duração dos sinais obtidos é atribuída a mudança na característica velocidade de impressão nas condições de teste.

Figura 4.55 – Representação de três sinais brutos obtidos do V-VI. (a) Teste em IR, (b) Teste em IIR1, (c) Teste em IIR2



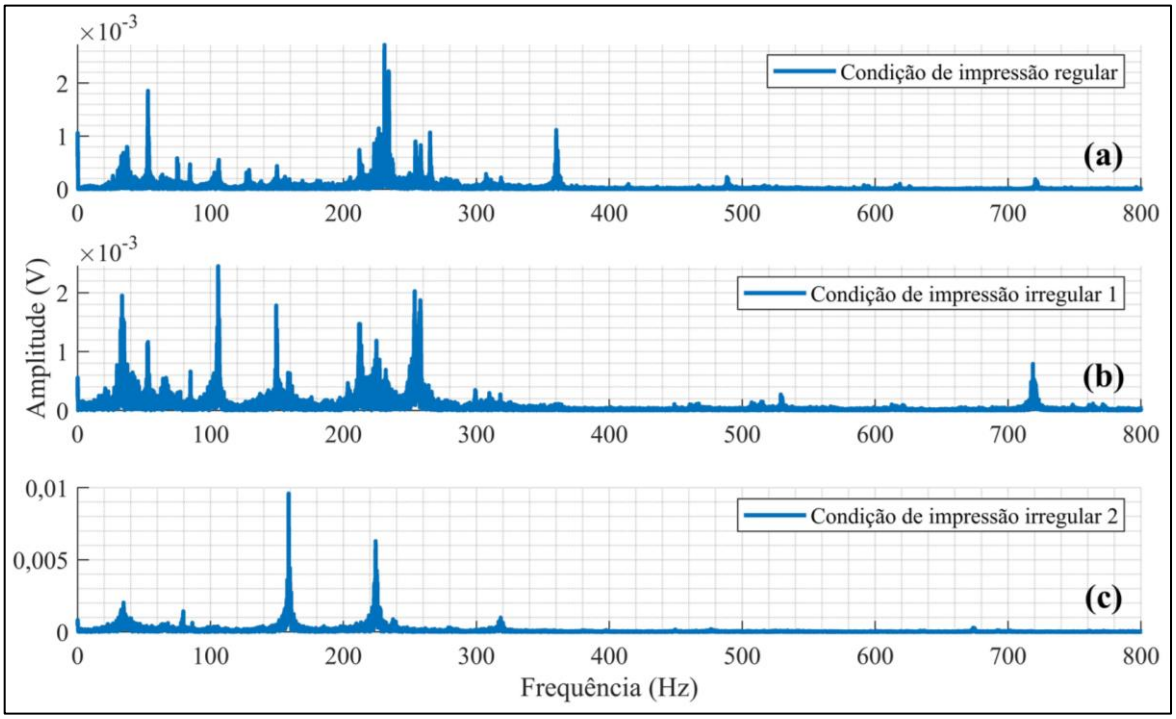
Fonte: Autor

Em segunda análise, é perceptível que as partes de fabricação do AP1 onde há MSM são mais sensíveis a variação da característica velocidade de impressão nas condições de teste. Conforme pode ser observado, na Figura 4.55(a), as partes de fabricação do AP1 onde há MSM em IR são, em suma, pouco maiores em valores de amplitude do que as partes de fabricação do AP1 onde há MSE. Isto é alterado, no entanto, quando se observa Figura 4.55(b), onde é notável um incremento nos valores de amplitude nas partes de fabricação do AP1 onde há MSM em IIR1, tornando mais fácil distinguir as partes de fabricação do AP1 onde há MSM e onde há MSE. Este fenômeno também observado na Figura 4.55(c), onde o incremento nos valores de amplitude nas partes de fabricação do AP1 onde há MSM em condição de defeito 2 alcançou níveis que ultrapassam inclusive os valores de amplitude observados no período de fabricação do AP2. A esta sensibilidade nas partes de fabricação do AP1 onde há MSM a variação da característica velocidade de impressão, atribui-se o fato de que o PZT esteve em contato direto com a mesa durante as impressões.

A Figura 4.56 apresenta os espectros de frequência obtidos dos três sinais brutos coletados pelo PZT durante os testes de impressão com variação da característica velocidade de impressão (V-VI), representados na banda de frequência de 1 Hz a 800 Hz. É possível observar que, diferentemente dos espectros calculados a partir dos sinais adquiridos pelo PZT durante os testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) em diferentes

condições de impressão, representados no item 4.3.2, os espectros dos sinais coletados pelo PZT durante os V-DZ apresentam valores de pico de amplitude em frequência muito distintos entre si. A este resultado atribui-se, em suma, a diferença de ativação nos motores de passo necessárias para as movimentações dos eixos X e Y durante as impressões em diferentes condições.

Figura 4.56 – Espectros de frequência de três sinais brutos obtidos do V-VI. (a) Teste em IR, (b) Teste em IIR1, (c) Teste em IIR2



Fonte: Autor

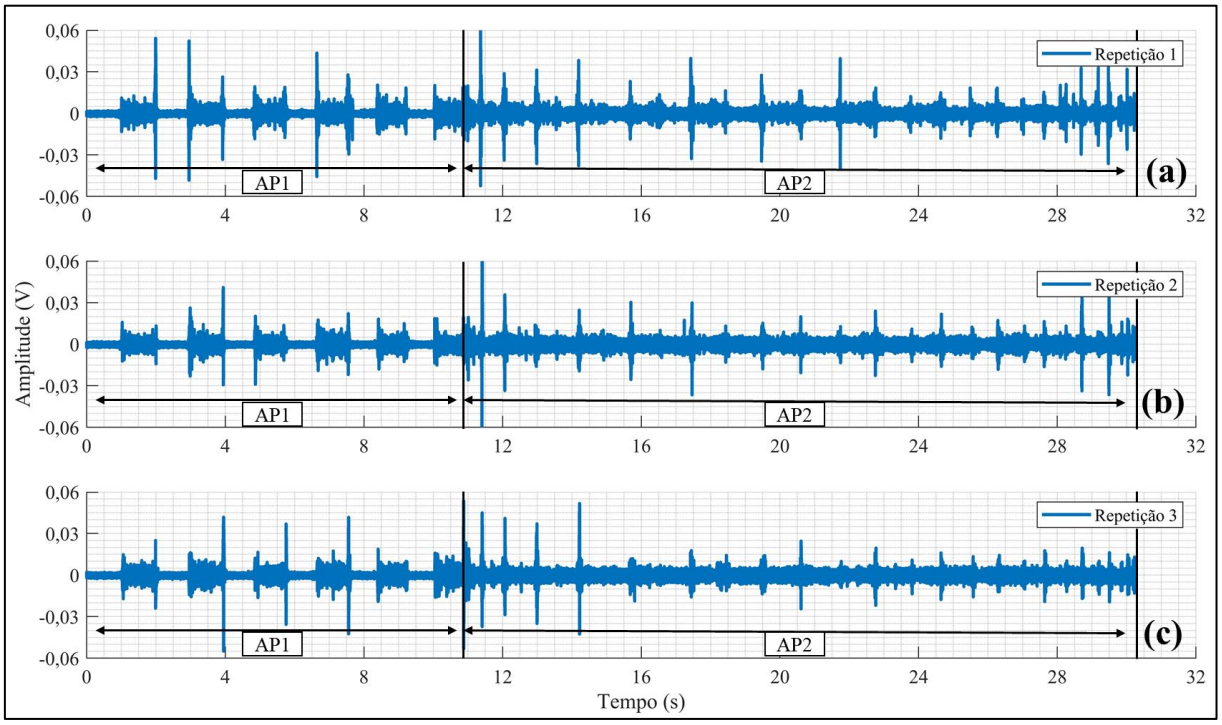
Pelos resultados das análises no domínio do tempo e no domínio da frequência, é possível determinar que a variação da característica velocidade de impressão com fins de obtenção de peças com diferentes características de defeitos não é recomendada. Visto que, em razão das diferenças entre as durações dos sinais, os respectivos vetores de dados em tamanhos também distintos. O que, em si, faz com que seja necessários processamentos digitais de sinais específicos para cada condição de impressão, com o objetivo de obter-se sinais normalizados no tempo. Outra característica que inviabiliza a variação da característica velocidade de impressão com fins de obtenção de peças com diferentes características de defeitos está representada nos espectros de frequência dos sinais. Como pôde ser observado, os espectros diferem grandemente em relação as frequências onde são observados os picos de amplitude relativos as ativações dos motores de passo. O que dificultaria a determinação de uma banda de frequência sensível as anomalias observadas nas peças.

4.6.2 Resultados das análises nos sinais dos V-DZ

Os três sinais obtidos pelo sensor EA em condição de impressão irregular 1 (IIR1) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) estão representados na Figura 4.57. Em primeira análise, é possível observar que existe repetibilidade entre os sinais obtidos em IIR1. Isto é evidenciado pela duração de aproximadamente 30,5 segundos para os três sinais. Outro fator que contribuí para a avaliação de repetibilidade entre os sinais está nos valores de amplitude observados ao longo das fabricações do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) onde há movimentação somente do extrusor (MSE) e onde há movimentação somente da mesa (MSM). É possível observar que os valores de amplitude observados nos blocos de fabricação são muito similares ao longo das três repetições. Com uma maior variação sendo observada nos instantes em que há a transição de uma fabricação de MSE para uma de MSM, e vice e versa. Isto pode ser atribuído a pequenas diferenças nas transições de ativações do motor de passo necessário para a movimentação do eixo X e do motor de passo necessário para a movimentação do eixo Y.

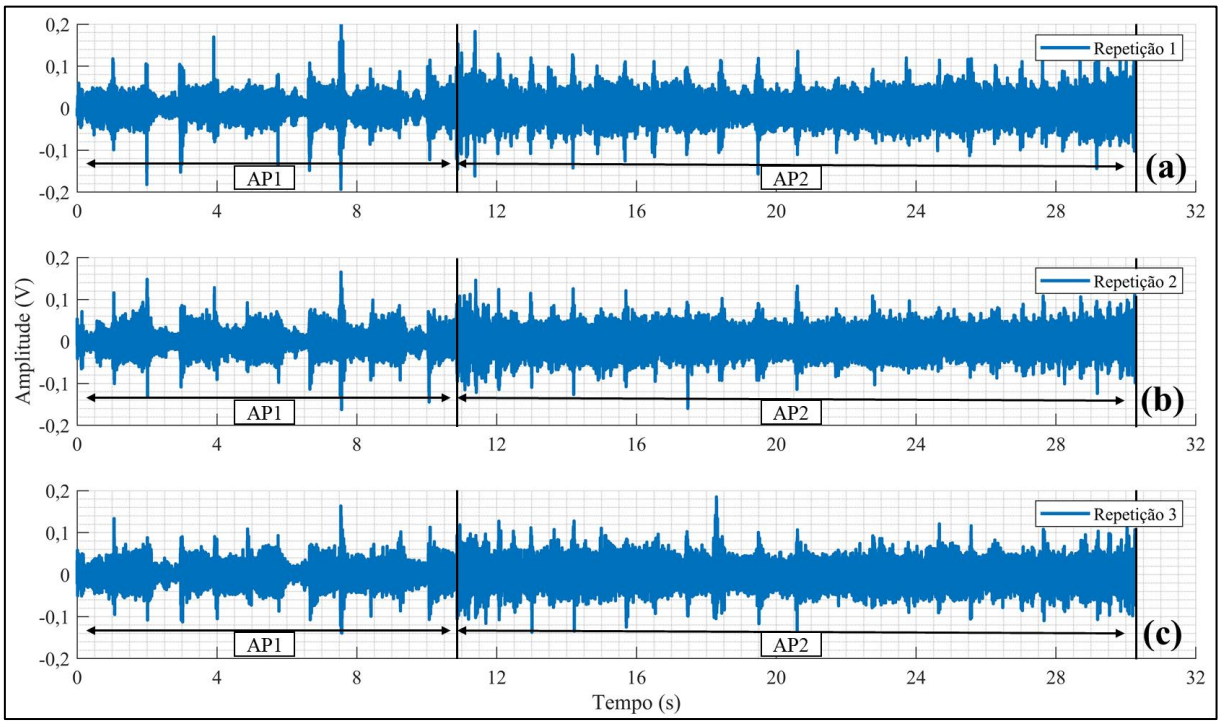
Os três sinais obtidos pelo PZT em IIR1 dos V-DZ estão representados na Figura 4.58. Em primeira análise, é possível observar que existe repetibilidade entre os sinais obtidos em IIR1. Isto é evidenciado pela duração de aproximadamente 30,5 segundos para os três sinais, a mesma que observado nos sinais obtidos pelo sensor EA. Outro fator que contribuí para a avaliação de repetibilidade entre os sinais está nos valores de amplitude observados ao longo das fabricações do AP1 onde há MSE e onde há MSM. Ainda que a repetibilidade nos sinais adquiridos pelo PZT sejam menores do que as observadas nos sinais obtidos pelo sensor EA, representado na Figura 4.57, ainda é possível observar que os valores de amplitude observados nos blocos de fabricação são similares ao longo das três repetições. Com uma maior variação sendo observada nos instantes em que há a transição de uma fabricação de MSE para uma de MSM, e vice e versa. Esta variação também pode ser atribuído a pequenas diferenças nas transições de ativações do motor de passo necessário para a movimentação do eixo X e do motor de passo necessário para a movimentação do eixo Y.

Figura 4.57 – Sinais obtidos pelo sensor EA em IIR1 dos V-DZ



Fonte: Autor

Figura 4.58 – Sinais obtidos pelo PZT em IIR1 dos V-DZ

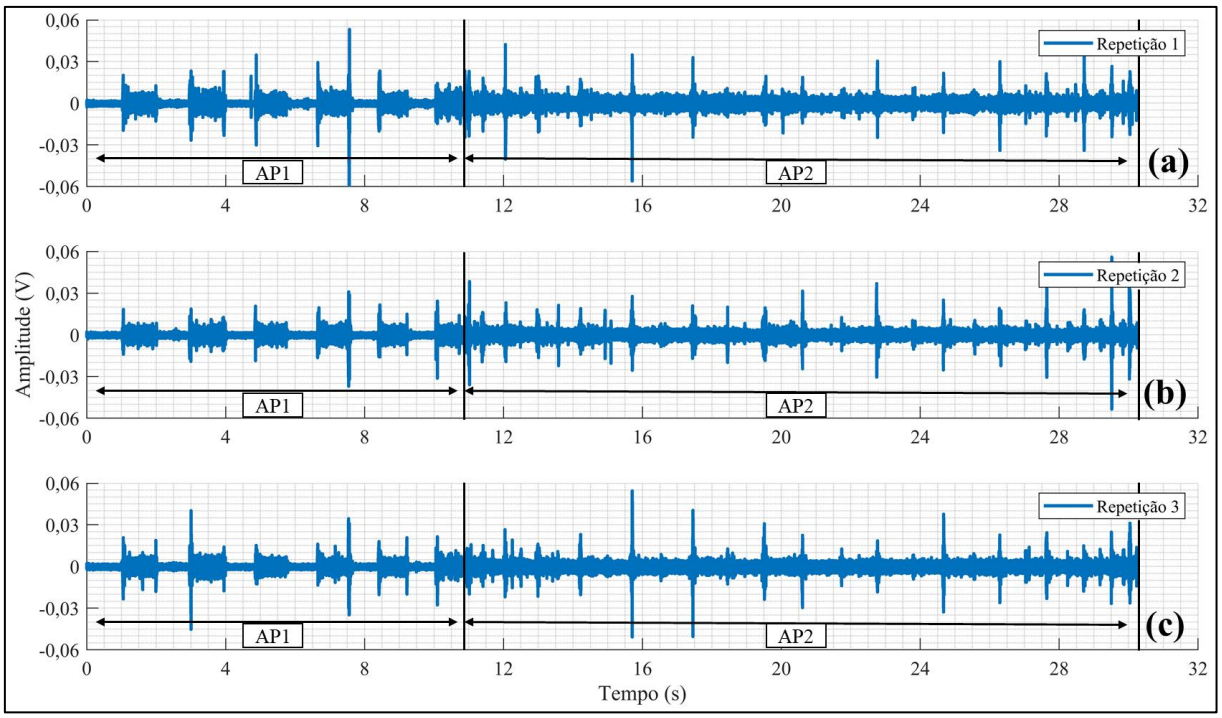


Fonte: Autor

Os três sinais obtidos pelo sensor EA em condição de impressão regular (IR) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) estão representados na Figura 4.59. Em primeira análise, é possível observar que existe repetibilidade entre os sinais

obtidos em IR. Isto é evidenciado pela duração de aproximadamente 30,5 segundos para os três sinais. Outro fator que contribuí para a avaliação de repetibilidade entre os sinais está nos valores de amplitude observados ao longo das fabricações do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) onde há movimentação somente do extrusor (MSE) e onde há movimentação somente da mesa (MSM). É possível observar que os valores de amplitude observados nos blocos de fabricação são muito similares ao longo das três repetições. Com uma maior variação sendo observada nos instantes em que há a transição de uma fabricação de MSE para uma de MSM, e vice e versa. Isto pode ser atribuído a pequenas diferenças nas transições de ativações do motor de passo necessário para a movimentação do eixo X e do motor de passo necessário para a movimentação do eixo Y.

Figura 4.59 – Sinais obtidos pelo sensor EA em IR dos V-DZ

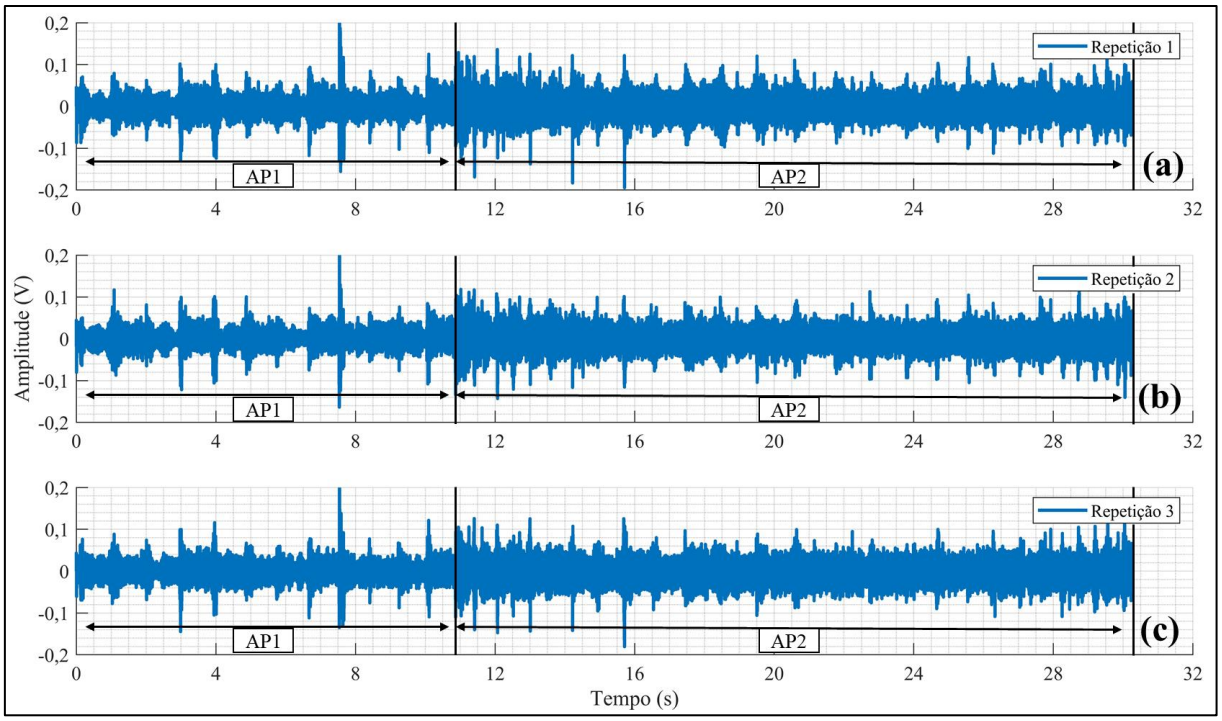


Fonte: Autor

Os três sinais obtidos pelo PZT em IR dos V-DZ estão representados na Figura 4.60. Em primeira análise, é possível observar que existe repetibilidade entre os sinais obtidos em IR. Isto é evidenciado pela duração de aproximadamente 30,5 segundos para os três sinais, a mesma que observado nos sinais obtidos pelo sensor EA. Outro fator que contribuí para a avaliação de repetibilidade entre os sinais está nos valores de amplitude observados ao longo das fabricações do AP1 onde há MSE e onde há MSM. Ainda que a repetibilidade nos sinais adquiridos pelo PZT sejam menores do que as obtidas pelo sensor EA, representado na Figura 4.59, ainda é

possível observar que os valores de amplitude observados nos blocos de fabricação são similares ao longo das três repetições. Com uma maior variação sendo observada nos instantes em que há a transição de uma fabricação de MSE para uma de MSM, e vice e versa. Esta variação também pode ser atribuído a pequenas diferenças nas transições de ativações do motor de passo necessário para a movimentação do eixo X e do motor de passo necessário para a movimentação do eixo Y.

Figura 4.60 – Sinais obtidos pelo PZT em IR dos V-DZ

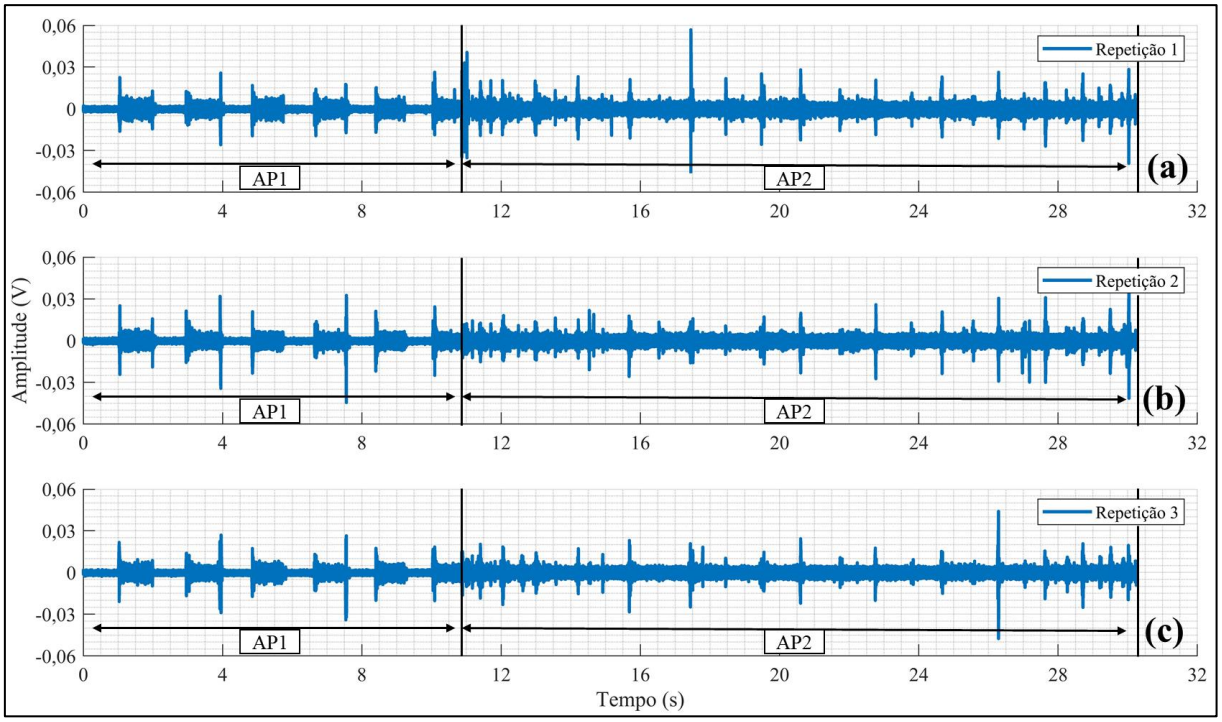


Fonte: Autor

Os três sinais obtidos pelo sensor EA em condição de impressão irregular 2 (IIR2) dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) estão representados na Figura 4.61. Em primeira análise, é possível observar que existe repetibilidade entre os sinais obtidos em IIR2. Isto é evidenciado pela duração de aproximadamente 30,5 segundos para os três sinais. Outro fator que contribuí para a avaliação de repetibilidade entre os sinais está nos valores de amplitude observados ao longo das fabricações do arquétipo de preenchimento 1 (AP1) onde há movimentação somente do extrusor (MSE) e onde há movimentação somente da mesa (MSM). É possível observar que os valores de amplitude observados nos blocos de fabricação são muito similares ao longo das três repetições. Com uma maior variação sendo observada nos instantes em que há a transição de uma fabricação de MSE para uma de MSM, e vice e versa. Isto pode ser atribuído a pequenas diferenças nas transições de ativações

do motor de passo necessário para a movimentação do eixo X e do motor de passo necessário para a movimentação do eixo Y.

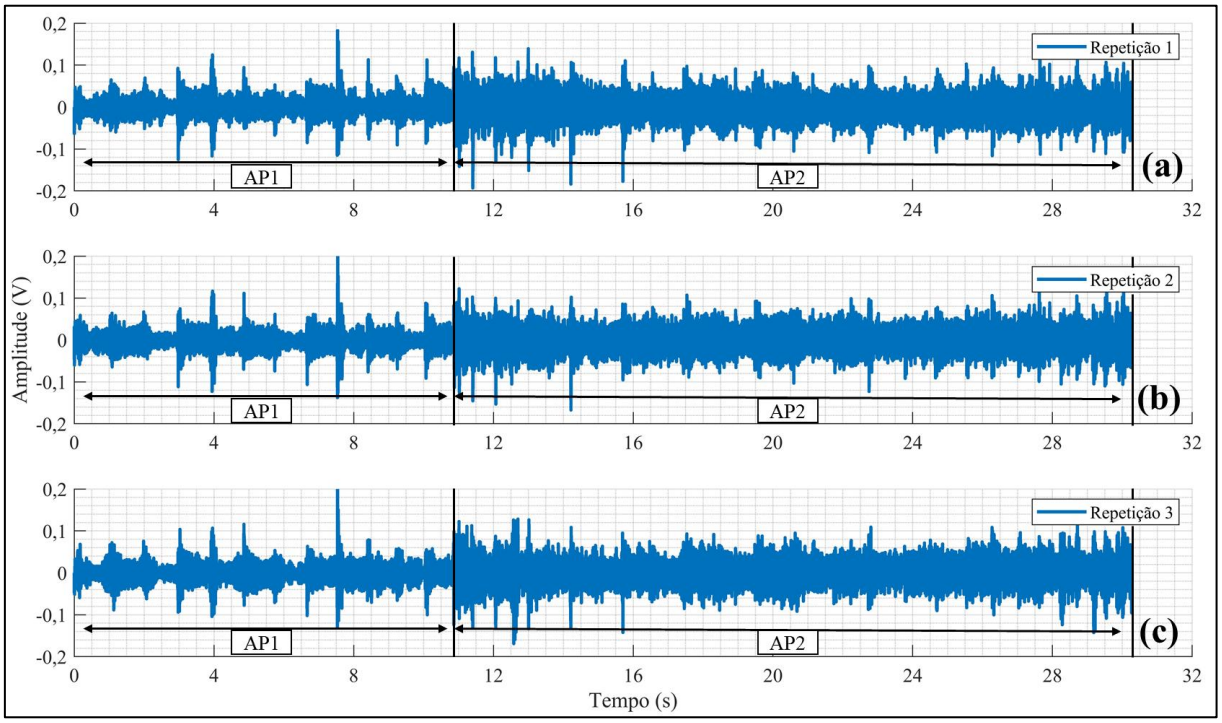
Figura 4.61 – Sinais obtidos pelo sensor EA em IIR2 dos V-DZ



Fonte: Autor

Os três sinais obtidos pelo PZT em IIR2 dos V-DZ estão representados na Figura 4.62. Em primeira análise, é possível observar que existe repetibilidade entre os sinais obtidos em IIR2. Isto é evidenciado pela duração de aproximadamente 30,5 segundos para os três sinais, a mesma que observado nos sinais obtidos pelo sensor EA. Outro fator que contribuí para a avaliação de repetibilidade entre os sinais está nos valores de amplitude observados ao longo das fabricações do AP1 onde há MSE e onde há MSM. Ainda que a repetibilidade nos sinais adquiridos pelo PZT sejam menores do que as obtidas pelo sensor EA, representado na Figura 4.61, ainda é possível observar que os valores de amplitude observados nos blocos de fabricação são similares ao longo das três repetições. Com uma maior variação sendo observada nos instantes em que há a transição de uma fabricação de MSE para uma de MSM, e vice e versa. Esta variação também pode ser atribuído a pequenas diferenças nas transições de ativações do motor de passo necessário para a movimentação do eixo X e do motor de passo necessário para a movimentação do eixo Y.

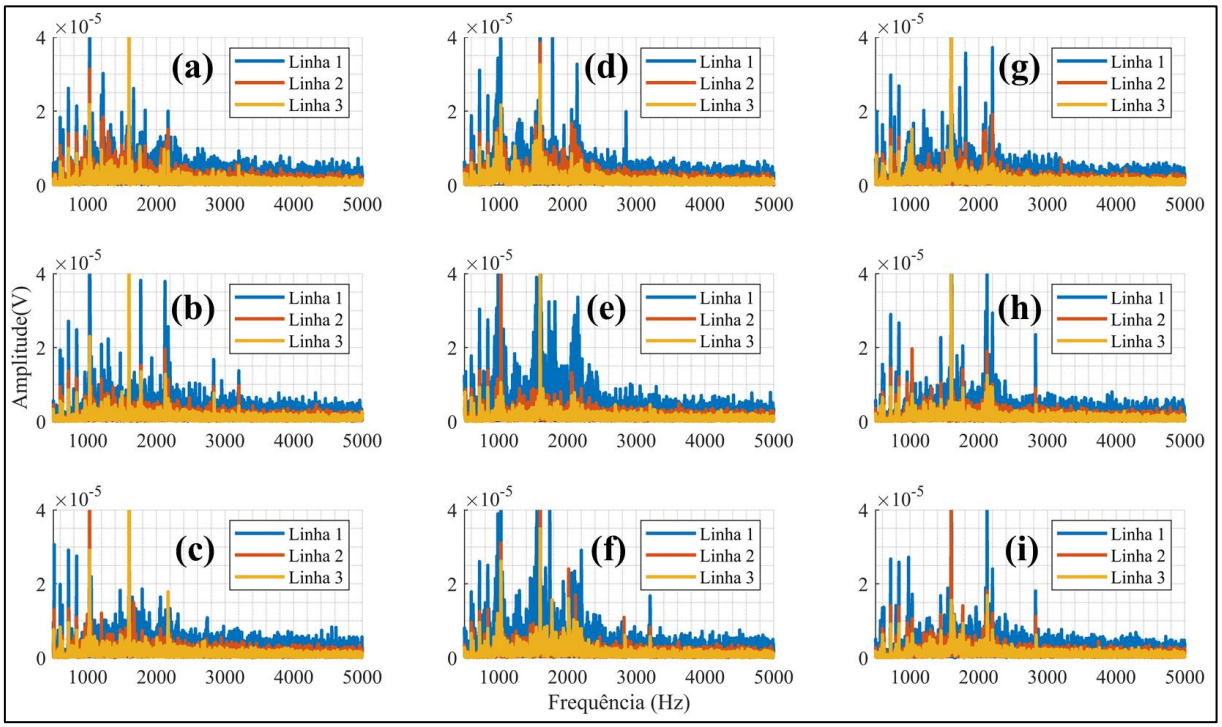
Figura 4.62 – Sinais obtidos pelo PZT em IIR2 dos V-DZ



Fonte: Autor

Os espectros de frequência das fabricações com MSE obtidos pelo sensor EA estão representados na Figura 4.63 na banda de 1 Hz a 5 kHz. Vale ressaltar que não houve saturação nos espectros em frequência, e que a escala representada na Figura 4.63 foi adotada para melhor efeito comparativo. Em primeira análise, é possível observar que as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de linha 1 (L1) são superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de linha 2 (L2) e linha 3 (L3) em toda a banda do espectro observado. É possível observar ainda que as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L2 apresentam valores ligeiramente superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L3. Este comportamento é atribuído as diferenças entre os fenômenos físicos ocorrentes durante as fabricações de cada linha. Durante a fabricação da primeira linha, não há na mesa de impressão nenhum material prévio de impressão ao qual o plástico extrudado possa se aderir, limitando-se este a adesão somente a mesa de impressão. Isto é alterado, no entanto, durante a fabricação da segunda linha. Onde na deposição desta, o plástico extrudado além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a primeira linha, já depositada na mesa. Isto se repete em relação a fabricação da terceira linha, que além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a segunda linha.

Figura 4.63 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA representativos das fabricações com MSE. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3

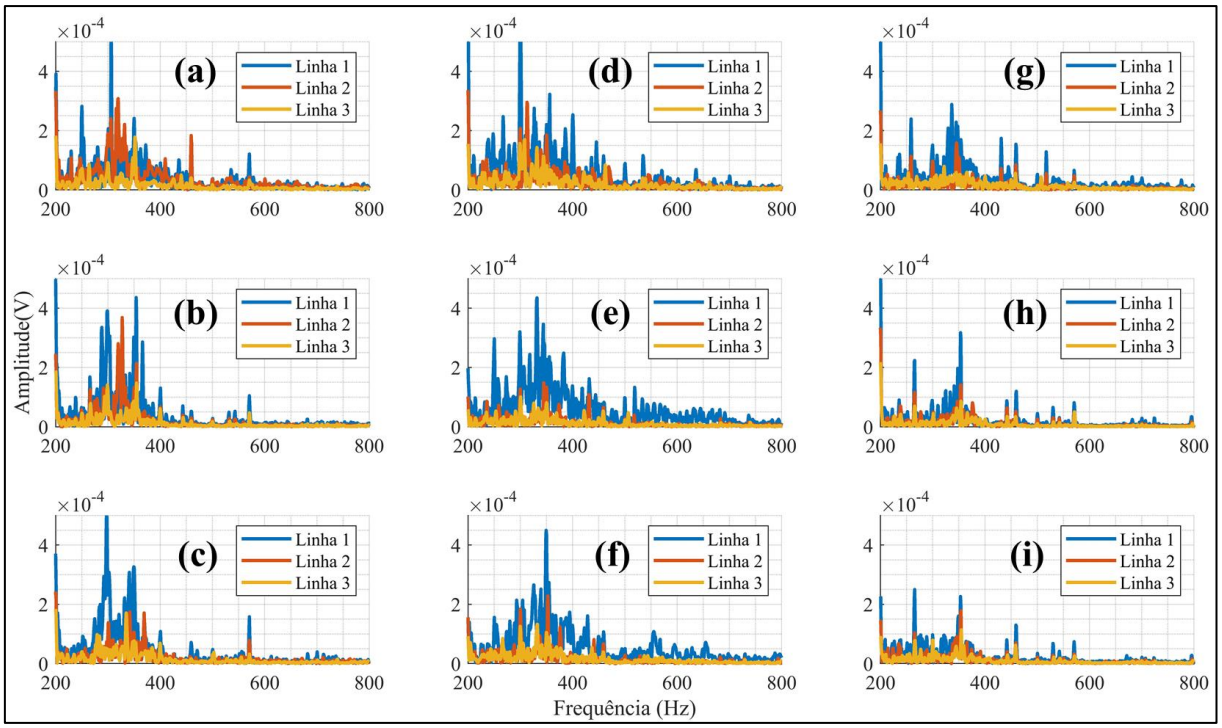


Fonte: Autor

Os espectros de frequência das fabricações com MSE obtidos pelo PZT estão representados na Figura 4.64 na banda de 1 Hz a 800 Hz. Vale ressaltar que não houve saturação nos espectros em frequência, e que a escala representada na Figura 4.64 foi adotada para melhor efeito comparativo. Em primeira análise, é possível observar que as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L1 são superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L2 e L3 em quase todos os espectros na banda observada, com as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L2 apresentam valores ligeiramente superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L3. Este comportamento é atribuído as diferenças entre os fenômenos físicos ocorrentes durante as fabricações de cada linha. Durante a fabricação da primeira linha, não há na mesa de impressão nenhum material prévio de impressão ao qual o plástico extrudado possa se aderir, limitando-se este a adesão somente a mesa de impressão. Isto é alterado, no entanto, durante a fabricação da segunda linha. Onde na deposição desta, o plástico extrudado além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a primeira linha, já depositada na mesa. Isto se repete em relação a fabricação da terceira linha, que além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a segunda linha.

Em segunda análise, observa-se que a situação antes avaliada sofre alteração. Isto está evidenciado nos espectros relativos a IIR1 – R1, representado na Figura 4.64(a), onde as amplitudes relativas a fabricação da L2 são superiores as relativas a fabricação da L1 e da L3 em quase toda a banda observada, e nos espectros relativos a IIR1 – R2, representado na Figura 4.64(b), onde as amplitudes relativas a fabricação da L2 são superiores as relativas a fabricação da L1 e da L3 na banda que compreende as frequências entre 300 Hz e 350 Hz. Esta alteração atribui-se a anomalias ocorridas durante as fabricações das linhas em análise, em decorrência da alteração em IIR1.

Figura 4.64 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT representativos das fabricações com MSE. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3

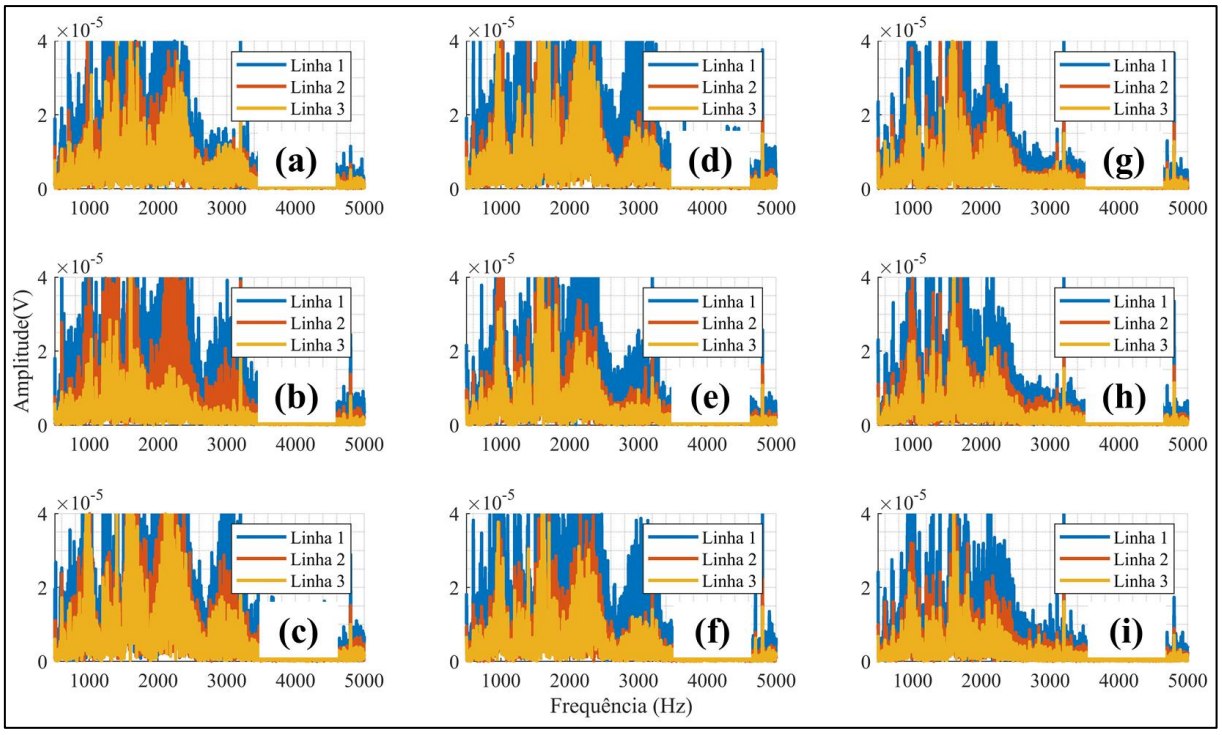


Fonte: Autor

Os espectros de frequência das fabricações com movimentação somente da mesa (MSM) obtidos pelo sensor EA estão representados na Figura 4.65 na banda de 1 Hz a 5 kHz. Vale ressaltar que não houve saturação nos espectros em frequência, e que a escala representada na Figura 4.65 foi adotada para melhor efeito comparativo. Em primeira análise, é possível observar que as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de linha 1 (L1) são superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de linha 2 (L2) e linha 3 (L3) em toda a banda do espectro observado. É possível observar ainda que as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L2 apresentam valores ligeiramente superiores as amplitudes dos espec-

tros relativos as fabricações de L1. Este comportamento é atribuído as diferenças entre os fenômenos físicos ocorrentes durante as fabricações de cada linha. Durante a fabricação da primeira linha, não há na mesa de impressão nenhum material prévio de impressão ao qual o plástico extrudado possa se aderir, limitando-se este a adesão somente a mesa de impressão. Isto é alterado, no entanto, durante a fabricação da segunda linha. Onde na deposição desta, o plástico extrudado além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a primeira linha, já depositada na mesa. Isto se repete em relação a fabricação da terceira linha, que além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a segunda linha.

Figura 4.65 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA representativos das fabricações com MSM. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3



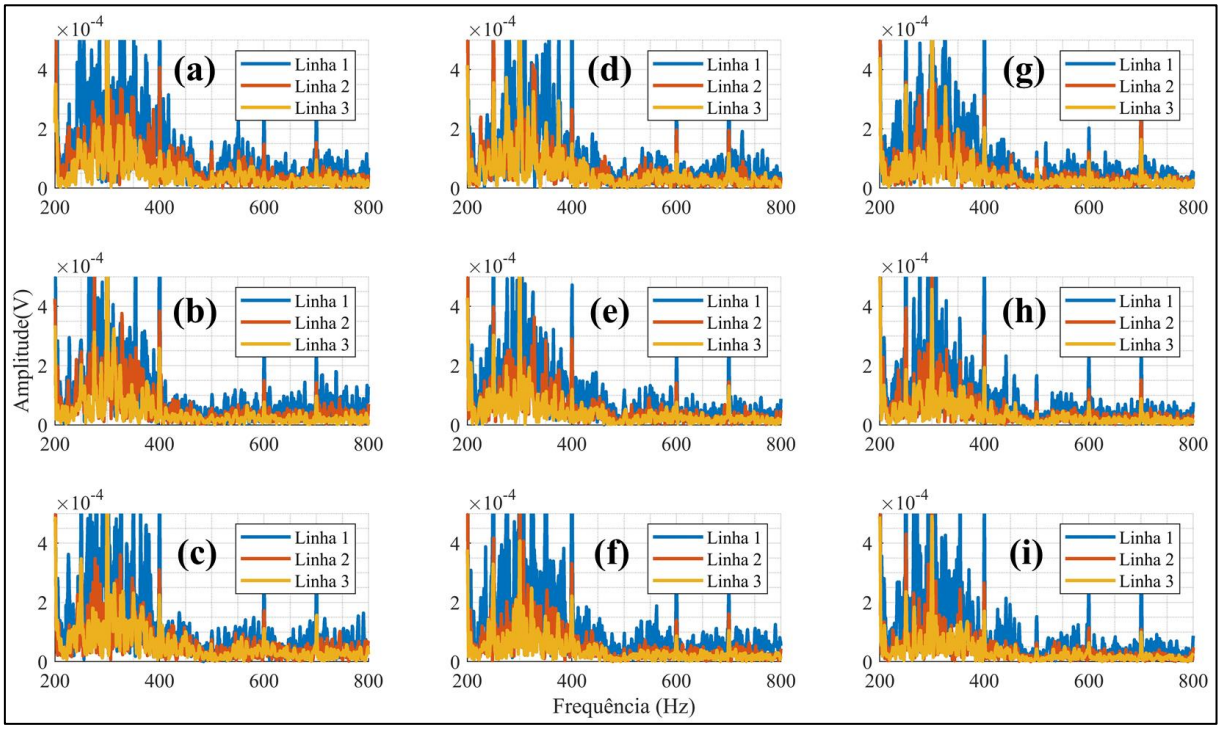
Fonte: Autor

Em segunda análise, é perceptível a alteração da amplitude observada na fabricação da L3 no espectro relativo a IIR1 – R2. Esta alteração atribui-se a anomalias ocorridas durante a fabricação da linha em análise, em decorrência da alteração em IIR1.

Os espectros de frequência das fabricações com MSM obtidos pelo PZT estão representados na Figura 4.66 na banda de 1 Hz a 800 Hz. Vale ressaltar que não houve saturação nos espectros em frequência, e que a escala representada na Figura 4.66 foi adotada para melhor efeito comparativo. Em primeira análise, é possível observar que as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L1 são superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L2 e L3 em toda a banda do espectro observado. É possível observar ainda que as

amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L2 apresentam valores ligeiramente superiores as amplitudes dos espectros relativos as fabricações de L1. Este comportamento é atribuído as diferenças entre os fenômenos físicos ocorrentes durante as fabricações de cada linha. Durante a fabricação da primeira linha, não há na mesa de impressão nenhum material prévio de impressão ao qual o plástico extrudado possa se aderir, limitando-se este a adesão somente a mesa de impressão. Isto é alterado, no entanto, durante a fabricação da segunda linha. Onde na deposição desta, o plástico extrudado além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a primeira linha, já depositada na mesa. Isto se repete em relação a fabricação da terceira linha, que além de aderir-se a mesa de impressão, adere-se também a segunda linha.

Figura 4.66 – Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT representativos das fabricações com MSM. (a) IIR1 – R1, (b) IIR1 – R2, (c) IIR1 – R3, (d) IR – R1, (e) IR – R2, (f) IR – R3, (g) IIR2 – R1, (h) IIR2 – R2, (i) IIR2 – R3



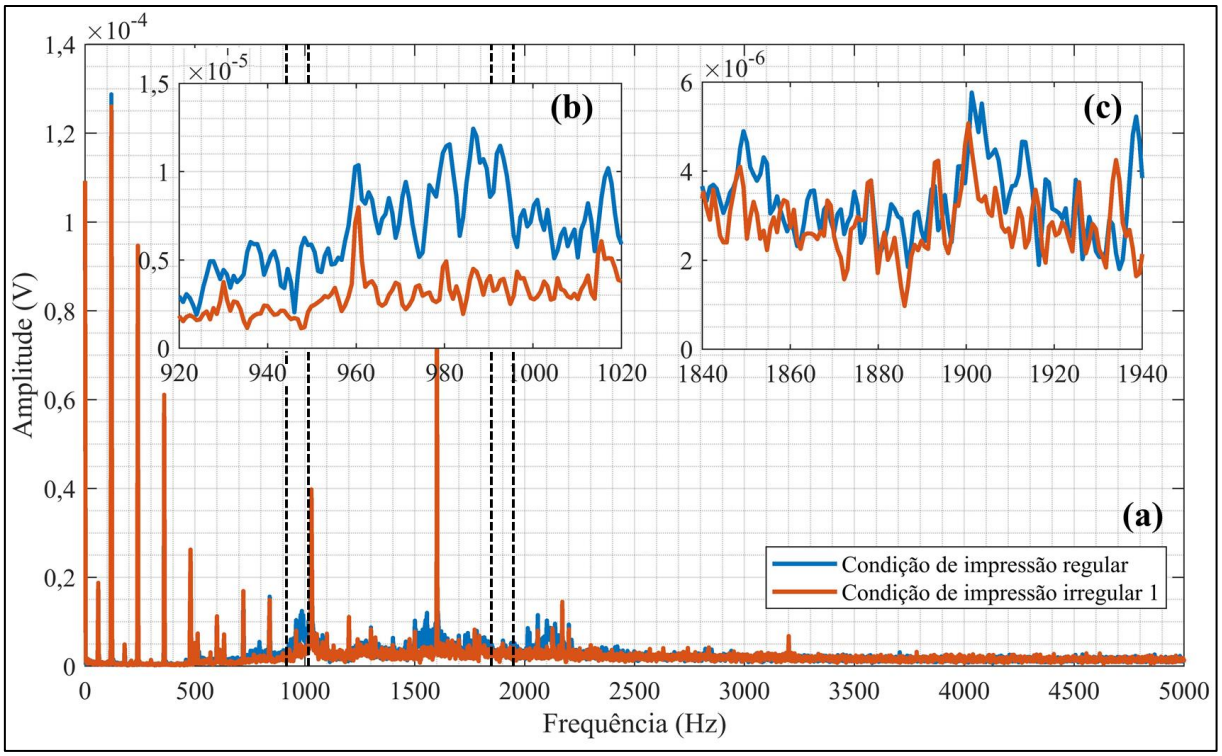
Fonte: Autor

4.6.2.1 Análise da variação em relação a IIR1

Os espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA para as fabricações de movimentação somente do extrusor (MSE) em condição de impressão irregular 1 (IIR1) e condição de impressão regular (IR) estão representados na Figura 4.67(a), na banda que compreende as frequências entre 1 Hz e 5 kHz. A análise nos espectros revela que eles possuem bandas de frequência com maior sobreposição em amplitude, tal como a representado na Figura 4.67(c), e bandas de frequência com menor sobreposição em amplitude, tal como representado na Figura 4.67 (b).

As bandas de frequência de 1.840 Hz a 1.940 Hz e de 920 Hz a 1.020 Hz, representadas, respectivamente, na Figura 4.67(c) e Figura 4.67(b), foram escolhidas para a avaliação da detecção de anomalias em IIR1 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de MSE, nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA.

Figura 4.67 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA para as fabricações de MSE em IIR1 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 5 kHz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição



Fonte: Autor

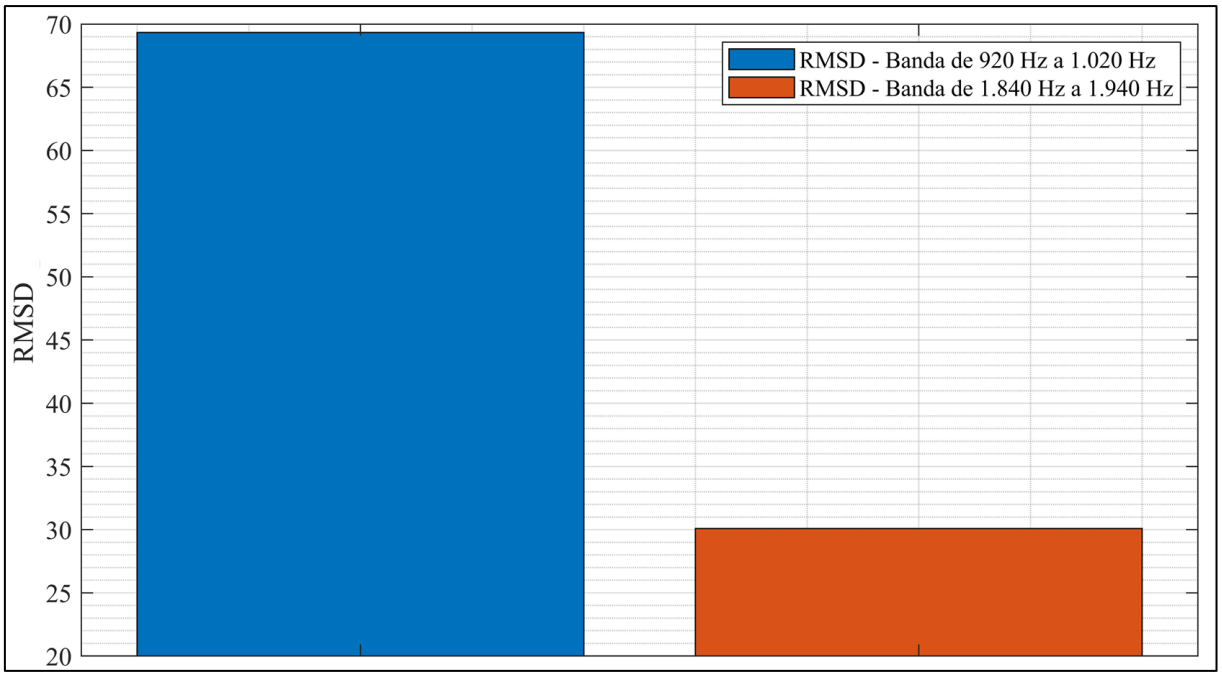
O resultado da avaliação da detecção de anomalias em IIR1 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de MSE, nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA está representado na Figura 4.68. Como pode ser observado, o índice RMSD acusa uma variação de aproximadamente 30 entre os espectros analisados na banda de 1.840 Hz a 1.940 Hz. Isto indica que, mesmo em uma banda onde existe grande sobreposição das amplitudes entre os espectros em estudo, uma variação que pode indicar anomalias decorrentes da IIR1 é observada. Esta indicação de anomalias é superior na banda de 920 Hz a 1.020, com o valor do índice RMSD obtido de aproximadamente 69,5. Isto demonstra que a banda de frequências de 920 Hz a 1.020 Hz é aproximadamente 2,3 vezes mais sensível as variações nos espectros que podem indicar a ocorrência de anomalias decorrentes da fabricação com MSE em IIR1.

Os espectros médios de referência obtidos pelo PZT para as fabricações de MSE em IIR1 e IR estão representados na Figura 4.69(a), na banda que compreende as frequências entre

1 Hz e 800 Hz. A análise nos espectros revela que eles possuem bandas de frequência com maior sobreposição em amplitude, tal como a representado na Figura 4.69(b), e bandas de frequência com menor sobreposição em amplitude, tal como representado na Figura 4.69(c).

As bandas de frequência de 110 Hz a 140 Hz e de 275 Hz a 305 Hz, representadas, respectivamente, na Figura 4.69(b) e Figura 4.69(c), foram escolhidas para a avaliação da detecção de anomalias em condição de impressão irregular 1 (IIR1) por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de movimentação somente do extrusor (MSE), nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT.

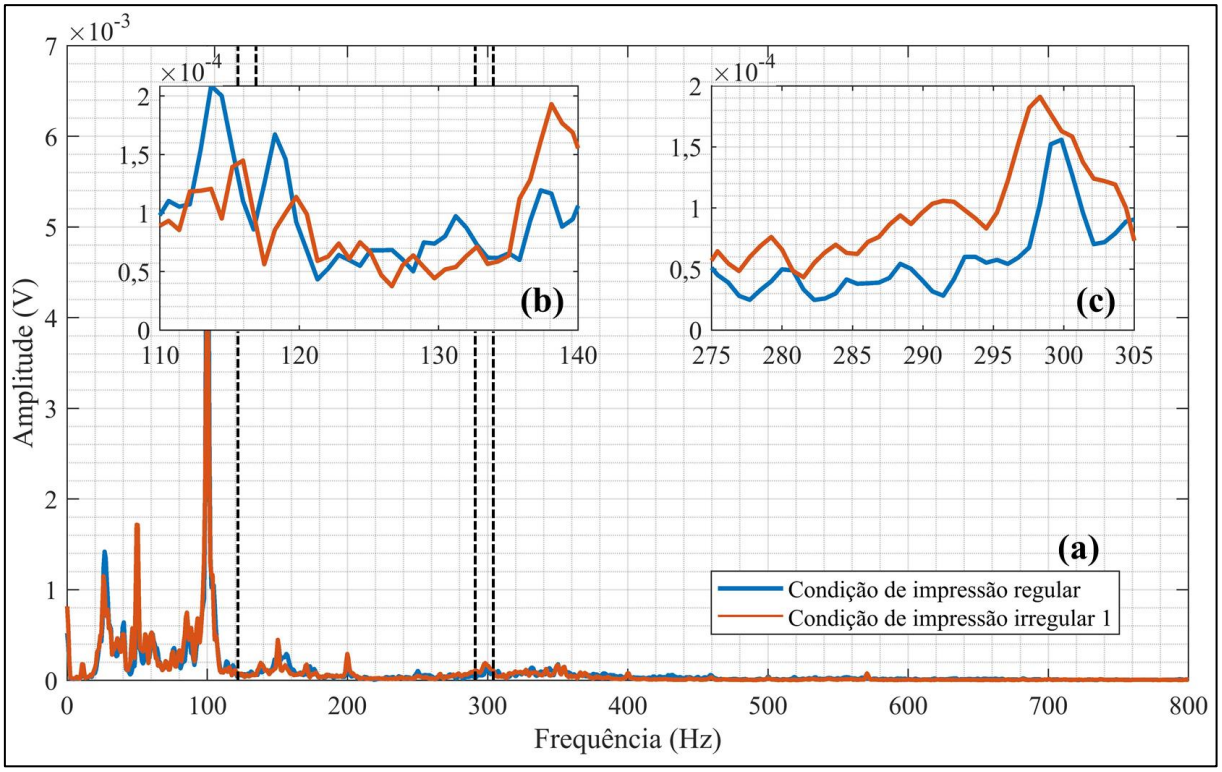
Figura 4.68 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR1 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA



Fonte: Autor

O resultado da avaliação da detecção de anomalias em IIR1 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de MSE, nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT está representado na Figura 4.70. Como pode ser observado, o índice RMSD acusa uma variação de aproximadamente 12 entre os espectros analisados na banda de 110 Hz a 140 Hz. Isto indica que, mesmo em uma banda onde existe grande sobreposição das amplitudes entre os espectros em estudo, uma variação que pode indicar anomalias decorrentes da IIR1 é observada. Esta indicação de anomalias é superior na banda 275 Hz a 375, com o valor do índice RMSD obtido de aproximadamente 34. Isto demonstra que a banda de frequências de 275 Hz a 375 Hz é aproximadamente 2,8 vezes mais sensível as variações nos espectros que podem indicar a ocorrência de anomalias decorrentes da fabricação com MSE em IIR1.

Figura 4.69 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT para as fabricações de MSE em IIR1 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 800 Hz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição



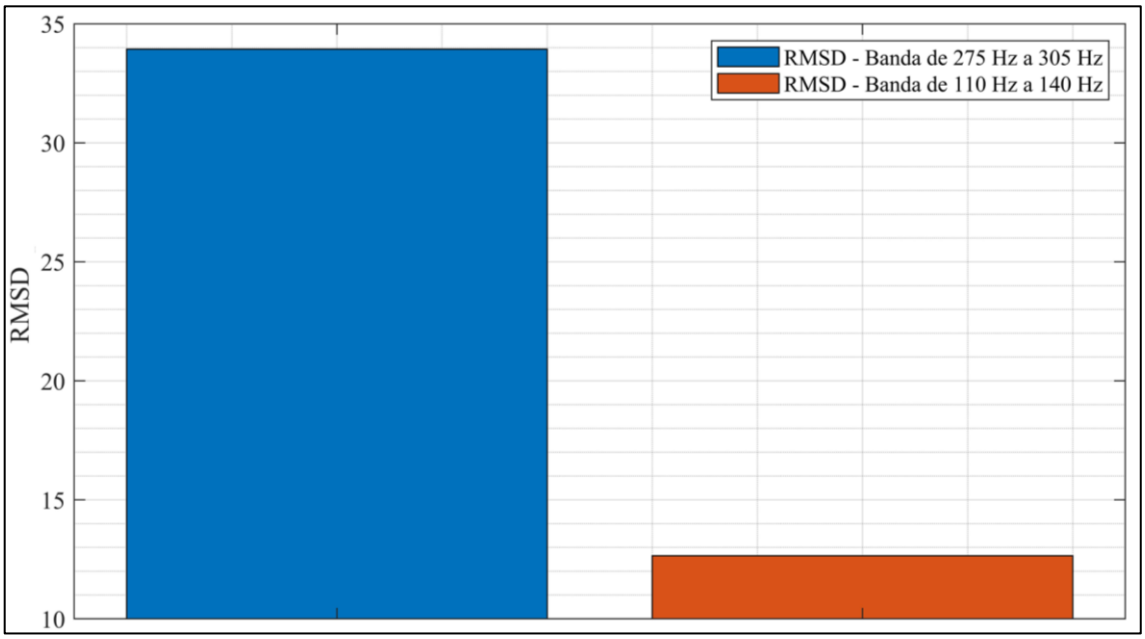
Fonte: Autor

Os sinais RMS, ROP, MovRMS e MovROP, resultantes da análise nos sinais adquiridos das fabricações de segmento 1 (S1) nos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) por ambos os sensores EA e PZT em condição de impressão irregular 1 (IIR1) e condição de impressão regular (IR) estão representados em totalidade no APÊNDICE VI.

O resultado dos valores de média entre as médias RMS dos sinais MovRMS de IIR1 e IR, e de média entre as médias ROP dos sinais MovROP de IIR1 e IR estão representados em totalidade na Figura 4.71. Em primeira análise, é possível observar que os valores de média entre as médias RMS e de média entre as médias ROP são superiores para os sinais de fabricação de S1 obtidos em IIR1 por ambos os sensores EA e PZT do que os obtidos em IR. Outro aspecto observável é que o valor de desvio padrão entre as médias RMS e de desvio padrão entre as médias ROP encontrado para os sinais de fabricação de S1 obtidos em IIR1 pelo sensor EA são superiores aos obtidos em IR.

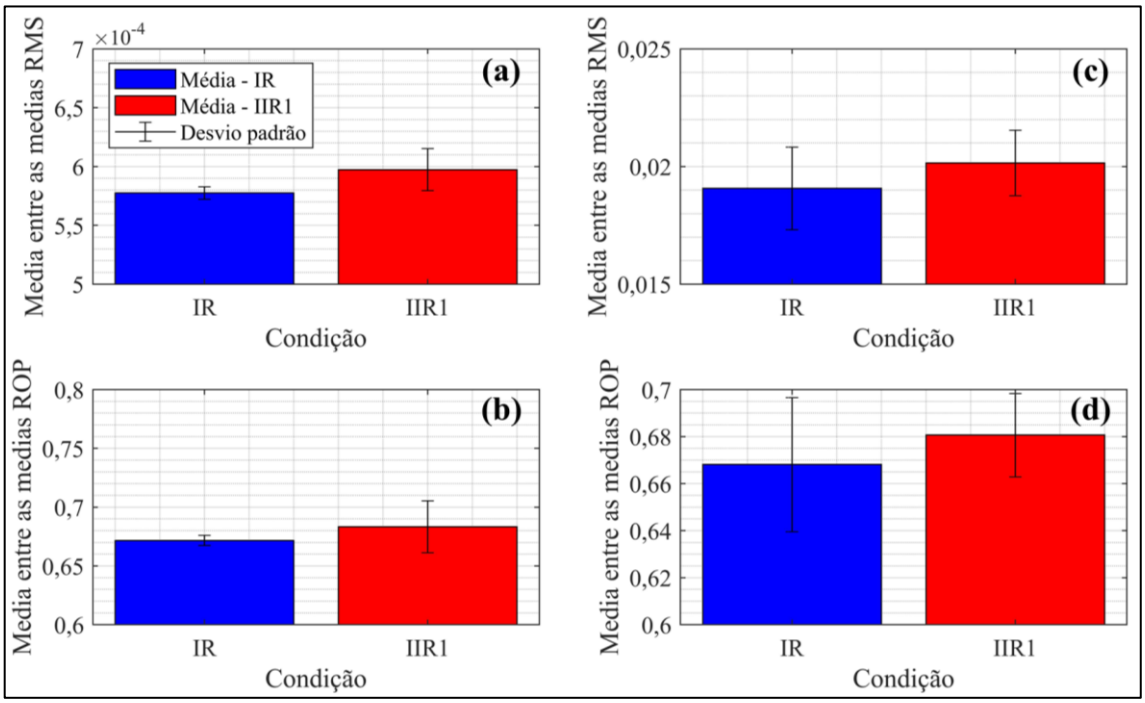
Estes fatores são indicativos da possibilidade de detecção de anomalias nas fabricações de S1 em razão da IIR1 pelos métodos propostos no item 3.3.5.2. Sendo que partes foram utilizados como dados de entrada para a análise proposta no item 3.3.5.3.

Figura 4.70 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR1 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT



Fonte: Autor

Figura 4.71 – Valores resultante da análise no domónio do tempo nos sinais de MovRMS e MovROP de IIR1 e IR referentes a fabricação de S1. (a) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (b) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (c) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo PZT, (d) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo PZT



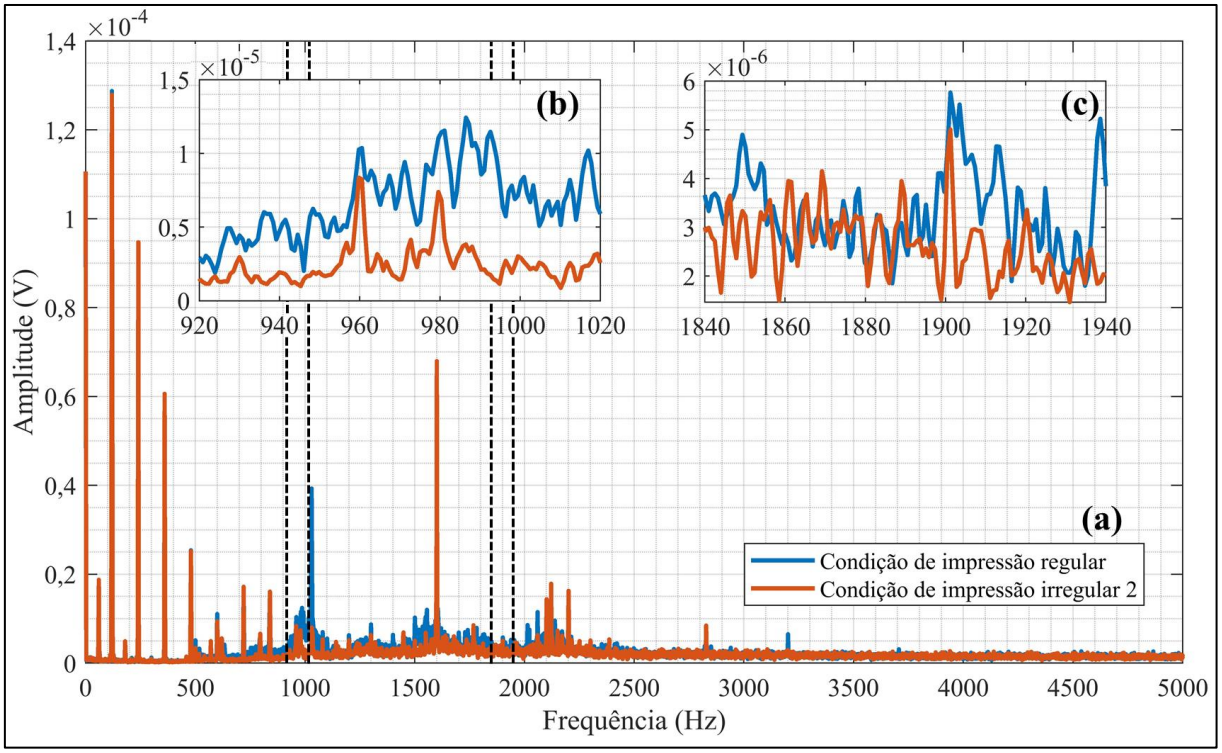
Fonte: Autor

4.6.2.2 Análise da variação em relação a IIR2

Os espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA para as fabricações de movimentação somente do extrusor (MSE) em condição de impressão irregular 2 (IIR2) e condição de impressão regular (IR) estão representados na Figura 4.72(a), na banda que compreende as frequências entre 1 Hz e 5 kHz. A análise nos espectros revela que eles possuem bandas de frequência com maior sobreposição em amplitude, tal como a representado na Figura 4.72(c), e bandas de frequência com menor sobreposição em amplitude, tal como representado na Figura 4.72(b).

As bandas de frequência de 1.840 Hz a 1.940 Hz e de 920 Hz a 1.020 Hz, representadas, respectivamente, na Figura 4.72(c) e Figura 4.72(b), foram escolhidas para a avaliação da detecção de anomalias em IIR2 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de movimentação somente do extrusor (MSE), nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA.

Figura 4.72 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA para as fabricações de MSE em IIR2 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 5 kHz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição



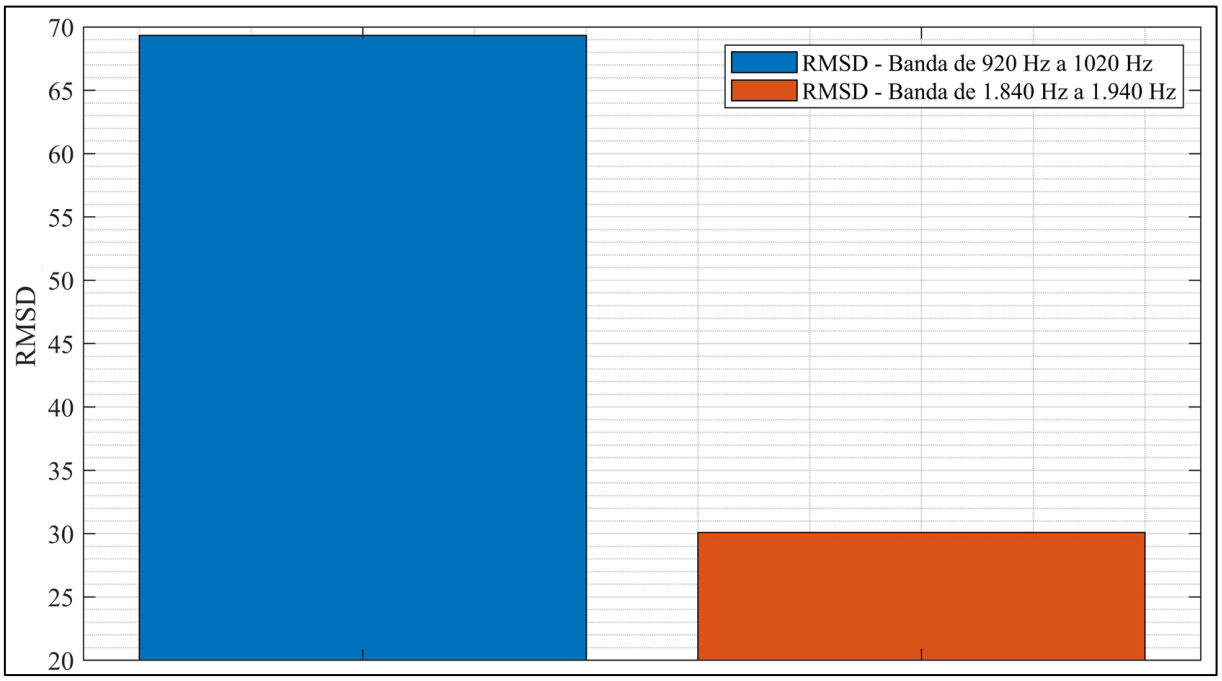
Fonte: Autor

O resultado da avaliação da detecção de anomalias em IIR2 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de MSE, nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA

está representado na Figura 4.73. Como pode ser observado, o índice RMSD acusa uma variação de aproximadamente 33,5 entre os espectros analisados na banda de 1.840 Hz a 1.940 Hz. Isto indica que, mesmo em uma banda onde existe grande sobreposição das amplitudes entre os espectros em estudo, uma variação que pode indicar anomalias decorrentes da IIR2 é observada. Esta indicação de anomalias é superior na banda de 920 Hz a 1.020 Hz, com o valor do índice RMSD obtido de aproximadamente 82,5. Isto demonstra que a banda de frequências de 920 Hz a 1.020 Hz é aproximadamente 2,5 vezes mais sensível as variações nos espectros que podem indicar a ocorrência de anomalias decorrentes da fabricação com MSE em IIR2.

Os espectros médios de referência obtidos pelo PZT para as fabricações de movimentação somente do extrusor (MSE) em condição de impressão irregular 2 (IIR2) e condição de impressão regular (IR) estão representados na Figura 4.74(a), na banda que compreende as frequências entre 1 Hz e 800 Hz. A análise nos espectros revela que eles possuem bandas de frequência com maior sobreposição em amplitude, tal como a representado na Figura 4.74(b), e bandas de frequência com menor sobreposição em amplitude, tal como representado na Figura 4.74 (c).

Figura 4.73 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR2 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo sensor EA

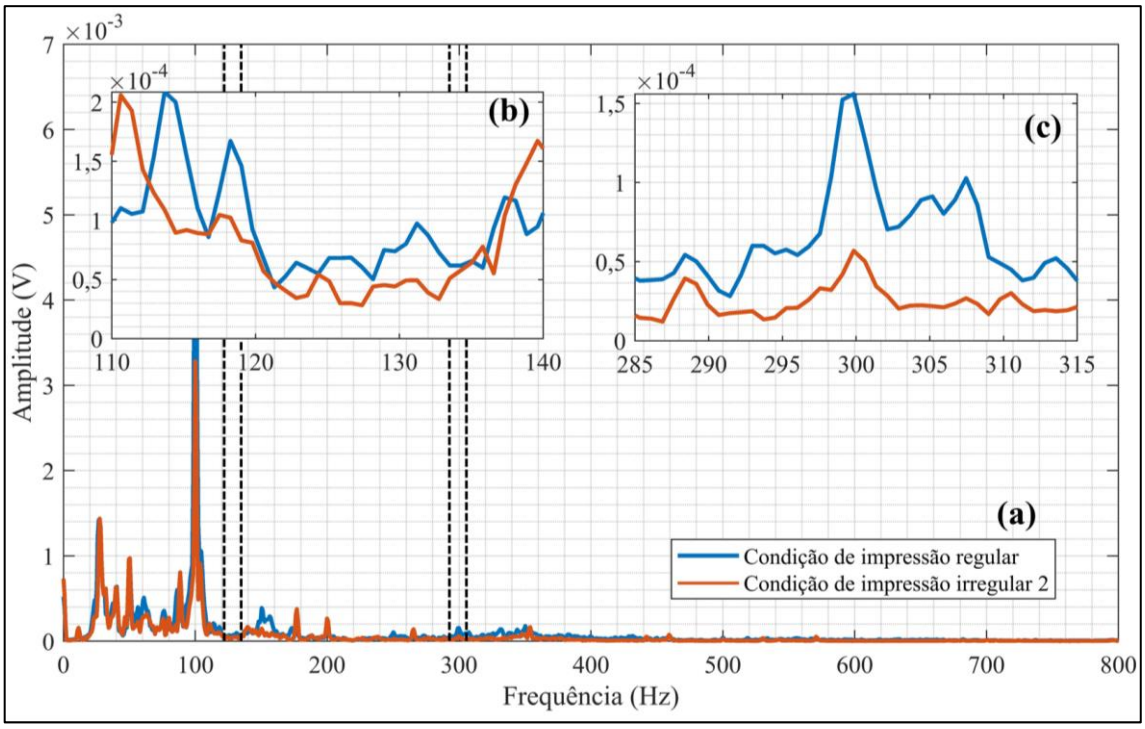


Fonte: Autor

As bandas de frequência de 110 Hz a 140 Hz e de 285 Hz a 315 Hz, representadas, respectivamente, na Figura 4.74(b) e Figura 4.74(c), foram escolhidas para a avaliação da detecção de anomalias em IIR2 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de MSE, nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT.

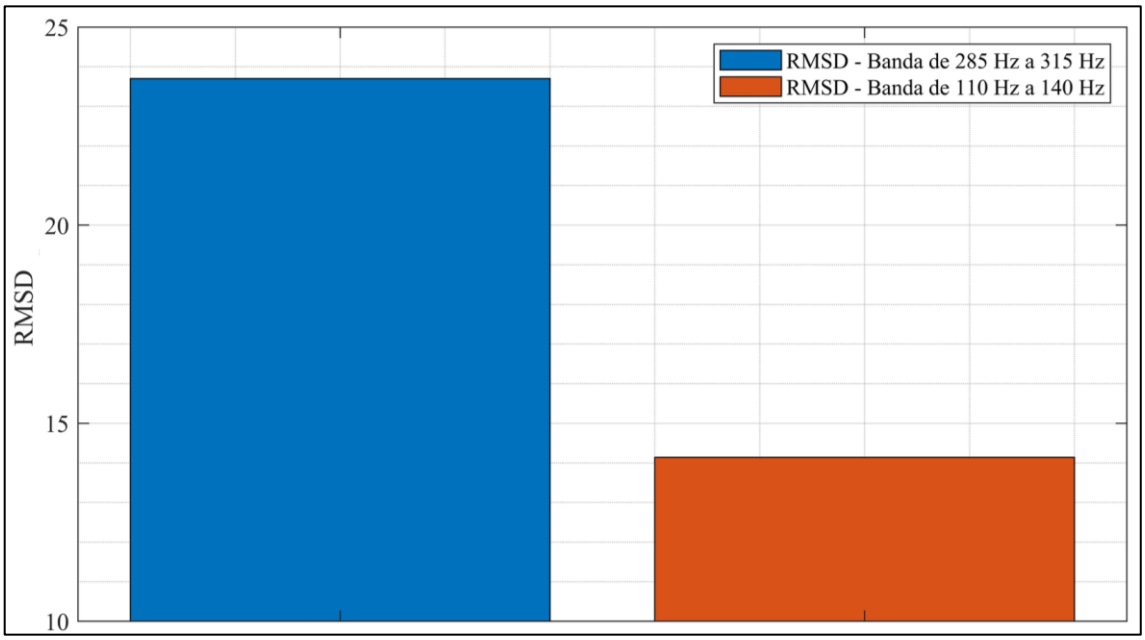
O resultado da avaliação da detecção de anomalias em IIR2 por meio do índice de dano RMSD para as fabricações de MSE, nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT está representado na Figura 4.75. Como pode ser observado, o índice RMSD acusa uma variação de aproximadamente 14 entre os espectros analisados na banda de 110 Hz a 140 Hz. Isto indica que, mesmo em uma banda onde existe grande sobreposição das amplitudes entre os espectros em estudo, uma variação que pode indicar anomalias decorrentes da IIR2 é observada. Esta indicação de anomalias é superior na banda 285 Hz a 315 Hz, com o valor do índice RMSD obtido de aproximadamente 24. Isto demonstra que a banda de frequências de 285 Hz a 315 Hz é aproximadamente 1,7 vezes mais sensível as variações nos espectros que podem indicar a ocorrência de anomalias decorrentes da fabricação com MSE em IIR2.

Figura 4.74 – Análise nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT para as fabricações de MSE em IIR2 e IR. (a) Espectros na faixa de 1 Hz a 800 Hz; (b) Banda de frequência onde os espectros possuem maior sobreposição; (c) Banda de frequência onde os espectros possuem menor sobreposição



Fonte: Autor

Figura 4.75 – Índices de dano RMSD obtidos para as frequências de interesse na detecção de anomalias em IIR2 para as fabricações de MSE nos espectros médios de referência obtidos pelo PZT



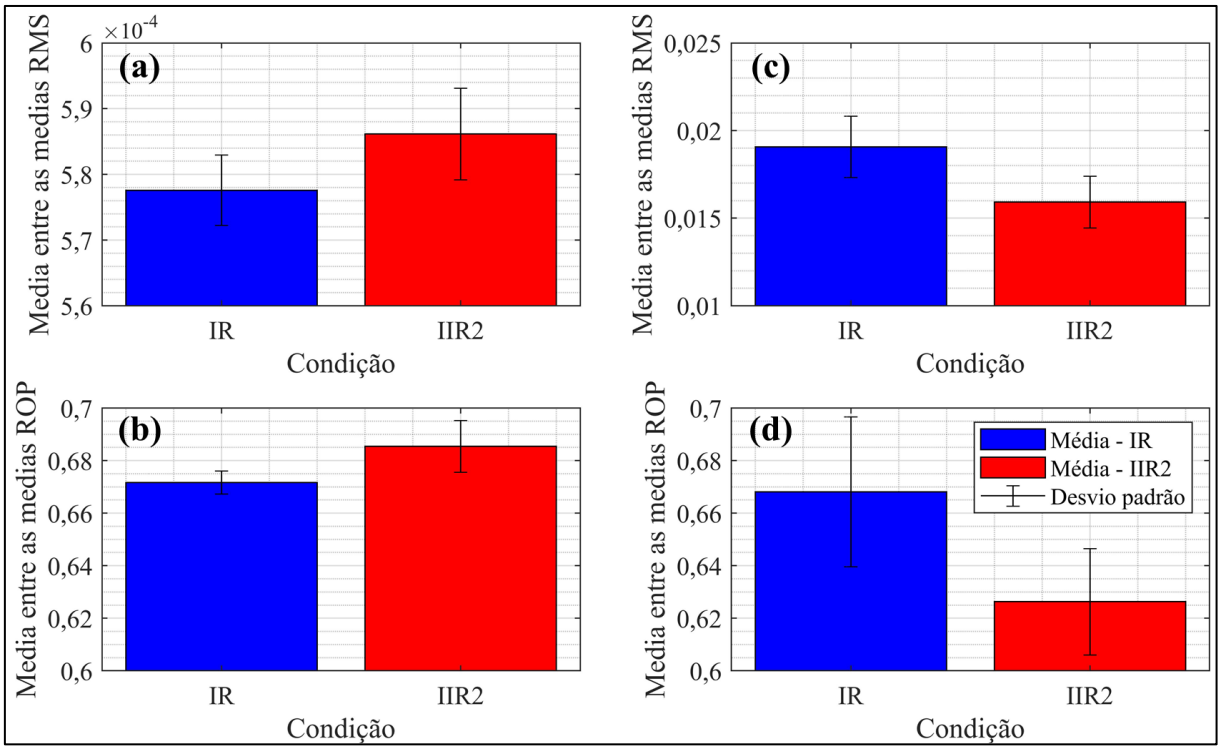
Fonte: Autor

Os sinais RMS, ROP, MovRMS e MovROP, resultantes da análise nos sinais adquiridos das fabricações de segmento 1 (S1) nos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ) por ambos os sensores EA e PZT em IIR2 e IR estão representados em totalidade no APÊNDICE VI.

O resultado dos valores de média entre as médias RMS dos sinais MovRMS de condição de impressão irregular 2 (IIR2) e condição de impressão regular (IR), e de média entre as médias ROP dos sinais MovROP de IIR2 e IR estão representados em totalidade na Figura 4.76. Em primeira análise, é possível observar que os valores de média entre as médias RMS e de média entre as médias ROP são superiores para os sinais de fabricação de S1 obtidos em IIR2 pelo sensor EA do que os obtidos em IR. Isto, no entanto, é alterado em relação aos sinais de fabricação de S1 obtidos em IIR2 e em IR pelo PZT, conforme pode ser observado na Figura 4.76(c) e na Figura 4.76 (d). Onde os valores de média entre as médias RMS e de média entre as médias ROP são superiores para os sinais de fabricação de S1 obtidos em IR pelo sensor EA do que os obtidos em IIR2. Outro aspecto observável é que o valor de desvio padrão entre as médias RMS e de desvio padrão entre as médias ROP encontrado para os sinais de fabricação de S1 obtidos em IIR2 pelo sensor EA são superiores aos obtidos em IR.

Estes fatores são indicativos da possibilidade de detecção de anomalias nas fabricações de S1 em razão da IIR2 pelos métodos propostos no item 3.3.5.2. Sendo que partes foram utilizados como dados de entrada para a análise proposta no item 3.3.5.3.

Figura 4.76 – Valores resultante da análise no domónio do tempo nos sinais de MovRMS e MovROP de IIR2 e IR referentes a fabricação de S1. (a) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (b) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo sensor EA, (c) Média entre as médias RMS dos sinais adquiridos pelo PZT, (d) Média entre as médias ROP dos sinais adquiridos pelo PZT



Fonte: Autor

4.6.3 Classificação das condições de impressão

4.6.3.1 Dados obtidos pelo sensor EA

Em primeira rodada dos testes de modelos de classificação nos dados obtidos pelo sensor EA, verificou-se que somente os métodos de classificação SVM Gaussiana Fina (*Fine Gaussian SVM*) e SVM Gaussiana Média (*Medium Gaussian SVM*) apresentaram resultados promissores de classificação das diferentes condições de impressão. Sendo estas a condição de impressão irregular 1 (IIR1), onde foram observadas anomalias geométricas e nos parâmetros fundamentais de camada únicos para esta condição de impressão, resultados discutidos nos itens 4.5.1.2 e 4.5.2, condição de impressão regular (IR), e condição de impressão irregular 2 (IIR2), onde foram observadas anomalias geométricas e nos parâmetros fundamentais de camada únicos para esta condição de impressão, resultados discutidos nos itens 4.5.1.2 e 4.5.2.

Sendo que o melhor destes foi o método SVM Gaussiana Fina, que apresentou uma acurácia na classificação de 66,7 %. Seguido do método SVM Gaussiana Média, que apresentou

acurácia na classificação de 33,3 %. Os métodos de classificação Discriminante Linear, Discriminante Quadrático e Gaussiana de Naive Bayes apresentaram falhas na classificação. Todos os outros métodos de classificação avaliados apresentaram acurácia na classificação de 0,0 %.

Devido ao método de classificação SVM Gaussiana Fina ter apresentado a melhor acurácia na classificação das diferentes condições de impressão em configuração de modelo padrão, suas definições de modelo foram exploradas, por meio das opções avançadas de SVM disponíveis no aplicativo *Classification Learner*, a fim de tentar refinar a acurácia de classificação.

Isto foi alcançado alterando-se a definição de modelo método multiclasse de Um-vs-Um (*One-vs-One*), para Um-vs-Todos (*One-vs-All*). Todas as outras definições de modelo foram mantidas em valores padrão. Com a alteração desta definição, o modelo de classificação SVM Gaussiana Fina passou a apresentar acurácia de 100,0 % na classificação das diferentes condições de impressão, tal como representado na Figura 4.77.

Figura 4.77 – Resultado das rodadas de testes de classificação a partir dos dados obtidos pelo sensor EA

Variável 1 ($\overline{MovROP}_{US=1}^{R}$)	**Variável 2** ($\overline{MovRMS}_{US=1}^{R}$)	**Condição** (1 – IIR1, 2 – IR, 3 – IIR2)
0,6833	5,9734 x 10^-4	1
0,6717	5,7758 x 10^-4	2
0,6854	5,8614 x 10^-4	3

⇩

Rodada	**SVM Gaussiana Fina**	**SVM Gaussiana Média**	**Discriminante Linear e Quadrático**	**Gaussiana de Naive Bayes**	**Demais métodos de classificação**
1º (Configurações de modelo padrão)	66,7 %	33,3 %	Falha na classificação	Falha na classificação	0 %
2º (método multiclasse alterado para Um-vs-Todos)	100 %	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliados

⇩

Definições do modelo de classificação para as diferentes condições de impressão

Fonte: Autor

A Tabela 13 apresenta as definições do modelo de classificação obtido para classificar as diferentes condições de impressão a partir dos dados obtidos pelo sensor EA.

Tabela 13: Definições do modelo de classificação para os dados obtidos pelo sensor EA

Resultados					
Acurácia		Velocidade de predição		Tempo de treino do modelo	
100 %		~94 obj/seg		1,422 seg	
Tipo do modelo					
Predefinição	Função do Kernel	Escala do Kernel	Nível de restrição da caixa	Método multiclasse	Padronização de dados
SVM Gaussiana Fina	Gaussiana	0,35	1	Um-vs-Todos	Verdade
Seleção de parâmetros					
Todos os parâmetros usados no modelo, antes do PCA					
PCA					
PCA desativado					

Fonte: Autor

4.6.3.2 Dados obtidos pelo PZT

Em primeira rodada dos testes de modelos de classificação nos dados obtidos pelo PZT, verificou-se que somente os métodos de classificação SVM Gaussiana Fina (*Fine Gaussian SVM*) e SVM Gaussiana Média (*Medium Gaussian SVM*) apresentaram resultados promissores de classificação das diferentes condições de impressão. Sendo estas a condição de impressão irregular 1 (IIR1), onde foram observadas anomalias geométricas e nos parâmetros fundamentais de camada únicos para esta condição de impressão, resultados discutidos nos itens 4.5.1.2 e 4.5.2, condição de impressão regular (IR), e condição de impressão irregular 2 (IIR2), onde foram observadas anomalias geométricas e nos parâmetros fundamentais de camada únicos para esta condição de impressão, resultados discutidos nos itens 4.5.1.2 e 4.5.2.

Ambos os métodos de classificação SVM Gaussiana Fina e SVM Gaussiana Média apresentaram acurácia na classificação de 33,3 %. Os métodos de classificação Discriminante Linear, Discriminante Quadrático e Gaussiana de Naive Bayes apresentaram falhas na classificação. Todos os outros métodos de classificação avaliados apresentaram acurácia na classificação de 0,0 %.

Devido aos métodos de classificação SVM Gaussiana Fina e SVM Gaussiana Média terem apresentado a melhor acurácia na classificação das diferentes condições de impressão em configuração de modelo padrão, suas definições de modelo foram exploradas, por meio das opções avançadas de SVM disponíveis no aplicativo *Classification Learner*, a fim de tentar refinar a acurácia de classificação.

Isto foi alcançado alterando-se a definição de modelo método multiclasse de Um-vs-Um (*One-vs-One*), para Um-vs-Todos (*One-vs-All*). Todas as outras definições de modelo foram mantidas em valores padrão. Com a alteração desta definição, o modelo de classificação SVM Gaussiana Fina passou a apresentar acurácia de 100,0 % na classificação das diferentes condições de impressão, e o modelo de classificação SVM Gaussiana Média continuou a apresentar acurácia de 33,3 % na classificação das diferentes condições de impressão, tal como representado na Figura 4.78.

Figura 4.78 – Resultado das rodadas de testes de classificação a partir dos dados obtidos pelo PZT

Variável 1 ($\overline{MovROP}_{US=1}^{R}$)	**Variável 2** ($\overline{MovRMS}_{US=1}^{R}$)	**Condição** (1 – IIR1, 2 – IR, 3 – IIR2)
0,6807	0,0202	1
0,6681	0,0191	2
0,6263	0,0159	3

⇩

Rodada	**SVM Gaussiana Fina**	**SVM Gaussiana Média**	**Discriminante Linear e Quadrático**	**Gaussiana de Naive Bayes**	**Demais métodos de classificação**
1º (Configurações de modelo padrão)	33,3 %	33,3 %	Falha na classificação	Falha na classificação	0 %
2º (método multiclasse alterado para Um-vs-Todos)	100 %	33,3 %	Não avaliado	Não avaliado	Não avaliados

⇩

Definições do modelo de classificação para as diferentes condições de impressão

Fonte: Autor

Como, por meio do modelo de classificação SVM Gaussiana Fina, uma acurácia de 100,0 % na classificação dos dados foi obtida, outros testes com o modelo de classificação SVM Gaussiana Média foram descontinuados. A Tabela 14 apresenta as definições do modelo de classificação obtido para classificar as diferentes condições de impressão a partir dos dados obtidos pelo PZT.

Tabela 14: Definições do modelo de classificação para os dados obtidos pelo PZT

Resultados					
Acurácia		Velocidade de predição		Tempo de treino do modelo	
100 %		~71 obj/seg		0,91086 seg	
Tipo do modelo					
Predefinição	Função do Kernel	Escala do Kernel	Nível de restrição da caixa	Método multiclasse	Padronização de dados
SVM Gaussiana Fina	Gaussiana	0,35	1	Um-vs-Todos	Verdade
Seleção de parâmetros					
Todos os parâmetros usados no modelo, antes do PCA					
PCA					
PCA desativado					

Fonte: Autor

CAPÍTULO 5– CONCLUSÕES

Neste trabalho um sensor de emissão acústica (EA) e um PZT foram utilizados para monitorar a fabricação da primeira camada do processo FDM, com o objetivo principal de auxiliar na identificação e classificação de diferentes anomalias no início do processo. Para tanto, fez-se uso de processamento digital de sinais, tais como: transformada rápida de Fourier (FFT), valor médio quadrático (RMS), razão de potência (ROP) e desvio do valor médio quadrático (RMSD). Ademais, diferentes métodos de classificação foram avaliados por meio do aplicativo *Classification Learner*, a fim de determinar qual seria mais adequado para gerar um modelo de classificação dos diferentes tipos de anomalias nas peças obtidas por meio dos dados estatísticos levantados no processamento digital de sinais.

Da revisão bibliográfica, observou-se que existem vários trabalhos voltados ao monitoramento do processo FDM por meio do processamento digital de sinais em dados adquiridos por transdutores piezelétricos alocados a mesa de impressão. Inclusive a partir de análises empregando a estatística RMS. No entanto, algumas lacunas foram identificadas. Por exemplo, não foram encontrados trabalhos científicos que abordassem, dentre outros tópicos, qual seria o valor de tempo de integração adequado para o cálculo do RMS neste processo. Por esta razão, objetivos secundários deste trabalho foram estabelecidos, a fim de procurar preencher tais lacunas encontradas.

Em relação aos resultados obtidos para os objetivos secundários deste trabalho, pode-se chegar as seguintes conclusões: que os elementos de fixação da mesa de impressão no arcabouço da impressora afetam diretamente da resposta dos transdutores piezelétricos; que a variação de temperatura da mesa no processo FDM afeta diretamente da resposta dos transdutores piezelétricos; que para o cálculo do sinal RMS a partir de um sinal adquirido por transdutor piezelétrico do processo FDM, um valor de tempo de integração de 9 ms é adequado; que nos sinais adquiridos pelos transdutores piezelétricos durante o processo FDM, determinados componentes em frequências estão relacionados com o acionamento dos motores de passo e com outros elementos da transmissão mecânica de movimento; e que os arquétipos de preenchimento adotados na fabricação de cada camada pelo processo FDM possuem grande influência nos sinais adquiridos pelos transdutores piezelétricos.

Em relação ao objetivo principal deste trabalho, conclui-se, com base nos resultados obtidos para o PZT e para o sensor EA, que é viável a utilização das estatísticas RMS e ROP, e do índice de dano RMSD, para a detecção de anomalias na fabricação da primeira camada do

processo FDM. E que utilizando o método de classificação SVM Gaussiana Fina em configuração de método multiclasse Um-vs-Todos no aplicativo *Classification Learner*, foi possível obter modelos capazes de classificar as diferentes condições de impressão a partir de sinais coletados pelo sensor EA e pelo PZT com acurácia de 100 %.

5.1 Sugestão para os próximos trabalhos.

- Ampliar o conhecimento das anomalias geradas pela alteração de características de impressão nas peças obtidas pelo processo FDM, tais como temperatura na mesa, multiplicador de filamento, entre outras;

- Estudar a detecção de anomalias na fabricação pelo processo FDM de uma única linha de determinado arquétipo de preenchimento;

- Verificar a validade de utilização do *Ti* de 9 ms na obtenção do sinal RMS a partir de sinais obtidos do processo FDM com diferentes matérias primas (Ex: PETG, ABS).

REFERÊNCIAS

ABEYKOON, Chamil; SRI-AMPHORN, Pimpisut; FERNANDO, Anura. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, *[S. l.]*, v. 3, n. 3, p. 284–297, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003

AGARWALA, Mukesh K. *et al.* Structural quality of parts processed by fused deposition. **Rapid Prototyping Journal**, *[S. l.]*, v. 2, n. 4, p. 4–19, 1996. Disponível em: https://doi.org/10.1108/13552549610732034. Acesso em: 15 mar. 2019.

AGUIAR, P. R. *et al.* In-process grinding monitoring by acoustic emission. **2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, *[S. l.]*, v. 5, p. V-405–408, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1109/icassp.2004.1327133

AGUIAR, Paulo R. *et al.* In-process grinding monitoring through acoustic emission. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, *[S. l.]*, v. 28, n. 1, p. 118–124, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000100014

AHRENS, Carlos Henrique *et al.* **Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. *E-book.*

AKTAS, Hakan; SAN, Bekir Taner. Landslide susceptibility mapping using an automatic sampling algorithm based on two level random sampling. **Computers and Geosciences**, *[S. l.]*, v. 133, n. September, p. 104329, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104329

AL FARUQUE, Mohammad Abdullah *et al.* Acoustic Side-Channel Attacks on Additive Manufacturing Systems. **2016 ACM/IEEE 7th International Conference on Cyber-Physical Systems, ICCPS 2016 - Proceedings**, *[S. l.]*, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ICCPS.2016.7479068

ALEXANDRE, Felipe *et al.* Emitter-Receiver Piezoelectric Transducers Applied in Monitoring Material Removal of Workpiece during Grinding Process. **Proceedings**, Basel, Switzerland, v. 4, n. 1,9, p. 6, 2019 a. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ecsa-5-05732

ALEXANDRE, Felipe A. *et al.* A Novel Ultrasound Technique Based on Piezoelectric Diaphragms Applied to Material Removal Monitoring in the Grinding Process. **Sensors**, *[S. l.]*, v. 19, n. 18, p. 3932, 2019 b. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s19183932

ALEXANDRE, Felipe A. *et al.* A Novel Ultrasound Technique Based on Piezoelectric Diaphragms Applied to Material Removal Monitoring in the Grinding Process. **Sensors**, *[S. l.]*, v. 19, n. 18, p. 3932, 2019 c. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s19183932

ALEXANDRE, Felipe Aparecido *et al.* Chatter Vibration Monitoring in the Surface Grinding Process through Digital Signal Processing of Acceleration Signal. **Proceedings**, *[S. l.]*, v. 2, n. 3, p. 126, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ecsa-4-04927

ALEXANDRE, Felipe Aparecido *et al.* Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 96, n. 1–4, p. 67–79, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-018-1582-0. Acesso em: 10 set. 2018.

ALIHEIDARI, Nahal *et al.* Interlayer adhesion and fracture resistance of polymers printed through melt extrusion additive manufacturing process. **Materials and Design**, *[S. l.]*, v. 156, p. 351–361, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.001

ALIMI, Oyekunle Azeez; BINGWA, Ndzondelelo; MEIJBOOM, Reinout. Homemade 3-D printed flow reactors for heterogeneous catalysis. **Chemical Engineering Research and Design**, *[S. l.]*, v. 150, p. 116–129, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.07.024

ANDEREGG, David A. *et al.* In-situ monitoring of polymer flow temperature and pressure in extrusion based additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 26, n. December 2018, p. 76–83, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.002

ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). **ASTM Standard E976-10 - Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response**. *[S. l.: s. n.]* Disponível em: https://doi.org/10.1520/E0976-15

ATTARAN, Mohsen. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. **Business Horizons**, *[S. l.]*, v. 60, n. 5, p. 677–688, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011

AULESTIA VIERA, Martin A. *et al.* A Time–Frequency Acoustic Emission-Based Technique to Assess Workpiece Surface Quality in Ceramic Grinding with PZT Transducer. **Sensors**, *[S. l.]*, v. 19, n. 18, p. 3913, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s19183913

AZEVEDO, Fábio Mariotto de. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. 2013. - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, *[s. l.]*, 2013.

BÄHR, Friedrich; WESTKÄMPER, Engelbert. Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling. **Procedia CIRP**, *[S. l.]*, v. 72, p. 1214–1219, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.048

BALAJI, V. R. *et al.* Skin disease detection and segmentation using dynamic graph

cut algorithm and classification through Naive Bayes classifier. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, *[S. l.]*, v. 163, p. 107922, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107922

BAPTISTA, Fabricio *et al.* An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Sensors**, *[S. l.]*, v. 14, n. 1, p. 1208–1227, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s140101208

BAUMANN, Felix *et al.* Concept Development of a Sensor Array for 3D Printer. **Procedia CIRP**, *[S. l.]*, v. 51, p. 24–31, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.041

BAUMANN, Felix; ROLLER, Dieter. Vision based error detection for 3D printing processes. **MATEC Web of Conferences**, *[S. l.]*, v. 59, p. 06003, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1051/matecconf/20165906003

BEHERA, Santi Kumari; RATH, Amiya Kumar; SETHY, Prabira Kumar. Maturity status classification of papaya fruits based on machine learning and transfer learning approach. **Information Processing in Agriculture**, *[S. l.]*, n. xxxx, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.05.003

BELLACICCA, Andrea; SANTANIELLO, Tommaso; MILANI, Paolo. Embedding electronics in 3D printed structures by combining fused filament fabrication and supersonic cluster beam deposition. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 24, n. September, p. 60–66, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.010

BHAVSAR, Pavan *et al.* Detecting first layer bond quality during FDM 3D printing using a discrete wavelet energy approach. **Procedia Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 48, p. 718–724, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.104

BINDU BHARGAVI, G.; GOPALA KRISHNA SASTRY, K. V. S. Experimental study on mechanical properties of bacterial concrete. **Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems**, *[S. l.]*, v. 9, n. Special issue 14, p. 454–464, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.076

BONAH, Ernest *et al.* Vis-NIR hyperspectral imaging for the classification of bacterial foodborne pathogens based on pixel-wise analysis and a novel CARS-PSO-SVM model. **Infrared Physics and Technology**, *[S. l.]*, v. 105, n. December 2019, p. 103220, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103220

CANDAN, Çaɬatay. Fine resolution frequency estimation from three DFT samples: Case of windowed data. **Signal Processing**, *[S. l.]*, v. 114, p. 245–250, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.03.009

CARMO, Matheus Godoy Fonseca do *et al.* Study of the Defects and Geometric Anomalies on Monolayer Parts Obtained by Fused Deposition Modeling Process. **Proceedings**, Online, v. 69, n. 1, p. 40, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/CGPM2020-07159

CELANI, Gabriela; CANCHERINI, Laura. Digitalização tridimensional de objetos: um estudo de caso. *In*: 2009, **Congresso SiGraDi**. *[S. l.: s. n.]*

CHANG, Kuo Tsai; CHIANG, Hsuang Chang; LEE, Chun Wei. Design and implementation of a piezoelectric clutch mechanism using piezoelectric buzzers. **Sensors and Actuators, A: Physical**, *[S. l.]*, v. 141, n. 2, p. 515–522, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.018

CHENG, Gong *et al.* Determination of acoustic emissions using panel contribution analysis and scale modeling. **Applied Acoustics**, *[S. l.]*, v. 155, p. 63–74, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.05.016

CICALA, Gianluca *et al.* Engineering thermoplastics for additive manufacturing: A critical perspective with experimental evidence to support functional applications. **Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials**, *[S. l.]*, v. 15, n. 1, p. e10–e18, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.5301/jabfm.5000343

COSTA, S. F.; DUARTE, F. M.; COVAS, J. A. Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques. **Journal of Materials Processing Technology**, *[S. l.]*, v. 245, p. 167–179, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.026. Acesso em: 15 mar. 2019.

DA SILVA, Jorge Vicente Lopes. Planejamento de processo para prototipagem rápida. *In*: VOLPATO, Neri (org.). **Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. p. 37. *E-book.*

DA SILVEIRA, Ricardo Zanni Mendes; CAMPEIRO, Leandro Melo; BAPTISTA, Fabricio Guimarães. Performance of three transducer mounting methods in impedance-based structural health monitoring applications. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, *[S. l.]*, v. 28, n. 17, p. 2349–2362, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1177/1045389X17689942

DADDONA, Doriana M. *et al.* Tool Condition Monitoring of Single-point Dressing Operation by Digital Signal Processing of AE and AI. **Procedia CIRP**, *[S. l.]*, v. 67, p. 307–312, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.218

DE ALMEIDA, Vinicius Augusto Dare; BAPTISTA, Fabricio Guimaraes; DE AGUIAR, Paulo Roberto. Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, *[S. l.]*, v. 15, n. 2, p.

693–702, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2352171. Acesso em: 6 maio. 2019.

DIZON, John Ryan C. *et al.* Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 20, p. 44–67, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002

DUONG, Trung H. *et al.* G-code Visualization and Editing Program for Inexpensive Metal 3D Printing. **Procedia Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 17, p. 22–28, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.007

ERTAY, Deniz Sera; YUEN, Alexander; ALTINTAS, Yusuf. Synchronized material deposition rate control with path velocity on fused filament fabrication machines. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 19, p. 205–213, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.011

FAROUKI, Rida T.; MANJUNATHAIAH, Jairam; YUAN, Guo Feng. G codes for the specification of Pythagorean-hodograph tool paths and associated feedrate functions on open-architecture CNC machines. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, *[S. l.]*, v. 39, n. 1, p. 123–142, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00018-2

FERNANDEZ, Breno O. *et al.* Study of Knock Sensors as Low-Cost Alternatives to Acoustic Emission Sensors. **IEEE Sensors Journal**, *[S. l.]*, v. 20, n. 11, p. 6038–6045, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2972778

FERREIRA, Cristiano Vasconcellos; DOS SANTOS, Jorge Roberto Lopes; DA SILVA, Jorge Vicente Lopes. Exemplos de aplicações da prototipagem rápida. *In*: VOLPATO, Neri (org.). **Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. p. 29. *E-book*.

FRASSINETI, Lorenzo *et al.* Automatic detection and sonification of nonmotor generalized onset epileptic seizures: Preliminary results. **Brain Research**, *[S. l.]*, v. 1721, n. October 2018, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.brainres.2019.146341

GARAS, Monique *et al.* 3D-Printed specimens as a valuable tool in anatomy education: A pilot study. **Annals of Anatomy**, *[S. l.]*, v. 219, p. 57–64, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aanat.2018.05.006

GENG, Peng *et al.* Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. **Journal of Manufacturing Processes**, *[S. l.]*, v. 37, n. November 2018, p. 266–273, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.023

GIRIDHAR, D.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic emission response of sintered alumina zirconia composite during grooving process. **NDT and E International**, *[S. l.]*, v. 46, n. 1, p. 55–62, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.11.002

GLENN, Andrew *et al.* Pulse pileup rejection methods using a two-component Gaussian Mixture Model for fast neutron detection with pulse shape discriminating scintillator. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, *[S. l.]*, v. 988, n. August 2020, p. 164905, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164905

GLISSOI LOPES, Thiago *et al.* A INFLUÊNCIA DA DETERMINAÇÃO DE LIMIAR A SER APLICADO NA MÉTRICA "COUNTS" NO ESTUDO DO PROCESSO DE DRESSAGEM. *In*: 2019, São Carlos. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. São Carlos: ABCM, 2019. p. 3–7. Disponível em: https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEF2019.COF2019-0423

GLISSOI LOPES, Thiago; DE AGUIAR, Paulo Roberto. DETECÇÃO DE FALHA NO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D POR MONITORAMENTO INDIRETO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS. *In*: (Paulo Roberto de Aguiar et al., Org.) 2019, Bauru. **IX Seminário de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**. Bauru: Bauru: UNESP/FEB, 2019. p. 206. Disponível em: https://www2.feb.unesp.br/pos/seminarioEletrica/anais/2019/Anais_IX_Seminario_Eletrica_2019.pdf

GO, Jamison *et al.* Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high-throughput system design. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 16, p. 1–11, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.03.007

GONZALES, Rafael C.; WOODS, Richard E.; EDDINS, Steven L. **Digital Image Processing Using MATLAB**. 2. ed. *[S. l.]*: Gatesmark Publishing, 2009. *E-book*.

GREEFF, Gabriel Pieter; SCHILLING, Meinhard. Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 14, p. 31–38, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.12.005

GRIFFIN, James; CHEN, Xun. Classification of the acoustic emission signals of rubbing, ploughing and cutting during single grit scratch tests. **International Journal of Nanomanufacturing**, *[S. l.]*, v. 1, n. 2, p. 189, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1504/IJNM.2006.012195

GRIFFIN, James Marcus; CHEN, Xun. Multiple classification of the acoustic

emission signals extracted during burn and chatter anomalies using genetic programming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 45, n. 11–12, p. 1152–1168, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-009-2026-7

HALL, Susan *et al.* A pilot study assessing the value of 3D printed molecular modelling tools for pharmacy student education. **Currents in Pharmacy Teaching and Learning**, *[S. l.]*, v. 9, n. 4, p. 723–728, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cptl.2017.03.029

HARTCHER-O'BRIEN, Jess; EVERS, Jeremy; TEMPELMAN, Erik. Surface roughness of 3D printed materials: Comparing physical measurements and human perception. **Materials Today Communications**, *[S. l.]*, v. 19, n. February, p. 300–305, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.01.008

HELLER, Blake P.; SMITH, Douglas E.; JACK, David A. Effects of extrudate swell and nozzle geometry on fiber orientation in Fused Filament Fabrication nozzle flow. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 12, p. 252–264, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.005

HERTZ, Alexandria M.; HERTZ, Nicholas M.; JOHNSEN, Niels V. Identifying bladder rupture following traumatic pelvic fracture: A machine learning approach. **Injury**, *[S. l.]*, v. 51, n. 2, p. 334–339, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.injury.2019.12.009

HIRSCH, Matthias *et al.* Assessing the capability of in-situ nondestructive analysis during layer based additive manufacture. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 13, p. 135–142, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2016.10.004. Acesso em: 24 maio. 2019.

HSU; N., N. Characterization and calibration of acoustic emission sensors. **Mater. Eval.**, *[S. l.]*, v. 39, p. 60–68, 1981. Disponível em: http://ci.nii.ac.jp/naid/80000770417/en/. Acesso em: 31 maio. 2019.

ISO/ASTM. INTERNATIONAL STANDARD ISO / ASTM 52900 Additive manufacturing — General principles — Terminology. **International Organization for Standardization**, *[S. l.]*, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1520/ISOASTM52900-15

JEMIELNIAK, Krzysztof. Some aspects of acoustic emission signal pre-processing. **Journal of Materials Processing Technology**, *[S. l.]*, v. 109, n. 3, p. 242–247, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00805-0. Acesso em: 19 ago. 2019.

JIANG, Ruth; KLEER, Robin; PILLER, Frank T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. **Technological Forecasting and Social Change**, *[S. l.]*, v. 117, p. 84–97, 2017. Disponível em:

https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.006

KAMPKER, Achim *et al.* Review on Machine Designs of Material Extrusion based Additive Manufacturing (AM) Systems - Status-Quo and Potential Analysis for Future AM Systems. **Procedia CIRP**, *[S. l.]*, v. 81, p. 815–819, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.205

KARAKURT, Ilbey; LIN, Liwei. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. **Current Opinion in Chemical Engineering**, *[S. l.]*, v. 28, p. 134–143, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001

KATIĆ, Katarina; LI, Rongling; ZEILER, Wim. Machine learning algorithms applied to a prediction of personal overall thermal comfort using skin temperatures and occupants' heating behavior. **Applied Ergonomics**, *[S. l.]*, v. 85, n. October 2018, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103078

KHAN, M. Attique *et al.* Lungs cancer classification from CT images: An integrated design of contrast based classical features fusion and selection. **Pattern Recognition Letters**, *[S. l.]*, v. 129, p. 77–85, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.11.014

KHARRAT, M. *et al.* Influence of damage accumulation under fatigue loading on the AE-based health assessment of composite materials: Wave distortion and AE-features evolution as a function of damage level. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, *[S. l.]*, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.020

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

KIM, Jung Sub *et al.* Development of Data-Driven In-Situ Monitoring and Diagnosis System of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Based on Support Vector Machine Algorithm. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, *[S. l.]*, v. 5, n. 4, p. 479–486, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40684-018-0051-4. Acesso em: 26 nov. 2018.

KISHAWY, H. A. *et al.* Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 98, n. 5–8, p. 1391–1407, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-018-2341-y

KLETETSCHKA, Karel *et al.* Suitability of 3D-Printed devices for low-temperature geochemical experiments. **Applied Geochemistry**, *[S. l.]*, v. 98, n. June, p. 121–126, 2018.

Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.08.012

KOCISKO, Marek *et al.* Postprocess Options for Home 3D Printers. **Procedia Engineering**, *[S. l.]*, v. 196, n. June, p. 1065–1071, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.063

KOESTER, Lucas W. *et al.* In-situ acoustic signature monitoring in additive manufacturing processes. *In*: 2018, **AIP Conference Proceedings**. : AIP Publishing LLC, 2018. p. 020006. Disponível em: https://doi.org/10.1063/1.5031503. Acesso em: 26 nov. 2018.

KOSTAKIS, Vasilis; PAPACHRISTOU, Marios. Commons-based peer production and digital fabrication: The case of a RepRap-based, Lego-built 3D printing-milling machine. **Telematics and Informatics**, *[S. l.]*, v. 31, n. 3, p. 434–443, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tele.2013.09.006

KRUTH, J. P. P. Material Incress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 40, n. 2, p. 603–614, 1991. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6

KUMAR, Sandeep; VISHWAKARMA, Manish; AKHILESH, Prof. ScienceDirect Advances and Researches on Non Destructive Testing : A Review. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, v. 5, n. 2, p. 3690–3698, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620. Acesso em: 27 jul. 2018.

KUN, Krisztián. Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. **Procedia Engineering**, *[S. l.]*, v. 149, n. June, p. 203–211, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657

LE, Khuyen T. *et al.* An adapted linear discriminant analysis with variable selection for the classification in high-dimension, and an application to medical data. **Computational Statistics and Data Analysis**, *[S. l.]*, v. 152, p. 107031, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.csda.2020.107031

LEE, Jian Yuan; AN, Jia; CHUA, Chee Kai. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. **Applied Materials Today**, *[S. l.]*, v. 7, p. 120–133, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004

LI, Chuan *et al.* Fusing convolutional generative adversarial encoders for 3D printer fault detection with only normal condition signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**, *[S. l.]*, v. 147, p. 107108, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107108

LI, Qiang; KUCUKKOC, Ibrahim; ZHANG, David Z. Production planning in additive manufacturing and 3D printing. **Computers and Operations Research**, *[S. l.]*, v. 83, p. 1339–

1351, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.01.013

LIANG, Rongjie; WANG, Qing Ming. High sensitivity piezoelectric sensors using flexible PZT thick-film for shock tube pressure testing. **Sensors and Actuators, A: Physical**, *[S. l.]*, v. 235, p. 317–327, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.09.027

LIM, Philip K. *et al.* Use of 3D Printed Models in Resident Education for the Classification of Acetabulum Fractures. **Journal of Surgical Education**, *[S. l.]*, v. 75, n. 6, p. 1679–1684, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2018.04.019

LIU, Chenang *et al.* Image analysis-based closed loop quality control for additive manufacturing with fused filament fabrication. **Journal of Manufacturing Systems**, *[S. l.]*, v. 51, n. April, p. 75–86, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.002

LIU, Fan *et al.* The effect of material mixing on interfacial stiffness and strength of multi-material additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 36, n. January, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101502

LIU, Jie *et al.* An improved fault diagnosis approach for FDM process with acoustic emission. **Journal of Manufacturing Processes**, *[S. l.]*, v. 35, n. August, p. 570–579, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.038

LOPES, Barbara Guedes *et al.* Study on the effect of the temperature in Acoustic Emission Sensor by the Pencil Lead Break Test. *In*: 2018a, **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. : IEEE, 2018. p. 1226–1229. Disponível em: https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627213. Acesso em: 21 maio. 2019.

LOPES, Thiago Glissoi *et al.* A Utilização de Manufatura Aditiva em Projetos de Pesquisa. *In*: (Anderson Pazin, Fábio Lúcio Meira, Org.) 2018b, Lins-SP. **Anais do II Congresso de Inovação e Tecnologia – FATEC Lins**. Lins-SP: Centro Paula Souza, 2018. p. 104–112. Disponível em: http://revista.fateclins.edu.br/congresso/edicoes.xhtml

LOPES, Thiago Glissoi *et al.* Study of the Influence of Temperature on Low-Cost Piezoelectric Transducer Response for 3D Printing Process Monitoring. *In*: 2019a, **2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)**. : IEEE, 2019. p. 544–549. Disponível em: https://doi.org/10.1109/IESTEC46403.2019.00103

LOPES, Thiago Glissoi *et al.* Evaluating Temperature Influence on Low-Cost Piezoelectric Transducer Response for 3D Printing Process Monitoring. **Proceedings**, Basel, Switzerland, v. 42, n. 1, p. 26, 2019 b. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ecsa-6-06571

LOPES, Thiago Glissoi *et al.* A PRIMEIRA CAMADA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO PLANEJAMENTO DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D. *In*: 2020,

Bauru. **Anais do XXVII Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP)**. Bauru: *[s. n.]*, 2020. p. 1–12. Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais_simpep.php?e=13

LOPES, Thiago Glissoi; LOOSLI, Victor Lopes; TANOMARU, Julio. DESENVOLVIMENTO DE SONDA PARA COLETA E ANÁLISE DE ÁGUA. *In*: 2018, Bauru. **XXV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Bauru: *[s. n.]*, 2018. p. 10. Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais_simpep.php?e=13

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

LU, Xiang; KUMARAVELU, Giridharan; OKWUDIRE, Chinedum E. An evaluation of data size reduction techniques for improving the reliability of cloud-based CNC for a 3D printer. **Procedia Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 34, p. 903–910, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.157

LU, Yanglong; WANG, Yan. Monitoring temperature in additive manufacturing with physics-based compressive sensing. **Journal of Manufacturing Systems**, *[S. l.]*, v. 48, n. June, p. 60–70, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.05.010

LUCAS, Guilherme B. *et al.* Study of a Low-Cost Piezoelectric Sensor for Three Phase Induction Motor Load Estimation. **Proceedings**, *[S. l.]*, v. 4, n. 1, p. 46, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ecsa-5-05723. Acesso em: 20 fev. 2019.

LUO, Cheng *et al.* Effects of feed rates on temperature profiles and feed forces in material extrusion additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 35, n. January, p. 101361, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101361

LYONS, Richard G. **Understanding Digital Signal Processing**. 3. ed. *[S. l.: s. n.]*. *E-book*.

MALHI, Arnaz; GAO, Robert X. PCA-based feature selection scheme for machine defect classification. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, *[S. l.]*, v. 53, n. 6, p. 1517–1525, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TIM.2004.834070

MARCHI, Marcelo *et al.* Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements. **Measurement Science and Technology**, *[S. l.]*, v. 26, n. 4, p. 045601, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/4/045601

MARTINS, Cesar H. R. *et al.* Tool condition monitoring of single-point dresser using acoustic emission and neural networks models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, *[S. l.]*, v. 63, n. 3, p. 667–679, 2014. Disponível em:

https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2281576

MATHWORKS. **Statistics and Machine Learning Toolbox**. *[s. l.]*, 2019. Disponível em: https://ch.mathworks.com/products/statistics.html. Acesso em: 12 jan. 2021.

MATHWORKS. **Choose Classifier Options**. *[s. l.]*, 2020. Disponível em: https://www.mathworks.com/help/stats/choose-a-classifier.html. Acesso em: 8 fev. 2020.

MELLOR, Stephen; HAO, Liang; ZHANG, David. Additive manufacturing: A framework for implementation. **International Journal of Production Economics**, *[S. l.]*, v. 149, p. 194–201, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008

MONZÓN, M. D. *et al.* Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 76, n. 5–8, p. 1111–1121, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-014-6334-1

NALON;, José Alexandre. **Introdução ao processamento digital de sinais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. *E-book*.

NATH, Paromita *et al.* Optimization of fused filament fabrication process parameters under uncertainty to maximize part geometry accuracy. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 35, n. March, p. 101331, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101331

NGO, Tuan D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, *[S. l.]*, v. 143, n. February, p. 172–196, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

NORTHCUTT, Lily A. *et al.* Effect of processing conditions on crystallization kinetics during materials extrusion additive manufacturing. **Polymer (United Kingdom)**, *[S. l.]*, v. 154, n. June, p. 182–187, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.09.018

PANDA, Biranchi *et al.* Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed honeycomb structures. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, *[S. l.]*, v. 116, n. October 2017, p. 495–506, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.037

PANDIYAN, Vigneashwara; TJAHJOWIDODO, Tegoeh; SAMY, Meena Periya. In-Process Surface Roughness Estimation Model for Compliant Abrasive Belt Machining Process. **Procedia CIRP**, *[S. l.]*, v. 46, p. 254–257, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.126

PAPON, Easir Arafat; HAQUE, Anwarul; MULANI, Sameer B. Process optimization and stochastic modeling of void contents and mechanical properties in additively manufactured

composites. **Composites Part B: Engineering**, *[S. l.]*, v. 177, n. February, p. 107325, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107325

PETSIUK, Aliaksei L.; PEARCE, Joshua M. Open source computer vision-based layer-wise 3D printing analysis. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 36, n. March, p. 101473, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101473

PILNÝ, Lukáš *et al.* Acoustic emission-based in-process monitoring of surface generation in robot-assisted polishing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 29, n. 11, p. 1218–1226, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1034180. Acesso em: 19 ago. 2019.

POPESCU, Diana *et al.* Effects of multiple sterilizations and natural aging on the mechanical behavior of 3D-printed ABS. **Mechanics of Materials**, *[S. l.]*, v. 148, n. April, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103423

RAVOORI, Darshan *et al.* Experimental and theoretical investigation of heat transfer in platform bed during polymer extrusion based additive manufacturing. **Polymer Testing**, *[S. l.]*, v. 73, n. November 2018, p. 439–446, 2019 a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.025

RAVOORI, Darshan *et al.* Nozzle-integrated pre-deposition and post-deposition heating of previously deposited layers in polymer extrusion based additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 28, n. June, p. 719–726, 2019 b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.006

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

SALUJA, Aditya; XIE, Jiarui; FAYAZBAKHSH, Kazem. A closed-loop in-process warping detection system for fused filament fabrication using convolutional neural networks. **Journal of Manufacturing Processes**, *[S. l.]*, v. 58, n. November 2019, p. 407–415, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.036

SANTANA, Leonardo *et al.* A comparative study between PETG and PLA for 3D printing through thermal, chemical and mechanical characterization. **Revista Materia**, *[S. l.]*, v. 23, n. 4, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0601

SANTOS, MARCELO AUGUSTO ROZAN DOS. **ENGENHARIA REVERSA: um método orientado a imobilizadores ortopédicos**. 2016. - UNESP, *[s. l.]*, 2016.

SARAL, G. Baby; PRIYA, R. Digital screen addiction with KNN and -Logistic

regression classification. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, n. xxxx, p. 3–6, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.360

SAUSE, Markus G. R. Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources. **Journal of Acoustic Emission**, *[S. l.]*, v. 29, p. 184–196, 2011. Disponível em: https://www.ndt.net/article/jae/papers/29-184.pdf. Acesso em: 21 maio. 2019.

SCHNIEDERJANS, Dara G. Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis. **International Journal of Production Economics**, *[S. l.]*, v. 183, n. November 2016, p. 287–298, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.008

SHEVCHIK, S. A. *et al.* Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 21, p. 598–604, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.012

SHIH, Chin Cheng *et al.* Effects of cold plasma treatment on interlayer bonding strength in FFF process. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 25, n. November 2018, p. 104–111, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.005

SHIN, Seung Jun; SUH, Suk Hwan; STROUD, Ian. Reincarnation of G-code based part programs into STEP-NC for turning applications. **CAD Computer Aided Design**, *[S. l.]*, v. 39, n. 1, p. 1–16, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cad.2006.08.005

SILVA DE FREITAS, Everaldo; GUIMARÃES BAPTISTA, Fabricio. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, *[S. l.]*, v. 238, p. 220–228, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031. Acesso em: 13 set. 2018.

SINGH, Sunpreet *et al.* Current status and future directions of fused filament fabrication. **Journal of Manufacturing Processes**, *[S. l.]*, v. 55, n. April, p. 288–306, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.049

SIVA, I. *et al.* Modal analysis on the additive manufactured robotic segments: Effect of printing densities on the vibrational properties. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, n. xxxx, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.230

SOLOMON, I. John; SEVVEL, P.; GUNASEKARAN, J. A review on the various processing parameters in FDM. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, n. xxxx, p. 10–15, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484

SRINIVAS, M.; BABU, B. Sridhar. A Critical Review on Recent Research Methodologies in Additive Manufacturing. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, v. 4, n. 8, p. 9049–9059, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.258

SRINIVASAN, R. *et al.* Influence of fused deposition modelling process parameters

on wear strength of carbon fibre PLA. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, v. 27, p. 1794–1800, 2020 a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.738

SRINIVASAN, R. *et al.* Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, v. 27, p. 1801–1805, 2020 b. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.777

SRINIVASAN, R. *et al.* Comparision of tribological behaviour for parts fabricated through fused deposition modelling (FDM) process on abs and 20% carbon fibre PLA. **Materials Today: Proceedings**, *[S. l.]*, v. 27, p. 1780–1786, 2020 c. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.689

STRANTZA, Maria *et al.* Acoustic emission monitoring of crack propagation in additively manufactured and conventional titanium components. **Mechanics Research Communications**, *[S. l.]*, v. 84, p. 8–13, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2017.05.009. Acesso em: 24 maio. 2019.

TAHAYERI, Anthony *et al.* 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. **Dental Materials**, *[S. l.]*, v. 34, n. 2, p. 192–200, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.10.003

TLEGENOV, Yedige; HONG, Geok Soon; LU, Wen Feng. Nozzle condition monitoring in 3D printing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 54, n. December 2017, p. 45–55, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.010

TLEGENOV, Yedige; WONG, Yoke San; HONG, Geok Soon. A dynamic model for nozzle clog monitoring in fused deposition modelling. **Rapid Prototyping Journal**, *[S. l.]*, v. 23, n. 2, p. 391–400, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0054

TORRADO, Angel R. *et al.* Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 6, p. 16–29, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001

TORRADO PEREZ, Angel R.; ROBERSON, David A.; WICKER, Ryan B. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, *[S. l.]*, v. 14, n. 3, p. 343–353, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9

TUNCER, Turker; ERTAM, Fatih. Neighborhood component analysis and reliefF based survival recognition methods for Hepatocellular carcinoma. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, *[S. l.]*, v. 540, p. 123143, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123143

VIERA, Martin A. Aulestia *et al.* A Low-Cost Acoustic Emission Sensor based on Piezoelectric Diaphragm. **IEEE Sensors Journal**, *[S. l.]*, p. 1–1, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2988478

VIJAYRAGHAVAN, Praveen; KRISHNAN, R. Noise in Electric Machines: A Review. *In*: 1998, Blacksburg. **Anais [...]**. Blacksburg: *[s. n.]*, 1998.

VOLPATO, Neri. Os principais processos de prototipagem rápida. *In*: VOLPATO, Neri (org.). **Prototipagem Rápida - Tecnologias e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2007. p. 45. *E-book*.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2017. *E-book*.

WANG, Bing; LIU, Zhanqiang. Acoustic emission signal analysis during chip formation process in high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy and Inconel 718 superalloy. **Journal of Manufacturing Processes**, *[S. l.]*, v. 27, p. 114–125, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.003

WANG, C. *et al.* Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 36, n. January, p. 101538, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101538

WASMER, K. *et al.* In Situ and Real-Time Monitoring of Powder-Bed AM by Combining Acoustic Emission and Artificial Intelligence. *In*: 2017, Cham. **International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 200–209. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66866-6_20. Acesso em: 26 nov. 2018.

WEBSTER, J.; DONG, W. P.; LINDSAY, R. Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63075-3. Acesso em: 16 jan. 2019.

WENDT, C. *et al.* FEM based evaluation of Fused Layer Modelling monolayers in tensile testing. **Procedia Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 13, p. 916–923, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.160

WENDT, Christiane *et al.* Processing and Quality Evaluation of Additive Manufacturing Monolayer Specimens. **Advances in Materials Science and Engineering**, *[S. l.]*, v. 2016, p. 1–8, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2016/5780693

WU, Haixi; WANG, Yan; YU, Zhonghua. In situ monitoring of FDM machine condition via acoustic emission. **The International Journal of Advanced Manufacturing**

Technology, *[S. l.]*, v. 84, n. 5–8, p. 1483–1495, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-015-7809-4. Acesso em: 26 nov. 2018.

WU, Haixi; YU, Zhonghua; WANG, Yan. A New Approach for Online Monitoring of Additive Manufacturing Based on Acoustic Emission. *In*: 2016, Blacksburg. **Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2016)**. Blacksburg: ASME, 2016. p. 8. Disponível em: https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8551

WU, Haixi; YU, Zhonghua; WANG, Yan. Real-time FDM machine condition monitoring and diagnosis based on acoustic emission and hidden semi-Markov model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, *[S. l.]*, v. 90, n. 5–8, p. 2027–2036, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9548-6. Acesso em: 26 nov. 2018.

XIE, Xiaozhu *et al.* A new monitoring method for metal rust removal states in pulsed laser derusting via acoustic emission techniques. **Journal of Materials Processing Technology**, *[S. l.]*, v. 275, n. July 2019, p. 116321, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116321

YAMPOLSKIY, Mark *et al.* Security of additive manufacturing: Attack taxonomy and survey. **Additive Manufacturing**, *[S. l.]*, v. 21, n. November 2017, p. 431–457, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.015

YAN, Ziwei *et al.* Rapid identification of benign and malignant pancreatic tumors using serum Raman spectroscopy combined with classification algorithms. **Optik**, *[S. l.]*, v. 208, n. January, p. 164473, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164473

YANG, Zhensheng *et al.* Filament breakage monitoring in fused deposition modeling using acoustic emission technique. **Sensors (Switzerland)**, *[S. l.]*, v. 18, n. 3, p. 1–16, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s18030749

YEH, Ching Chiang; CHEN, Yi Fan. Critical success factors for adoption of 3D printing. **Technological Forecasting and Social Change**, *[S. l.]*, v. 132, n. January, p. 209–216, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.02.003

YU, Shih Yuan *et al.* Sabotage Attack Detection for Additive Manufacturing Systems. **IEEE Access**, *[S. l.]*, v. 8, p. 27218–27231, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971947

YUAN, Bodi *et al.* Machine-Learning-Based Monitoring of Laser Powder Bed Fusion. **Advanced Materials Technologies**, *[S. l.]*, v. 1800136, p. 1–6, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1002/admt.201800136

ZHANG, Xiao *et al.* Correlation approach for quality assurance of additive manufactured parts based on optical metrology. **Journal of Manufacturing Processes**, *[S. l.]*, v. 53, n. May 2019, p. 310–317, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.02.037

ZHANG, Yingjie *et al.* Extraction and evaluation of melt pool, plume and spatter information for powder-bed fusion AM process monitoring. **Materials and Design**, *[S. l.]*, v. 156, p. 458–469, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.002

ZHAO, Peng *et al.* Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, *[S. l.]*, v. 197, p. 1046–1055, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.275

ZI, Bin *et al.* Design, stiffness analysis and experimental study of a cable-driven parallel 3D printer. **Mechanism and Machine Theory**, *[S. l.]*, v. 132, p. 207–222, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.11.003

APÊNDICE I

A seguir é apresentado a Tabela 15, que contém as características completas de impressão utilizadas no pós-processador Slic3r® para o fatiamento da peça em IR nos V-VI.

Tabela 15: Características completas de impressão para os V-VI

Características de impressão				
Camadas e perímetros				
Altura da camada				
Altura das camadas	Altura da primeira camada	Usar fatiamento adaptativo	Qualidade adaptativa	Igualar superfícies horizontais
0,3 mm	0,4 mm	Não	Não utilizado	Não utilizado
Conchas verticais				
Perímetros	Espessura mínima de concha	Vaso espiral		
3	0 mm	Não		
Conchas horizontais				
Camadas sólidas no topo	Camadas sólidas na base	Espessura mínima de concha		
3	3	0 mm		
Qualidade (fatiamento lento)				
Perímetros extras se necessário	Evitar cruzar perímetros	Detectar paredes finas	Detectar perímetros de ponte	
Sim	Não	Sim	Sim	
Avançado				
Posição de costura	Prioridade a perímetros externos			
Alinhado	Não			
Preenchimento				
Preenchimento				
Densidade de preenchimento	Arquétipo de preenchimento	Padrão de impressão externo superior	Arquétipo de preenchimento externo inferior	
20 %	Estrelas	Rectlinear	Rectlinear	
Redução de tempo de impressão				
Combinar preenchimento a cada	Apenas preencher onde necessário			
1 camada	Não			
Avançado				
Preencher espaços	Preenchimento solido a cada	Ângulo de preenchimento	Área limiar de preenchimento sólido	Apenas retrair quando cruzando perímetros	Preenchimento antes de perímetros
Sim	0 camadas	45 º	70 mm²	Sim	Não
Saia e Borda				
Saia				
Voltas (mínimo)	Distância do objeto	Altura da saia	Comprimento de extrusão mínima	
2	6 mm	1 camada	0 mm	
Borda				
Largura de borda exterior	Largura de borda interior	Largura de conexão de borda		
0 mm	0 mm	0 mm		
Material de suporte				
Material de suporte				
Gerar material de suporte	Limiar de saliência	Número de camadas máximo para suportes	Forçar suporte para as primeiras	
Não	Não utilizado	Não utilizado	0 camadas	
Jangada				
Camadas de jangada				
0 camadas				

Opções para material de suporte e de jangada				
Distância de contato Z	Padrão	Espaçamento de padrão	Ângulo de padrão	Tamanho do pilar
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
Espaçamento do pilar	Camadas de interface	Espaçamento de camadas de interface	Suportes apenas em bases de construção	Não gerar suportes para pontes
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não	Não utilizado
Velocidade				
Velocidade para movimentações de impressão				
Perímetros	Perímetros pequenos	Perímetros externos	Preenchimento	Preenchimento sólido
60 mm/s	15 mm/s	30 mm/s	80 mm/s	20 mm/s
Preenchimento sólido superior	Preenchimento de vazios	Preenchimento de pontes	Material de suporte	Material de suporte de interfaces
15 mm/s	20 mm/s	60 mm/s	60 mm/s	Não utilizado
Velocidade para movimentações de não impressão				
Movimentos				
130 mm/s				
Modificadores				
Velocidade da primeira camada				
15 mm/s				
Controle de aceleração (avançado)				
Perímetros	Preenchimento	Pontes	Primeira camada	Padrão
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	0 mm/s²
Velocidade automática (avançado)				
Velocidade máxima de impressão		Velocidade volumétrica máxima		
Não utilizado		0 mm³/s		
Múltiplos extrusores				
Extrusores				
Extrusor de perímetro	Extrusor de preenchimento	Extrusor de preenchimento sólido	Extrusor de material de suporte/jangada/saia	Extrusor de material de interface de jangada
1	1	1	1	Não utilizado
Prevenção de escorregamento				
Habilitar		Variação de temperatura		
Não		Não utilizado		
Avançado				
Sobreposição de regiões de diferentes extrusores		Conchas de interface		
0 mm		Não		
Avançado				
Largura de extrusão				
Largura de extrusão padrão	Primeira camada	Perímetros	Perímetros externos	Preenchimento
Automático	Padrão	Padrão	Automático	Padrão
Preenchimento sólido	Preenchimento sólido superior	Interface de suporte	Material de suporte	
Padrão	Padrão	Não utilizado	Não utilizado	
Sobreposição				
Sobreposição entre preenchimento e perímetro				
55 %				
Vazão				
Razão de vazão de ponte				
1				
Outro				
Compensação de tamanho XY		Resolução (depreciado)		
0 mm		0 mm		

Opções de saída		
Impressão sequencial		
Completar objetos individualmente	Raio de abertura do extrusor	Altura de abertura do extrusor
Não	Não utilizado	Não utilizado
Arquivo de saída		
Código G comentado	Identificar objeto de impressão no código G	Formato de nome de saída
Não	Não	[input_filename_base].gcode
Scripts de pós-processamento		
Não utilizado		
Não utilizado		
Notas		
Não utilizado		
Não utilizado		
Não utilizado		
Atalhos		
Preferencias de perfil		
Impressoras compatíveis		
Todas		
Definições de filamento		
Filamento		
Filamento		
Cor	Diâmetro	Multiplicador de extrusão
#FFFFFF	1,75 mm	1

Temperatura			
Extrusor – Primeira camada	Extrusor – Demais camadas	Mesa – Primeira camada	Mesa – Demais camadas
195 ºC	190 ºC	65 ºC	60 ºC

Informações opcionais	
Densidade	Custo
0 g/cm³	0 unidade_monetária/kg

Resfriamento	
Habilitar	
Manter ventilador sempre ligado	Permitir auto resfriamento
Não	Sim

Definições de ventilador			
Velocidade mínima do ventilador	Velocidade máxima do ventilador	Velocidade de ventilador para pontes	Desabilitar ventilador para as primeiras
35 %	100 %	100 %	3 camadas

Limiar de resfriamento		
Habilitar ventilador se o tempo de impressão da primeira camada estiver abaixo de	Atrasar ventilador se o tempo de impressão da primeira camada estiver abaixo de	Mínima velocidade de impressão
aproximadamente 60 segundos	aproximadamente 5 segundos	10 mm/s

Código G customizado
Código G precedente a impressão
Código G precedente a impressão
; Filament gcode
Código G seguinte a impressão
Código G seguinte a impressão
; Filament-specific end gcode ;END gcode for filament
Notas
Não utilizado
Não utilizado

Não utilizado					
Sobreposições					
Preferências de perfil					
Impressoras compatíveis					
Todas					
Sobreposições					
Velocidade volumétrica máxima					
0 mm³/s					
Definições de impressora					
Geral					
Tamanho e coordenadas					
Formato	Tamanho em X	Tamanho em Y	Origem em X	Origem em Y	Defasagem no eixo Z
Retangular	200 mm	160 mm	0 mm	0 mm	0 mm
Capacidades					
Número de extrusores			Possuí mesa aquecida		
1			Sim		
Firmware					
Tipo do código G					
RepRap (Marlin/Sprinter)					
Avançado					
Usar distâncias E relativas	Usar retrações por *firmware*	Usar E volumé-trico	Avanço de pressão	Limite de vibração (depreciado)	
Não	Não	Não	0	0 Hz	
Passos por milímetros completos em Z	Usar preparar e aguardar Código G - Extrusor		Usar preparar e aguardar Código G - Mesa		
0	Não		Não		
Código G customizado					
Código G precedente a impressão					
Código G precedente a impressão					
G28 ; home all axes G1 Z5 F5000 ; lift nozzle					
Código G seguinte a impressão					
Código G seguinte a impressão					
M104 S0 ; turn off temperature G28 X0 ; home X axis M84 ; disable motors					
Notas					
Não utilizado					
Não utilizado					
Não utilizado					
Extrusor 1					
Tamanho					
Diâmetro do bico					
0,5 mm					
Limites					
Mínimo			Máximo		
0,15 mm			0,4 mm		
Posição (para impressoras com múltiplos extrusores)					
Defasagem de extrusor em X			Defasagem de extrusor em Y		
0 mm			0 mm		
Retração					
Comprimento	Elevação em Z		Apenas subir Z acima e abaixo	Velocidade	
0 mm	Não utilizado		Não utilizado	Não utilizado	

Comprimento extra no reinício	Mínimo de movimentação após re-tração	Retração em mudança de camada	Cortar enquanto retração
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
Retração apenas quando a ferramenta é desabilitada (opções avançadas para procedimentos multi-extrusores)			
Comprimento		Comprimento extra no reinício	
Não utilizado		Não utilizado	

Fonte: Autor

APÊNDICE II

A seguir é apresentado a Tabela 16, que contém as características completas de impressão utilizadas no pós-processador Slic3r® para o fatiamento da peça em IR nos V-DZ.

Tabela 16: Características completas de impressão para V-DZ

Características de impressão				
Camadas e perímetros				
Altura da camada				
Altura das camadas	Altura da primeira camada	Usar fatiamento adaptativo	Qualidade adaptativa	Igualar superfícies horizontais
0,3 mm	0,3 mm	Não	Não utilizada	Não utilizado
Conchas verticais				
Perímetros	Espessura mínima de concha	Vaso espiral		
3	0 mm	Não		
Conchas horizontais				
Camadas sólidas no topo	Camadas sólidas na base	Espessura mínima de concha		
3	3	0 mm		
Qualidade (fatiamento lento)				
Perímetros extras se necessário	Evitar cruzar perímetros	Detectar paredes finas	Detectar perímetros de ponte	
Sim	Não	Sim	Sim	
Avançado				
Posição de costura	Prioridade a perímetros externos			
Alinhado	Sim			
Preenchimento				
Preenchimento				
Densidade de preenchimento	Arquétipo de preenchimento	Padrão de impressão externo superior	Arquétipo de preenchimento externo inferior	
20 %	Colmeia	Rectlinear	Rectlinear	
Redução de tempo de impressão				
Combinar preenchimento a cada	Apenas preencher onde necessário			
1 camada	Não			
Avançado				
Preencher espaços	Preenchimento solido a cada	Ângulo de preenchimento	Área limiar de preenchimento sólido	Apenas retrair quando cruzando perímetros	Preenchimento antes de perímetros
Sim	0 camadas	45 º	70 mm²	Sim	Não
Saia e Borda				
Saia				
Voltas (mínimo)	Distância do objeto	Altura da saia	Comprimento de extrusão mínima	
2	4 mm	1 camada	0 mm	
Borda				
Largura de borda exterior	Largura de borda interior	Largura de conexão de borda		
0 mm	0 mm	0 mm		
Material de suporte				
Material de suporte				
Gerar material de suporte	Limiar de saliência	Número de camadas máximo para suportes	Forçar suporte para as primeiras	
Não	Não utilizado	Não utilizado	0 camadas	
Jangada				
Camadas de jangada				
0 camadas				

Opções para material de suporte e de jangada				
Distância de contato Z	Padrão	Espaçamento de padrão	Ângulo de padrão	Tamanho do pilar
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado
Espaçamento do pilar	Camadas de interface	Espaçamento de camadas de interface	Suportes apenas em bases de construção	Não gerar suportes para pontes
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não	Não utilizado
Velocidade				
Velocidade para movimentações de impressão				
Perímetros	Perímetros pequenos	Perímetros externos	Preenchimento	Preenchimento sólido
20 mm/s	10 mm/s	5 mm/s	20 mm/s	20 mm/s
Preenchimento sólido superior	Preenchimento de vazios	Preenchimento de pontes	Material de suporte	Material de suporte de interfaces
15 mm/s	Automático	60 mm/s	60 mm/s	Não utilizado
Velocidade para movimentações de não impressão				
Movimentos				
50 mm/s				
Modificadores				
Velocidade da primeira camada				
20 mm/s				
Controle de aceleração (avançado)				
Perímetros	Preenchimento	Pontes	Primeira camada	Padrão
Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	Não utilizado	0 mm/s²
Velocidade automática (avançado)				
Velocidade máxima de impressão		Velocidade volumétrica máxima		
80 mm/s		0 mm³/s		
Múltiplos extrusores				
Extrusores				
Extrusor de perímetro	Extrusor de preenchimento	Extrusor de preenchimento sólido	Extrusor de material de suporte/jangada/saia	Extrusor de material de interface de jangada
1	1	1	1	Não utilizado
Prevenção de escorregamento				
Habilitar		Variação de temperatura		
Não		Não utilizado		
Avançado				
Sobreposição de regiões de diferentes extrusores		Conchas de interface		
0 mm		Não		
Avançado				
Largura de extrusão				
Largura de extrusão padrão	Primeira camada	Perímetros	Perímetros externos	Preenchimento
Automático	250 %	Padrão	Automático	Padrão
Preenchimento sólido	Preenchimento sólido superior	Interface de suporte	Material de suporte	
Padrão	Padrão	Não utilizado	Não utilizado	
Sobreposição				
Sobreposição entre preenchimento e perímetro				
55 %				
Vazão				
Razão de vazão de ponte				
1				
Outro				
Compensação de tamanho XY		Resolução (depreciado)		
0 mm		0 mm		

Opções de saída		
Impressão sequencial		
Completar objetos individualmente	Raio de abertura do extrusor	Altura de abertura do extrusor
Não	Não utilizado	Não utilizado
Arquivo de saída		
Código G comentado	Identificar objeto de impressão no código G	Formato de nome de saída
Sim	Não	[input_filename_base].gcode
Scripts de pós-processamento		
Não utilizado		
Não utilizado		
Notas		
Não utilizado		
Não utilizado		
Não utilizado		
Atalhos		
Preferencias de perfil		
Impressoras compatíveis		
Todas		
Definições de filamento		
Filamento		
Filamento		
Cor	Diâmetro	Multiplicador de extrusão
#FFFFFF	1,75 mm	1

Temperatura			
Extrusor – Primeira camada	Extrusor – Demais camadas	Mesa – Primeira camada	Mesa – Demais camadas
190 ºC	190 ºC	65 ºC	65 ºC

Informações opcionais	
Densidade	Custo
0 g/cm³	0 unidade_monetária/kg

Resfriamento	
Habilitar	
Manter ventilador sempre ligado	Permitir auto resfriamento
Não	Sim

Definições de ventilador			
Velocidade mínima do ventilador	Velocidade máxima do ventilador	Velocidade de ventilador para pontes	Desabilitar ventilador para as primeiras
35 %	100 %	100 %	3 camadas

Limiar de resfriamento		
Habilitar ventilador se o tempo de impressão da primeira camada estiver abaixo de	Atrasar ventilador se o tempo de impressão da primeira camada estiver abaixo de	Mínima velocidade de impressão
aproximadamente 60 segundos	aproximadamente 5 segundos	10 mm/s

Código G customizado
Código G precedente a impressão
Código G precedente a impressão
; Filament gcode M109 S190 ; set temperature and wait for it to be reached G21 ; set units to millimeters G90 ; use absolute coordinates M82 ; use absolute distances for extrusion G92 E0 ; reset extrusion distance G92 E0 ; reset extrusion distance G1 Z0.1 F2100.000 ; move to next layer (0) G1 F800

G1 X60.000 Y60.000 E30.000 ; clean extruder
Código G seguinte a impressão
Código G seguinte a impressão
; Filament-specific end gcode ;END gcode for filament
Notas
Não utilizado
Não utilizado
Não utilizado
Sobreposições
Preferências de perfil
Impressoras compatíveis
Todas
Sobreposições
Velocidade volumétrica máxima
0 mm³/s
Definições de impressora
Geral
Tamanho e coordenadas

Formato	Tamanho em X	Tamanho em Y	Origem em X	Origem em Y	Defasagem no eixo Z
Retangular	145 mm	150 mm	0 mm	0 mm	0 mm

Capacidades	
Número de extrusores	Possuí mesa aquecida
1	Sim

Firmware
Tipo do código G
RepRap (Marlin/Sprinter)

Avançado				
Usar distâncias E relativas	Usar retrações por *firmware*	Usar E volumé-trico	Avanço de pressão	Limite de vibração (depreciado)
Não	Não	Não	0	0 Hz

Passos por milímetros completos em Z	Usar preparar e aguardar Código G - Extrusor	Usar preparar e aguardar Código G - Mesa
0	Não	Não

Código G customizado
Código G precedente a impressão
Código G precedente a impressão
G28 ; home all axes G1 Z5 F5000 ; lift nozzle
Código G seguinte a impressão
Código G seguinte a impressão
M104 S0 ; turn off temperature G28 X0 ; home X axis G1 Z10 F5000 ; lift nozzle M84 ; disable motors
Notas
Não utilizado
Não utilizado
Não utilizado
Extrusor 1
Tamanho
Diâmetro do bico
0,4 mm
Limites

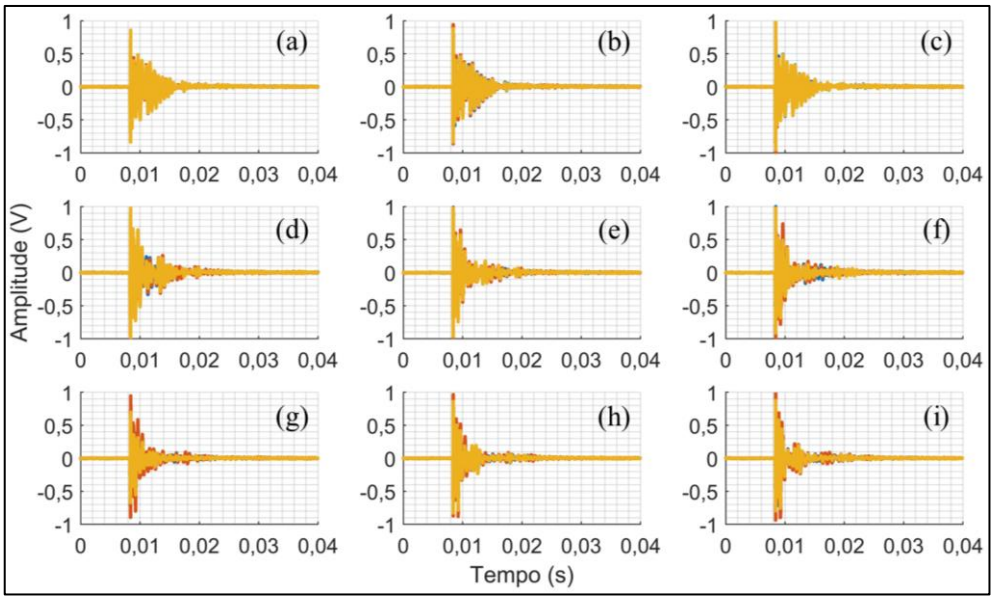
Mínimo	Máximo

0,15 mm		0,3 mm	
Posição (para impressoras com múltiplos extrusores)			
Defasagem de extrusor em X		Defasagem de extrusor em Y	
0 mm		0 mm	
Retração			
Comprimento	Elevação em Z	Apenas subir Z acima e abaixo	Velocidade
1,5 mm	0 mm	Não utilizado	40 mm/s
Comprimento extra no reinício	Mínimo de movimentação após re-tração	Retração em mudança de camada	Cortar enquanto retração
0 mm	2 mm	Não	Não
Retração apenas quando a ferramenta é desabilitada (opções avançadas para procedimentos multi-extrusores)			
Comprimento		Comprimento extra no reinício	
Não utilizado		Não utilizado	

Fonte: Autor

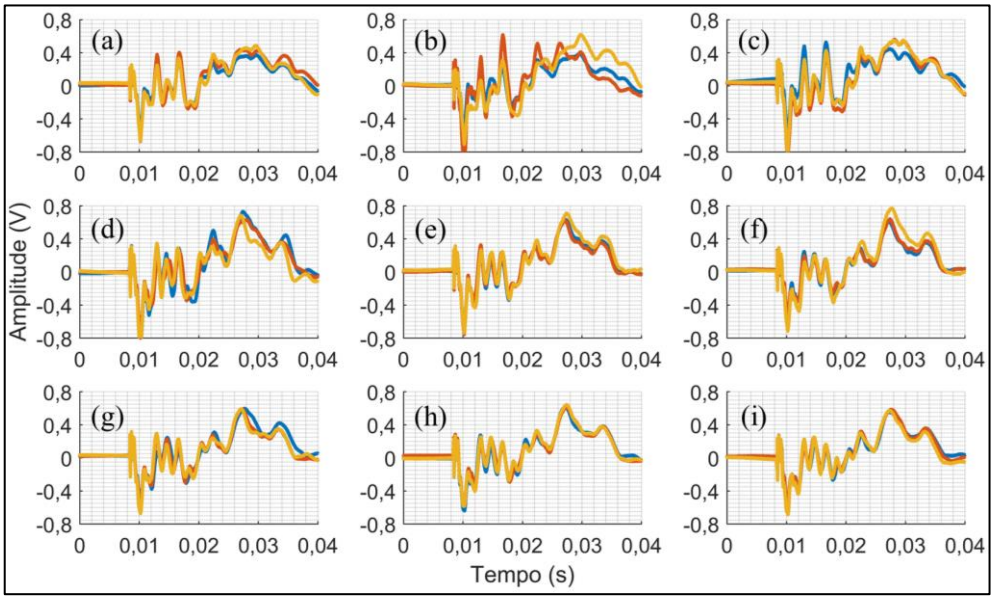
APÊNDICE III

Figura 6.1 - Aproximação nos sinais obtidos pelo sensor EA para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC



Fonte: Autor

Figura 6.2 - Aproximação nos sinais obtidos pelo PZT para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC



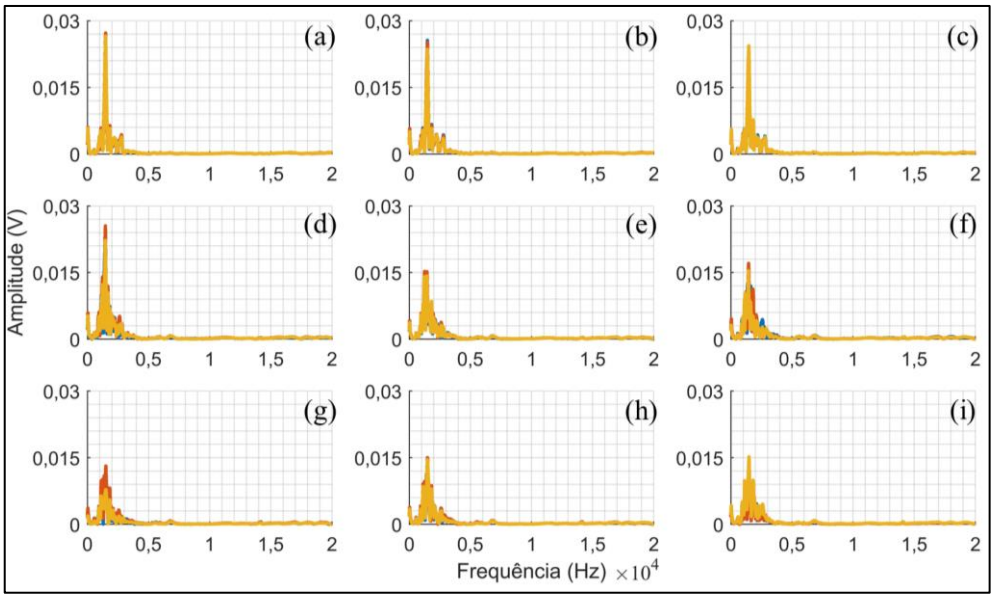
Fonte: Autor

Estão representadas na Figura 6.1 as aproximações nos sinais obtidos pelo sensor EA para o teste de PLB em mesa aquecida a diferentes temperaturas. Os sinais de cor azul se referem as repetições de número um, os sinais de cor vermelho se referem as repetições de número dois, e os sinais de cor amarelo se referem as repetições de número três.

Na Figura 6.2 estão representas as aproximações nos sinais obtidos pelo PZT para os PLB-A a diferentes temperaturas. Os sinais de cor azul se referem as repetições de número um, os sinais de cor vermelho se referem as repetições de número dois, e os sinais de cor amarelo se referem as repetições de número três.

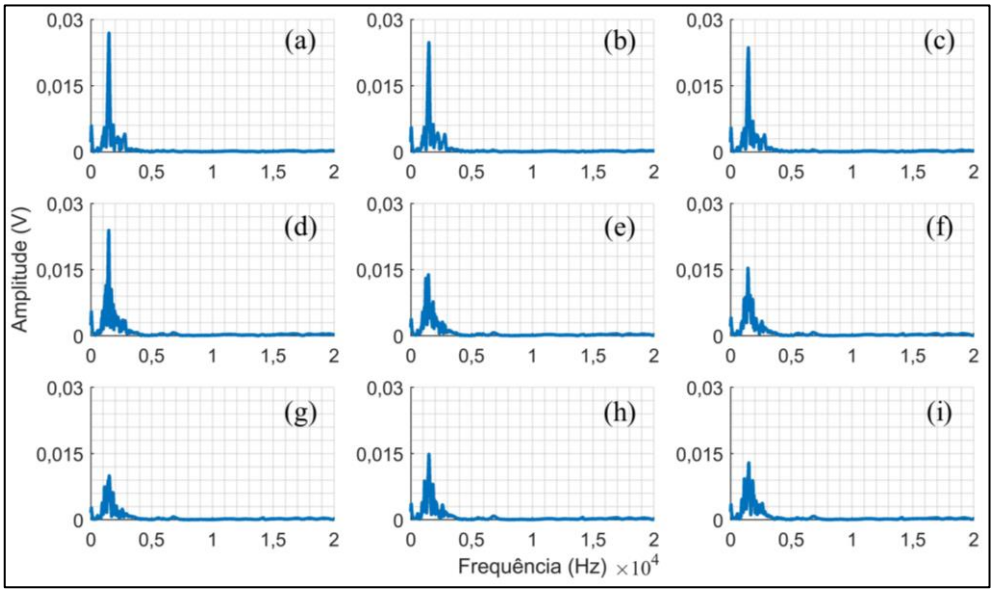
APÊNDICE IV

Figura 6.3 - Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC



Fonte: Autor

Figura 6.4 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com sensor EA. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC



Fonte: Autor

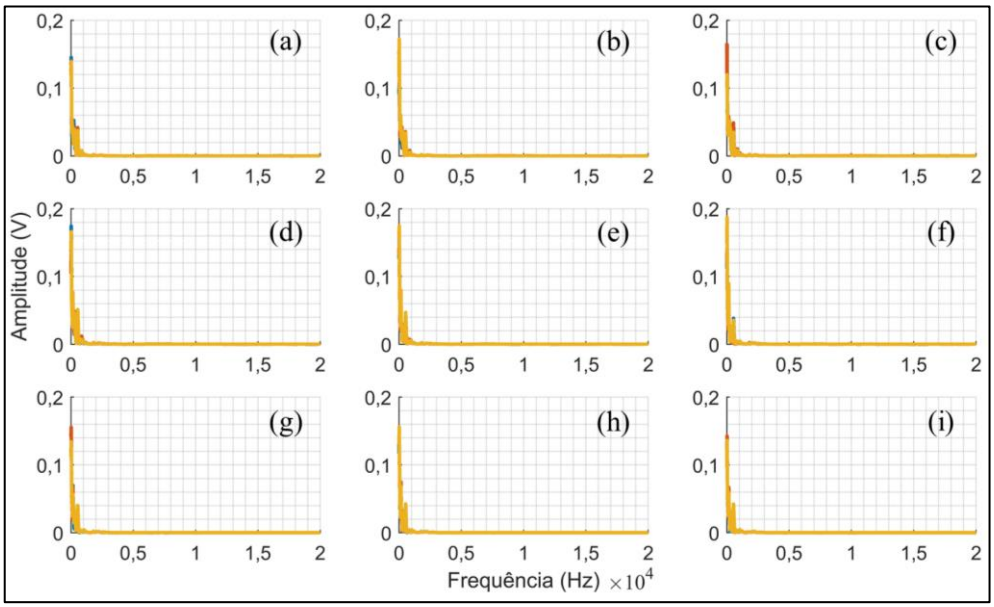
Anteriormente estão representadas na Figura 6.3 os espectros de frequência dos sinais obtidos pelo sensor EA para os PLB-A a diferentes temperaturas, representados na banda que compreende as frequências de 0 Hz a 20 kHz. Os sinais de cor azul se referem as repetições de

número um, os sinais de cor vermelho se referem as repetições de número dois, e os sinais de cor amarelo se referem as repetições de número três.

Anteriormente estão representadas na Figura 6.4 os espectros de frequência médios, calculados a partir dos espectros dos sinais obtidos pelo sensor EA para os PLB-A a diferentes temperaturas, representados na banda que compreende as frequências de 0 Hz a 20 kHz.

A seguir estão representadas na Figura 6.5 os espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT para os PLB-A a diferentes temperaturas, representados na banda que compreende as frequências de 0 Hz a 20 kHz. Os sinais de cor azul se referem as repetições de número um, os sinais de cor vermelho se referem as repetições de número dois, e os sinais de cor amarelo se referem as repetições de número três.

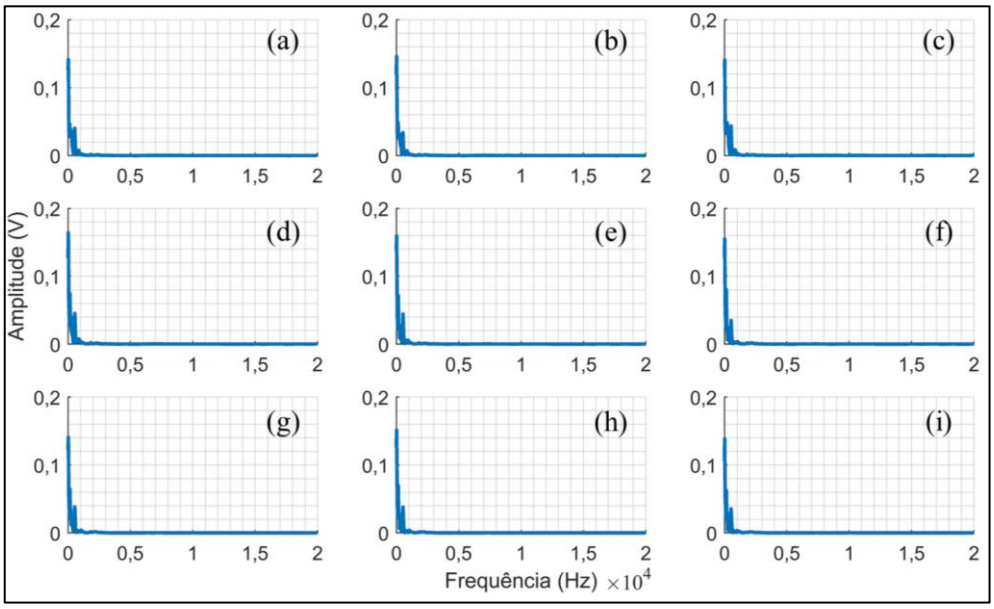
Figura 6.5 - Espectros de frequência dos sinais obtidos pelo PZT para o teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC



Fonte: Autor

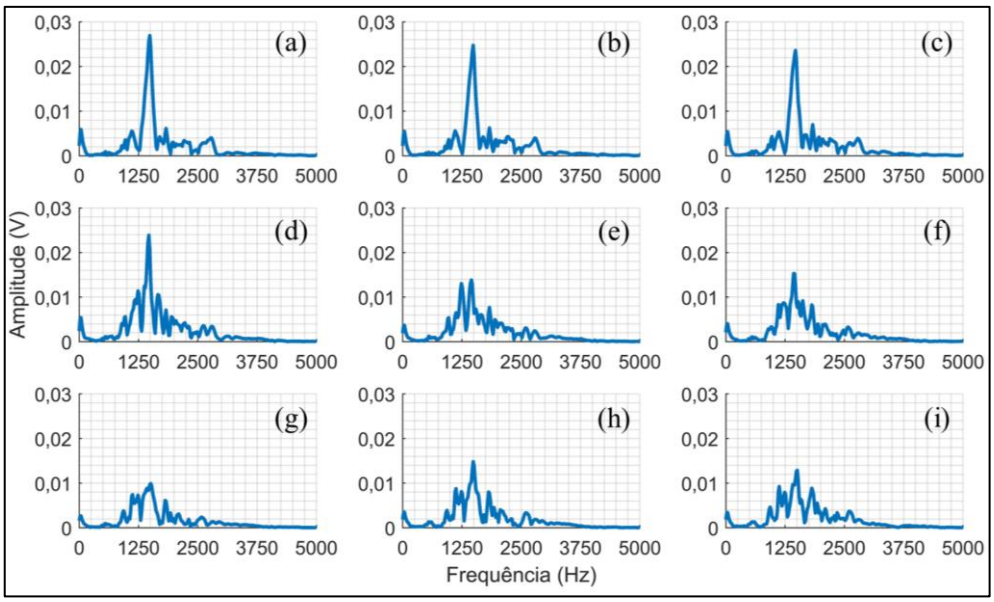
A seguir estão representadas na Figura 6.6 os espectros de frequência médios, calculados a partir dos espectros dos sinais obtidos pelo PZT para os PLB-A a diferentes temperaturas, representados na banda que compreende as frequências de 0 Hz a 20 kHz.

Figura 6.6 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com PZT. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC



Fonte: Autor

Figura 6.7 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com sensor EA representado na banda de 0 Hz a 5 kHz. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC

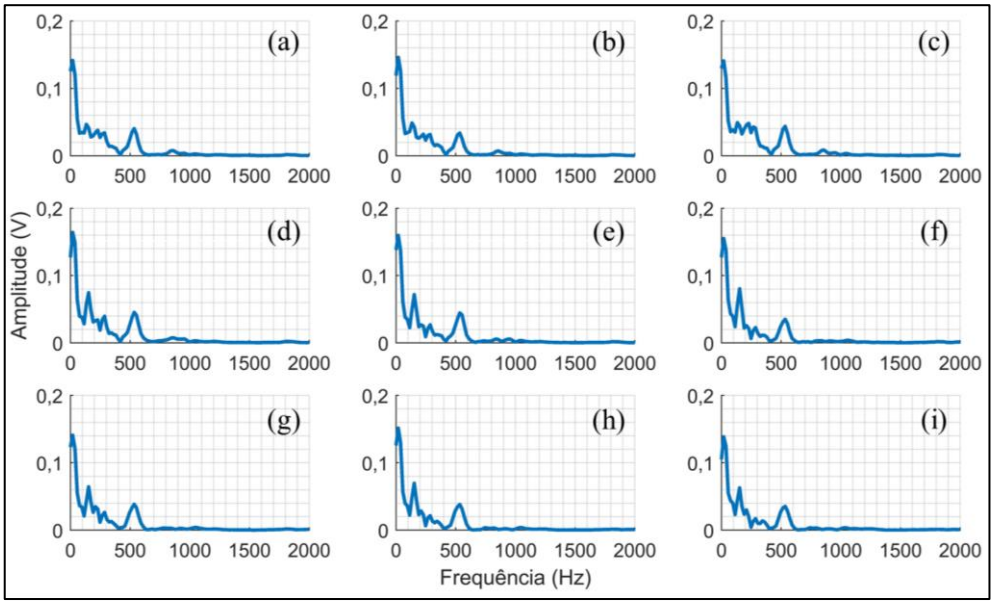


Fonte: Autor

Anteriormente estão representadas na Figura 6.7 os espectros de frequência médios, calculados a partir dos espectros dos sinais obtidos pelo sensor EA para os PLB-A a diferentes temperaturas, representados na banda de análise encontrada no item 4.1.4.1 que compreende as frequências de 0 Hz a 5 kHz.

A seguir estão representadas na Figura 6.8 os espectros de frequência médios, calculados a partir dos espectros dos sinais obtidos pelo PZT para os PLB-A a diferentes temperaturas, representados na banda de análise encontrada no item 4.1.4.2 que compreende as frequências de 0 Hz a 1,5 kHz.

Figura 6.8 - Espectro de frequência médio do teste de mesa aquecida a diferentes temperaturas com PZT representado na banda de 0 Hz a 4 kHz. (a) 25 ºC, (b) 30 ºC, (c) 35 ºC, (d) 40 ºC, (e) 45 ºC, (f) 50 ºC, (g) 55 ºC, (h) 60 ºC, (i) 65 ºC

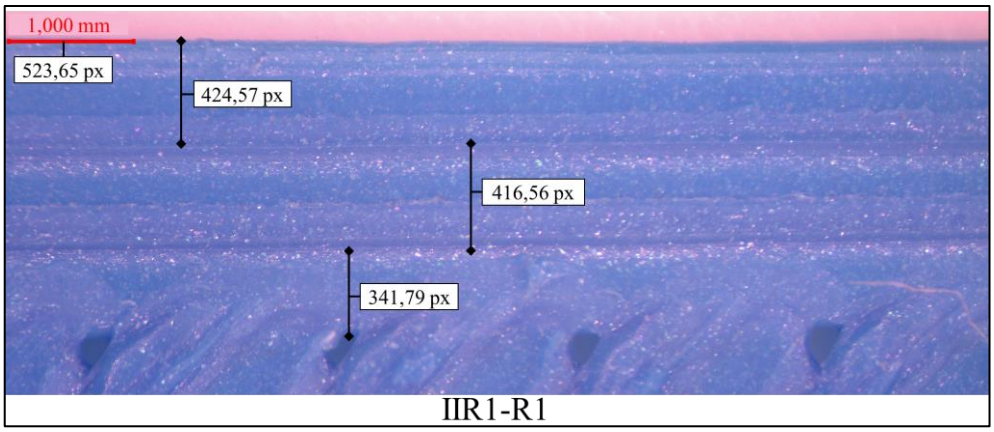


Fonte: Autor

APÊNDICE V

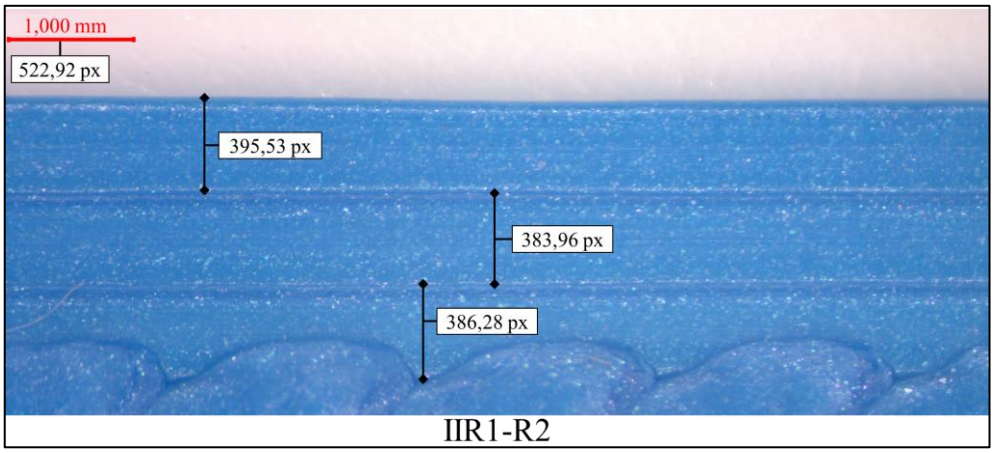
A seguir estão representados em totalidade os resultados das medidas realizadas nas imagens obtidas por microscopia óptica no segmento 1 (S1) das peças fabricas nos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ).

Figura 6.9 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR1-R1



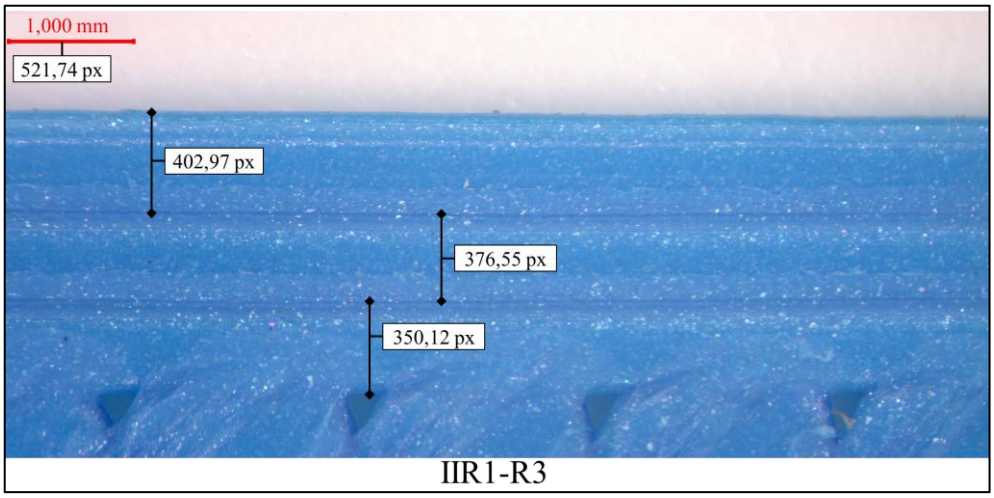
Fonte: Autor

Figura 6.10 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR1-R2



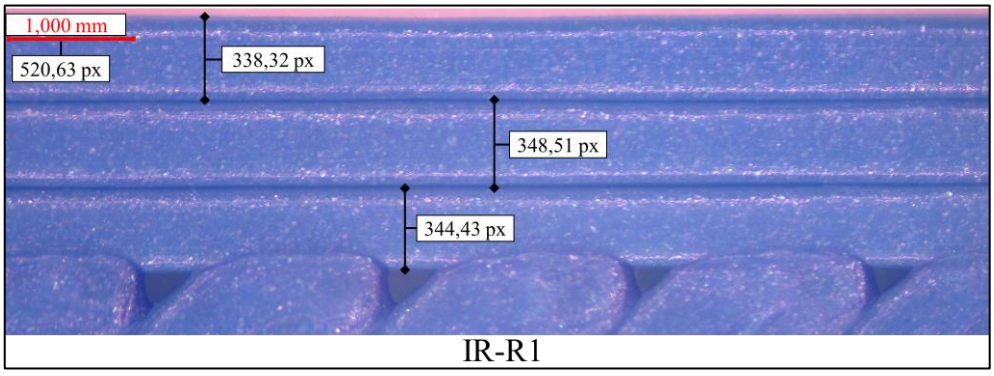
Fonte: Autor

Figura 6.11 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR1-R3



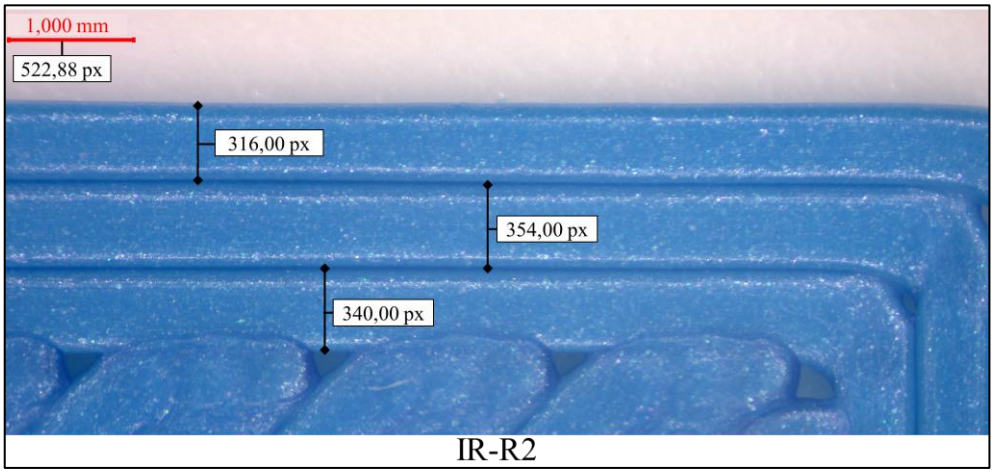
Fonte: Autor

Figura 6.12 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IR-R1



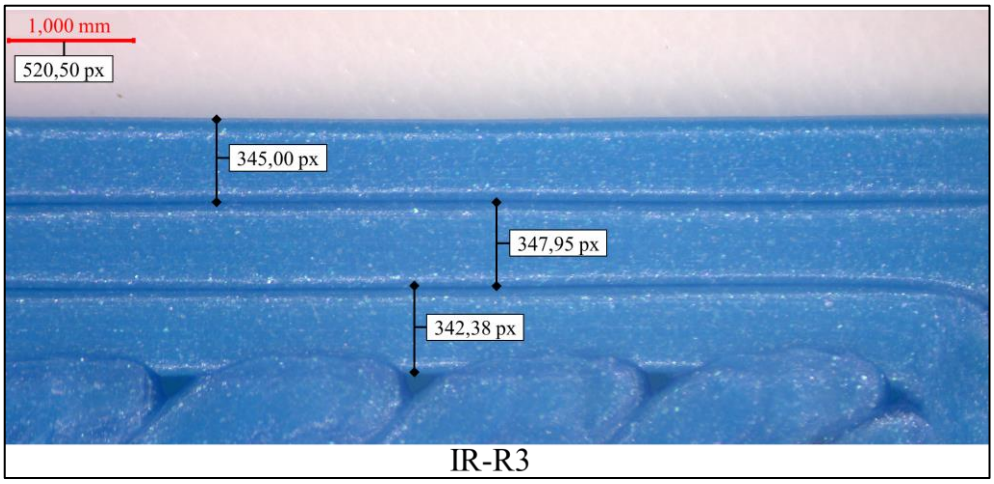
Fonte: Autor

Figura 6.13 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IR-R2



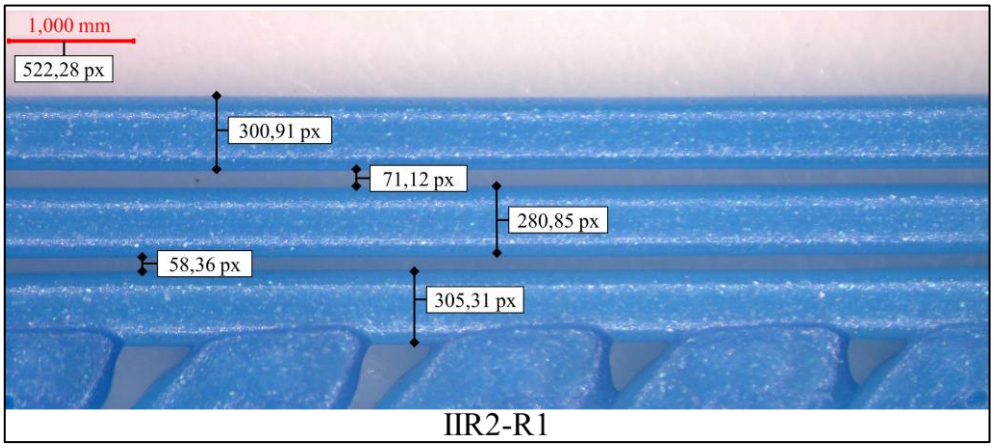
Fonte: Autor

Figura 6.14 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IR-R3



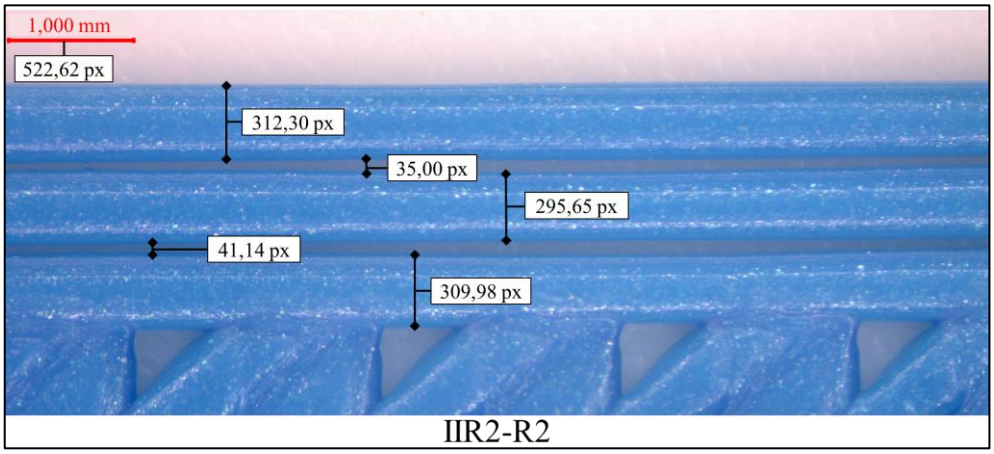
Fonte: Autor

Figura 6.15 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR2-R1



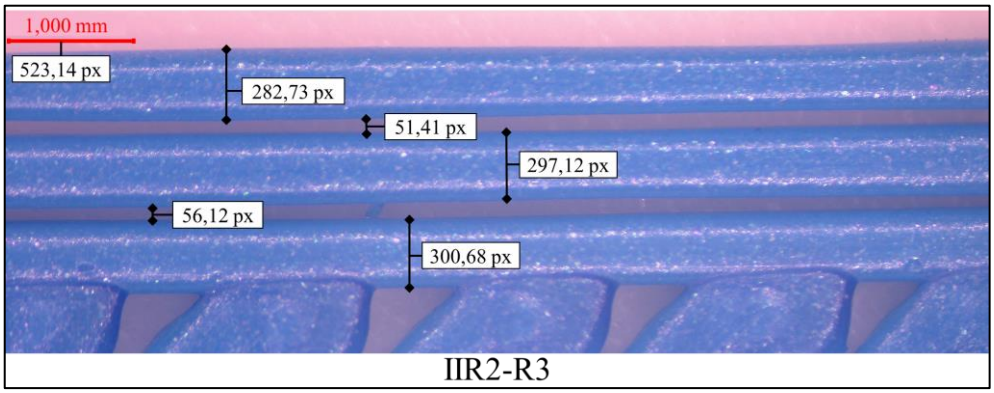
Fonte: Autor

Figura 6.16 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR2-R2



Fonte: Autor

Figura 6.17 – Larguras de contorno das linhas do S1 da IIR2-R3

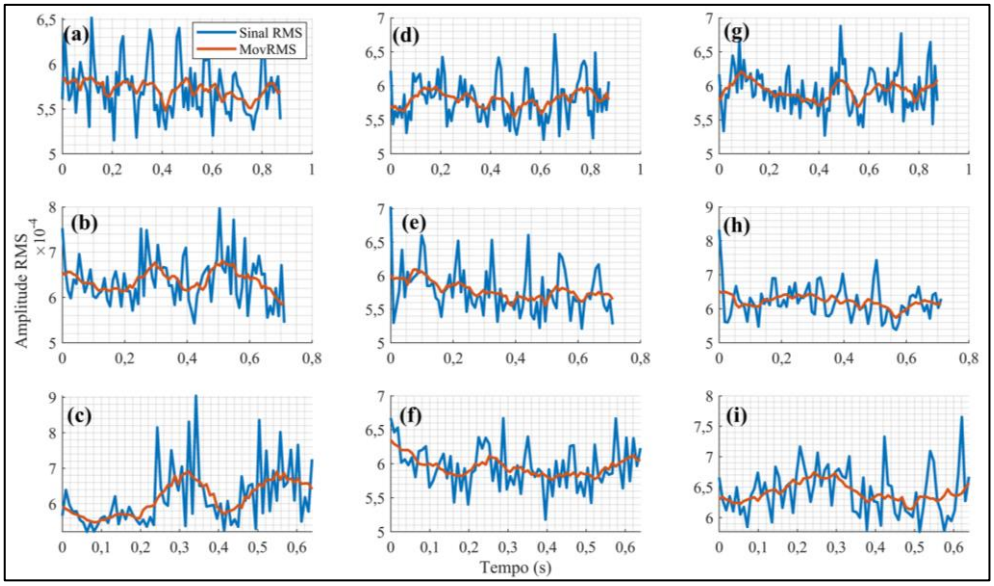


Fonte: Autor

APÊNDICE VI

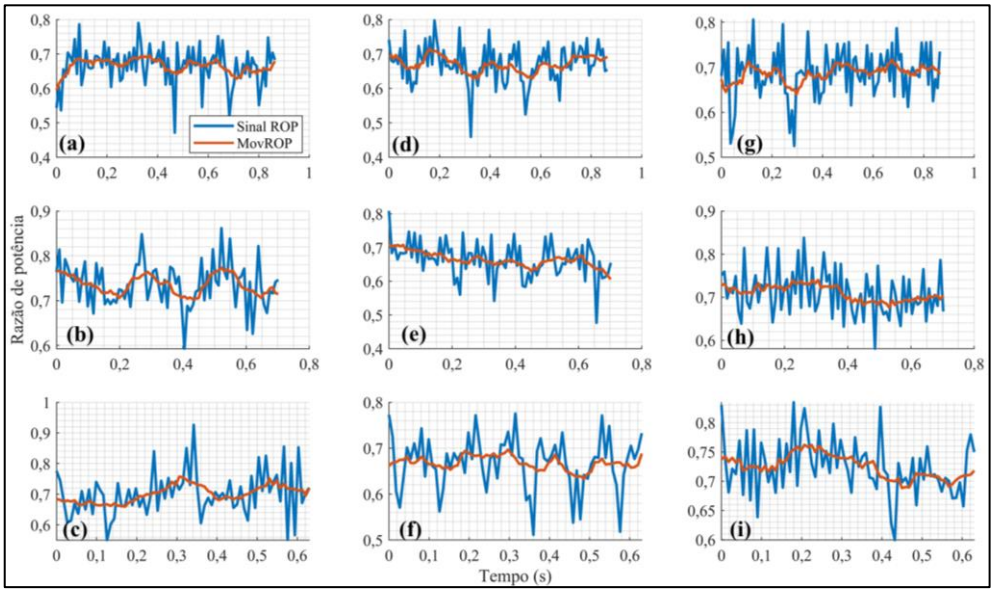
A seguir estão representados os sinais RMS, ROP, MovRMS e MovROP calculados conforme algoritmo representado na Figura 3.21, para as fabricações de contorno do segmento 1 (S1) nas diferentes condições de impressão dos testes com variação da característica de impressão defasagem no eixo Z (V-DZ).

Figura 6.18 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



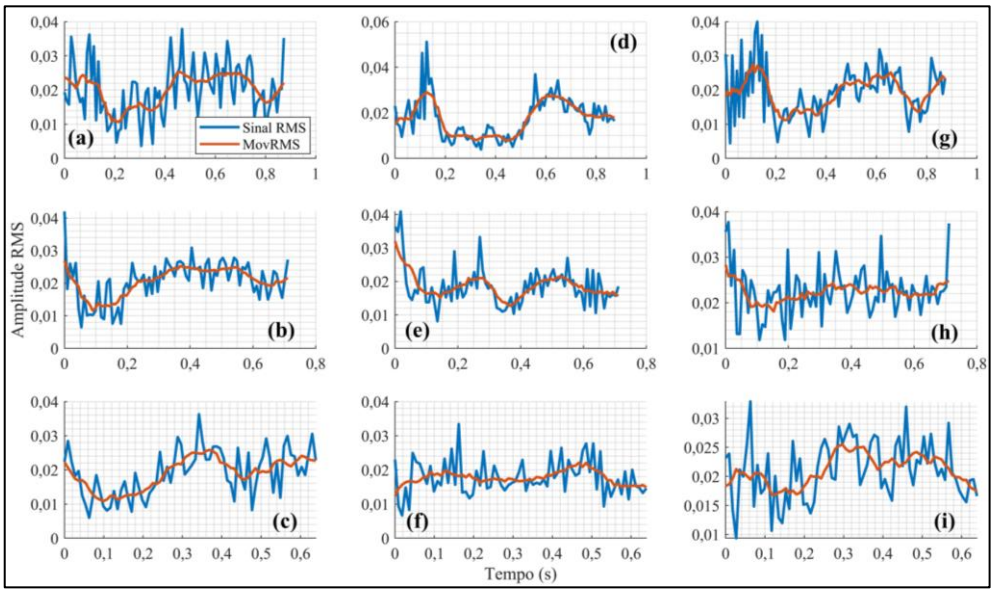
Fonte: Autor

Figura 6.19 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



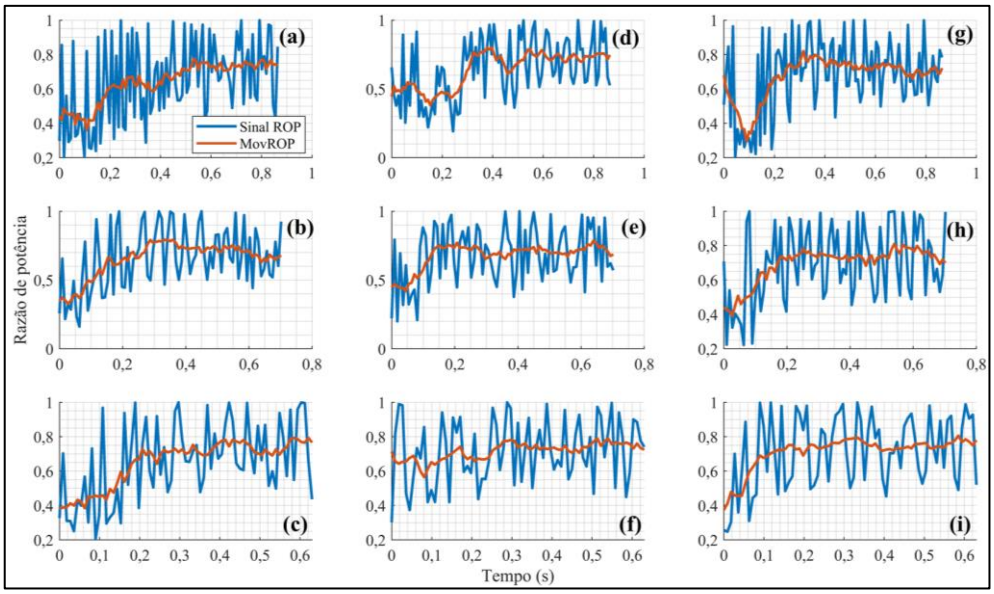
Fonte: Autor

Figura 6.20 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



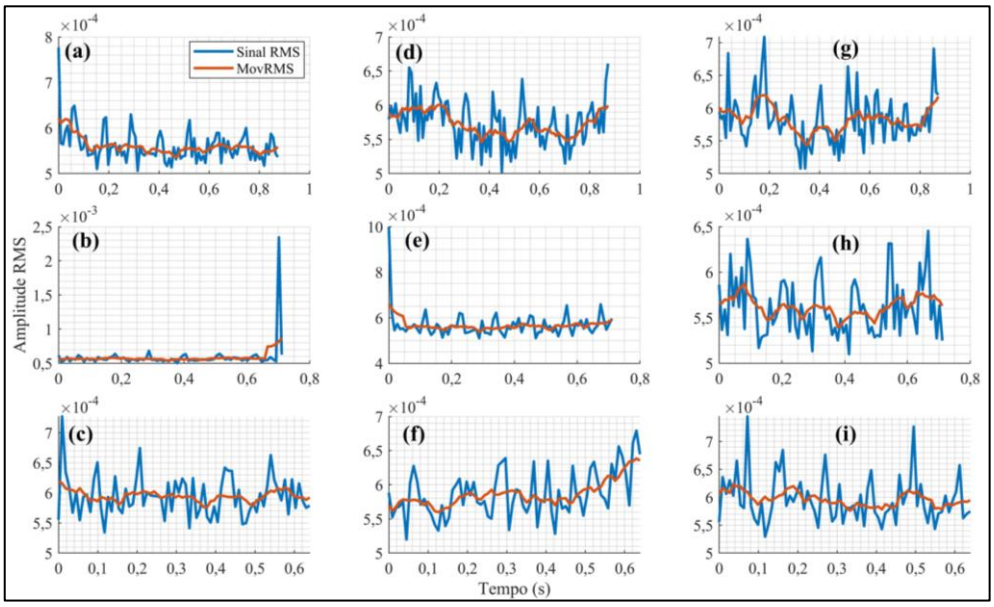
Fonte: Autor

Figura 6.21 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR1. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



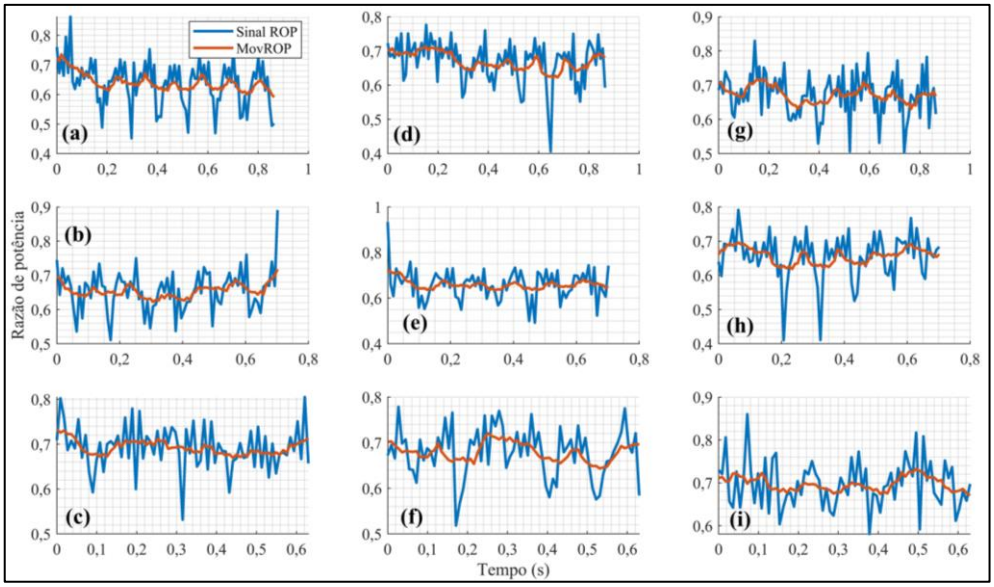
Fonte: Autor

Figura 6.22 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



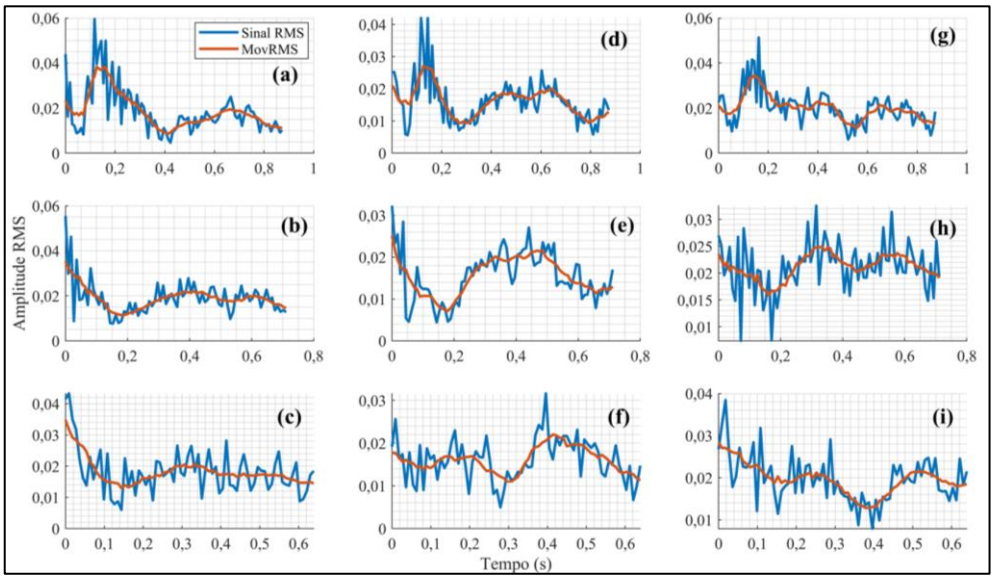
Fonte: Autor

Figura 6.23 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



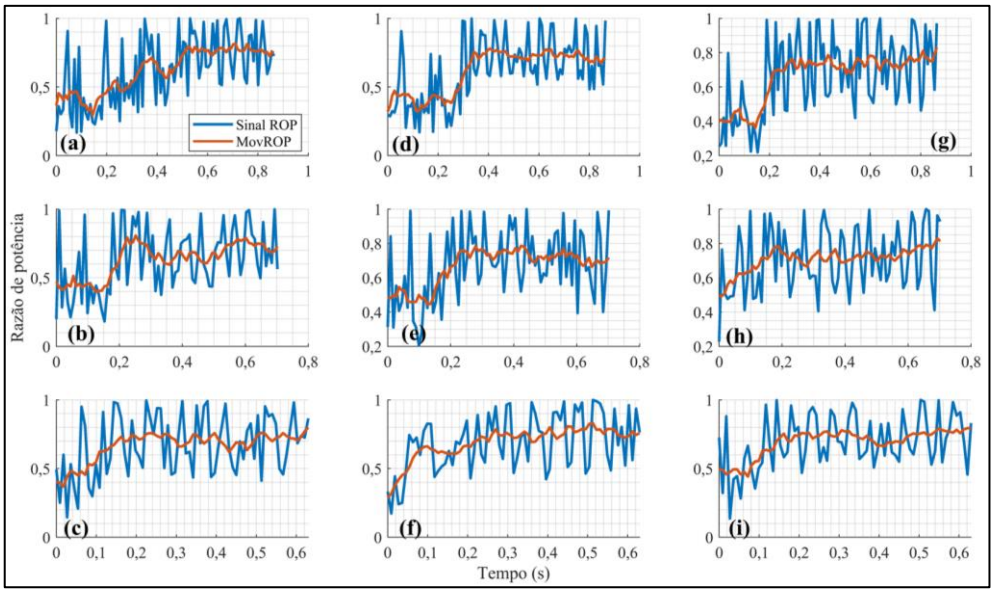
Fonte: Autor

Figura 6.24 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



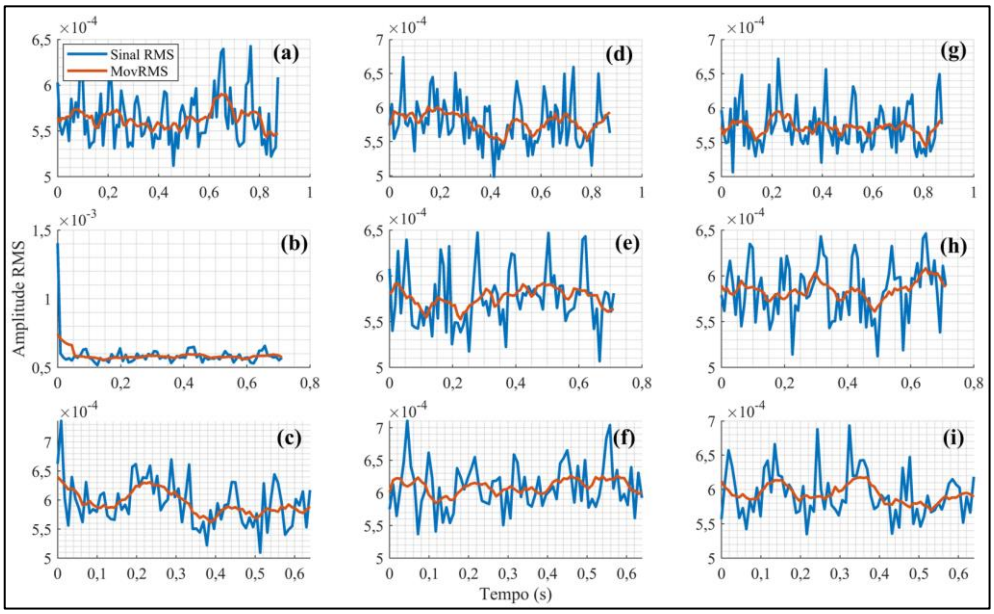
Fonte: Autor

Figura 6.25 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IR. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



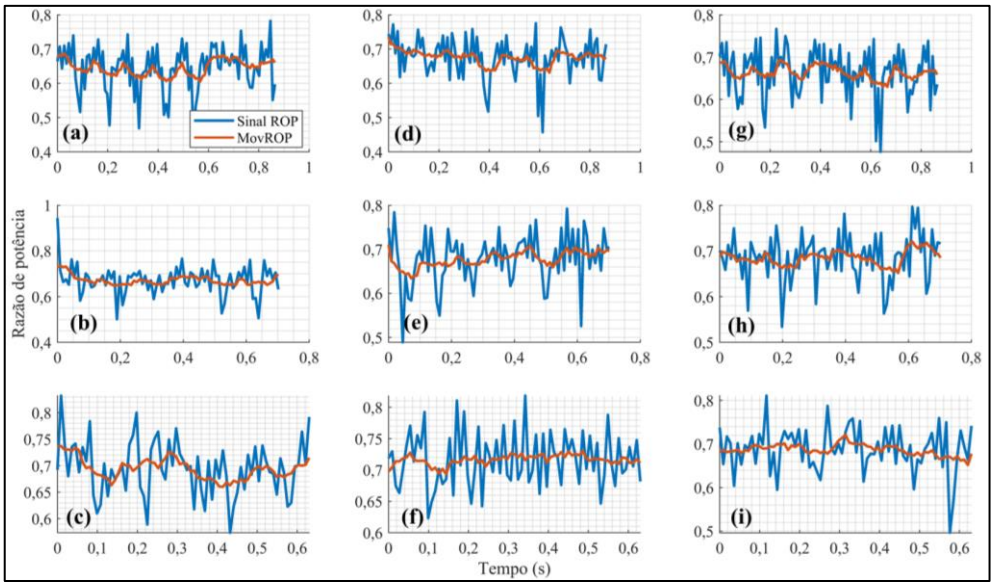
Fonte: Autor

Figura 6.26 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



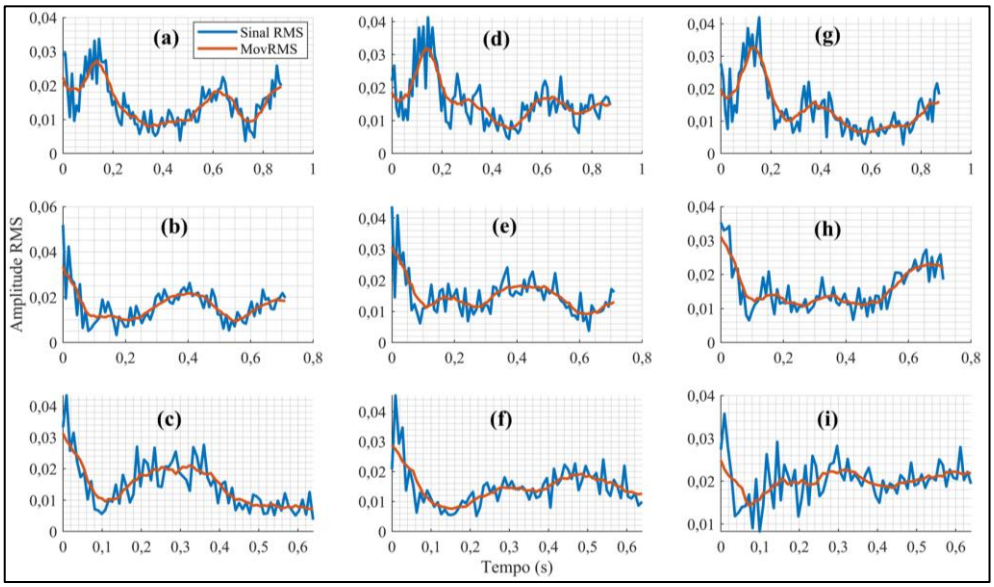
Fonte: Autor

Figura 6.27 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo sensor EA para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



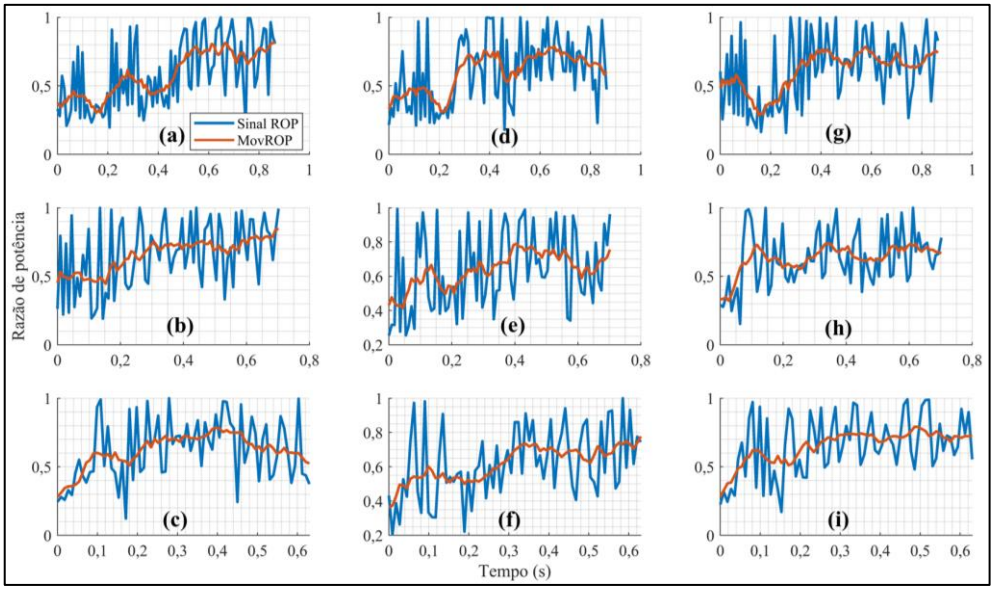
Fonte: Autor

Figura 6.28 – Sinais RMS obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



Fonte: Autor

Figura 6.29 – Sinais ROP obtidos a partir dos sinais coletados pelo PZT para as fabricações do S1 em IIR2. (a) L1 – R1, (b) L2 – R1, (c) L3 – R1, (d) L1 – R2, (e) L2 – R2, (f) L3 – R2, (g) L1 – R3, (h) L2 – R3, (i) L3 – R3



Fonte: Autor