

JEAN CARLOS DE OLIVEIRA

**MONITORAMENTO DO PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO À ARCO,
UTILIZANDO ALGORITMO DE APRENDIZAGEM E
FUSÃO DE SENsoRES**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2025

JEAN CARLOS DE OLIVEIRA

**MONITORAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA
POR DEPOSIÇÃO À ARCO, UTILIZANDO ALGORITMO DE
APRENDIZAGEM E FUSÃO DE SENsoRES**

Tese apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

**UBERLÂNDIA – MG
2025**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 Oliveira, Jean Carlos de, 1985-
2025 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA
POR DEPOSIÇÃO À ARCO, UTILIZANDO ALGORITMO DE
APRENDIZAGEM E FUSÃO DE SENSORES [recurso eletrônico] / Jean
Carlos de Oliveira. - 2025.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.645>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel Oliveira,1975-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-

MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, número 414, PPGEM				
Data:	31 de outubro de 2025	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:56
Matrícula do Discente:	12023EMC006				
Nome do Discente:	Jean Carlos de Oliveira				
Título do Trabalho:	Monitoramento do Processo de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco Utilizando Algoritmo de Aprendizagem e Fusão de Sensores				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Desenvolvimento de Tecnologias de Deposição 4.0 com Inovação, Gestão e Inclusão				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Eduardo de Magalhães Braga - UPPA; Sheila Medeiros de Carvalho - UFES; Roberto Mendes Finzi Neto - FEMEC/UFU; Marcelo Braga dos Santos - FEMEC/UFU e Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Mendes Finzi Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/10/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Braga dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/10/2025, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **SHEILA MEDEIROS DE CARVALHO, Usuário Externo**, em 08/11/2025, às 08:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/11/2025, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Magalhães Braga, Usuário Externo**, em 11/11/2025, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6718697** e o código CRC **2A0EE7E0**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida;

À Universidade Federal de Uberlândia;

À Faculdade de Engenharia Mecânica;

Ao Instituto Federal de Triângulo Mineiro pela liberação em afastamento total;

Ao meu orientador, Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, paciência e amizade;

Ao Programa de Pós-Graduação da FEMEC;

Ao Laprosolda/UFU – Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva – pela concessão dos recursos técnicos e materiais;

Aos amigos e colegas de laboratório pelo incentivo, troca de conhecimentos e colaboração indispensável para conclusão deste trabalho;

Aos meus pais pelo apoio e carinho;

À minha esposa, Thamires, grande companheira e incentivadora em todos os momentos;

Aos meus filhos, Samuel e Davi, por alegrarem meus dias;

Aos membros da banca, por se disporem a avaliar este trabalho;

Aos demais amigos pelos momentos de descontração.

OLIVEIRA, J. C. **Monitoramento do Processo de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco, utilizando Algoritmo de Aprendizagem e Fusão de Sensores**. 2025. 165p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento do processo de manufatura aditiva por deposição à arco (MADA), para auxiliar a etapa de inspeção de peças fabricadas, através da previsão e indicação de regiões potencialmente defeituosa. A solução integra sistema de aquisição e instrumentação, algoritmo de aprendizagem, fusão de sensores, clusterização de anomalias e validação cruzada com imagem radiográfica. O planejamento experimental contemplou a deposição de paredes, em aço carbono e aço inoxidável, com diferentes estratégias de deposição, indução controlada de instabilidades e a aquisição das séries temporais das variáveis de processo: tensão e corrente de soldagem, vazão do gás de proteção, velocidade de alimentação, velocidade de deposição, intensidade luminosa do arco e sons de deposição. A detecção de anomalias foi concebida através de pipelines interativos de análise, algoritmo de aprendizagem baseado em Autoenconder LSTM e utilização de dois indicadores de eventos anômalos: Limiar de Amplitude (eventos de grande intensidade no erro de reconstrução) e Limiar de Volatilidade (eventos de flutuações persistentes). Posteriormente aplicou-se a estratégia de fusão de sensores e clusterização (KMeans) de características híbridas (estatísticas e wavelet) com aplicação da redução de dimensionalidade (PCA) para obtenção de grupos com assinaturas/perfis compatíveis a regiões com probabilidade aumentada de ocorrência de defeitos. A validação do sistema foi realizada através da sobreposição das previsões sobre a imagem radiográfica das peças fabricadas, permitindo assim a comparação das regiões indicadas pelo sistema de previsão e as áreas defeituosas efetivamente evidenciadas.

Palavras-chave: MADA; Monitoramento de processo; Autoenconder LSTM; Detecção de anomalias; Fusão de sensores

OLIVEIRA, J. C. **Process Monitoring of Wire Arc Additive Manufacturing, using a Learning Algorithm and Sensor Fusion**. 2025. 165p. Doctoral thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

This work presents the development of a process-monitoring system for Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) to support the inspection stage of fabricated parts by predicting and indicating potentially defective regions. The solution integrates a data acquisition and instrumentation system, a machine-learning algorithm, sensor fusion, anomaly clustering, and cross-validation with radiographic imaging. The experimental plan comprised the deposition of walls in carbon steel and stainless steel, using different deposition strategies, controlled induction of instabilities, and the acquisition of time series for the process variables: welding voltage and current, shielding-gas flow rate, wire feed speed, travel (deposition) speed, arc luminous intensity, and deposition acoustic signals. Anomaly detection was designed through interactive analysis pipelines, a learning algorithm based on an LSTM Autoencoder, and two indicators of anomalous events: an Amplitude Threshold (large-magnitude events in the reconstruction error) and a Volatility Threshold (persistent fluctuation events). Subsequently, a sensor-fusion strategy and clustering (K-Means) of hybrid features (statistical and wavelet-based) were applied, together with dimensionality reduction (PCA), to obtain groups with signatures/profiles consistent with regions exhibiting an increased probability of defect occurrence. System validation was performed by overlaying the predictions onto the radiographic images of the fabricated parts, thereby enabling comparison between the regions indicated by the prediction system and the defective areas actually observed.

Keywords: WAAM; Process monitoring; LSTM autoencoder; Anomaly detection; Sensor fusion

LISTA DE FIGURA

Figura 2.01 - (a) Esquema de um sistema WAAM (b) Fotografia de uma peça (c) Esquema de deposição de cordões em camadas (Xia et al., 2020)	5
Figura 2.02 - (a) Trabalhos publicados sobre processos MADA, (b) Trabalhos publicados sobre monitoramento e controle dos processos MADA, (c) Fatiado dos trabalhos sobre monitoramento e controle.	7
Figura 2.03 - Fluxo de Trabalho baseado na Qualidade para processos WAAM (Wu et al., 2018)	8
Figura 2.04 - Sistema de Monitoramento e Controle de MADA (Xia et al., 2020)	9
Figura 2.05 - Parâmetros monitorados em WAAM. (Xu et al., 2018).....	10
Figura 3.01 – Fluxograma de Execução do Projeto.	14
Figura 3.02 - Fluxograma do Sistema de Aquisição.	18
Figura 3.03 – Montagem Final do Sistema de Aquisição	19
Figura 3.04 – Sistema de Aquisição.....	19
Figura 3.05 - Interface do Sistema de Monitoramento.....	20
Figura 3.06 - Mesa cartesiana do processo MADA: (a) Vista frontal e (b) Vista Lateral.	22
Figura 3.07 – Fonte de soldagem da Fronius®, modelo TransPuls Synergic 5000 (TPS 5000).	23
Figura 3.08 – Tanque para utilização do RAQI.	24
Figura 3.09 – Arame Weld West Arco S6.....	25
Figura 3.10 – Arame Weld-Inox WI M 316 L SI	25
Figura 3.11 – Trajetos da tocha de soldagem: (a) Passe único, (b) Tecimento e (c) Cordões paralelos.	26
Figura 3.12 – Pré-forma padrão para a peças a serem fabricadas estratégias passe único e tecimento.	27
Figura 3.13 – Padrão de nomenclatura das peças principais.	28
Figura 3.14 – Célula de Manufatura Instrumentada	34
Figura 3.15 – Cabos Blindados	35
Figura 3.16 – Vista superior da Célula de Manufatura	35
Figura 3.17 – Vista frontal da Célula de Manufatura	36
Figura 3.18 – Estação de Supervisão	36
Figura 3.19 – Fluxograma do Algoritmo de Aprendizagem.	38
Figura 3.20 – Autoencoder LSTM.	40
Figura 3.21 – Topologia do Notebook de Análise/Inferência.	43
Figura 3.22 – Topologia do Notebook de Validação com Raio-X.	45

Figura 4.01 – Teste preliminar em Aço Carbono de trajetória e parametrização.....	48
Figura 4.02 – Teste preliminar em Aço Inox para avaliação de trajetória e parametrização.	50
Figura 4.03 – Indução de porosidade.....	50
Figura 4.04 – Falta de preenchimento induzida.	51
Figura 4.05 – Escorramento e porosidade induzidos.....	51
Figura 4.06 – Paredes depositadas para teste de integração	52
Figura 4.07 – Representação das paredes do teste de integração.	52
Figura 4.08 – Cortes nas paredes testes.	53
Figura 4.09 – Fixação do Substrato	53
Figura 4.10 – Peça de teste: Camada com porosidade.....	54
Figura 4.11 – Peça de teste: Camada sem defeitos aparentes	54
Figura 4.12 – Parede de teste finalizada.....	54
Figura 4.13 – Vistas da parede de teste.....	55
Figura 4.14 – Vista em perspectiva da parede de teste	55
Figura 4.15 – Representação digital da peça de teste	56
Figura 4.16 – Amostra da série temporal das variáveis de processo	57
Figura 4.17 – Peça de teste usinada para inspeção interna.....	57
Figura 4.18 – Chapa um com 33 paredes depositadas em aço carbono.....	59
Figura 4.19 – Representação da aquisição dos dados da chapa um – vista superior	59
Figura 4.20 - Representação da aquisição dos dados da chapa um – vista em perspectiva.	60
Figura 4.21 - Chapa dois com 33 paredes depositadas em aço inoxidável.	61
Figura 4.22 - Representação da aquisição dos dados da chapa dois – vista superior.....	61
Figura 4.23 - Representação da aquisição dos dados da chapa dois – vista em perspectiva.	62
Figura 4.24 – Registro Fotográfico da camada 10 da peça CF-04	64
Figura 4.25 – Peça CF-04: (a) término da deposição; (b) pronta para ensaio não destrutivo	65
Figura 4.26 – Sinais temporais das variáveis de processo durante a fabricação da CF-04 ..	66
Figura 4.27 – Representação digital da peça CF-04	66
Figura 4.28 – CF-04: Peça e Raio-X	69
Figura 4.29 – CM-01: Peça e Raio-X	69
Figura 4.30 – CG-04: Peça e Raio-X	69
Figura 4.31 – IF-02: Peça e Raio-X.....	69
Figura 4.32 – IM-02: Peça e Raio-X.....	70
Figura 4.33 – IG-03: Peça e Raio-X.....	70
Figura 4.34 – Painel de Sintonia de Limiares.....	71
Figura 4.35 – Pipeline de Análise com Features Pré-Calculadas.....	72

Figura 4.36 – Dashboard de Análise Unificado.	74
Figura 4.37 – Dados das camadas consideradas “normais”.....	77
Figura 4.38 – Dados da camada de referência (63).....	78
Figura 4.39 – Histórico do treinamento	79
Figura 4.40 – Distribuição do Erro de Reconstrução	80
Figura 4.41 – Erro de Reconstrução dos dados de treinamento	80
Figura 4.42 – Painel de análise de anomalias da camada 63 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição	82
Figura 4.43 – Painel de análise de anomalias da camada 49 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.	83
Figura 4.44 – Painel de análise de anomalias da camada 54 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.	85
Figura 4.45 – Painel de análise de anomalias da camada 45 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.	87
Figura 4.46 – Painel de análise de anomalias da camada 45 – Peça IF-02: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição	88
Figura 4.47 – Painel de análise de anomalias da camada 54 – Peça IF-02: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.	89
Figura 4.48 – Clusterização Primária das Anomalias de Amplitude da peça IF-02.....	91
Figura 4.49 – Clusterização Secundária das Anomalias de Amplitude da peça IF-02.....	93
Figura 4.50 – Visualização 3D de Anomalia: previsão de Escorramento da peça IF-02.....	94
Figura 4.51 – Sobreposição da previsão de Escorramento da peça IF-02 com o Raio-X	95
Figura 4.52 – Sobreposição da previsão de Desvio Geométrico da peça IF-02 com o Raio-X	96
Figura 4.53 – Clusterização Primária das Anomalias de Volatilidade da peça IF-02	97
Figura 4.54 – Clusterização Secundária das Anomalias de Volatilidade da peça IF-02	98
Figura 4.55 – Visualização 3D de Anomalia: previsão de Porosidade da peça IF-02	99
Figura 4.56 – Sobreposição da previsão de Porosidade da peça IF-02 com o Raio-X	100
Figura 4.57 – Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça IM-02.....	101
Figura 4.58 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça CM-01	102

Figura 4.59 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça IG-03.....	103
Figura 4.60 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça CG-04	104
Figura 4.61 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça CF-04.....	105
Figura 4.62 – Validação do modelo de previsão de porosidade da peça CF-04 ($r = 3$ mm).	107
Figura 4.63 – Validação do modelo de previsão de porosidade da peça CF-04 ($r = 5$ mm).	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.01 – Ligas Metálicas e Arames-Eletrodos	24
Tabela 3.02 – Padronização de nomenclatura, primeira letra.	28
Tabela 3.03 – Padronização de nomenclatura, segunda letra.....	29
Tabela 3.04 – Parametrização.	29
Tabela 3.05 – Checklist de Preparação.	30
Tabela 3.06 – Tabela de Controle Experimental.	33
Tabela 3.07 – Mapa de Ocorrências.	33
Tabela 3.08 – Tabela de Ocorrências	33
Tabela 4.01 – Teste preliminar de trajetória e parametrização.....	49
Tabela 4.02 – Tabela de Parametrização da peça CF-04	63
Tabela 4.03 – Tabela de Controle de Deposição da peça CF-04	64
Tabela 4.04 – Mapa de defeitos da peça CF-04	65
Tabela 4.05 – Volume de Informação	68
Tabela 4.06 – Camadas com condições operacionais normais.....	76
Tabela 4.07 – Arquitetura do Modelo Autoencoder LSTM.....	79
Tabela 4.08 – Registro das camadas do Cluster 1/Subcluster 0 da Anomalias de Amplitude	94
Tabela 4.09 – Registro das camadas do Cluster 1/Subcluster 2 da Anomalias de Amplitude	94
Tabela 4.10 – Registro das camadas do Cluster 0/Subcluster 0 da Anomalias de Volatilidade	98
Tabela 4.11 – Registro das camadas do Cluster 0/Subcluster 1 da Anomalias de Volatilidade	99
Tabela 4.12 – Desempenho do Sistema de Previsão de Anomalia.....	108

LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AE-LSTM	Autoencoder baseado em LSTM
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CF	Peça de aço carbono com passe único
CG	Peça de aço carbono com tecimento
CM	Peça de aço carbono com cordões paralelos
CNN	Rede Neural Convolucional
CO ₂	Dióxido de carbono
DBCP	Distância bico de contato peça
Df	<i>DataFrame</i>
END	Ensaios Não Destrutivos
GB	Gigabyte
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GND	<i>Ground</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
Hm	Altura média do cordão — Métrica geométrica do cordão depositado.
IF	Peça de aço inox com passe único
IG	Peça de aço inox com tecimento
IM	Peça de aço inox com cordões paralelos
Iqr	<i>Interquartile Range</i>
Laprosolda	Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (UFU)
Lm	Largura média do cordão
LSTM	<i>Long Short-Term Memory</i>
MA	Manufatura Aditiva
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NI	<i>National Instruments</i>
NaN	<i>Not a Number</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PCA	Análise de Componentes Principais

RAQI	Resfriamento Ativo por Quase Imersão
RCU	<i>Remote Control Unit</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RMS	<i>Root Mean Square</i>
Tdms	<i>Technical Data Management Streaming</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
Valim	Velocidade de alimentação de arame
Vdep	Velocidade de deposição
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS.....	xiv
SUMÁRIO	xvi
INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo Geral.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Manufatura aditiva por deposição à arco (MADA)	4
2.2 Desafios tecnológicos	6
2.3 Monitoramento do processo.....	8
2.4 Garantia da qualidade das peças produzidas	10
2.5 Redes neurais baseadas em autoencoders LSTM.....	11
2.6 Detecção de Anomalias	12
METODOLOGIA.....	14
3.1 Visão Geral da Metodologia	14
3.2 Sistema de Aquisição de Dados	17
3.3 Sistema de Monitoramento	20
3.4 Planejamento Experimental	22
3.5 Montagem, Instalação e Integração dos Sistemas.....	33
3.6 Fabricação das peças e Aquisição de Dados.....	37
3.7 Algoritmo de Aprendizagem.....	37
3.8 Notebook de Análise/Inferência - Identificação de Anomalias e Clusterização.....	42
3.9 Notebook de Validação com Raio-X.....	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 Deposições Preliminares	47
4.2 Deposições de Validação.....	51
4.3 Deposições das Peças Principais	62
4.4 Ferramentas de Análise Interativas.....	70

4.5 Detecção de Anomalias	75
CONCLUSÕES	109
TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
APÊNDICE I – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS PEÇAS PRINCIPAIS	119
APÊNDICE II – ESTUDO DO PROCESSO E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS.....	136
APÊNDICE III – PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO	143
APêNDICE IV – PROJETOS DOS CONDICIONADORES DE SINAIS.....	162

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A Norma ISO/ASTM 52900:2021 define a Manufatura Aditiva (MA) como: “processo de união de materiais para fabricar peças a partir de dados de um modelo 3D, usualmente camada sobre camada, em contraste às metodologias subtrativas e formativas”, e estabelece que a Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA) pertence ao grupo de processos que utiliza a Deposição Direta de Energia (DED), sendo o arco elétrico a fonte de calor usada para fundir arames metálicos, que são depositados sobre um substrato para formar a geometria da peça desejada. Uma característica interessante do MADA/WAAM é a aplicação de técnicas e princípios de soldagem a arco elétrico, combinada com Controle Numérico Computadorizado (CNC) ou robôs industriais para a movimentação do sistema de deposição (XIA et al., 2020; CHATURVEDI et al., 2021).

O princípio básico do MADA é a adição contínua de arames metálicos na formação da poça de fusão, através da energia fornecida pelo arco elétrico, o material fundido se solidifica à medida que a tocha se movimenta, conforme a trajetória previamente programada, para a obtenção da geometria desejada, à medida que sucessivas camadas sejam depositadas (RODRIGUES et al., 2019).

A possibilidade de obtenção de peças complexas utilizando uma quantidade reduzida de material, o que é difícil de ser obtido com os demais processos de fabricação, destaca-se como vantagem uso da MA (DEBROY et al., 2018). Vale ressaltar ainda, o fato de dispensar o uso de matrizes, moldes, ferramentas de alto custo e numerosas etapas de processamento (SILVA, 2020).

Porém, o tempo destinado a fabricação de um único produto em relação aos processos de produção em massa e a baixa disponibilidade de equipamentos com a flexibilidade de trabalhar com diversos materiais, são obstáculos que precisam ser superados para deixar o processo mais viável. Assim, uma maior utilização e a disponibilização de resultados de

pesquisas relacionadas a área se faz necessária para aumentar o desempenho e competitividade (ALBERTINI et al., 2014).

O MADA apresenta características que podem contribuir muito para a superação destes obstáculos, como por exemplo a alta taxa de deposição de material em relação às alternativas, como manufatura aditiva por deposição à feixe de elétrons e laser, isto possibilita a obtenção de peças maiores com maior rapidez. Outra característica interessante é o uso de processos convencionalmente aplicados ao processo de soldagem, como o MIG/MAG e TIG, que conseguem fundir e depositar diferentes materiais metálicos com relativo baixo custo (SILVA, 2020).

A maneira como cada camada é executada neste tipo de técnica é fundamental para garantia da qualidade final do produto e eficiência do processo, assim é preciso assegurar cordões com geometria capaz de reduzir o número de passes necessário para a produção de determinado produto, reduzindo assim o custo de deposição.

A seleção adequada dos parâmetros e o monitoramento das variáveis envolvidas no processo são fundamentais para atingir os objetivos desejados. Mudanças nas condições de execução podem provocar alterações na altura de cordões, taxa de resfriamento e velocidade de deposição, causando defeitos como trincas, poros e oxidação.

Portanto, torna-se fundamental para aplicações industriais e popularização da técnica, a pesquisa e desenvolvimento de sistemas eficientes para monitoramento em tempo real, além do uso de algoritmos inteligentes para tratamento e disponibilização de informações importantes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é desenvolver um sistema de monitoramento das variáveis do processo de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA), baseado em algoritmo inteligente de previsão, a partir de dados adquiridos através de sistema de instrumentação, condicionamento de sinal e eletrônica embarcada, com a capacidade de prever instabilidades do processo de deposição durante a fabricação de peças, evidenciar falhas e ocorrências ao operador, de forma que seja possível orientá-lo no processo de inspeção final, com a indicação de regiões possivelmente defeituosas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Projetar e implementar um sistema de instrumentação multi-sensor para captura sincronizada das variáveis críticas do processo MADA;
- Desenvolver uma metodologia experimental para geração controlada de instabilidades e defeitos em peças de aço carbono e inoxidável via MADA;
- Conceber uma arquitetura de fusão sensorial para integração temporal de dados heterogêneos do processo de manufatura aditiva;
- Formular um modelo de detecção de anomalias baseado em Autoencoder LSTM com indicadores complementares de amplitude e volatilidade;
- Propor um esquema de classificação de modos de falha através de técnicas de clusterização para assinatura de defeitos;
- Validar a eficácia do sistema de monitoramento através de correlação cruzada entre anomalias detectadas e defeitos identificados via radiografia.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura aditiva por deposição à arco (MADA)

A Manufatura aditiva por deposição à arco (MADA), diferentemente de outras tecnologias de manufatura aditiva de metais faz uso do arco elétrico como fonte de calor para deposição em camadas do material, o qual é alimentado em forma de arame. Podemos dividir em três tipos:

- Baseado na soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) (Wang et al., 2019) conhecida como TIG (*Tungsten Inert Gas*);
- Baseado na soldagem *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) (Shi et al., 2018), também conhecida como MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas*, MAG – *Metal Active Gas*);
- Baseado na soldagem a arco com plasma (PAW) (Bai et al., 2018).

A taxa de deposição do MADA baseado em GMAW é maior do que o baseado em GTAW ou PAW, porém é o processo é menos estável e gera mais gases de soldagem e respingos devido ao arco elétrico agindo diretamente sobre a matéria prima (WU et al., 2018).

O processo GMAW pulsado baseia-se na modulação da corrente entre valores de base e de pico promovendo uma transferência metálica controlada, estável e predominantemente em modo goticular. No âmbito do MADA, essa propriedade apresenta aspectos vantajosos, pois diminui respingos, melhora a molhabilidade e reduz a energia média por unidade de comprimento (FIGUEIREDO et al., 2023; HENCKELL et al., 2020).

Ademais, pesquisas recentes indicam que regimes pulsados promovem a regularidade geométrica, refino microestrutural e reduzem a incidência de defeitos como porosidade e falta de fusão, em comparação com os modos de transferência spray e curtos (DU et al., 2023; REZENDE et al., 2025).

O modo sinérgico, funcionalidade presente em fontes de soldagem digitais avançadas, permite ao operador controlar o processo a partir de poucos parâmetros, normalmente são tipo de material, diâmetro de arame, gás de proteção e velocidade de alimentação. A partir destes, a fonte ajusta de forma automática e coordenada (sinérgica) as características dinâmicas do arco: corrente de pico e de base, tensão média de arco, frequência e largura de pulso. Isso significa que o operador não precisa ajustar manualmente cada variável, a fonte determina as grandezas de acordo com curvas pré-programada (linhas sinérgicas). Esse controle automático aumenta a repetibilidade do processo e simplifica a operação, pontos atrativos para o processo MADA.

Pesquisas recentes indicam que o modo de transferência pulsado sinérgico oferece boa estabilidade do arco, menor diluição e cordões com geometria mais previsível, o que facilita a deposição camada a camada (HACKENHAAR et al., 2022; IQBAL et al., 2025).

Na Fig. 2.01 (a) temos um esquema básico de MADA com o processo GMAW, (b) uma peça construída com a técnica e (c) um diagrama ilustrando a deposição de material em cordões e camadas.

À medida que as aplicações industriais de MADA crescem, especialmente no campo aeroespacial, a necessidade de alcançar um processo estável e preciso tornar-se mais urgente. Para isso, o primeiro requisito é obter uma descrição precisa do processo MADA. Do ponto de vista do monitoramento, é um processo não linear complexo, variante no tempo e multivariável (LIU et al., 2020).

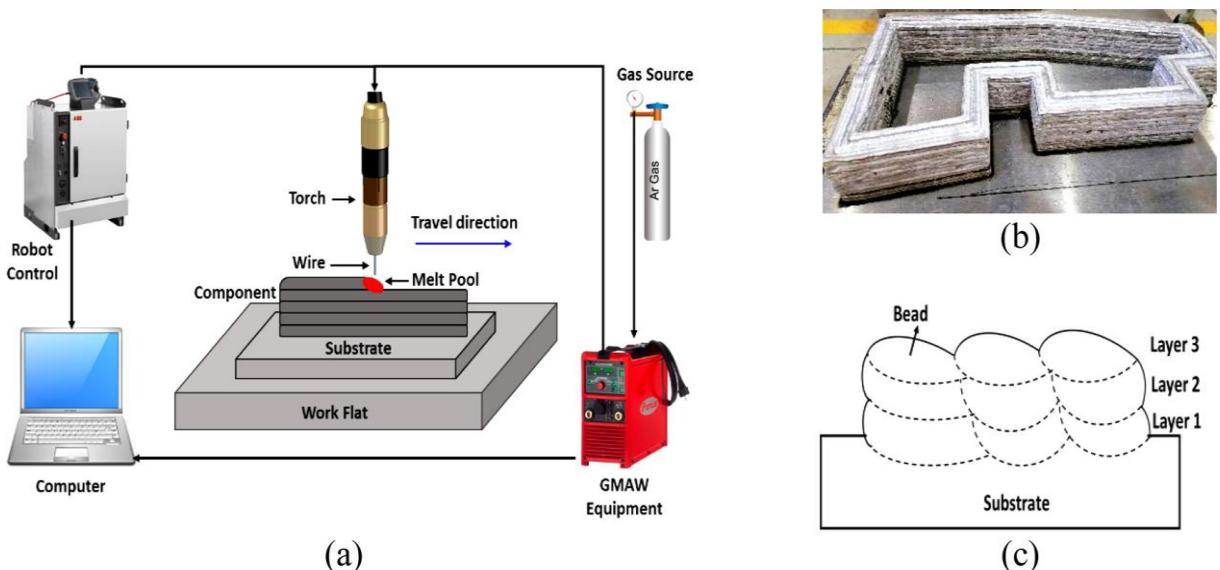


Figura 2.01 - (a) Esquema de um sistema MADA (b) Fotografia de uma peça (c) Esquema de deposição de cordões em camadas (XIA et al., 2020).

2.2 Desafios tecnológicos

As comunidades científica e industrial concordam que os processos de manufatura aditiva (MA) capazes de processar materiais metálicos são um conjunto de tecnologias revolucionárias que oferecem características únicas com enorme potencial de aplicação. Porém, com tudo o que a MADA tem a oferecer, a qualidade e a repetibilidade das peças de metal são tidos como os principais desafios tecnológicos a serem superados para a adoção generalizada, pois ainda não são suficientes para atender as rígidas exigências dos setores industriais.

Devido a uma variedade de fatores, alcançar alta qualidade e repetibilidade de peças de metal produzidas com MA é uma tarefa desafiadora, devido à alta complexidade de fenômenos físicos e transformações que ocorrem durante a produção de peças e a falta de modelos matemáticos e estatístico, os quais dificultam o controle do processo produtivo e a garantia da qualidade.

A fim de superar alguns desses desafios, o monitoramento dos processos MADA passou recentemente a ter grande importância, sendo foco de um número crescente de pesquisas. Para exemplificar realizou-se duas pesquisas na base Scopus (Elsevier), a primeira para levantar a quantidade de trabalhos publicados sobre MADA nos últimos dez anos e outra sobre trabalhos focados no monitoramento do processo no mesmo período:

- a) TITLE-ABS-KEY (("additive manufacturing" OR "3D printing") AND ("WAAM" OR "wire arc" OR "wire-arc" OR "welding" OR "wire + arc") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar"))
- b) TITLE-ABS-KEY (("additive manufacturing" OR "3D printing") AND ("WAAM" OR "wire arc" OR "wire-arc" OR "welding" OR "wire + arc") AND ("control" OR "monitoring" OR "sensor" OR "instrumentation" OR "automation" OR "automated system")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar"))

Baseado nas pesquisas, na Fig. 2.02 (a) tem-se um gráfico que representa o crescimento das publicações sobre MADA nos últimos dez anos, na Fig. 2.02 (b) nota-se que o tema monitoramento e controle do processo tem apresentado um número crescente de trabalhos, os dois gráficos são muito similares, fica claro que o interesse dos pesquisadores tem aumentado “exponencialmente” a cada ano, no gráfico da Fig. 2.02 (c) é possível verificar a significativa participação do tema monitoramento e controle nos estudos sobre o processo MADA, representando 20% do total.

A importância destes estudos se dá pela necessidade de prover ao processo qualidade, confiabilidade e previsibilidade, fundamentais para sua aplicação de seus produtos em ambiente Industrial.

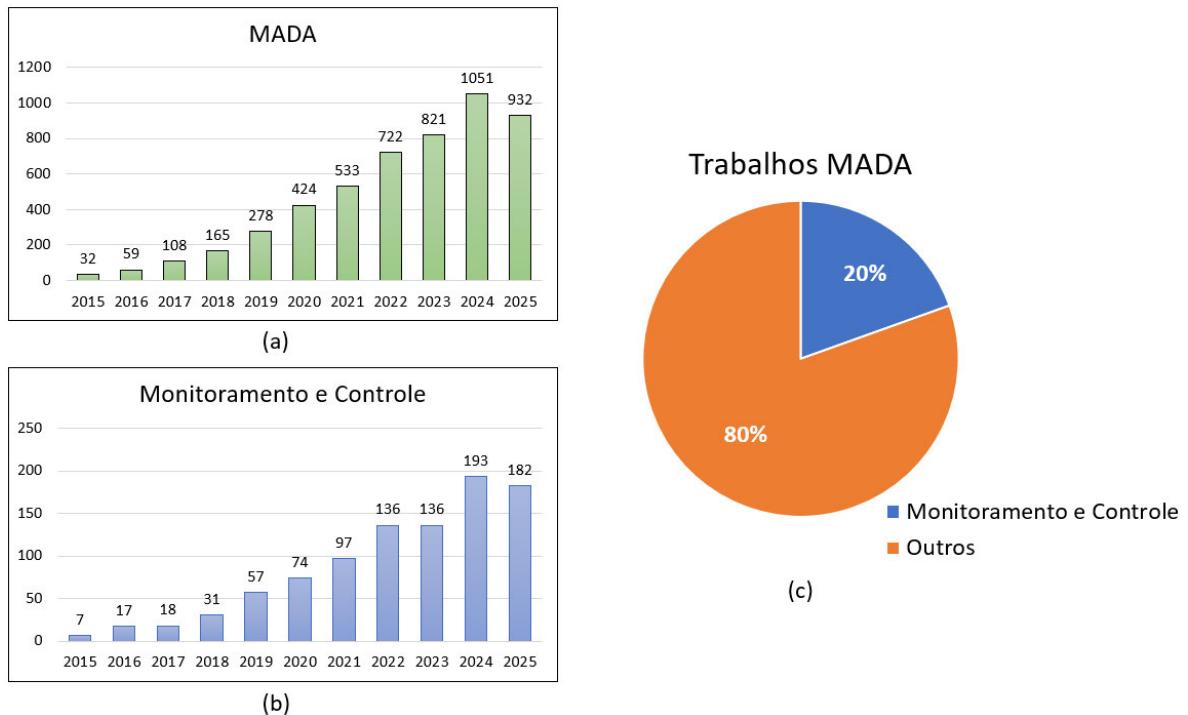


Figura 2.02 - (a) Trabalhos publicados sobre processos MADA, (b) Trabalhos publicados sobre monitoramento e controle dos processos MADA, (c) Fatiado dos trabalhos sobre monitoramento e controle.

Wu et al. (2018) apresentam em seu trabalho um diagrama, mostrado na Fig. 2.03, que propõe os principais pontos para se alcançar o desempenho da qualidade (*Quality Performance*) nos processos de MADA, baseado no desenvolvimento de três eixo principais: seleção do processo, otimização da matéria prima e tratamento pós-processamento. A seleção adequada do processo pode garantir alta taxa de deposição de material, contribuir para estabilidade e redução de defeitos, além disso o controle e monitoramento do processo são fundamentais para assegurar a qualidade, melhorar estabilidade, controlar de defeitos e atingir as propriedades mecânicas.

Dentre os aspectos de atenção destes sistemas estão a geometria dos cordões depositados, a temperatura de interpasso, características do arco elétrico e o comportamento da transferência de material. A otimização da matéria prima, através de novos projetos de composição de materiais pode conferir aspectos microestruturais e desempenho mecânicos aos produtos obtidos. A adição de determinados elementos e até a mistura de arames

permitem o desenvolvimento de uma vasta gama de produtos com características para aplicações especiais.

O tratamento pós-processamento é outro eixo importante no desempenho da qualidade dos processos MADA, através do qual algumas características podem ser otimizadas, como redução de tensões residuais e distorções, refinamento da microestrutura, melhoria na dureza e aumento da resistência do material (WU et al., 2018).

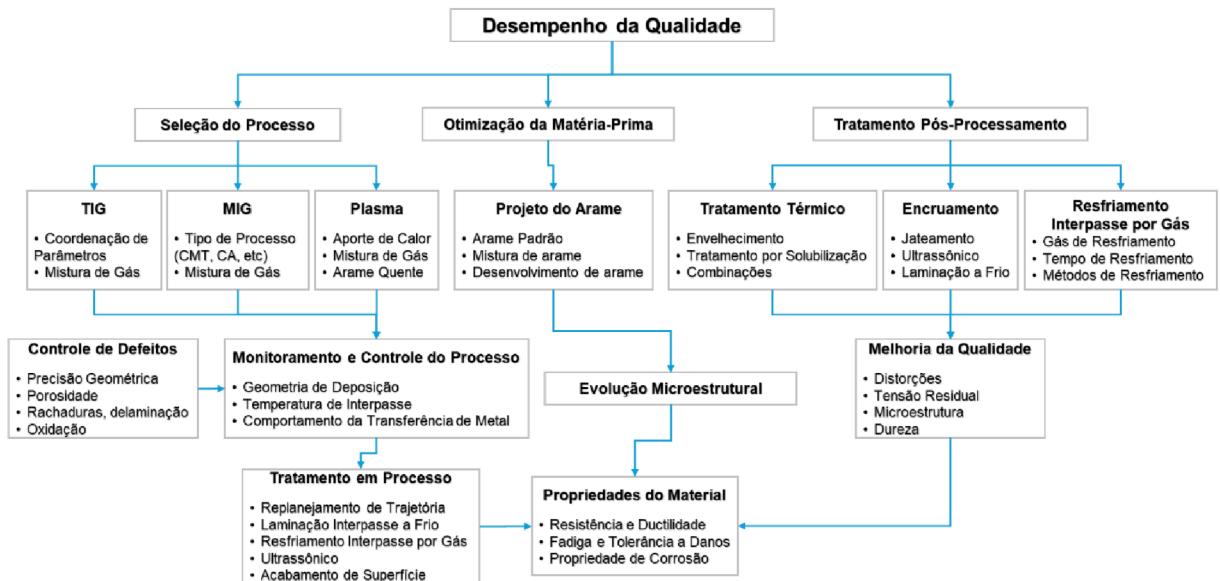


Figura 2.03 - Fluxo de Trabalho baseado na Qualidade para processos MADA (WU et al., 2018)

2.3 Monitoramento do processo

O MADA é um sistema que pode apresentar variações no comportamento do processo ao longo do tempo de fabricação de uma peça, muitas vezes devido ao acúmulo de calor à medida que o número de camadas depositadas aumenta. Além disso, defeitos comuns como falta de precisão geométrica, porosidade, trincas e oxidação podem ter como origem à escolha inadequada de parâmetros, contaminação, perturbações externas e instabilidades do processo.

Ademais, ainda existe uma grande dependência da intervenção humana, em muitas aplicações os operadores são responsáveis, baseado apenas na sua experiência, pela seleção dos parâmetros, ajustes no caminho, controle de pausa e retomada no resfriamento (XIONG et al. 2020).

Melhorar a estabilidade, eliminar ou diminuir defeitos de geometria de deposição e garantir desempenho mecânico passa pela seleção dos parâmetros, os quais podem ser respaldados e/ou sugeridos por estes algoritmos e sistemas, ambos baseados em dados históricos e em tempo real do processo, que são obtidos através de técnicas de instrumentação.

Para aquisição dos dados, sensores ópticos podem ser usados para monitorar a geometria e qualidade da superfície de deposição, sensores espectrais e acústicos podem detectar defeitos internos como porosidade e trincas, sensores térmicos podem fornecer um mapa da distribuição de calor, sensores de posição são necessários para melhorar a movimentação dos componentes do sistema e sensores de grandezas elétricas podem ajudar a compreender a dinâmica de formação do arco e da transferência do material (XIA et al., 2020).

Um sistema de monitoramento e controle foi proposto por Xia et al. (2020), Fig. 2.04, com o objetivo de melhorar a estabilidade do processo, garantir a geometria desejada, melhorar a qualidade das peças produzidas e diagnosticar possíveis defeitos. O módulo de monitoramento é composto por diversos sensores, sendo responsável por capturar os sinais de processo e gerar alertas de defeitos.

No trabalho de Xia et al. (2020), a temperatura de deposição foi acompanhada pela câmera térmica e pelo pirômetro, a morfologia foi obtida pelo scanner a laser e monitorada pela câmera CCD, o espectrômetro forneceu o espectro do cordão depositado e as grandezas elétricas, tensão e corrente, foram obtidas pelos sensores elétricos.

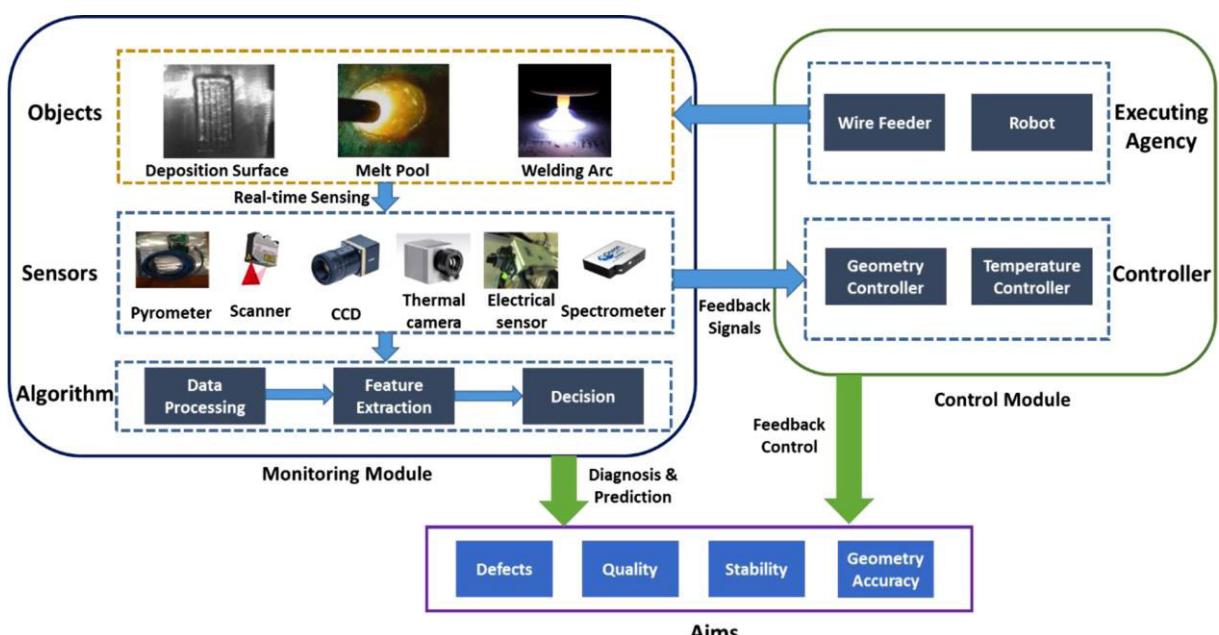


Figura 2.04 - Sistema de Monitoramento e Controle de MADA (XIA et al., 2020)

Segundo Xu et al. (2018), os parâmetros para o monitoramento MADA podem ser divididos em dois grupos (Fig. 2.05):

- Parâmetros Tradicionais: são parâmetros normalmente monitorados em processos de soldagem e associados ao próprio sistema, sendo tensão do arco, corrente do arco, velocidade de alimentação do arame, velocidade de movimentação e fluxo do gás de proteção.
- Parâmetros não Tradicionais: são parâmetros associados com as condições da peça e do ambiente, sendo sinal acústico, radiação de raios-x, sinal óptico e parâmetros térmicos.

O trabalho de Xu et al. (2018) ainda aponta que os defeitos mais recorrentes em MADA são: tensão residual, distorção estrutural, trincas, falta de fusão, porosidade, escorramento e dissipação térmica. Sendo que, a tensão residual, a distorção estrutural e a dissipação térmica estão normalmente associadas ao histórico térmico; a falta de fusão, a porosidade e o escorramento podem estar relacionados aos parâmetros do processo e as trincas são frequentemente associadas a tensões residuais.

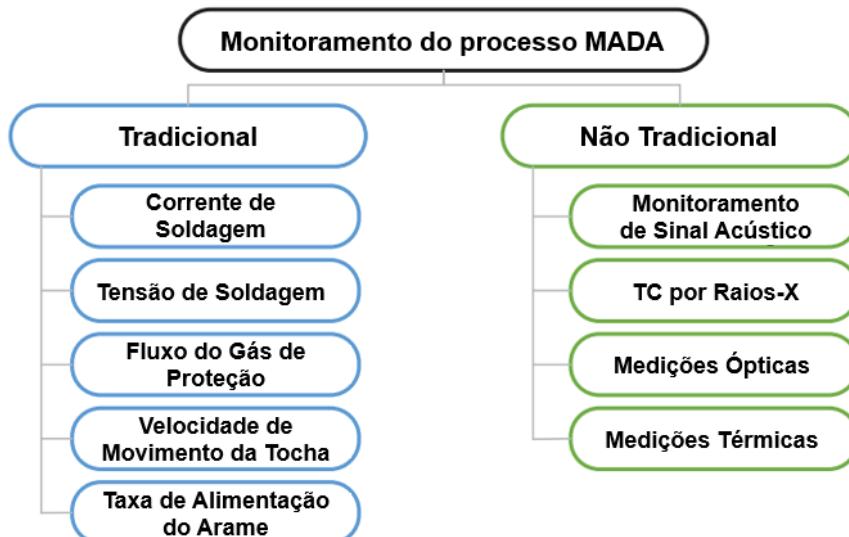


Figura 2.05 - Parâmetros monitorados em MADA. (XU et al., 2018)

2.4 Garantia da qualidade das peças produzidas

A qualificação e a certificação das peças produzidas por MADA dependem de uma compreensão aprofundada das características do processo, da definição de padrões de

qualidade e da adoção de procedimentos de inspeção não destrutivos adequados (CHUA et al., 2017). Os autores propõem que o fluxo de inspeção possa ser estruturado em três fases principais:

- inspeção de camada única, na qual são observadas em tempo real as características da poça de fusão e estabelecidas correlações com os parâmetros de processo;
- inspeção multicamada, cujo objetivo é localizar ocorrências anômalas ao longo do volume construído, com base na detecção de fenômenos irregulares, como regiões com distribuição de temperatura inconsistente; e
- inspeção final, voltada à verificação da qualidade global do componente fabricado.

As duas primeiras fases são realizadas por meio de monitoramento em tempo real (online), permitindo a detecção precoce de instabilidades durante a fabricação. A terceira fase é conduzida de forma offline, por meio de uma inspeção mais lenta e detalhada, voltada à avaliação de atributos do produto acabado, tais como dimensões geométricas e localização de defeitos (porosidades ou vazios). Nessa etapa, a aplicação de métodos de ensaio não destrutivo é fortemente recomendada, de modo a assegurar a qualidade e a confiabilidade do componente sem comprometer sua integridade.

2.5 Redes neurais baseadas em autoencoders LSTM

A compreensão efetiva do processo, o estabelecimento de um modelo que relacione os parâmetros e variáveis do processo com a ocorrência de defeitos e a qualidade final das peças produzidas, ainda é um desafio. Devido à alta complexidade de fenômenos físicos, transformações, número de variáveis e parâmetros, existe a dificuldade em estabelecer modelos matemáticos precisos.

O desenvolvimento da inteligência artificial fornece uma alternativa factível, pois permite que a incerteza e a complexidade no processo sejam efetivamente processadas sem descrever com precisão o modelo. A aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina em MA inclui principalmente: otimização do processo, design de modelo, processamento de informações de vários sensores, previsão da geometria do cordão e propriedades mecânicas.

Dentro das possibilidades de algoritmos e ferramentas de inteligência artificial, uma estratégia que tem se mostrada eficaz para detecção de anomalias em séries temporais é o emprego de Autoencoders com camadas da rede LSTM (*Long Short-Term Memory*). Essa abordagem incorpora as boas características de captura de padrões de curto e longo prazo das redes LSTM, com a capacidade dos Autoencoders de aprender bem padrões de

normalidade do processo, sendo capazes de identificar comportamentos anômalos através da reconstrução dos sinais.

Os modelos treinados com dados “normais” aprendem o padrão de comportamento e a dinâmicas entre as várias temporais, assim na presença de um comportamento inadequado, os algoritmos falham na reconstrução do sinal e gera o chamado erro de reconstrução (diferença entre o sinal de entrada e o sinal reconstruído).

Maleki et al. (2021) e Lee et al. (2024) utilizaram os Autoencoders baseados em LSTM na detecção não supervisionada de anomalias em séries temporais, sendo o erro de reconstrução a métrica usada para identificar os desvios do comportamento normal do sistema.

Diante da impossibilidade de previsão de todos os potenciais problemas que podem ocorrer durante o processo e atuar de forma rápida e eficaz (Machado, 2019), justifica-se o presente projeto, onde desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados para coletar informações do processo MADA, sendo os dados obtidos através da instalação de sensores compatíveis com as variáveis de processo e circuitos de condicionamento de sinais. Após a aquisição, os dados foram tratados e armazenados de forma estruturada para utilização neste e em trabalhos futuros. A abordagem de fusão de sensores aplicada à algoritmo de aprendizagem baseado em redes neurais artificiais, autoencoder LSTM, gerou um modelo de predição capaz de prever e indicar possíveis falhas e regiões defeituosas em peças fabricadas utilizando o sistema de monitoramento proposto.

A inspeção pós-fabricação é etapa fundamental para a aplicação de peças produzidas por manufatura aditiva na indústria. Com a indicação, por parte do sistema, de possíveis falhas de fabricação e pontos defeituosos, os procedimentos de inspeção serão mais direcionados, o que facilita a execução e o tornar mais assertivo, gerando economia de tempo e aumentando a confiabilidade dos produtos.

2.6 Detecção de Anomalias

A visão computacional tem sido tema recorrente de estudos recentes, que buscam acompanhar a geometria e detectar anomalias, trabalhos com rede neural convolucional (CNN) e segmentação de imagem apresentam resultados significativos, porém dependem fortemente do arranjo ótico e posicionamento de câmeras, com desafio de reproduzibilidade (XIA et al. 2022). Em contraste, o presente trabalho utiliza-se de sinais temporais de variáveis do processo como fonte de detecção de instabilidades, reduzindo a dependência de sistemas ópticos e permite a integração com a visão quando disponível.

Dados adquiridos da corrente e tensão do processo são comumente utilizados para captar a “assinatura” do aporte de energia e estabilidade do arco, permitindo a associação com a qualidade das camadas depositadas (CHAURASIA et al., 2025). O diferencial deste trabalho está no modelamento de séries temporais através de autoencoder LSTM (AE-LSTM) e a fusão de sensores para identificação e caracterização de anomalias.

A estratégia de aprendizagem não supervisionada para dispensar a rotulagem dos dados e lidar com a variabilidade do processo é outra vertente que tem apresentado crescente destaque em estudos recentes, há exemplos tanto com a utilização de sinais do processo quanto em processamento de imagem (MATTERA et al., 2024; LI et al., 2025). O presente trabalho se destaca por apresentar a validação das previsões de forma consistente: as anomalias identificadas e agrupadas por clusterização são associadas a defeitos reais por sobreposição com imagens radiográficas.

Muitos estudos tratam “anomalia” como qualquer desvio em métricas indiretas (proxies de qualidade), isto é, indicadores substitutos obtidos de sinais de processo ou de imagem que se correlacionam com estabilidade, mas não observam diretamente o defeito. Exemplos incluem variações abruptas da largura e do brilho da poça (visão), picos no desvio-padrão dos sinais de tensão/corrente, flutuações de pico térmico e taxa de resfriamento (termografia). Embora úteis para triagem rápida e para controle de processo, tais proxies são susceptíveis a falsos positivos/negativos e oferecem evidência indireta. Nesta tese, supera-se essa limitação ao detectar anomalias e associá-las, a defeitos confirmados por radiografia. Com isso, o marcador de anomalia deixa de ser apenas um marcador de instabilidade do processo e passa a constituir evidência de não conformidade, aumentando a confiabilidade diagnóstica e a capacidade de generalização do método.

Este trabalho avança o estado da arte ao integrar e validar a aquisição multissensorial de alta frequência, a modelagem da dinâmica do processo com AE-LSTM que aprende o estado de normalidade sem necessidade de rótulos, a aplicação de duplo marcador de anomalias, a clusterização das instabilidades para discriminar as ocorrências distintas, a validação dos eventos detectados por radiografia e correlacionando a assinatura dos sinais adquiridos com defeitos reais.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1 Visão Geral da Metodologia

As etapas de execução desenvolvidas no presente projeto são apresentadas no fluxograma da Fig. 3.01.

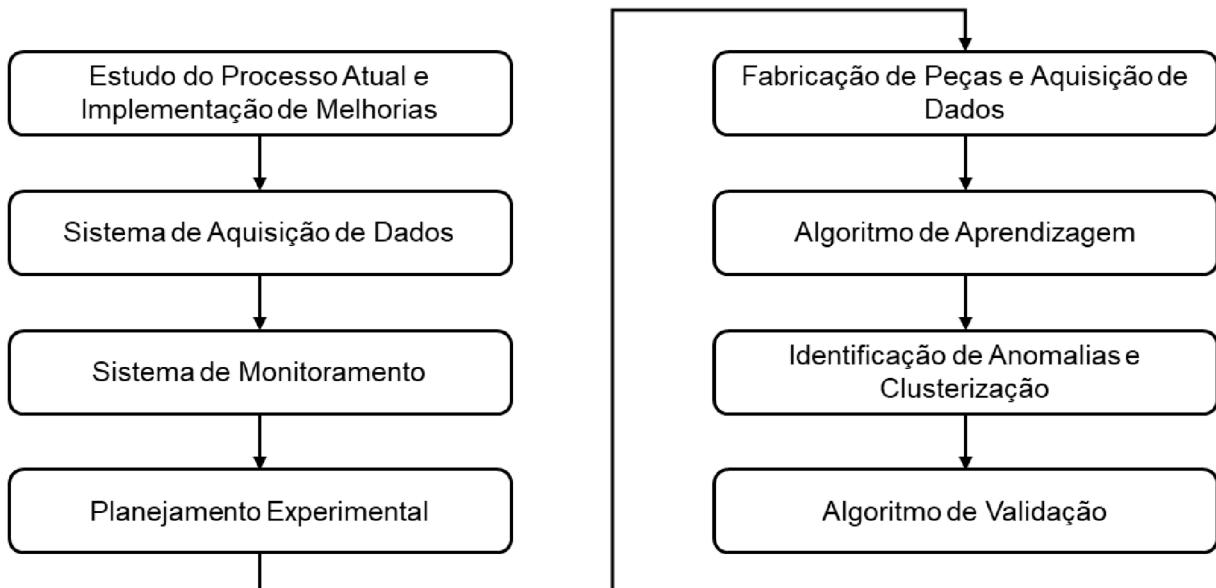


Figura 3.01 – Fluxograma de Execução do Projeto.

O fluxograma representa a sequência de etapas necessárias para o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento do Processo de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco, utilizando Algoritmo de Aprendizagem e Fusão de Sensores.

Etapa Preliminar – Estudo do processo atual e Implementação de Melhorias: Fase inicial em que foram analisados os métodos e recursos atualmente disponíveis no processo MADA, identificados gargalos e oportunidades de melhoria.

- Estudo do processo atual;
- Substituição da controladora de comunicação paralela por controladora USB;
- Substituição dos motores de passos por “Easy Servo” (motores de passo com encoders integrado);
- Utilização de comutador elétrico para fim de cursos;
- Utilização de comutador elétrico para definição de “home” ($x=0$, $y=0$ e $z=0$);
- Utilização de “sensor probe” para distanciamento automático do bico da tocha em relação ao substrato/camada superior;
- Testes em bancada;
- Montagem do novo painel elétrico;
- Instalação das modificações propostas.

Etapa 1 – Sistema de aquisição de dados: Desenvolvimento e implementação da infraestrutura de instrumentação e condicionamento de sinais (sensores elétricos, acústicos, térmicos, entre outros).

- Projeto do sistema de aquisição de dados, composto por instrumentação e condicionamento de sinal dedicado ao processo;
- Especificação e compra de componentes eletrônicos, sensores e transdutores;
- Construção das placas de circuito impresso;
- Montagem do sistema de aquisição;
- Instalação do sistema, testes e calibração.

Etapa 2 – Sistema de Monitoramento: Desenvolvimento da interface de monitoramento, possibilitando o acompanhamento em tempo real das variáveis do processo e a organização estruturada dos dados adquiridos.

- Desenvolvimento do sistema de monitoramento;
- Criação da interface com o usuário;
- Interligação do sistema de monitoramento ao sistema de aquisição de dados e ao processo;
- Testes e validação do sistema.

Etapa 3 – Planejamento Experimental: Estabelecimento dos parâmetros de soldagem, geometria da peça, quantidade de camadas e estratégias de deposição. Essa fase determina a base experimental para assegurar a confiabilidade dos resultados.

- Determinação de materiais;

- Especificação do tipo de arame a ser empregado;
- Determinação da geometria das peças a serem impressas;
- Determinação do percurso da ferramenta;
- Definição da quantidade de peças a serem impressas;
- Definição dos ensaios a serem empregados;
- Elaboração do roteiro de trabalho;
- Determinação dos equipamentos a serem usados;
- Estabelecimento dos parâmetros do processo;
- Agendamento de horários no laboratório para execução dos experimentos.

Etapa 4 – Produção das peças e Aquisição de Dados: Registro dos sinais durante o processo de fabricação das peças. A etapa assegura a captura consistente dos dados brutos, fornecendo a base para análises posteriores.

- Produção das peças com geometrias simples;
- Indução de instabilidades para ocorrência e documentação de possíveis defeitos;
- Avaliação das peças produzidas;
- Visualização e manipulação de dados.

Etapa 5 – Algoritmo de Aprendizagem baseado em Rede Neural Artificial (RNA): Aplicação de métodos de inteligência artificial, redes neurais LSTM e Autoencoders, para representar o comportamento normal do processo.

- Estudo da linguagem Python e Plataforma a ser empregada;
- Importação de bibliotecas utilizadas na análise de dados e RNA;
- Importação e visualização de dados adquiridos;
- Configuração do Autoencoder LSTM;
- Pré-processamento de dados;
- Geração de janelas temporais;
- Criação do modelo Autoencoder LSTM;
- Treinamento do modelo;
- Validação do modelo;
- Exportação de resultados e modelos.

Etapa 6 – Detecção de Anomalias e Clusterização: A partir dos algoritmos de aprendizado, realiza-se a identificação padrões de instabilidade no processo. Técnicas de

clusterização (KMeans e HDBSCAN) são utilizadas para segmentar e caracterizar os diferentes tipos de falhas e desvios.

- Carregar modelos obtidos na rede neural com Autoencoder LSTM;
- Carregar dados das peças;
- Cálculo do erro de reconstrução;
- Definição de Limiares;
- Análise detalhada do erro por camada e Identificação de Anomalias;
- Cálculo das características estatísticas;
- Cálculo dos coeficientes das Wavelet;
- Clusterização das Anomalias;
- Aplicação dos modelos de clusterização;
- Análise e visualização das regiões anômalas.

Etapa 7 – Algoritmo de Validação: Comparação entre os defeitos detectados pelo sistema e os defeitos reais obtidos por técnicas de inspeção (como radiografia). Essa validação permite verificar o desempenho e confiabilidade do sistema proposto.

- Importação da Imagem do Raio-X da peça;
- Rotação da Imagem;
- Segmentação da Imagem;
- Detecção de Porosidade;
- Validação e Sobreposição.

Os detalhes da etapa preliminar podem ser vistos no Apêndice II: Estudo do processo e implementação de melhorias.

3.2 Sistema de Aquisição de Dados

O objetivo principal desta etapa é o projeto e a construção do sistema de aquisição de dados, para isso estudou-se e definiu-se as variáveis de processo a serem adquiridas e tratadas, as quais serviram de base para todo desenvolvimento posterior. O diagrama mostrado na Fig. 3.02 apresenta na cor verde as variáveis de processo, à direita destas e na cor azul, tem-se respectivamente, os sensores e os circuitos eletrônicos utilizados para condicionamento de sinal antes da aquisição pela placa NI USB 6341 da *National Instruments*, mostrada mais à direita.

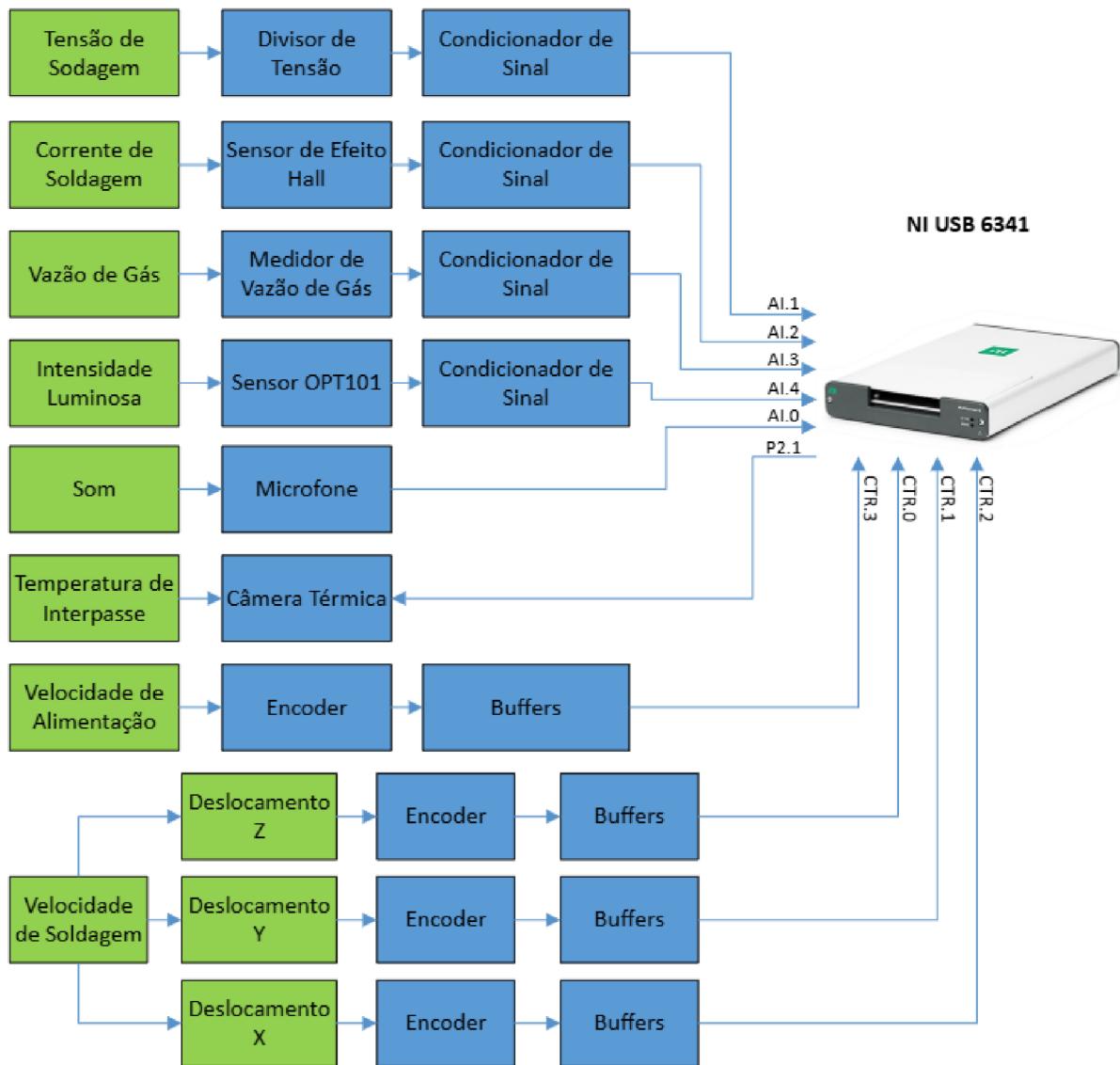


Figura 3.02 - Fluxograma do Sistema de Aquisição.

As especificações dos sensores, projetos dos condicionadores de sinais e montagem do sistema de aquisição podem ser vistos no Apêndice III – Projeto e construção do sistema de aquisição de dados.

A Fig. 3.03 apresenta o sistema de condicionamento de sinal pronto em vista interna, evidenciando a organização do cabeamento com codificação cromática padronizada conforme especificado na etapa de desenvolvimento, e sua integração à unidade de aquisição de dados National Instruments NI USB-6341.

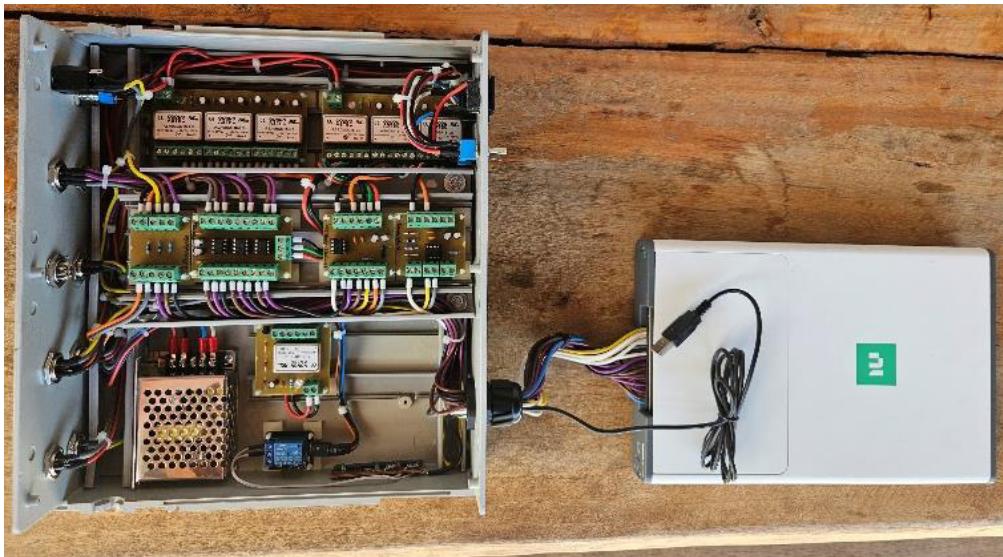


Figura 3.03 – Montagem Final do Sistema de Aquisição

A Fig. 3.04 mostra o conjunto já enclausurado: na face frontal, todos os conectores de entrada encontram-se claramente identificados e diferenciados por tipo, atribuindo um conector específico a cada variável medida e, assim, mitigando riscos de interconexões equivocadas; na face traseira, destacam-se as chaves de configuração da alimentação elétrica. Para as aquisições das peças após os testes preliminares, adotou-se uma fonte de 12 V em bateria estacionária, com o objetivo de reduzir o acoplamento de interferências da rede e, consequentemente, o nível de ruído. O roteamento dos cabos entre os condicionadores e os canais da NI USB-6341 foi organizado, preservando a rastreabilidade de cada sinal e minimizando a probabilidade de erros de ligação durante a operação.



Figura 3.04 – Sistema de Aquisição.

3.3 Sistema de Monitoramento

Com a definição da utilização da placa de aquisição dados da National Instruments, optou-se por trabalhar com o software Labview® para desenvolvimento do Sistema de Monitoramento das variáveis do processo MADA, por serem produtos da mesma empresa, a comunicação e integração com o Sistema de Aquisição de Dados é facilitada.

A interface gráfica desenvolvida é mostrada na Fig. 3.05, o principal objetivo é disponibilizar em tempo real a visualização dos dados adquiridos e possibilitar o armazenamento estruturado para posterior análise. Buscou-se criar um ambiente simples, organizada em painéis que exibem cada uma das variáveis monitoradas, apresentando gráficos para representação dos dados obtidos e mostradores dos valores, assim pode-se verificar se as variáveis estão sendo efetivamente adquiridas no momento dos experimentos e se os valores medidos estão coerentes com os valores esperados.

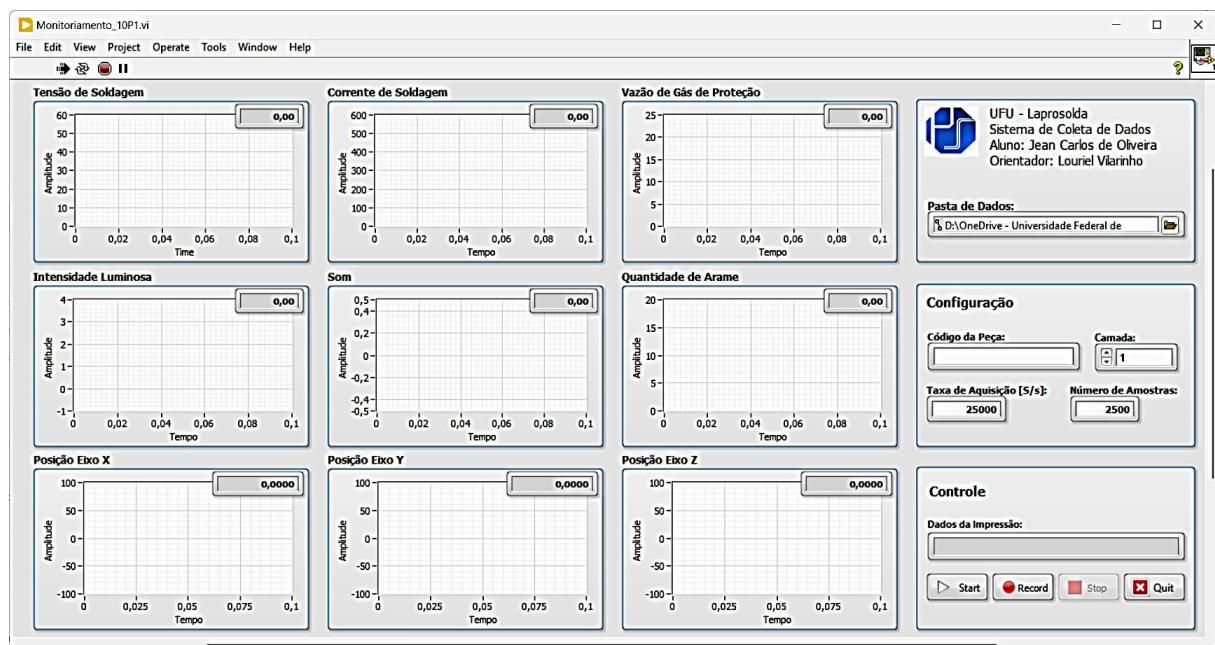


Figura 3.05 - Interface do Sistema de Monitoramento.

Na parte superior esquerda, encontra-se os gráficos de Tensão de Soldagem, Corrente de Soldagem e Vazão do Gás de Proteção, logo abaixo, são exibidos os sinais de Intensidade Luminosa, Som e a Quantidade de Arame, e na parte inferior, os gráficos correspondentes às posições dos eixos X, Y e Z.

À direita, a interface conta com painéis destinados à configuração e operação do sistema, na parte superior faz-se a determinação do caminho do banco de dados, sendo os dados automaticamente salvos neste, abaixo temos o painel de configuração principal, onde

inserirmos o código da peça, que foi criado para facilitar o rastreamento dos dados, ao lado fica a indicação ou determinação da camada a ser depositada, o sistema incrementa o valor da camada de forma automática assim que uma camada é realizada, mas permite que esse controle seja feito manualmente. Neste painel ainda, é feito a configuração da taxa de amostragem e o número de amostra a serem realizado por ciclo de aquisição e atualização dos gráficos. No painel inferior é disponibilizado botões de controle para permitir a operação do Sistema de Monitoramento, possibilitando iniciar, registrar e encerrar aquisições.

Visando viabilizar a coleta de dados em alta frequência de múltiplos sensores de natureza distinta e a integração com o sistema de aquisição, câmera térmica e mesa de impressão, o sistema foi projetado com algumas características e funcionalidades:

- Utilização da base de tempo do conversor analógico digital também na entrada dos contadores, permitindo vincular as leituras analógicas (tensão, corrente e demais sinais) às leituras dos encoders dos *Easy Servos* e do cabeçote de alimentação de arame da fonte de tensão;
- Disponibilização de saída digital configurada para acionar a câmera térmica, permitindo a gravação automática e sincronizando o início da filmagem com o início da aquisição dos sinais. O Sistema de Monitoramento, através da saída digital aciona um relé presente no Sistema de Aquisição e este dispara a gravação da câmera.
- Uma entrada digital foi disponibilizada para receber o disparo proveniente do software de controle da mesa de impressão, através do código G criado para fabricação das peças, é dado um comando para acionar o relé auxiliar e que é conectado à entrada digital da placa USB NI-6341, possibilitando que a aquisição se inicie de forma sincronizada com o processo de deposição;
- O incremento da camada de deposição é realizado de forma automática, facilitando a associação entre dados adquiridos e a geometria da peça;
- O sistema disponibiliza em seu código, parâmetros para a inserção da curva de calibração de cada variável, que relaciona os valores medidos com os valores reais. Optou-se por não disponibilizar essa função na Interface e deixar apenas no código interno por ser uma operação que demanda conhecimento técnico e pode afetar a qualidade da aquisição;
- Devido ao grande volume de informação gerando por aquisições realizadas em alta frequência, todos os dados são armazenados em arquivo binários no formato *tdms*, (*Technical Data Management Streaming*), padrão usando pelo *Labview*, garantindo estruturação e rastreabilidade.

Diversos trabalhos na literatura destacam a importância e aplicabilidade de sistemas de aquisição em *Labview* para processos de soldagem e manufatura aditiva (MISHRA et al.,

2020; CHEN et al., 2019; KOKARE et al., 2024), pois possibilitam a integração de diversos sensores e análise em tempo real, contribuindo para o avanço de sistemas inteligentes de monitoramento com aplicação de técnicas de detecção de anomalias e inspeção assistida.

3.4 Planejamento Experimental

Para a realização do planejamento experimental, realizou-se as seguintes definições iniciais:

- Célula de manufatura

A primeira definição foi a célula de manufatura a ser utilizada, ficando definido um sistema tipo mesa cartesiana de 3 eixos e envelope de trabalho de 1000 mm x 1000 mm x 400 mm, mostrada na Fig. 3.06, com a fonte de soldagem da Fronius®, modelo TransPuls Synergic 5000 (TPS 5000).



(a)



(b)

Figura 3.06 - Mesa cartesiana do processo MADA: (a) Vista frontal e (b) Vista Lateral.

A fonte de soldagem Fronius® TPS 5000, mostrada na Fig. 3.07, apresenta características interessante para sua aplicação em MADA, possui arquitetura digital de alta potência, ampla biblioteca de programas sinérgicos e interfaces dedicadas para integração com sistemas de automação e robóticos. Programas sinérgicos são um sistema de controle inteligente onde a fonte de soldagem automaticamente ajusta múltiplos parâmetros de soldagem de forma coordenada, mantendo uma relação otimizada entre eles.

O equipamento conta com recursos avançados de controle, que possibilitam ajustes finos na forma de onda de acordo com a aplicação, são modificações precisas e controladas nos parâmetros elétricos do arco para otimizar o processo de soldagem para aplicações específicas, resultando em maior estabilidade do arco e qualidade da deposição (FRONIUS, 2010; SHUKLA et al., 2023).

Com a definição da célula de manufatura, determinou-se o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) pulsado no modo sinérgico para a fabricação das peças metálicas, a serem produzidas neste trabalho.



Figura 3.07 – Fonte de soldagem da Fronius®, modelo TransPuls Synergic 5000 (TPS 5000).

A célula de manufatura é equipada com um tanque, mostrado na Fig. 3.08, para aplicação do resfriamento ativo por quase-imersão (RAQI), técnica desenvolvida por Silva et al. (2020) no Laprosolda. O RAQI é uma técnica de gerenciamento térmico projetada para mitigar o acúmulo excessivo de calor do processo MADA, onde a deposição ocorre dentro de um tanque de líquido refrigerante, cujo nível é constantemente ajustado de modo a resfriar ativamente as camadas já solidificadas, sem que a zona de fusão entre em contato com o fluido. A técnica permite a extração eficiente de calor, reduzindo gradientes térmicos e estabilizando a geometria da peça durante a deposição.



Figura 3.08 – Tanque para utilização do RAQI.

- Material de deposição:

A Tab. 3.01 apresenta as ligas metálicas selecionadas para este projeto. A escolha dessas ligas decorre de sua ampla disponibilidade comercial, da demanda do mercado e do fato de terem suas propriedades e seu comportamento no processo de soldagem amplamente estudados.

Tabela 3.01 – Ligas Metálicas e Arames-Eletrodos.

Índice	Liga Metálica	Arame-Eletrodo	Norma de Especificação do Arame	Diâmetro Nominal (mm)
1	Aço Carbono	ER70S-6	AWS A5.18	1,2
2	Aço Inox	ER316 LSi	AWS A5.9	1,2

O arame Weld West Arco S6, mostrado na Fig. 3.09, é classificado segundo a AWS A5.18/ASME SFA 5.18 como ER70S-6, sendo um consumível maciço de aço carbono para processos de soldagem MIG/MAG, amplamente utilizado em estruturas metálicas, construção civil, setor automotivo e fabricação de equipamentos em aço carbono (AWS, 2017; ASME, 2019).



Figura 3.09 – Arame Weld West Arco S6

O arame Weld-Inox WI M 316 L SI, mostrado na Fig. 3.10, é classificado pela norma AWS A5.9/ASME SFA 5.9 como ER316LSi, sendo um consumível maciço de aço inoxidável austenítico, amplamente usado em ambientes agressivos, como aqueles encontrados nas indústrias química, petroquímica, alimentícia e naval (AWS, 2021; ASME, 2020).



Figura 3.10 – Arame Weld-Inox WI M 316 L SI

- Trajetória da tocha de soldagem

A trajetória da tocha de soldagem é o caminho que ela percorre sobre a peça, garantindo a deposição de material onde necessário, camada por camada. Para formar a geometria final, em MADA, a trajetória é projetada de maneira cuidadosa para garantir que a deposição aconteça de maneira consistente, sendo fator determinante para a qualidade e características geométricas. Neste trabalho foram empregadas três estratégias de movimentação da tocha de soldagem, comumente utilizadas na fabricação de peças.

A primeira consistiu em uma trajetória de passe único, mostrado na Fig. 3.11a, abordagem que é utilizada para obtenção de paredes finas, uma vez que é realizado a deposição de um único cordão por camada.

A segunda estratégia, mostrado na Fig. 3.11b, aplicou-se o movimento de tecimento, onde uma oscilação de amplitude controlada é realizada pela tocha, garantindo um aporte maior de material, consequentemente a formação de paredes mais espessas. A oscilação possibilita uma melhor distribuição térmica e deposição uniforme, segundo Ding et al. (2015) o tecimento é essencial para controlar a diluição e evitar defeitos como sobreposição irregular ou falta de fusão lateral. É uma estratégia que proporciona um bom recobrimento, os estudos de Martina et al. (2019) apontam que a oscilação mais ampla é vantajosa para preenchimento superficiais, porém demanda ajustes na corrente e aporte térmico para não gerar defeitos geométricos.

Por fim, utilizou-se a deposição de cordões paralelos, mostrado na Fig. 3.11c, onde foram depositados quatro cordões lado a lado, nessa estratégia é importante observar a taxa de sobreposição, que é a fração da largura do cordão que se sobrepõe ao cordão adjacente. Valores típicos de sobreposição variam entre 30 % e 50 %, garantindo boa fusão lateral e evitando falta de fusão, falta de preenchimento e excesso de material. A escolha adequada da taxa de sobreposição é crucial para garantir a integridade metalúrgica e regularidade geométrica (WANI et al., 2024).

Como forma de garantir a conformidade geométrica o início de deposição das camadas é realizado de forma alternada, trocasse o lado de abertura do arco, consequentemente o sentido de deposição, ora ocorre o deslocamento da direita para a esquerda e ora da esquerda para direita. Na terceira estratégia (Fig. 3.56c), como a parede é mais espessa, alternasse o início entre os quatros cantos da parede.

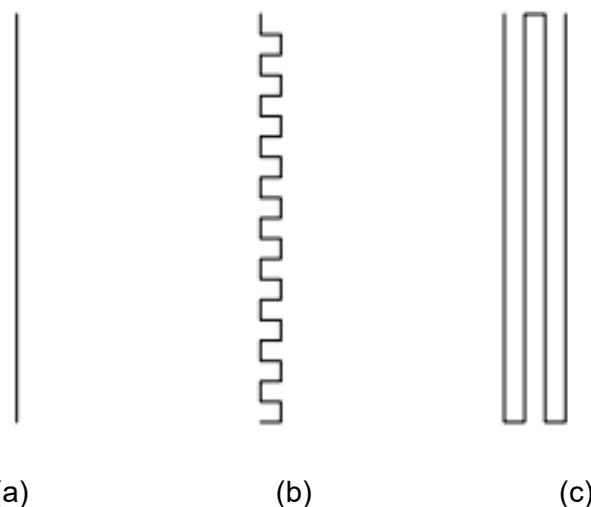


Figura 3.11 – Trajetos da tocha de soldagem: (a) Passe único, (b) Tecimento e (c) Cordões paralelos.

- Geometria da pré-forma

Visando minimizar o esforço experimental e custos decorrentes do tempo de deposição das peças fabricadas, definiu-se uma geometria simples para a pré-forma padrão, conforme Fig. 5.12, com dimensões adequadas aos ensaios posteriores. As peças possuem o formato de parede, para as estratégias de passe único e tecimento as medidas adotadas foram 200 mm de comprimento e 100 mm de altura e para a trajetória dos cordões paralelos, 150 mm de comprimento e 80 mm de altura.

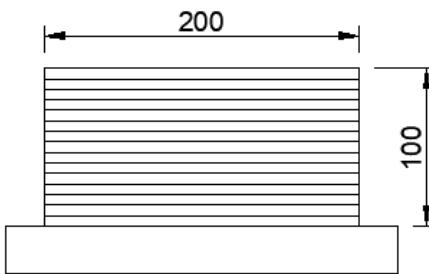


Figura 3.12 – Pré-forma padrão para a peças a serem fabricadas estratégias passe único e tecimento.

- Defeitos e Ensaios a serem realizados

Para o presente trabalho, a definição dos defeitos a serem abordados baseou-se nos defeitos recorrentes em manufatura aditiva de metais por deposição à arco e mais verificados nos projetos executados no laboratório, além da capacidade e facilidade em induzi-los para posterior associação aos dados coletados, sendo eles:

- a) Porosidade:

Objetivo: Induzir porosidades deliberadas na peça.

Procedimento Básico para Indução: Inserção intencional de pequenas quantidades de ar na zona de fusão durante o processo de soldagem. Isso pode ser realizado interrompendo temporariamente a vazão do gás de proteção ou promovendo a circulação de ar redor da área de soldagem.

- b) Escorramento:

Objetivo: Promover o escorramento de material em regiões determinadas da camada de deposição.

Procedimento Básico para Indução: Aumentar a taxa de deposição de arame em uma região específica da peça, mantendo a taxa de deposição normal nas demais regiões. Isso pode ser alcançado aumentando a velocidade de alimentação do arame e diminuindo a velocidade de deposição.

A inclusão de escoria e falta de fusão entre camadas, defeitos citados de forma recorrente na literatura, não foram verificados nos testes iniciais, por isso não foram alvo do presente estudo. A geometria simples adotada e o modo sinérgico da fonte, colocam-se com razões para a dificuldade em reproduzi-los de maneira intencional.

Os ensaios, para a identificação e caracterização dos defeitos, são a avaliação visual, avaliação geométrica e a radiografia, estes estão propostos em conformidade com a norma AWS-D20.1, que trata da especificação para fabricação de componentes metálicos usando manufatura aditiva e apresenta, na Cláusula 8, os requisitos de inspeção, teste e aceitação dos componentes produzidos.

- Construção do Roteiro de Trabalho

Para facilitar o rastreamento, identificações e cruzamento das informações criou-se um padrão simples de nome para as peças principais produzidas (peças cujos dados serão utilizados nos algoritmos de aprendizagem). O padrão adotado, mostrado na Fig. 3.13, contém duas letras e dois números, a primeira letra é relativa ao material do arame depositado, conforme Tab. 3.02, podendo ser “C” para Aço Carbono (ER70S-6) e “I” para Aço Inox (ER316 LSi), a segunda letra indica a trajetória de deposição, conforme Tab. 3.03, podendo ser “F” para parede fina feita com passe único, “M” para parede média utilizando tecimento com 5 mm de amplitude de oscilação e “G” para parede grossa obtida com a estratégica de cordões paralelos, sendo usado quatros cordões com distância de 4,5 mm. Os dois números são para indicar a sequência que as peças foram produzidas.

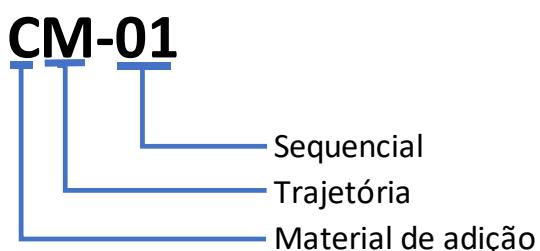


Figura 3.13 – Padrão de nomenclatura das peças principais.

Tabela 3.02 – Padronização de nomenclatura, primeira letra.

MATERIAL DE ADIÇÃO				
Índice	Liga Metálica	Arame Eletrodo	Norma Referência	Diâmetro Nominal (mm)
C	Aço Carbono	ER70S-6	AWS A5.18	1,2
I	Aço Inox	ER316 LSi	AWS A5.9	1,2

Tabela 3.03 – Padronização de nomenclatura, segunda letra.

TRAJETÓRIA	
Índice	Trajetória
F	Parede Fina (Passe Único)
M	Parede Média (Tecimento)
G	Parede Grossa (Cordões Paralelos)

No intuito de auxiliar o processo, diminuir erros de operações e registrar a produção das peças principais criou-se tabelas e checklists. Na Tab. 3.04 é registrado os parâmetros iniciais de deposição que foram definidos após os testes preliminares, também há campos para informação dos valores de calibração da fonte, das coordenadas da peça em relação a mesa cartesiana e a configuração de quadros da câmera térmica.

A Tab. 3.05 contém o principal checklist de preparação, o qual contém as etapas fundamentais para a deposição das peças, tem-se itens relativos ao substrato, sensores, mesa de controle, sistema de aquisição, câmera térmica, água para resfriamento, gás de proteção, fonte de soldagem, movimentação dos motores, parâmetros, posicionamento, habilitação do arco e integração dos sistemas. Ao todo são 64 itens a serem verificados.

Tabela 3.04 – Parametrização.

Parâmetros Iniciais	Valor Base
Velocidade de alimentação [m/min]:	5
Velocidade de deposição [mm/min]:	450
Vazão de Gás [l/min]:	15
DBCP [mm]:	21
Correção arco:	4%
Gás de Proteção:	Ar + 2% CO ₂

Calibração da fonte	Valor
R [mOhm]	
L [uH]	

Zero Peça	Valor
X [mm]	
Y [mm]	
Z [mm]	

Câmera Térmica	Valor
Quadros Camada Simples	

Tabela 3.05 – Checklist de Preparação.

Item	Descrição	Status
1	Posicionar o Substrato	
2	Fixar o Substrato	
3	Energizar Mesa de Apoio	
4	Conferir ligação/montagem sensor de tensão	
5	Conferir ligação/montagem sensor de corrente	
6	Conferir ligação/montagem sensor de vazão	
7	Conferir ligação/montagem sensor de velocidade de alimentação	
8	Conferir ligação/montagem sensor de posição	
9	Conferir ligação/montagem sensor de intensidade luminosa	
10	Conferir ligação/montagem sensor de microfone	
11	Ligar Painel da Mesa	
12	Conferir chaves no painel: Chave Geral Ligada e Arco Desligado	
13	Ligar Lattepanda (Computador de comando da mesa)	
14	Abrir Mach3	
15	Testar Movimentação dos Motores	
16	Ligar Sistema de Aquisição	
17	Conferir Carga da Bateria	
18	Ligar NI USB6341	
19	Conectar NI USB6341 com Notebook de Aquisição	
20	Montar Notebook da Aquisição	
21	Ligar Notebook da Aquisição	
22	Abrir Sistema de Monitoramento	
23	Preencher dados da impressão	
24	Montar Câmera Térmica	
25	Ligar Notebook da Câmera Térmica	
26	Abrir Programa da Câmera Térmica	
27	Configurar disparo e tempo de aquisição da câmera	
28	Testar Câmera Térmica	
29	Alinhar Câmera Térmica	
30	Alinhar Microfone	
31	Ligar Microfone	
32	Alinhar Sensor de Intensidade Luminosa	

33	Iniciar Aquisição	
34	Testar Sistemas de Aquisição/Monitoramento/Câmera Térmica	
35	Conferir Arame	
36	Ligar tomada da fonte de soldagem	
37	Conectar entrada de Gás de Proteção	
38	Conectar entrada de água	
39	Conferir saída de água	
40	Conferir registros de água	
41	Ligar Fonte de Soldagem	
42	Abrir Cilindro de Gás de Proteção	
43	Conferir Gás de Proteção	
44	Conferir Calibração da Fonte	
45	Testar Refrigeração da Fonte	
46	Conferir estado do bico	
47	Testar Gás de Proteção	
48	Testar Alimentação de Arame	
49	Selecionar o Jog na RCU	
50	Conferir Parâmetros da Fonte de Soldagem	
51	Testar integração dos sistemas	
52	Mover Tocha para o Home	
53	Mover Tocha para o Zero Peça	
54	Ajustar DBCP	
55	Registrar posição do Zero Peça em relação ao Home	
56	Abrir Código G da Peça no Mach3	
57	Testar Movimentação com Código	
58	Reposicionar a Tocha no Zero Peça	
59	Ajustar nível da água	
60	Conferir arquivo de dados	
61	Reiniciar Sistema de Monitoramento	
62	Conectar disparo da câmera térmica	
63	Habilitar Arco	
64	Executar o código G	

A Tab. 3.06 é uma ficha de controle experimental para monitorar os parâmetros técnicos da deposição e as condições de limpeza, posição do código, temperatura de interpasse e registro fotográfico. Ao final de cada ciclo de deposição, o preenchimento dessa tabela permite

correlacionar eventuais defeitos aparentes e/ou variações geométricas dos cordões com as condições registradas:

- a) Camada: representa as camadas sucessivas de material depositado. A cor verde na camada 1 indica que esta é a camada atual a ser preenchida, ao de cada preenchimento o destaque muda para a camada seguinte.
- b) Parâmetros: Espaço destinado ao registro das variáveis do processo empregadas em cada camada (como velocidade de alimentação do arame, velocidade de deposição e vazão do gás de proteção).
- c) Ocorrências: Campo destinados a anotação de anomalias, desvios e falhas observadas durante a deposição e após inspeção visual ao término da camada.
- d) Foto 0, Foto 1, Foto 2 e Foto 3: Documentação visual de cada camada, a “Foto 0” registra o sistema de monitoramento, onde temos a informação da camada atual , a “Foto 1” registra a vista frontal da peça, a “Foto 2” é destinada a vista em perspectiva e a “Foto 3” é a vista superior.
- e) Linha do Código: Refere-se à linha específica do código G de início da camada, essa informação é uma segurança em caso de eventuais problemas que demandem o reinício do sistema de controle.
- f) Nível da água: Campo destinado à informação sobre o nível da água do sistema de resfriamento ativo (RAQI).
- g) Escova: Indica se a superfície foi escovada (limpeza mecânica) antes da deposição da camada seguinte.
- h) Z: Indica o valor relativo à altura atual da peça.
- i) Corte do Arame: Campo designado para indicação do corte da extremidade do arame ao final da deposição, procedimento que visa facilitar a abertura do arco na camada subsequente.
- j) DBCP: Registro do ajuste da Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP).
- k) Temperatura de Interpasse: A temperatura da peça antes do início da deposição da camada seguinte.

A Tab. 3.07 é um Mapa de Ocorrências, onde as camadas foram dívidas em regiões representada pelas cores, a ideia é facilitar o registro de ocorrências durante a deposição e a inspeção visual da camada. Por exemplo, verificou-se a presença de porosidade numa região quase central, porém mais à direita da camada cinco, deve-se com base na codificação de ocorrência mostrada na Tab. 3.08, indicar na linha cinco e colunas em “Laranja” do Mapa de Ocorrências, a sigla PO (código para porosidade).

Tabela 3.06 – Tabela de Controle Experimental.

Código da Peça: XX-XX

Data: XX/XX/XX

Camada	Parâmetros	Ocorrências				Foto 0	Foto 1	Foto 2	Foto 3	Linha do Código	Nível da Água	Escova	Z	Corte do Arame	DBCP	Temperatura de Interpasse
10																
9																
8																
7																
6																
5																
4																
3																
2																
1																

Tabela 3.07 – Mapa de Ocorrências.

Código da Peça: XX-XX

Data: XX/XX/XX

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10																				
9																				
8																				
7																				
6																				
5																				
4																				
3																				
2																				
1																				

Tabela 3.08 – Tabela de Ocorrências

Índice	Ocorrência
ES	Escorrimento
FE	Falta de Preenchimento
GE	Defeitos Gerais
PO	Porosidade
SD	Sem Defeitos
IN	Instabilidade

3.5 Montagem, Instalação e Integração dos Sistemas.

A célula de manufatura instrumentada e preparada com as melhorias propostas é mostrada na Fig. 3.14. No canto inferior direito observa-se o novo painel de comando. Os atuadores lineares dos eixos Z (1) e X (2) são os motores *Easy Servo*, dotados de encoders incrementais acoplados; seus sinais serão adquiridos para sincronizar, as variáveis de processo com a posição cartesiana, viabilizando o mapeamento espaço-temporal das medições. Os itens três e quatro correspondem, respectivamente, a sensores de fim de curso

e a sensores de referência (“*home*”), empregados tanto para limitação da movimentação quanto para a definição reproduzível dos zeros da peça e da mesa. Observa-se, adicionalmente, a presença do tanque destinado ao gerenciamento térmico do processo.

O item cinco refere-se ao encoder dedicado ao registro da velocidade de alimentação do arame, o item seis é um fotossensor de intensidade luminosa acoplado à tocha e encapsulado, protegido por filtro de soldagem tonalidade 8, a fim de evitar saturação e ampliar a faixa dinâmica útil. O sete consiste em um microfone para aquisição do sinal acústico do processo, já o oito é a câmera termográfica utilizada para o monitoramento da temperatura de interpasso. Embora não visíveis na imagem, também foram integrados sensores de corrente (baseados em efeito Hall), medição de tensão de soldagem por cabos dedicados e um sensor de vazão do gás de proteção. Toda a instrumentação encontra-se devidamente identificada e roteada ao sistema de aquisição com cabos blindados, Fig. 3.15, assegurando rastreabilidade metrológica e mitigando riscos de conexões equivocadas.

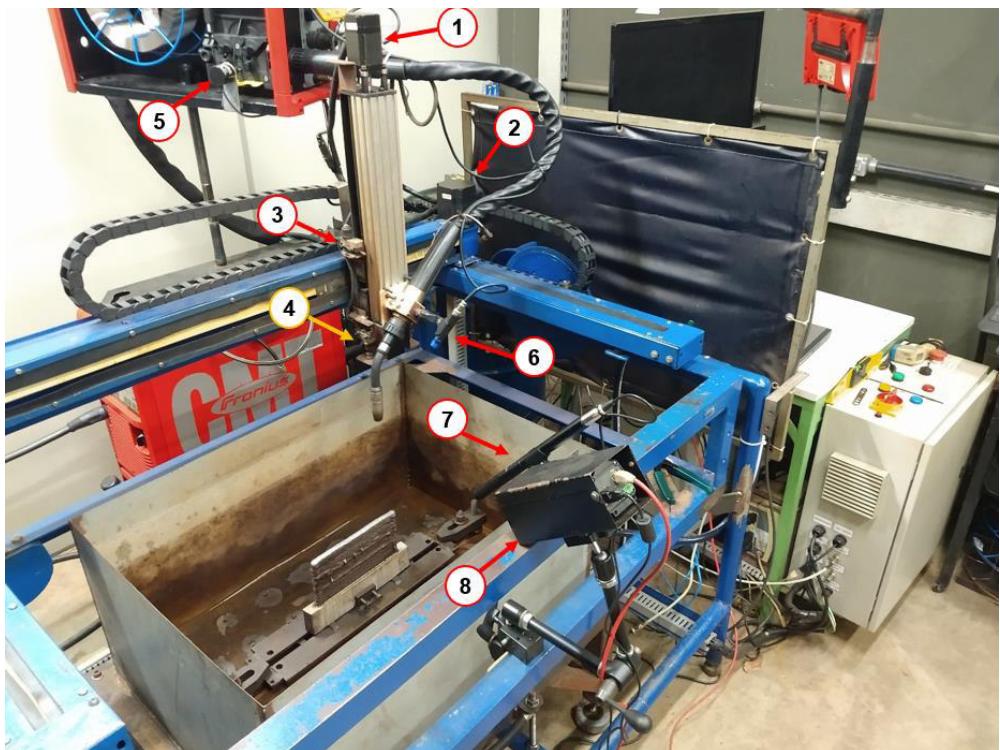


Figura 3.14 – Célula de Manufatura Instrumentada



Figura 3.15 – Cabos Blindados

A vista superior da célula de manufatura, mostrada na Fig. 3.16, evidencia a distribuição espacial dos instrumentos e o arranjo da instrumentação, incluindo o sensor de corrente, em destaque, instalado no cabo negativo da fonte de soldagem. A Fig. 3.17 exibe a vista completa da estação trabalho. Na porção inferior esquerda, destaca-se o novo painel montado; logo acima, encontram-se os sistemas de supervisão, compostos por computadores portáteis dedicados às interfaces de visualização do sistema de monitoramento de processo, ao software da câmera termográfica e ao console de comando da mesa.

A Fig. 3.18 destaca a operação da célula de manufatura e o núcleo de supervisão do processo. Na porção superior, observa-se a interface de movimentação e comando da célula, imediatamente abaixo, encontra-se a aplicação de monitoramento em tempo real, responsável pela aquisição e pelo registro contínuo das variáveis de processo.



Figura 3.16 – Vista superior da Célula de Manufatura

Na parte inferior, dois computadores portáteis desempenham funções dedicadas: à esquerda, o terminal da câmera termográfica, utilizado para a supervisão e o registro da temperatura de interpasso; à direita, a estação do sistema de monitoramento, encarregada da

aquisição, armazenamento e visualização das variáveis, bem como do preenchimento dos checklists operacionais e de acompanhamento das deposições. No canto superior esquerdo, destaca-se o console de comando da fonte de soldagem (RCU). A centralização física e lógica desses elementos de comando e supervisão nessa região visa reduzir o tempo de *setup*, padronizar procedimentos, mitigar erros operacionais e fortalecer a rastreabilidade dos dados.



Figura 3.17 – Vista frontal da Célula de Manufatura

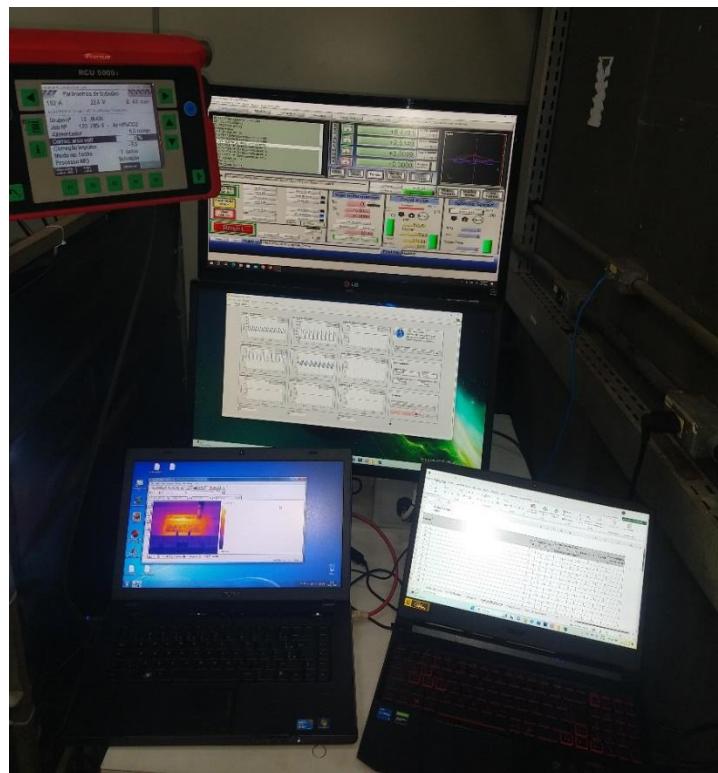


Figura 3.18 – Estação de Supervisão

3.6 Fabricação das peças e Aquisição de Dados

A etapa de fabricação das amostras para aquisição de dados constituiu um marco metodológico do projeto e será apresentada em detalhe no capítulo de Resultados. Em resumo, o plano experimental foi executado em três fases:

Fase piloto: realizaram-se três peças-teste com o objetivo de avaliar estratégias de deposição, trajetórias e a indução controlada de defeitos, estabelecendo parâmetros operacionais e procedimentos para as etapas subsequentes.

Fase de refinamento de parâmetros: em duas chapas foram depositadas 66 paredes (33 em aço carbono e 33 em aço inoxidável), cada uma com seis camadas sobrepostas, utilizando as mesmas trajetórias, o mesmo material e o mesmo lote dos arames previstos para as peças principais; uma chapa recebeu deposição do arame ER70S-6 (aço carbono) e a outra ER316 LSi (aço inoxidável), o objetivo foi refinar os parâmetros, testar a aquisição de dados, sistema de monitoramento e roteiro de trabalho.

Fase principal: foram fabricadas as peças cujos dados adquiridos são destinados a alimentar os algoritmos de detecção e classificação de anomalias, totalizando 24 amostras, sendo 12 por material. Para cada liga, produziram-se quatro peças com trajetória de passe único, quatro com trajetória de tecimento (amplitude de 5 mm) e quatro com trajetória de cordões paralelos (distância de 4,5 mm entre cordões). Esse roteiro, com controle de consumíveis e variação sistemática de trajetórias, visa garantir reprodutibilidade, cobrir diferentes regimes de deposição e gerar um conjunto de dados adequados para treinamento e validação dos modelos subsequentes.

3.7 Algoritmo de Aprendizagem

A linguagem de programação Python e o Google Colaboratory (Google Colab) foram escolhidos como ferramenta e ambiente de desenvolvimento das três próximas etapas de execução deste projeto: Algoritmo de Aprendizagem, Identificação de Anomalias e Clusterização e Algoritmo de Validação. A principal razão para se optar pelo Colab é que se trata de uma plataforma em nuvem, que dispensa a necessidade de infraestrutura local robusta, pois oferece recursos de processamento avançados, como unidades de processamento gráfico (GPU) e unidades de processamento tensorial (TPU). Ademais, é compatível com bibliotecas e frameworks utilizados em aplicações de inteligência artificial, como TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn, Numpy e Pandas. Além disso, conta com integração nativa com o Google Drive, facilitando o armazenamento de dados e a organização do projeto.

Esses recursos são fundamentais para trabalhos que envolvem grandes volumes de dados e algoritmos de aprendizado, por proporcionar desempenho adequado para experimentos de alta exigência computacional (Bisong, 2019).

O desenvolvimento do Algoritmo de Aprendizagem foi estruturado em dez etapas principais, cada qual destinada a funções e tarefas específicas de preparação, treinamento e validação do modelo de predição baseado em rede neural do tipo Autoencoder LSTM, o fluxo de trabalho desta etapa de execução do projeto é mostrado na Fig. 3.19.

- Início e Parametrização

A etapa inicial consiste na configuração dos parâmetros globais que controlam a execução do algoritmo. São definidos os caminhos de entrada e saída de arquivos, os nomes atribuídos aos modelos, os parâmetros da rede neural, como o tamanho da janela temporal, o lote para treinamento e número de épocas, além da lista de variáveis utilizadas no treinamento do modelo. O resultado dessa célula é a disponibilização das variáveis essenciais para as fases seguintes.

- Carregamento de Dados Brutos

Nesta fase, efetua-se a leitura do arquivo de dados da deposição da peça de referência, obtidos à 25 kS/s. Nesta etapa do algoritmo, é possível reduzir a taxa de amostragem dos dados, levando em consideração as demandas computacionais e as necessidades de armazenamento. É criado um *Dataframe Pandas* (df) contendo os dados brutos da peça.

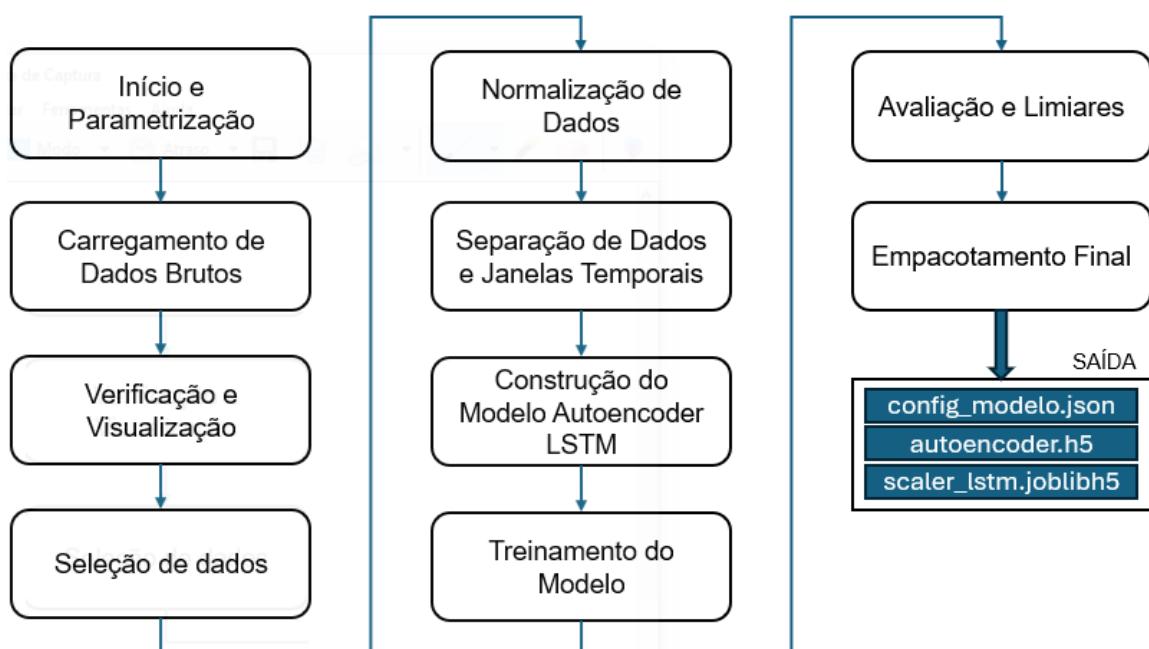


Figura 3.19 – Fluxograma do Algoritmo de Aprendizagem.

- Verificação e Visualização

Após o carregamento, são geradas representações gráficas das séries temporais das variáveis de processo. Esta etapa possibilita a manipulação, visualização e verificação preliminar da consistência dos dados e a identificação de possíveis anomalias visuais. É realizado uma verificação na integridade dos dados, onde é checado a presença de valores “NaN” (Not a Number), valores “infinitos” e é apresentado ao usuário uma tabela com máximos, mínimos, medias e desvio padrão.

- Seleção de dados

Após a visualização dos dados, realiza-se a seleção do subconjunto de dados que representam o estado de “operação normal” do processo, é escolhida uma camada realizada com os parâmetros considerados ideais (definidos nos testes), que os dados não apresentam anomalias visíveis (ou com o menor número possível) e que a inspeção visual, feita no momento da deposição, não tenha identificado nenhum defeito, pode-se usar também a imagem da radiografia. A saída desta etapa é um *Dataframe* (df_selection) com dados de operação normal.

- Normalização de Dados

Com os dados selecionado, procede-se à normalização das variáveis de processo usando o *MinMaxScaler*, basicamente essa ferramenta aprende os valores mínimos e máximos de cada variável e os coloca na escala de 0 a 1. A normalização é uma prática amplamente adotada em redes neurais, favorece a convergência do treinamento e reduz o risco da dominância de variáveis de maior magnitude (LECUN et al. 2015).

- Separação dos Dados e Janelas Temporais

Esta etapa é responsável por separar os dados em conjuntos de treinamento e validação, que serão usados para obtenção do modelo da rede neural, e pela criação das janelas temporais de acordo com os parâmetros já definidos.

- Construção do Modelo Autoencoder LSTM

Através a biblioteca Tensorflow/Keras é definida a arquitetura da rede neural do tipo Autoencoder com camadas LSTM. A estrutura é dividida em duas partes, um codificador (encoder), responsável por comprimir a informação temporal, e um decodificador (decoder), encarregado da reconstrução dos sinais. A compilação do modelo é realizada com o otimizador Adam e a função de perda *Mean Absolute Error* (mae).

- Treinamento do Modelo

Agora “ensinamos” ao modelo qual o comportamento normal do processo. As janelas de dados criadas com o *tf.data.Dataset* alimentam o modelo de forma eficiente para otimizar o uso da memória e a função *model.fit()* executa o processo de treinamento por um número definido anteriormente de épocas. Usa-se *callbacks* para salvar o melhor modelo e parar o

treinamento antecipadamente se não melhora ao longo do treinamento. Assim tem-se o modelo autoencoder com os pesos treinados.

- Avaliação do modelo e Cálculo de Limiares

Usa-se o modelo treinado para calcular o erro de reconstrução (`val_mae_loss`) do conjunto dos dados de validação, a partir do qual é apresentado um gráfico de distribuição e estabelecido dois tipos de limiares de anomalia: Limiar de Amplitude do Erro de Reconstrução e Limiar de Volatilidade, obtido a partir do cálculo do desvio padrão de janelas moveis do erro. Esses limiares são parâmetros críticos para a detecção de anomalias no processo, para sua determinação pode-se recorrer a estratégias como a utilização de percentis elevado ou da regra dos três sigmas.

- Empacotamento Final

Na etapa final, todos os artefatos treinados e configurados são salvos em arquivos, criando um “Pacote de Análise” reutilizável. São incluídos os modelos treinados em formato `.h5` (autoencoder e encoder), o `scaler` em formato `.joblib` e o dicionário de configuração em `.json`, contendo informações dos caminhos dos arquivos, listas de variáveis utilizadas e limiares calculados. Este pacote é armazenado em um diretório específico, pronto para ser utilizado pelo Algoritmo de Identificação de Anomalias e Clusterização.

O Algoritmo de Aprendizagem conta com dois aspectos fundamentais: a Estrutura do Autoencoder LSTM e os Limiares de Amplitude e Volatilidade, que serão explicados a seguir. A configuração do Autoencoder LSTM, mostrada na Fig. 3.20, é composta por quatro componentes:

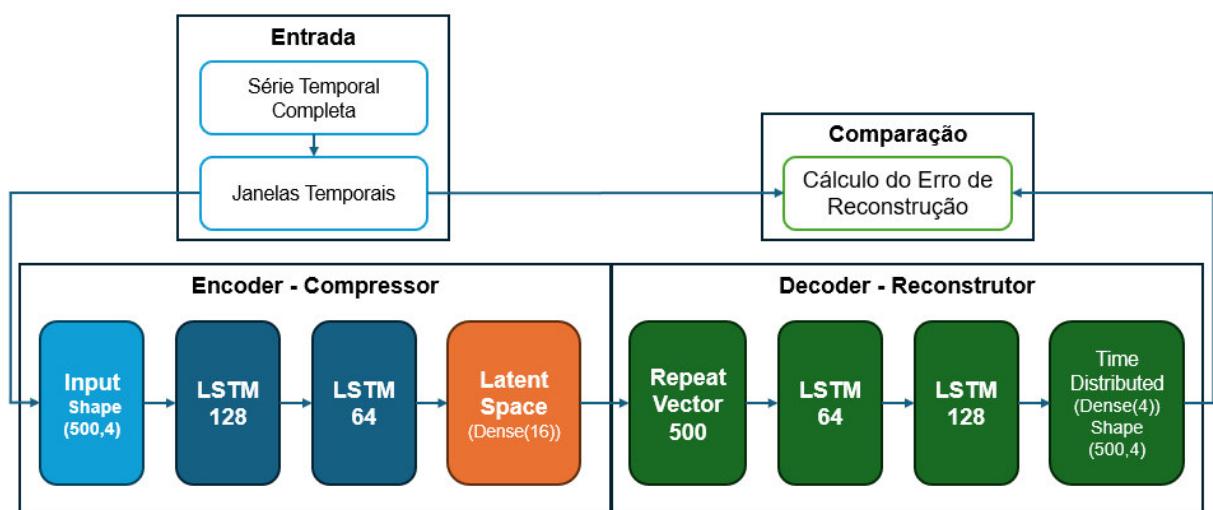


Figura 3.20 – Autoencoder LSTM.

- Entrada: Janelamento dos Dados Temporais

Visa converter a extensa série temporal contínua em amostras de tamanho fixo, chamadas de janelas temporais. Cada janela é representada por uma matriz de dimensões (tamanho_janela, numero_variaveis). Por exemplo, uma matriz de tamanho (500,4), corresponde a 500 momentos no tempo de cada uma das quatro variáveis. Essa estratégia visa captar dependências temporais locais e preservar a viabilidade computacional do treinamento.

- Encoder: Compressão de Informação

O encoder tem a função de transformar sequências temporais complexas em uma representação densa e com menor dimensão, chamada de espaço latente. A primeira camada LSTM (128 unidades) lê a janela de entrada de forma sequencial, identificando relações temporais entre os pontos, com o parâmetro *return_sequences=True*, uma nova sequência de mesmo comprimento (500 passos) é gerada, mas agora cada passo é representado por um vetor de 128 características do padrão aprendido. A segunda camada LSTM (64 unidades) recebe a sequência da camada anterior e com o parâmetro *return_sequences=False*, ela processa a sequência inteira e gera único vetor de 64 características que representam o padrão aprendido de toda a janela. O espaço latente, uma camada Dense pega o vetor da camada anterior e o comprime ainda mais para a dimensão final (*encoding_dim=16*). Este vetor é a representação essencial e comprimida da janela original, preservando as informações mais relevantes para caracterizar o comportamento normal.

- Decoder: Reconstrução da Informação

O decoder tem a função de pegar a informação comprimida do espaço latente e tentar reconstruir a janela de entrada da maneira mais precisa possível. O RepeatVector pega o vetor do espaço latente e o multiplica até o tamanho da janela, gerando uma sequência de 500 passos iguais que serve como base para a reconstrução. As camadas LSTM (64 e 128 unidades) em ordem inversa ao encoder, usam a informação repetida para recuperar as dinâmicas temporais originais, o parâmetro *return_sequences=True* é essencial para gerar a sequência completa. A camada TimeDistributed (Dense) aplica uma pequena camada Dense com número de neurônios igual ao *numero_variaveis* (quatro) em cada um dos 500 passos, sua função é pegar as 128 características da última camada LSTM e projetá-los para as quatro variáveis originais do processo, obtendo uma sequência reconstruída.

- Comparação: Erro de Reconstrução

O objetivo é medir o desempenho do modelo, a janela de entrada original é comparada com a janela reconstruída e a diferença entre elas é o Erro de Reconstrução, durante o treinamento, os pesos da rede são ajustados para minimizar esse erro.

O modelo Autoencoder LSTM proposto, quando treinado majoritariamente com dados normais, apresenta maior dificuldade em reconstruir padrões desconhecidos. Assim ao avaliar novos dados, um erro de reconstrução baixo indica comportamento normal do processo, enquanto um erro alto sugere a ocorrência de anomalias.

Neste contexto, faz-se a importância da definição dos limiares que buscam determinar valores de referência do erro de reconstrução, para que o comportamento do processo seja considerado normal ou não. O Limiar de Amplitude é um detector de eventos de grande magnitude, são picos e regiões do erro de reconstrução que apresentam altos valores, representando um desvio do comportamento normal, ao analisar novos dados, qualquer ponto cujo erro de reconstrução ultrapasse o limiar (valor de referência pré-definido) é classificado como uma Anomalia de Amplitude. O Limiar de Volatilidade é um detector de “tremor”, busca identificar regiões onde o erro de reconstrução, mesmo que abaixo do limiar de amplitude, esteja oscilando muito, ele não se “importa” com o valor absoluto do erro, e sim com a sua variação em uma pequena janela de tempo, ao analisar novos dados, qualquer ponto cujo desvio padrão móvel do erro ultrapasse o limiar é considerado como uma Anomalia de Volatilidade.

3.8 Notebook de Análise/Inferência - Identificação de Anomalias e Clusterização

O Notebook de Análise/Inferência é o ambiente operacional do projeto, responsável por aplicar, de forma reproduzível, os modelos e pacotes treinamento a dados de novas peças para detectar, classificar e visualizar regiões de anomalias. Sua topologia é mostrada na Fig. 3.21.

- Carregamento de Dados e Modelos

O objetivo dessa célula é preparar o ambiente para a análise de uma nova peça. A partir do ID_DA_PECA (código da Fig. 3.63), o sistema cria a estrutura de diretórios isolada (artefatos, modelos e resultados) e carrega os dados brutos, quando disponível, a planilha de temperatura de interpasso e o Pacote de Análise completo (produto do *notebook* anterior), assim torna-se disponível o modelo de autoencoder, o scaler e o limiares de detecção de anomalias.

- Pré-cálculo das características (Estatísticas e Wavelet)

Realiza os cálculos mais pesados para determinar as características uma única vez para toda peça, usa-se janelas deslizantes camada a camada para evitar contaminação entre regimes de processo. A célula estatística calcula o conjunto de oito métricas (média, desvio-

padrão, iqr, assimetria, curtose, valor RMS e taxa de cruzamentos) e a célula wavelet calcula a energia e coeficientes em bandas através da transformada wavelet, os resultados são salvos em dois arquivos, com alinhamento temporal com o sinal original, para uso posterior na fase de clusterização.

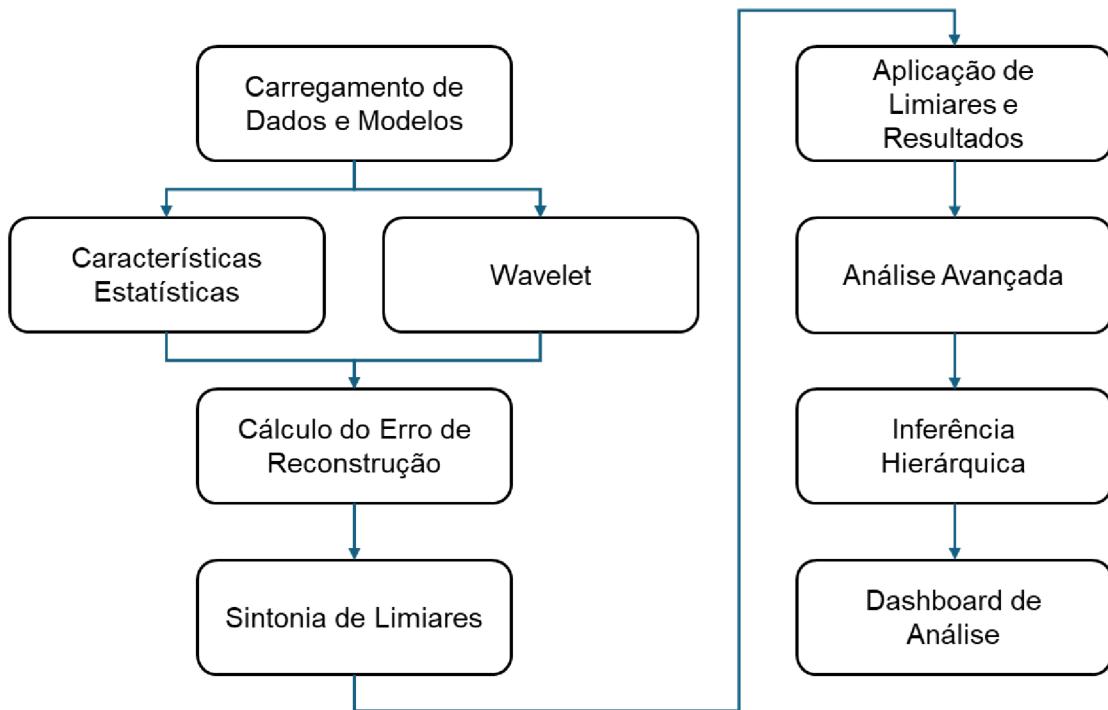


Figura 3.21 – Topologia do Notebook de Análise/Inferência.

- Cálculo do Erro de Reconstrução

Esta é a etapa de predição da rede neural, o pipeline busca os dados brutos carregados anteriormente, aplica o scaler e o padrão de janelamento usando na etapa de treinamento, percorre os dados camada a camada aplicando o autoencoder e calculando o Erro de Reconstrução, além de métricas do erro, como desvio padrão móvel, médias móveis curtas e longas (suporte para aplicação de limiares de anomalia). Esta célula não aplica nenhum limiar, apenas calcula os “sinais de erro”. Um arquivo com os erros calculados é salvo.

- Painel Interativo de Sintonia de Limiares

É uma ferramenta visual, rápida e interativa para realização da sintonia fina dos limiares. A célula carrega o arquivo de erros pré-calculados e cria um painel de controle responsivo com *widgets* para a calibração dos limiares de Amplitude e Volatilidade, o usuário seleciona a camada ou camadas de interesse, logo o sistema plota o erro de reconstrução destacando as regiões que seriam classificadas com anômalas com base nos valores correntes dos controles, o gráfico é atualizado sempre que os valores são ajustados, até que se encontre o

resultado adequado ao conjunto de dados em questão. Os valores finais dos limiares ficam disponíveis para aplicação na célula subsequente.

- Aplicação Final de Limiares e Geração de Resultados

Aplica os limiares calibrados na célula anterior à toda a peça para gerar a classificação final de anomalias. Com o arquivo de erros calculados e os valores dos limiares, o sistema verifica as condições de amplitude e volatilidade, o resultado é expresso em duas colunas: *is_anomaly* (sim ou não) e *anomaly_type* (tipo da anomalia), que são adicionadas ao *Dataframe* completo e criado o arquivo *df_final_analise_lote.parquet* que o principal input para todas as fases posteriores (clusterização, inferência e dashboard de visualização). Após a aplicação dos limiares pode-se gerar pares de gráficos dos erros de reconstrução e do desvio padrão do erro para visualização da detecção de regiões anômalas de todas as camadas.

- Análise Avançada

Trata-se de um pipeline interativo e hierárquico, direcionado à análise exploratória profunda para descobrir e salvar padrões de cluster. Esta célula integra os resultados da detecção de anomalia com as características pré-calculadas das variáveis de processo. Permite ao usuário filtrar por tipo de anomalia (*anomaly_type*) e escolher o grupo de características a ser usado (entre estatísticas, *wavelet* e híbrido), após realiza uma normalização e oferece a possibilidade de usar o PCA para diminuir a dimensão. A clusterização hierárquica pode ser realizada em dois níveis, primária (cluster) e secundária (subcluster), em ambos pode-se usar os métodos KMeans e HDBScan. Ao final de cada análise bem-sucedida, o usuário tem a opção de salvar o Pacote de Clusterização (modelo de cluster, scaler, PCA e o .json de configuração).

- Pipeline de Inferência Hierárquica

Destinada à aplicação do padrão de clusterização em novas peças, o sistema carrega os arquivos de características das variáveis e detecção de anomalia, mapeia automaticamente o Pacote de Clusterização salvo, aplica os modelos primários e secundários, respeitando a hierarquia correta, usando a mesma preparação das características (seleção de anomalias, tipo de características, normalização, PCA). Um arquivo com as anomalias clusterizadas da nova peça, o resultado da inferência, é salvo para uso posterior.

- Dashboard de Análise Unificado

Esta é uma ferramenta de visualização dos produtos da Análise Avançada e do Pipeline de Inferência Hierárquica, o usuário escolhe qual resultado deseja explorar, filtra os cluster e subcluster e sob demanda, gera as visualizações: mapa 2D (exemplo X vs. Z ou camada) para inspeção simplificada (comparação com raio-x), mapa 3D interativo para correlação das regiões de anomalias com a geometria da peça e perfil radar com escala absoluta para comparação de perfil de clusters. Os gráficos são destinados a análise técnica e geração de

relatórios auxiliares ao procedimento de inspeção. Esta etapa é responsável por relacionar à detecção de anomalias e previsão de defeitos com a geometria da peça.

3.9 Notebook de Validação com Raio-X

Este notebook constitui um pipeline de visão computacional que busca validar o resultado do sistema de detecção de anomalias através da sobreposição do modelo de previsão com a imagem do raio-X, contendo os defeitos reais. A topologia desta etapa é mostrada na Fig. 3.22.

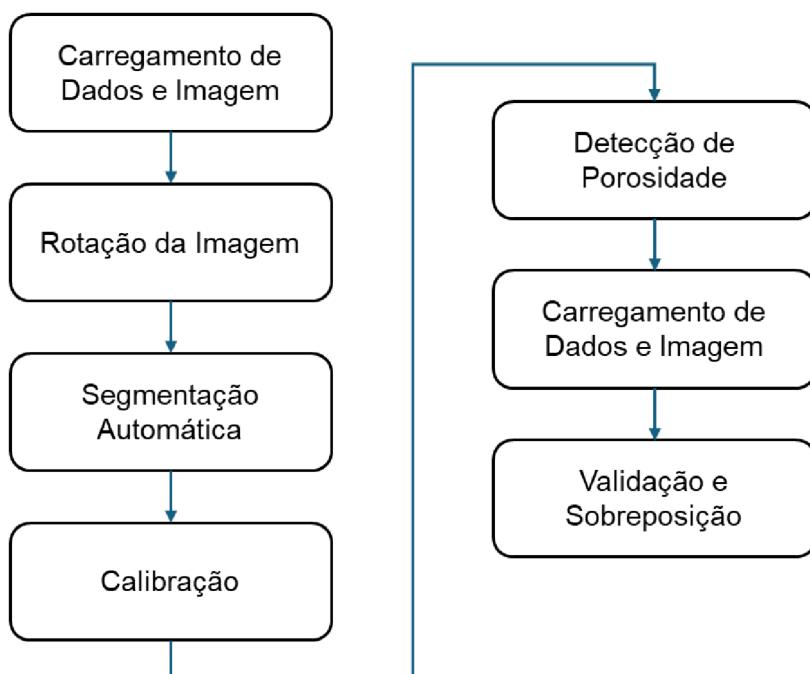


Figura 3.22 – Topologia do Notebook de Validação com Raio-X.

- Carregamento dos Dados e Imagem
- Está célula centraliza o carregamento dos insumos necessário para validação, primeiro carrega a imagem radiográfica correspondente a peça alvo e o arquivo com o resultado da análise de anomalias do processo, as coordenadas espaciais (X, Y e Z) e atributos da clusterização produzidos no Notebook de Análise/Inferência. As dimensões físicas da peça em milímetros (largura e altura) devem informadas para o processo de calibração.

- Rotação Interativa da Imagem
- Apresenta um painel interativo com controle deslizante para corrigir o alinhamento rotacional da peça na imagem do raio-X.

- Segmentação Automática da Peça

O objetivo dessa etapa é isolar digitalmente a região da peça, separando-a do fundo.

Para isso, é aplicado uma sequência de técnicas de visão computacional da biblioteca OpenCV: a imagem é convertida para escala de cinza e desfocada para reduzir ruído, então a limiarização de Otsu é usada para separar a peça (geralmente mais clara) do fundo (geralmente mais escuro) e o maior contorno encontrado é identificado como a peça, tudo que não é peça é colocado na cor preta. Assim, conseguimos gerar o retângulo delimitador do contorno da peça.

- Calibração da Imagem

A calibração busca estabelecer a relação entre a escala da imagem (em pixels) e a escala real (em milímetros), a célula utiliza as dimensões do retângulo delimitador da peça e as dimensões reais para calcular os fatores de escala em X e Z.

- Painel de Controle para Detecção de Porosidade

Este é um painel interativo para o usuário calibrar a detecção de porosidade na imagem do raio-x, ajustando os parâmetros de sensibilidade da limiarização adaptativa e os filtros de área e circularidade. A cada ajuste, o painel exibe o contorno das regiões candidatas a defeito, criando uma espécie de gabarito para avaliar a previsão do sistema de monitoramento e previsão de defeitos.

- Dashboard de Validação e Sobreposição

A etapa final, permite ao usuário selecionar quais clusters de anomalias deseja avaliar, assim o sistema converte, através dos parâmetros de calibração calculados anteriormente, as coordenadas (X, Z) dos pontos dos clusters (em milímetros) para as coordenadas da imagem (em pixels). Em seguida, é comparada as posições dos pontos de detecção com as regiões de defeitos reais do raio-x, considerando um raio de tolerância (para compensar as pequenas, mas inevitáveis, discrepâncias entre dois sistemas de medição). Por fim, é gerada uma imagem com a sobreposição dos pontos de previsão de anomalias sobre a imagem da peça segmentada, permitindo a avaliação da qualidade do modelo de previsão de anomalias e defeitos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Deposições preliminares

As deposições preliminares foram realizadas para testar a operação da célula de manufatura, a integração dos sistemas, as estratégias de deposição, as trajetórias e indução de defeitos, além da definição de parâmetros e criação de roteiro de trabalho. Os testes consistiram em deposições de vários cordões e camadas, a seguir são apresentados alguns desses.

Vale destacar que, antes da realização dos testes preliminares, o autor do presente projeto participou, em conjunto à equipe de técnicos e engenheiros do Laprosolda, da fabricação de peças destinadas à aplicação real na indústria petroquímica. Essa experiência prática proporcionou o conhecimento da configuração e operação dos equipamentos da célula de manufatura, assim como embasou a escolha dos parâmetros iniciais empregados nos ensaios experimentais.

Na Fig. 4.01 é mostrado um teste direcionado para validar as trajetórias, as técnicas de deposição e levantamento de parâmetros. Realizou-se várias deposições, com o arame ER70S-6, sobre uma chapa de aço carbono, utilizando cinco velocidades de alimentação (no intervalo de 5 m/min a 7 m/min e incremento de 0,5 m/min) e cinco trajetórias diferentes. A Tab. 4.01 contém os dados referentes a cada deposição, e nota-se que a variação entre passe único, tecimento e cordões paralelos, aliado as mudanças na velocidade de alimentação do arame, modificam consideravelmente a largura média (Lm) e altura média (Hm).

Nas deposições 1 a 5, o passe único resultou em cordões estreitos no intervalo de 7,17 mm a 9,25 mm, e altura média na faixa de 2,45 mm a 2,92. As deposições 6 a 10, realizadas com movimento oscilatório “curto”, passo de 5 mm na largura e 5 mm no comprimento, resultou em cordões mais largos, de 10,28 mm a 13,72 mm e com maior altura, 3,22 mm a 3,93 mm. Já em 11 a 15, aplicou o aumento na amplitude da oscilação, sendo 15 mm o passo

na largura e 5 mm no comprimento, o que ampliou substancialmente a largura média, 20,52 mm a 23,47 mm, enquanto a altura média ficou entre 3,73 mm e 4,27 mm.



Figura 4.01 – Teste preliminar em Aço Carbono de trajetória e parametrização.

As deposições 16 a 20 e 21 a 25 foram realizados com a estratégia de cordões paralelos à 5 mm de distância, sendo usado respectivamente três e cinco cordões. Com três cordões as larguras variaram entre 16,32 mm e 19,03 mm, já com cinco os valores ficaram entre 26,9 mm e 29,5, a altura média nessas deposições se mantiveram próximas de 3,3 mm a 3,8 mm. A deposição 26 foi feita para testar a sobreposição de camadas, sendo feita quatro camadas com a estratégia do tecimento de oscilação de 15 mm e passo 5 mm no comprimento.

Tabela 4.01 – Teste preliminar de trajetória e parametrização.

Deposição	Trajetória	V _{alim} [m/min]	V _{dep} [mm/min]	Gás [l/mim]	L _m [mm]	H _m [mm]
1	Passe único	5,0	450	17,5	7,17	2,45
2	Passe único	5,5	450	17,5	7,55	2,65
3	Passe único	6,0	450	17,5	7,87	2,73
4	Passe único	6,5	450	17,5	8,57	2,82
5	Passe único	7,0	450	17,5	9,25	2,92
6	Tecimento - 5 mm x 5 mm	5,0	450	17,5	10,28	3,22
7	Tecimento - 5 mm x 5 mm	5,5	450	17,5	11,67	3,28
8	Tecimento - 5 mm x 5 mm	6,0	450	17,5	12,60	3,48
9	Tecimento - 5 mm x 5 mm	6,5	450	17,5	13,47	3,72
10	Tecimento - 5 mm x 5 mm	7,0	450	17,5	13,72	3,93
11	Tecimento - 5 mm x 15 mm	5,0	450	17,5	20,52	3,97
12	Tecimento - 5 mm x 15 mm	5,5	450	17,5	21,93	3,98
13	Tecimento - 5 mm x 15 mm	6,0	450	17,5	22,68	3,73
14	Tecimento - 5 mm x 15 mm	6,5	450	17,5	23,20	3,88
15	Tecimento - 5 mm x 15 mm	7,0	450	17,5	23,47	4,27
16	3 Cordões Paralelos - 5 mm	5,0	450	17,5	16,32	3,40
17	3 Cordões Paralelos - 5 mm	5,5	450	17,5	17,68	3,60
18	3 Cordões Paralelos - 5 mm	6,0	450	17,5	18,17	3,82
19	3 Cordões Paralelos - 5 mm	6,5	450	17,5	18,45	4,15
20	3 Cordões Paralelos - 5 mm	7,0	450	17,5	19,03	4,33
21	5 Cordões Paralelos - 5 mm	5,0	450	17,5	26,90	3,30
22	5 Cordões Paralelos - 5 mm	5,5	450	17,5	28,10	3,48
23	5 Cordões Paralelos - 5 mm	6,0	450	17,5	27,85	3,73
24	5 Cordões Paralelos - 5 mm	6,5	450	17,5	29,50	3,40
25	5 Cordões Paralelos - 5 mm	7,0	450	17,5	29,20	3,82
26	4 camadas - Tecimento - 5 mm x 15 mm	5,5	450	17,5	30,53	13,57

A chapa, mostrada na Fig. 4.02, foi preenchida por deposições em Aço Inox, usando o arame ER316 LSi, para verificar as estratégias de deposição neste material. Na parte superior foram realizados cordões de 100 mm de comprimento em passes únicos, ao lado foi depositado um cordão de 200 mm de comprimento, usando o tecimento e mais ao centro e à direita tem-se deposições usando os cordões paralelos.



Figura 4.02 – Teste preliminar em Aço Inox para avaliação de trajetória e parametrização.

Outra série de deposições foram realizadas para testar a indução de defeitos, abaixo é apresentado uma sequência de registros de diferentes defeitos provocados:

- a) Na Fig. 4.03 é mostrado dois cordões que foram realizadas com tecimento, porém a indução foi feita apenas no cordão superior, que apresentou porosidade concentrada em uma região próxima ao centro, já o cordão inferior, realizado sem interferência, não apresentou porosidade visível. Além disso, os cordões não apresentam boa uniformidade lateral devido os parâmetros do tecimento.



Figura 4.03 – Indução de porosidade.

- b) As deposições mostradas na Fig. 4.04 indicam falta de preenchimento induzidas, as três impressões inferiores possuem pequenos defeitos na região central, nos cordões internos da camada. Já deposição superior apresentou uma grande descontinuidade interna, nota-se um grande “vazio” entre os cordões interno.



Figura 4.04 – Falta de preenchimento induzida.

- c) Na Fig. 4.05 são mostradas duas deposições, na parte inferior tem-se uma parede onde foram induzidos vários defeitos, verifica-se regiões com grande incidência de poros e no lado esquerdo a presença de escorramento. A outra deposição é um cordão onde é possível encontrar porosidade na região central e irregularidade geométrica.



Figura 4.05 – Escorramento e porosidade induzidos.

4.2 Deposições de Validação

Após a integração do sistema de monitoramento, da instrumentação e das interconexões com a célula de manufatura, realizou-se um ensaio de validação operacional por meio da deposição de duas paredes simples: um empregando a estratégia de tecimento e outro utilizando cordões paralelos. O objetivo foi verificar a integração, operação e testar a

interoperabilidade entre os subsistemas (aquisição, açãoamentos e monitoramento). Os resultados macroscópicos das deposições estão apresentados na Fig. 4.06. Em seguida, os dados de processo foram pré-processados e submetidos à etapa de visualização, cuja representação encontra-se na Fig. 4.07.



Figura 4.06 – Paredes depositadas para teste de integração

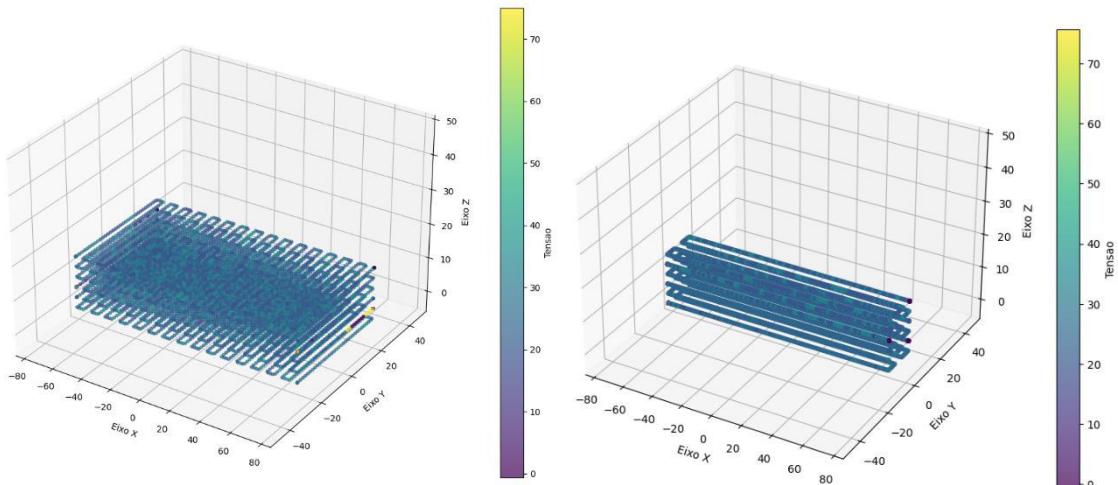


Figura 4.07 – Representação das paredes do teste de integração.

Para inspeção interna, efetuou-se um seccionamento único em cada parede, Fig. 4.08. Na parede depositada com cordões paralelos observou-se a presença alguns poros, na parede produzida com tecimento não foram identificadas descontinuidades na região avaliada. Ressalta-se que tais constatações referem-se às seções específicas analisadas, ou seja, na região de corte. Do ponto de vista funcional, o sistema de monitoramento apresentou o comportamento esperado, uma vez que, foi possível gerar a visualização digital tridimensional da peça, na qual a coloração de cada ponto está associada à magnitude da

tensão de arco, evidenciando a consistência da aquisição e o mapeamento espaço-temporal das variáveis de processo.



Figura 4.08 – Cortes nas paredes testes.

Após os ensaios iniciais, destinados a verificar a integração entre os sistemas de aquisição, comando e monitoramento, realizou-se o pré-teste mais abrangente até então, empregando a pré-forma previamente definida (200 mm de comprimento x 100 mm de altura). Adotou-se a estratégia de deposição por tecimento com amplitude de 5 mm, uma das trajetórias previstas para as peças principais, seguindo integralmente o roteiro experimental estabelecido, incluindo técnicas de indução controlada de instabilidades para geração de defeitos e a utilização do conjunto completo de procedimentos projetado para a fase principal. O material do arame foi aço carbono, tendo sido depositadas 51 camadas sucessivas até atingir a altura especificada na pré-forma.

O procedimento iniciou-se com a fixação do substrato (Fig. 4.09) e prosseguiu com a deposição camada a camada. A Fig. 4.10 ilustra uma camada na qual foi deliberadamente induzida porosidade (realçada em vermelho), enquanto a Fig. 4.11 apresenta uma camada produzida com parâmetros considerados adequados, resultando em morfologia superficial compatível com o estado de referência (“condição boa”).

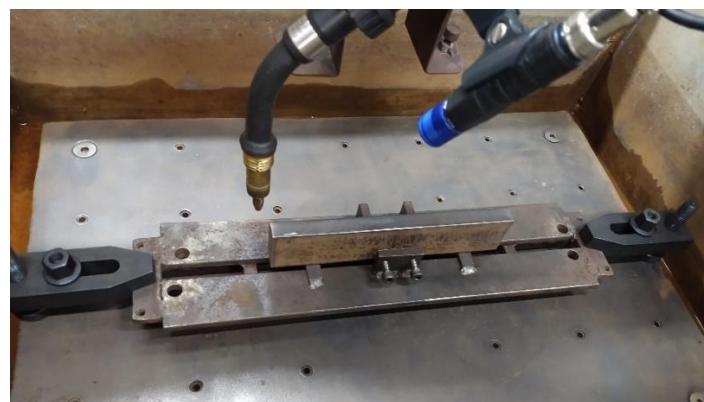


Figura 4.09 – Fixação do Substrato



Figura 4.10 – Peça de teste: Camada com porosidade



Figura 4.11 – Peça de teste: Camada sem defeitos aparentes

A pré-forma finalizada após as 51 camadas depositadas é mostrado na Fig. 4.12. Em seguida, a peça foi removida, submetida à limpeza mecânica (escovamento) e documentada quanto ao acabamento superficial, a Fig. 4.13 reúne quatro vistas: lateral esquerda (imagem à esquerda), frontal (imagem central), lateral direita (imagem à direita) e superior (imagem inferior), e a Fig. 4.14 apresenta a vista em perspectiva da mesma peça.



Figura 4.12 – Parede de teste finalizada



Figura 4.13 – Vistas da parede de teste



Figura 4.14 – Vista em perspectiva da parede de teste

Esse teste demonstrou a operacionalidade do arranjo experimental, fornecendo evidências visuais da execução controlada das trajetórias e da resposta do sistema às condições de instabilidade induzidas, em acordo com os requisitos da etapa subsequente de fabricação das peças principais.

As Fig. 4.15 e 4.16 sintetizam os resultados da aquisição de sinais obtidos neste ensaio. A Fig. 4.15 apresenta a reconstrução geométrica camada a camada da deposição, permitindo visualizar o modelo digital da pré-forma. A Fig. 4.16 reúne amostras representativas das séries temporais das variáveis monitoradas: tensão de arco, corrente, vazão do gás de proteção, intensidade luminosa, sinal acústico, velocidade de alimentação do arame, velocidade de deposição e, por fim, o índice de camada associado a cada registro.

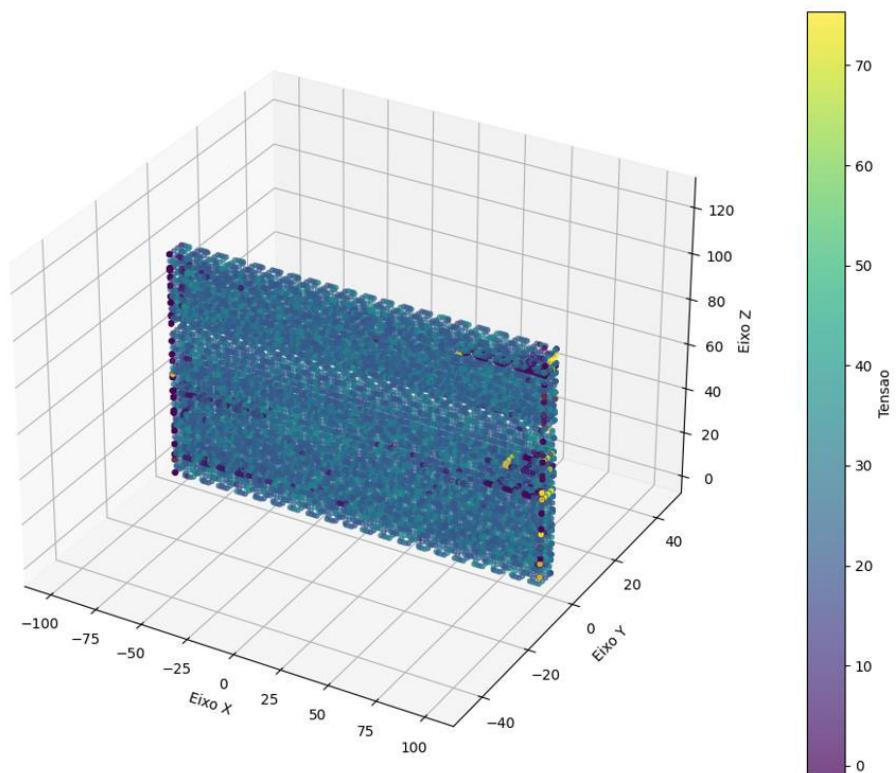


Figura 4.15 – Representação digital da peça de teste

Assim como aplicado às paredes de teste anteriores, buscou-se realizar a inspeção interna, a peça produzida foi usinada por fresamento, permitindo inspeção interna das descontinuidades. A avaliação, Fig. 4.17, revelou porosidade compatível com a instabilidade deliberadamente induzida para a geração de defeitos, corroborando a eficácia do procedimento experimental de indução. Esse resultado sustenta a rastreabilidade entre condição de processo, mecanismo de instabilidade e resposta estrutural, reforçando a

adequação do roteiro de validação para estudos subsequentes de correlação entre sinais de monitoramento e defeitos internos.

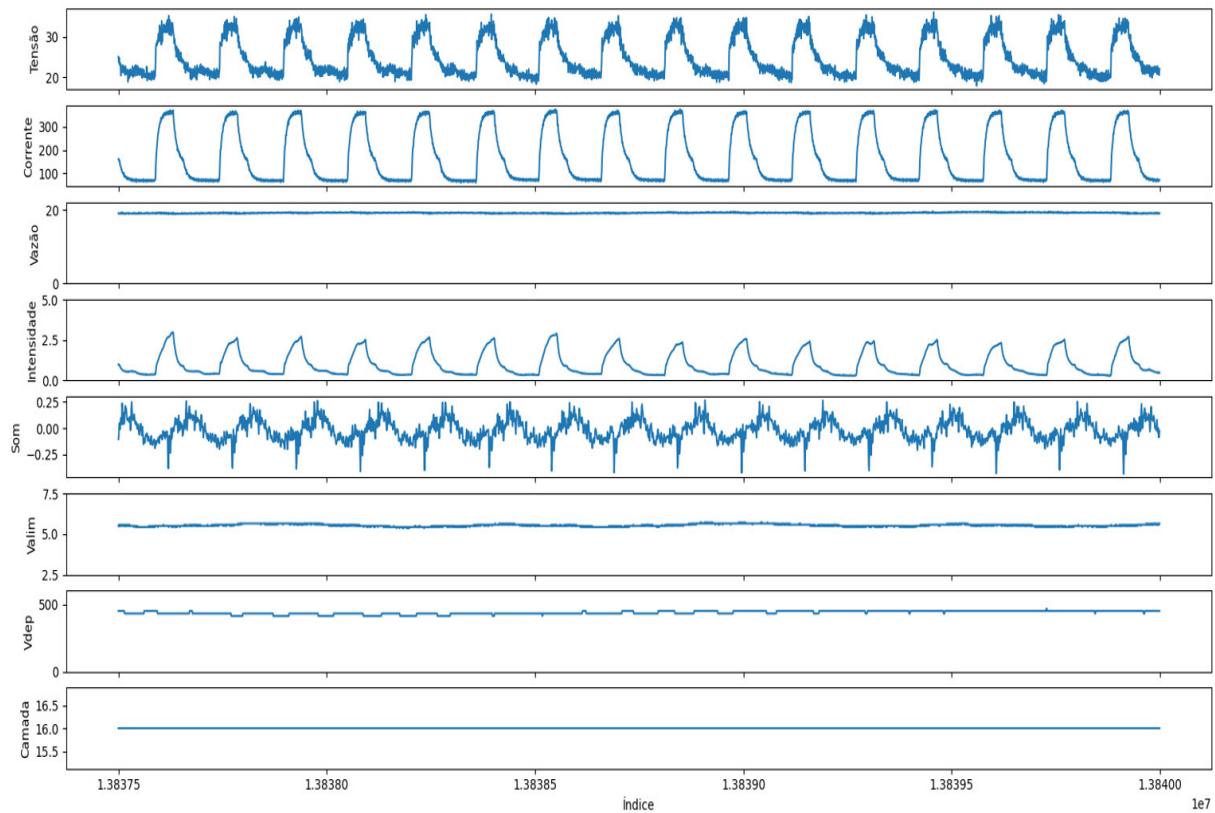


Figura 4.16 – Amostra da série temporal das variáveis de processo

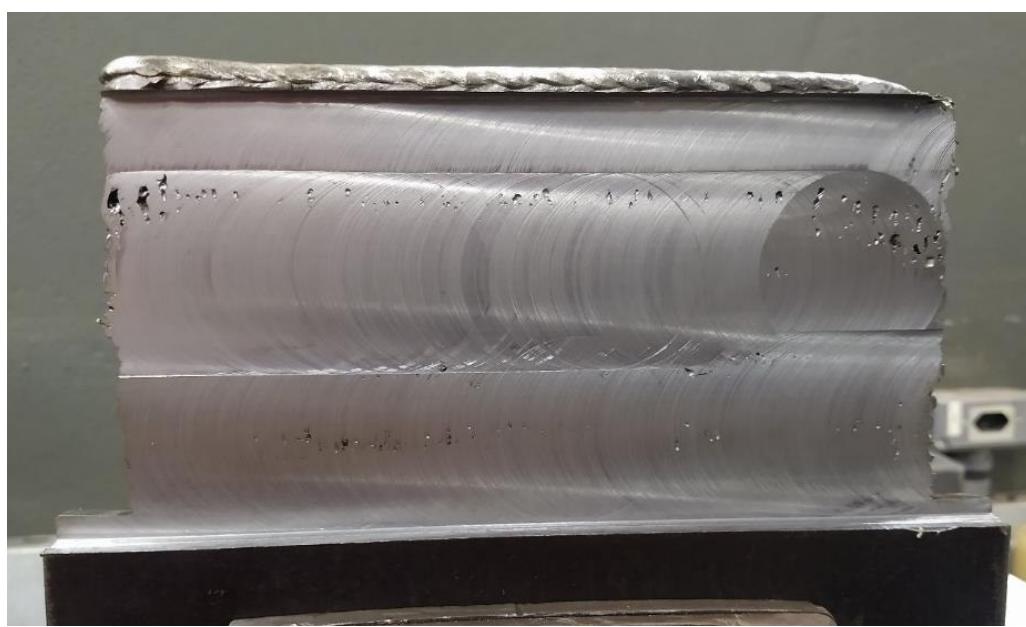


Figura 4.17 – Peça de teste usinada para inspeção interna

Em uma nova etapa de fabricação destinada à geração de dados experimentais, foram realizadas múltiplas deposições sobre chapas metálicas. Para tanto, foram preparadas duas chapas: uma depositada com arame de aço carbono e outra com arame de aço inoxidável. Em cada chapa, foram depositadas 33 paredes com seis camadas, organizadas em um arranjo de linhas e colunas. Cada coluna corresponde a uma velocidade de deposição, da esquerda para direita, foi definida em três níveis: 350, 450 e 550 mm/min. Por sua vez, as linhas foram definidas a partir da variação da velocidade de alimentação do arame e da estratégia de deposição adotada.

As cinco primeiras linhas foram construídas utilizando a estratégia de passe único, com velocidades de alimentação progressivas de 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 e 6,5 m/min. Em seguida, três linhas foram depositadas com a estratégia de tecimento, empregando amplitude de 5 mm e velocidades de alimentação de 5,0; 5,5 e 6,0 m/min. Finalmente, as três últimas linhas foram realizadas pela estratégia de cordões paralelos, estabelecendo-se espaçamento fixo de 4,5 mm entre cordões, e velocidades de alimentação de 5,0; 5,5 e 6,0 m/min.

Essas três estratégias de deposição foram selecionadas por representarem as condições que foram posteriormente aplicadas na fabricação das peças principais, destinadas à análise por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina. A utilização dessa abordagem permitiu mapear os efeitos combinados entre parâmetros operacionais (velocidade de deposição, velocidade de alimentação e estratégia de percurso) na formação geométrica das paredes.

Outro aspecto relevante, foi que as deposições realizadas nas chapas foram executadas com consumíveis do mesmo lote dos utilizados nas peças principais, assegurando a consistência experimental.

Em complemento ao exposto anteriormente, a Fig. 4.18 apresenta os resultados das deposições com arame de aço carbono, evidenciando o efeito da velocidade de deslocamento sobre a geometria das paredes (todas com seis camadas). Observa-se tendência esperada de redução da largura com o incremento da velocidade: a coluna da esquerda (350 mm/min) exibe as maiores larguras, a coluna central (450 mm/min) valores intermediários e a coluna da direita (550 mm/min) as menores larguras.

A Fig. 4.19, por sua vez, demonstra os dados de aquisição, de modo a explicitar as estratégias de trajetória empregadas no arranjo experimental: as cinco primeiras linhas correspondem a passe único, as três subsequentes ao tecimento e as três finais a cordões paralelos. Essa, permite a associação direta entre a estratégia aplicada e o resultado geométrico observado na Fig. 4.18.



Figura 4.18 – Chapa um com 33 paredes depositadas em aço carbono

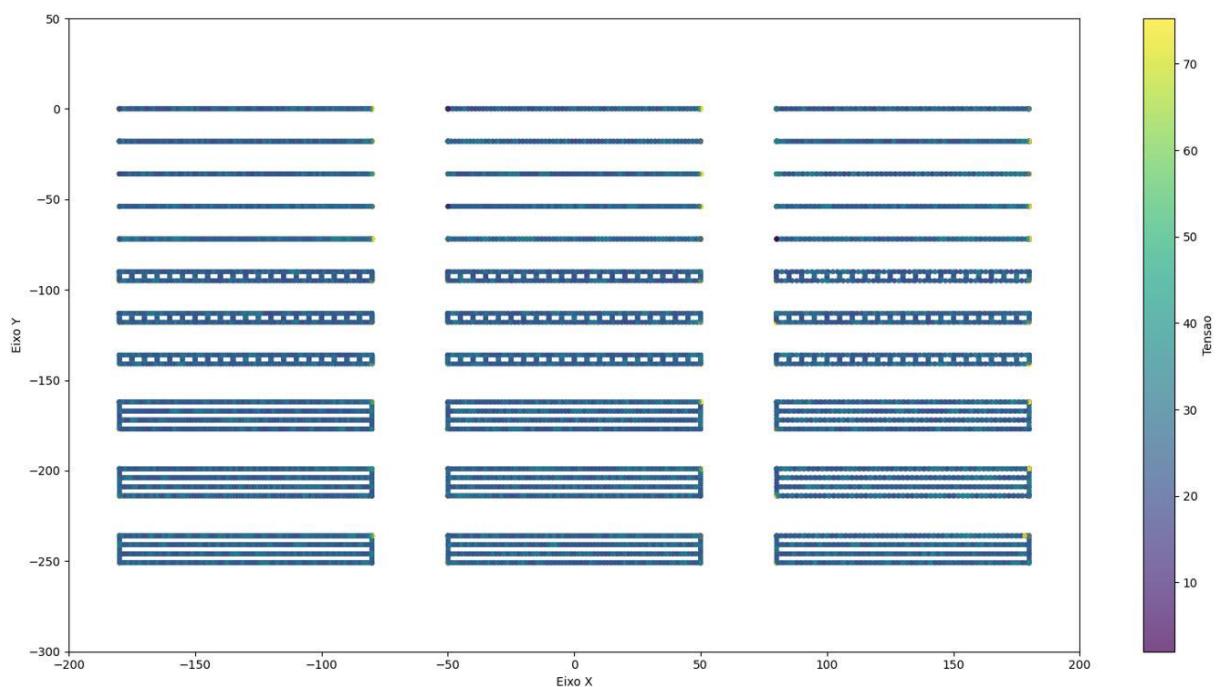


Figura 4.19 – Representação da aquisição dos dados da chapa um – vista superior

Por fim, a Fig. 4.20 oferece uma visualização tridimensional da aquisição, integrando posição e variáveis de processo. Essa representação espacial corrobora a efetividade da

integração entre os sistemas de aquisição e controle, ao permitir a inspeção coerente do empilhamento de camadas e da resposta do processo às diferentes estratégias e velocidades.

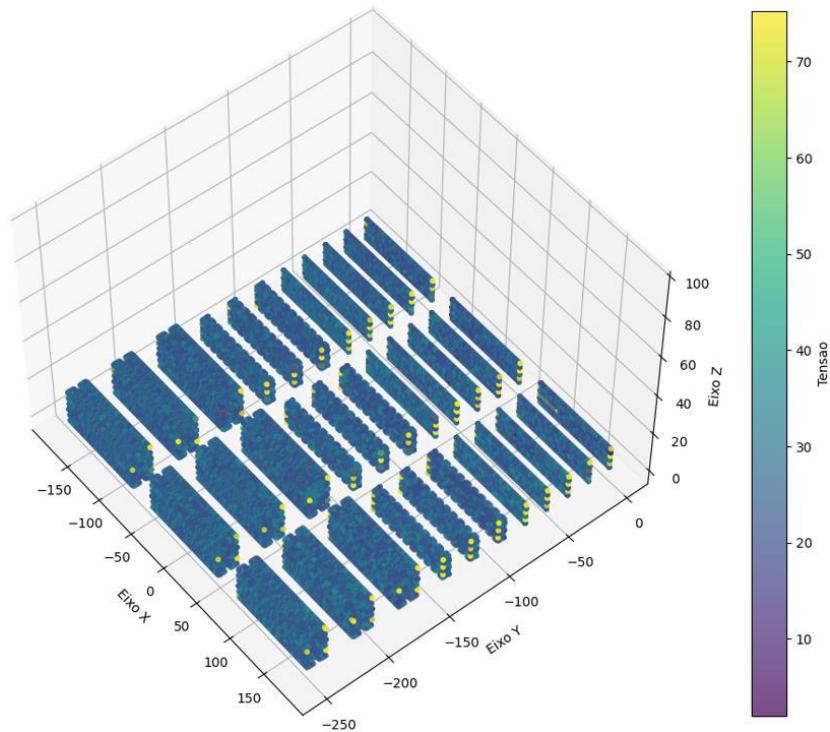


Figura 4.20 - Representação da aquisição dos dados da chapa um – vista em perspectiva.

De modo análogo ao observado no aço carbono, a Fig. 4.21 apresenta as deposições realizadas com arame de aço inoxidável, preservando o mesmo projeto de trajetória e a mesma configuração experimental. Verifica-se novamente a tendência de redução da largura das paredes com o incremento da velocidade de deslocamento.

Como principal destaque, a estratégia de cordões paralelos mostrou maior incidência de defeitos. Em razão da ocorrência de descontinuidades relevantes, a execução dessas paredes foi interrompida antes de completar as seis camadas, com o intuito de documentar os modos de falha. Adicionalmente, na condição de maior velocidade de alimentação do arame (6,5 m/min) combinada com a menor velocidade de deslocamento (350 mm/min), registrou-se escorramento do cordão, compatível com o aumento do aporte térmico e com a consequente perda de estabilidade da poça de fusão.

A Fig. 4.22 traz os dados adquiridos associados a essas deposições, evidenciando, as três estratégias de trajetória (passe único, tecimento e cordões paralelos).



Figura 4.21 - Chapa dois com 33 paredes depositadas em aço inoxidável.

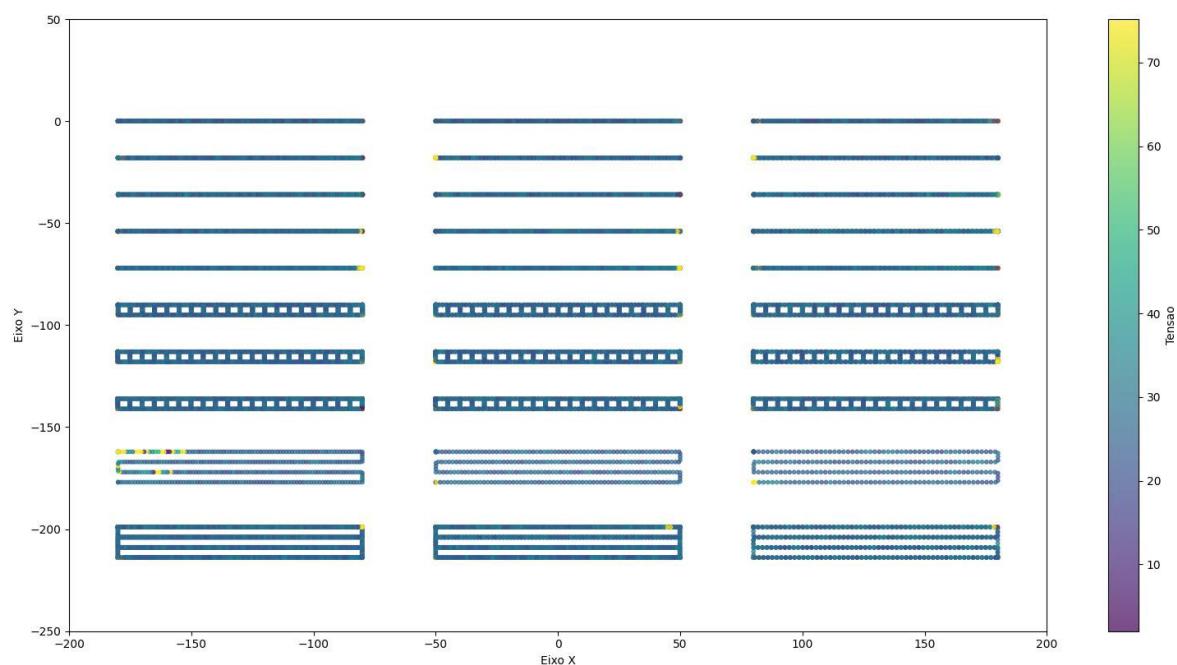


Figura 4.22 - Representação da aquisição dos dados da chapa dois – vista superior.

Por fim, a Fig. 4.23 apresenta o modelo tridimensional reconstruído a partir das séries temporais e da referência espacial, com o mesmo propósito de validação já empregado no

caso do aço carbono, corroborar a integração entre instrumentação, aquisição e reconstrução geométrica.

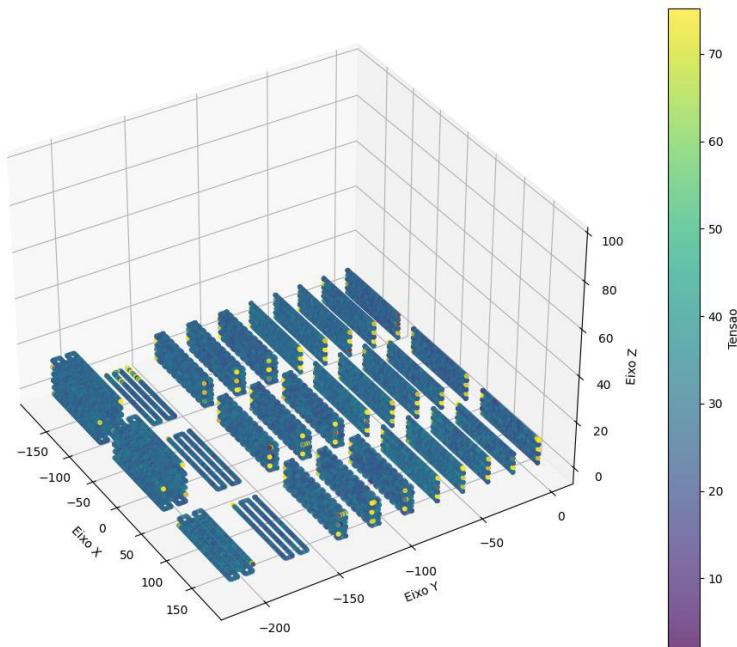


Figura 4.23 - Representação da aquisição dos dados da chapa dois – vista em perspectiva.

4.3 Deposições das Peças Principais

Após a conclusão dos testes preliminares, incluindo as deposições em chapas e a fabricação de peças exploratórias, iniciou-se a produção das peças principais. Todas as etapas seguiram rigorosamente os roteiros e as especificações definidos no planejamento experimental, com apoio das tabelas de controle e dos checklists previamente estabelecidos, assegurando rastreabilidade e padronização dos procedimentos.

Como condição inicial, os parâmetros de processo foram definidos com base nos resultados dos experimentos anteriores e observações por parte do autor em fabricações realizadas no Laprosolda: velocidade de alimentação do arame de 5 m/min, velocidade de deposição de 450 mm/min, vazão de gás de proteção de 15 l/min (gás de proteção composto por argônio com 2% de CO₂) e distância bico de contato peça (DBCP) de 21 ± 1 mm. A partir desses valores de referência, os parâmetros foram ajustados iterativamente, por aumento ou redução controlada, durante as deposições, com dois objetivos complementares, buscar a estabilidade operacional do processo e introduzir perturbações deliberadas capazes de induzir instabilidades e, consequentemente, defeitos. Todas as alterações foram registradas nos

instrumentos de controle mencionados, permitindo a correlação posterior entre condições de processo, ocorrência de instabilidades e resposta dos métodos de inspeção e monitoramento.

- Peça CF-04

A sequência a seguir documenta a deposição da peça CF-04, utilizada para exemplificar os resultados obtidos. A Tabela de parametrização (Tab. 4.02) registra: os parâmetros iniciais de processo previamente descritos; o procedimento de calibração da fonte; o referencial geométrico (zero peça) em relação ao sistema de coordenadas da máquina; e a configuração do número de quadros da câmera térmica.

Tabela 4.02 – Tabela de Parametrização da peça CF-04

Código da Peça: CF-04

Data: 24/02/24

Parâmetro	Valor Base
Velocidade de alimentação [m/min]:	5
Velocidade de deposição [mm/min]:	450
Vazão de Gás [l/min]:	15
DBCP [mm]:	21 ± 1
Correção arco:	6%

Calibração	Valor
R [mOhm]	9,5
L [uH]	7

Zero Peça	Valor
X [mm]	-203,1928
Y [mm]	-173,1242
Z [mm]	-208,0006

Câmera Térmica	Valor
Quadros Camada Simples	1800

A cada camada depositada realizou-se uma sequência de atividades e relativa anotação na Tabela de Controle de Deposição (Tab. 4.03), dentre elas o registro fotográfico, o qual é composto por quatro fotografias por camada. O registro da decima camada de deposição da peça CF-04 é mostrado na Fig. 4.24, neste identificam-se indícios morfológicos compatíveis com porosidade concentrada na região central do cordão.

Tabela 4.03 – Tabela de Controle de Deposição da peça CF-04

Camada	Parametros	Ocorrências	Foto	Foto	Foto	Foto	Linha	Nível	Escova	Z	Corte	Corte	Temperatura
			0	1	2	3	do Códig	da Águ			do Aram	DBC	de Interpass
10	Valim=4,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Circulação de ar - Porosidade laranja e região central	OK	OK	OK	OK	167			18	OK	OK	60
9	Valim=6 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Arco longo - Circulação de ar - OK	OK	OK	OK	OK	151			16	OK	OK	72
8	Valim=6 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Arco longo	OK	OK	OK	OK	135			14	OK	OK	73
7	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	119			13	OK	OK	68
6	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	103			11	OK	OK	66
5	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	87			10	OK	OK	30
4	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	71			8	OK	OK	62
3	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	55			6	OK	OK	70
2	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	39			4	OK	OK	72
1	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK	OK	OK	OK	OK	23			2	OK	OK	60

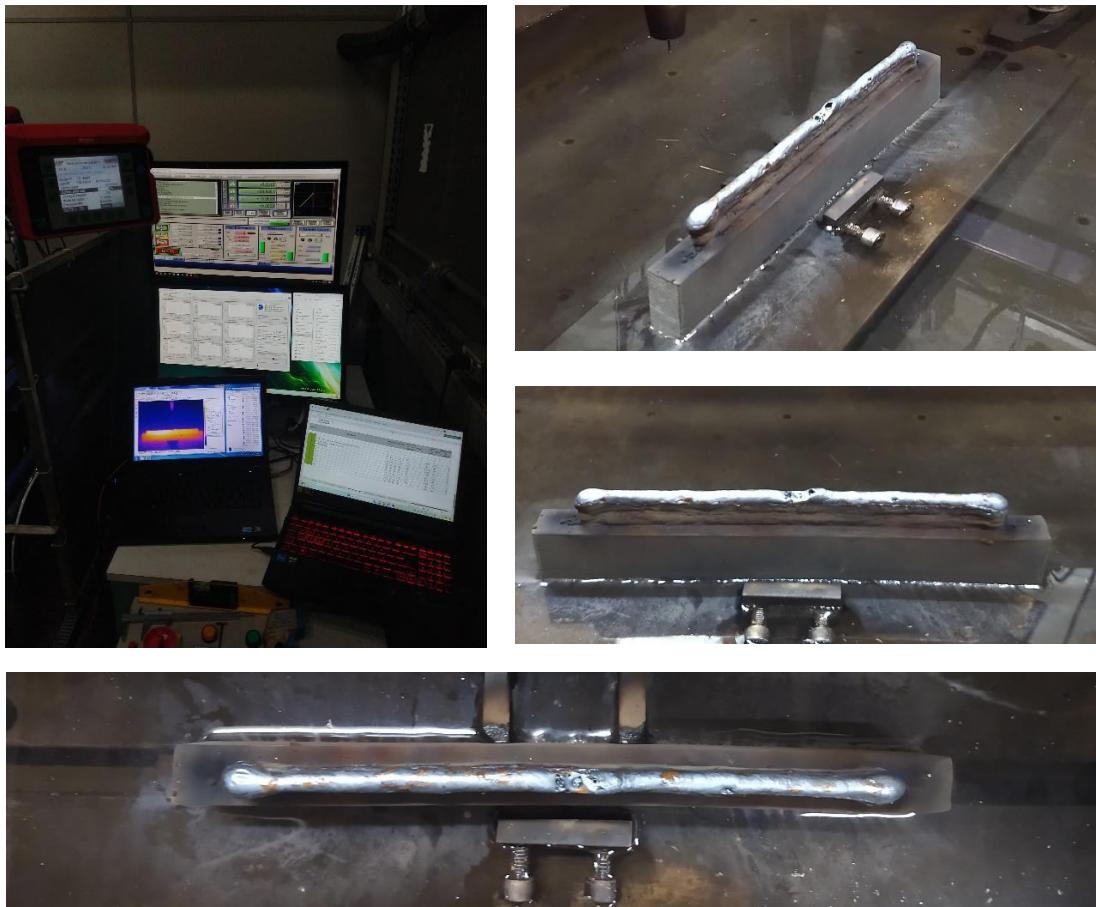


Figura 4.24 – Registro Fotográfico da camada 10 da peça CF-04

A observação foi anotada no campo “Ocorrência” da Tabela de Controle (Tab. 4.03) e, de forma consistente, mapeado no Mapa de Defeitos (Tab. 4.04) na região correspondente, segundo a convenção de zonas adotada para a peça. Essa padronização, detecção durante a deposição, inspeção visual subsequente e registro redundante em ambos os instrumentos (tabela e mapa), evidencia a padronização do procedimento e assegura rastreabilidade para análises posteriores, possibilitando relacionar a localização do defeito às condições operacionais vigentes naquela camada.

Tabela 4.04 – Mapa de defeitos da peça CF-04

Camada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10										PO	PO									
9																				
8																				
7																				
6																				
5																				
4																				
3																				
2																				
1																				

As Fig. 4.25, 4.26 e 4.27 apresentam uma síntese dos resultados da deposição da peça CF-04. Em Fig. 4.25a, observa-se a peça concluída ainda com o substrato e fixada à mesa de deposição, evidenciando a integridade geométrica macroscópica imediatamente após o término do processo. Em Fig. 4.25b, mostra-se a peça após destacamento do substrato e escovação, em condição final de envio para a realização da radiografia industrial (raio-x). Em Fig. 4.26, exibe-se o painel de aquisição de dados, no qual as variáveis de processo registradas ao longo de todas as camadas são apresentadas em série temporal agregada, preservando a segmentação por camada e possibilitando a correlação entre eventos de processo e a sequência construtiva. Por fim, em Fig. 4.27, apresenta-se a reconstrução tridimensional da peça, obtida a partir das trajetórias de deposição e dos incrementos no eixo Z; a coloração superficial codifica a velocidade de alimentação do arame, de modo que a escala cromática represente a magnitude local desse parâmetro. Em conjunto, as quatro imagens fornecem uma visão integrada que combina: o estado macroscópico da peça no substrato; a condição superficial pós-acabamento mecânico; a evolução multicanal das variáveis de processo ao longo das camadas; e o mapeamento espacial de um parâmetro chave sobre a geometria resultante, favorecendo análises cruzadas entre sinais de processo, morfologia depositada e preparação para ensaios não destrutivos (END).



Figura 4.25 – Peça CF-04: (a) término da deposição; (b) pronta para ensaio não destrutivo

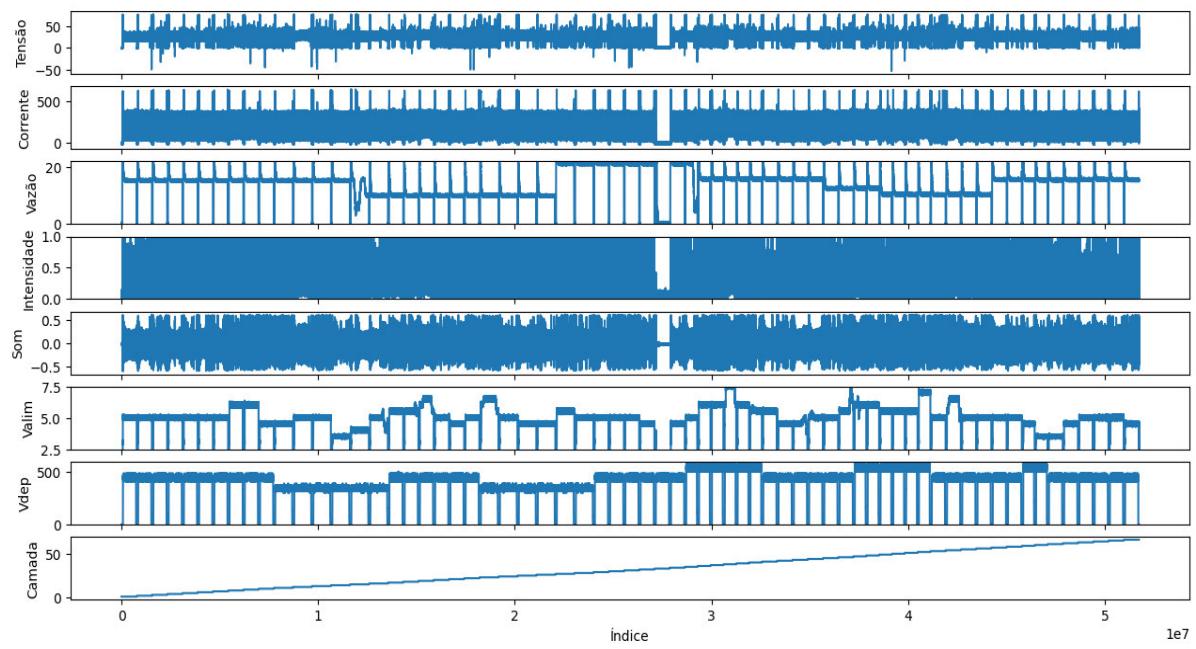


Figura 4.26 – Sinais temporais das variáveis de processo durante a fabricação da CF-04

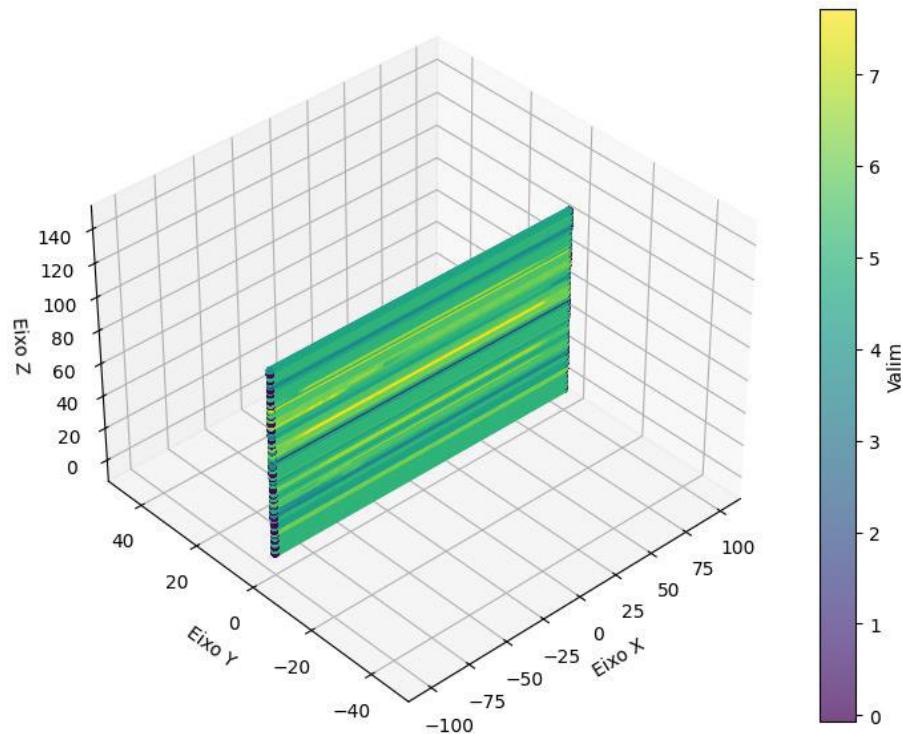


Figura 4.27 – Representação digital da peça CF-04

- Banco de Dados

Adotou-se um arranjo 2 x 3, combinando dois materiais/consumíveis, aço carbono com arame ER70S-6 e aço inoxidável com arame ER316 LSi, e três estratégias de trajetória de deposição (passe único, tecimento e cordões paralelos), com quatro “réplicas” por condição. Assim, foram produzidas 24 peças ao todo: 12 em aço carbono (sendo quatro peças com cada trajetória) e 12 em aço inoxidável (sendo quatro peças com cada trajetória).

Durante as deposições, foram criadas para cada peça uma planilha de controle específica, contendo tabela de parâmetros, checklist de preparação, tabela de controle de camadas e mapa de defeitos, de modo a assegurar rastreabilidade integral entre condições de processo e registros de inspeção visual. Após o término da fabricação, as peças foram encaminhadas à radiografia industrial, totalizando 24 imagens de raio-X.

Além desse material, a Tab. 4.05 sintetiza o volume de informação gerado na fabricação das 24 peças do estudo: a primeira coluna apresenta o código da peça; a segunda indica o consumível (arame) utilizado; a terceira descreve a trajetória de deposição; a quarta reporta o número de camadas depositadas; a quinta contabiliza o total de imagens fotográficas adquiridas durante a deposição, adotando-se protocolo mínimo de quatro tomadas por camada em ângulos distintos; a sexta expressa o tamanho do acervo fotográfico (GB); a sétima informa o volume de dados de aquisição/monitoramento (GB) gerado pelo sistema; e a oitava apresenta o tamanho da gravação termográfica (GB) associado a cada peça.

Como observação metodológica, os registros termográficos não são objeto de análise neste trabalho. A câmera térmica foi empregada para medir e registrar a temperatura de interpasso ao longo da deposição, opção adotada em substituição ao pirômetro pontual inicialmente previsto, com o propósito de documentar o regime térmico e constituir um banco de dados útil a investigações futuras.

Considerando as três estratégias de trajetória, os menores conjuntos amostrais por estratégia foram: no CF-04 (passe único), registraram-se 51.732.500 amostras por canal ao longo de 66 camadas, (\approx 783.826 amostras/camada/canal) e a 465.592.500 amostras no total dos nove canais. No CM-04 (tecimento), obtiveram-se 80.165.000 amostras por canal em 54 camadas (\approx 1.484.537 amostras/camada/canal), totalizando 721.485.000 amostras nos nove canais. No IG-02 (cordões paralelos), foram 82.182.500 amostras por canal distribuídas em 38 camadas (\approx 2.162.697 amostras/camada/canal), perfazendo 739.642.500 amostras quando considerados todos os canais. Esses valores configuram os menores arquivos de dados observados em cada estratégia e permitem comparar, com base objetiva, a carga informacional gerada por trajetória e por camada.

Tabela 4.05 – Volume de Informação

Peça	Arame	Trajetória	Número de Camadas	Número de Fotos	Arquivo Fotográfico (GB)	Arquivo de dados (GB)	Câmera Térmica (GB)
CF-01	ER70S-6	Passe único	68	318	0,90	6,08	21,3
CF-02	ER70S-6	Passe único	75	305	0,85	4,03	20,1
CF-03	ER70S-6	Passe único	70	299	0,83	3,67	18,6
CF-04	ER70S-6	Passe único	66	288	0,81	3,48	17,5
CM-01	ER70S-6	Tecimento	57	239	0,63	5,67	23,5
CM-02	ER70S-6	Tecimento	57	243	0,64	5,95	23,8
CM-03	ER70S-6	Tecimento	59	257	0,67	5,88	23,5
CM-04	ER70S-6	Tecimento	54	243	0,65	5,39	21,5
CG-01	ER70S-6	Cordões Paralelos	41	193	0,52	6,16	24,5
CG-02	ER70S-6	Cordões Paralelos	42	184	0,48	6,23	24,5
CG-03	ER70S-6	Cordões Paralelos	42	209	0,56	6,23	24,7
CG-04	ER70S-6	Cordões Paralelos	41	183	0,47	6,08	24,5
IF-01	ER316 LSi	Passe único	77	316	0,97	4,06	20,5
IF-02	ER316 LSi	Passe único	73	313	0,95	3,81	18,6
IF-03	ER316 LSi	Passe único	75	347	1,02	4,04	19,9
IF-04	ER316 LSi	Passe único	76	314	0,93	3,91	20,2
IM-01	ER316 LSi	Tecimento	68	286	0,80	6,44	27,1
IM-02	ER316 LSi	Tecimento	58	260	0,72	5,74	22,7
IM-03	ER316 LSi	Tecimento	61	271	0,76	6,00	24,3
IM-04	ER316 LSi	Tecimento	68	266	0,73	6,76	27,1
IG-01	ER316 LSi	Cordões Paralelos	40	194	0,52	5,94	23,9
IG-02	ER316 LSi	Cordões Paralelos	38	179	0,48	5,52	22,7
IG-03	ER316 LSi	Cordões Paralelos	43	193	0,52	6,37	25,7
IG-04	ER316 LSi	Cordões Paralelos	47	201	0,56	6,87	28,1
Total			1396	6101	16,97	130,31	548,8

- Peças principais

Para fins demonstrativo, dado o total de 24 peças, selecionou-se seis casos representativos, um por tipo de trajetória e material: CF-04 (aço carbono, parede fina, passe único) na Fig. 4.28, CM-01 (aço carbono, parede média, tecimento) na Fig. 4.29, CG-04 (aço carbono, parede grossa, cordões paralelos) na Fig. 4.30, IF-02 (aço inoxidável, parede fina, passe único) na Fig. 4.31, IM-02 (aço inoxidável, parede média, tecimento) na Fig. 4.32 e IG-03 (aço inoxidável, parede grossa, cordões paralelos) na Fig. 4.33. A sequência de figuras apresenta os resultados da deposição das peças principais. Em cada painel, à esquerda observa-se a peça acabada após escovação superficial, em condição de envio para ensaio não destrutivo (END) e à direita, exibe-se o respectivo raio-x, evidenciando as descontinuidades internas deliberadamente induzidas (porosidades) para fins de validação do

sistema de detecção de anomalias e indicação de possíveis defeitos. O registro fotográfico de todas as peças principais fabricadas pode ser visto no Apêndice I.



Figura 4.28 – CF-04: Peça e Raio-X

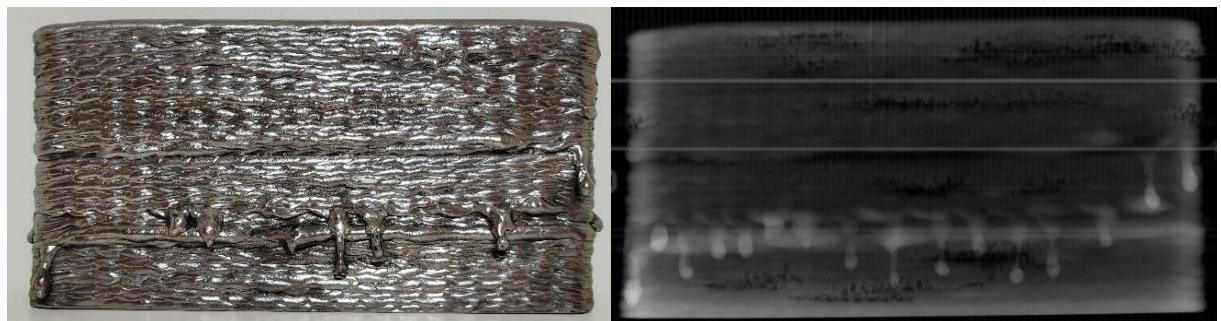


Figura 4.29 – CM-01: Peça e Raio-X

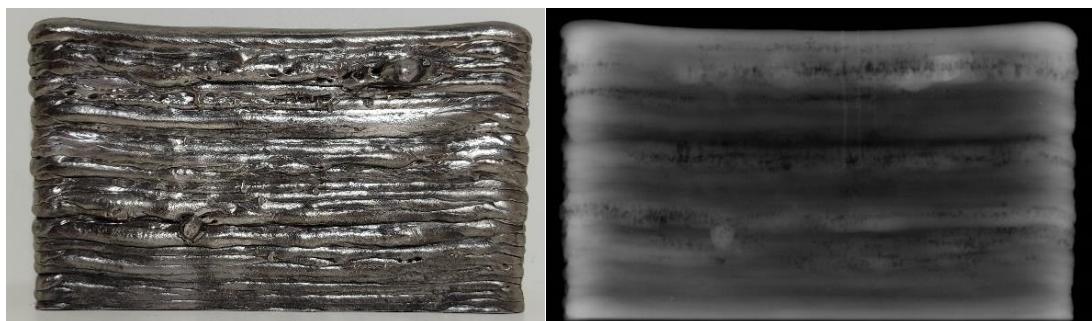


Figura 4.30 – CG-04: Peça e Raio-X

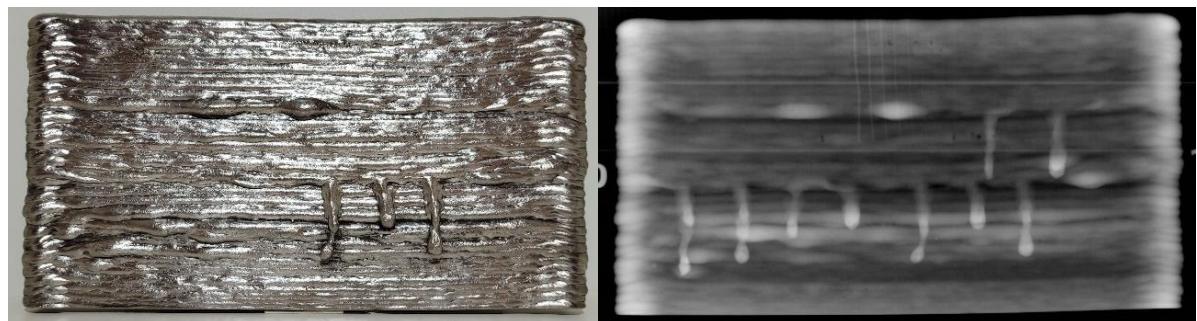


Figura 4.31 – IF-02: Peça e Raio-X

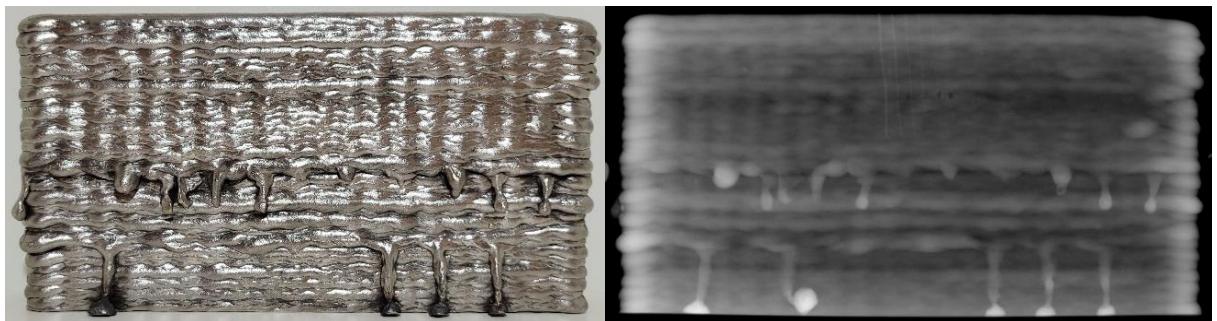


Figura 4.32 – IM-02: Peça e Raio-X

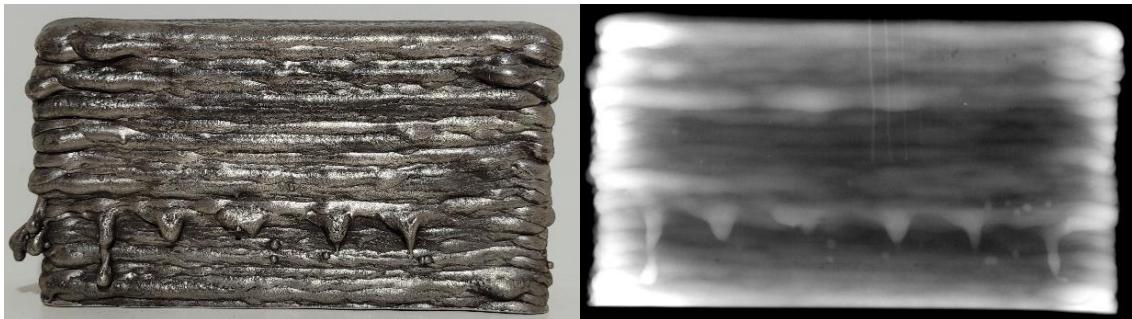


Figura 4.33 – IG-03: Peça e Raio-X

Em conjunto, os pares “peça finalizada/raio-x” demonstram o desfecho geométrico das deposições e o êxito da estratégia de indução controlada de defeitos, oferecendo base visual e documental para as análises comparativas entre material, trajetória e detecção de anomalias.

4.4 Ferramentas de Análise Interativas

Durante o desenvolvimento dos algoritmos, com o intuito de promover um fluxo de trabalho exploratório e reproduzível, foram criados painéis interativos destinados a acelerar testes e análises.

- Painel de Sintonia de Limiares

O painel interativo para ajuste de limiares de detecção de anomalias em séries temporais de processo é mostrado na Fig. 4.34. À esquerda, o usuário seleciona a(s) camada(s) analisada(s) e define os parâmetros: Limiar de Amplitude e Limiar de Volatilidade, os valores iniciais são os calculados na etapa de avaliação do modelo do Autoencoder LSTM.

O gráfico principal, “Sintonia de Limiares – Camada(s) (Amostra de 10)” representa, no eixo x, o tempo e, no eixo y, o erro de reconstrução (MAE) dos sinais de processo aplicado ao

modelo do Autoencoder LSTM. A curva azul corresponde ao MAE ao longo da deposição, a linha tracejada vermelha marca o limiar de amplitude definido, a região sombreada em rosa indica quando o MAE excedeu o limiar, configurando uma “Anomalia por Amplitude”. As regiões destacadas com marcadores amarelos indicam que a variabilidade local supera o limiar de volatilidade, ocorrendo assim a “Anomalia por Volatilidade”.

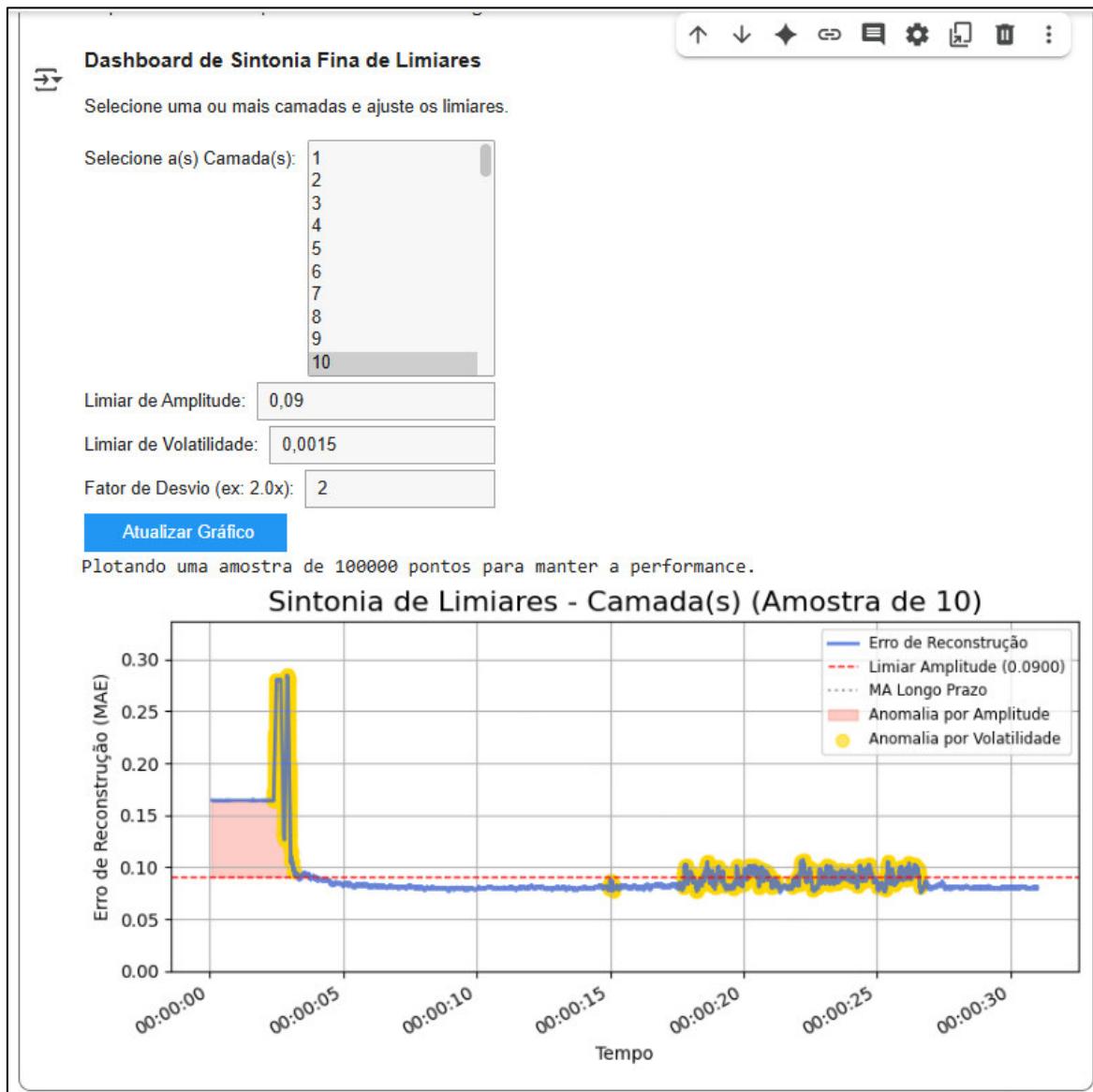


Figura 4.34 – Painel de Sintonia de Limiares

- Pipeline de Análise com Features Pré-Calculadas

Este é um painel interativo em modo console para análise e clusterização das anomalias com atributos pré-calculadas, sua tela inicial é vista na Fig. 4.35. O fluxo de análise inicia-se com o carregamento de artefatos pré-computados, incluindo conjuntos de características estatísticas, componentes da wavelet e o erro de reconstrução já limiado (amplitude e

volatilidade). Em seguida, o usuário seleciona o grupo de anomalias de interesse (por amplitude ou por volatilidade) e define o bloco de atributos a empregar, estatísticos, wavelet ou híbridos (combinação). Opcionalmente, pode-se incluir a temperatura de interpasso como variável adicional. Para reduzir dimensionalidade e eliminar colinearidades, é disponibilizada a aplicação de PCA, adotando-se, neste trabalho, o critério de variância explicada $\geq 95\%$. Para suporte à escolha do número de agrupamentos, o sistema oferece a visualização de um dendrograma (quando pertinente) e do método do cotovelo (no caso do K-Means, já que o HDBSCAN infere automaticamente a quantidade de clusters a partir da densidade dos dados).

PIPELINE DE ANÁLISE COM FEATURES PRÉ-CALCULADAS



[Mostrar código](#)



```
#####
### INICIANDO PIPELINE DE ANÁLISE COM FEATURES PRÉ-CALCULADAS ###
#####
Carregando dados de temperatura de interpasso...

[ETAPA 1/4] Carregando arquivos de dados pré-processados...
[SUCESSO] Alinhamento concluído. 2985071 anomalias válidas para análise.

=====
### PAINEL DE ANÁLISE DE CLUSTER POR TIPO DE ANOMALIA ###
=====

Escolha o tipo de anomalia que deseja analisar:
1: Apenas 'Amplitude'
2: Apenas 'Volatilidade'

Digite 'sair' para terminar e salvar os resultados acumulados.
Sua escolha: 2

Analizando 928566 anomalias do tipo: 'Volatilidade'

Escolha o conjunto de features pré-calcadas:
1: Estatísticas
2: Wavelet
3: Híbridas
Digite sua escolha (1, 2, ou 3): 3
--> Deseja adicionar a 'Temperatura de Interpasso' como uma feature extra? (s/n):
--> Deseja aplicar PCA sobre estas features? (s/n): s
Digite o número de componentes (ex: 3): 12
PCA aplicado! Variância explicada: 95.51%

[ETAPA 3/5] Executando Clusterização Primária ('Famílias')

ANÁLISE VISUAL OPCIONAL COM DENDROGRAMA
--> Deseja gerar um dendrograma para ajudar a visualizar a estrutura dos clusters? (s/n)

Escolha o algoritmo de cluster para estes anomalias primárias:
1: K-Means
2: HDBSCAN
Digite sua escolha (1-2): 1
```

Figura 4.35 – Pipeline de Análise com Features Pré-Calculadas.

Após a seleção do algoritmo (K-Means ou HDBSCAN) e, quando aplicável, do número de clusters, os resultados são apresentados por meio de gráficos, posição X (em mm) no eixo horizontal e índice de camada no eixo vertical, permitindo avaliar a distribuição dos pontos anômalos por agrupamento. Adicionalmente, são exibidos gráficos radar sobrepostos para comparação dos perfis médios de atributos entre clusters, facilitando a interpretação das características das famílias de anomalias. O usuário pode, então, salvar o modelo completo de clusterização, o sistema salva o “Pacote de Clusterização” reproduzível que contém a configuração completa (seleção de atributos, inclusão de temperatura, parâmetros de PCA, algoritmo de clusterização e quantidade de clusters), permitindo a rastreabilidade e reuso em aplicações futuras.

O ambiente possui ainda uma etapa de sub-clusterização interativa. Nela, o usuário seleciona o cluster primário e reaplica o mesmo roteiro (opções de PCA, dendrograma/método do cotovelo, escolha entre K-Means ou HDBSCAN e definição do número de sub-clusters, quando necessário). Os sub-clusters são apresentados em gráficos posição por camada análogos aos anteriores, acompanhados de gráficos de radar comparativos, e podem igualmente ser salvos como pacotes reproduzíveis (“Pacote de Clusterização”). Em conjunto, essas funcionalidades compõem um painel exploratório, que integra preparação de dados, seleção de atributos, redução de dimensionalidade, clusterização multi-nível e visualização, otimizando o ciclo de descoberta, validação e documentação das anomalias no processo MADA.

- Dashboard de Análise Unificado

O Dashboard de Análise Unificado, mostrado na Fig. 4.36, é uma interface para avaliação exploratória de anomalias já clusterizadas e agregadas. Na parte superior, o seletor de arquivo permite escolher o conjunto de resultados acumulados a serem explorados. Após ação “Carregar e Consultar”, o painel confirma, por meio de *checkmark* verde, que os dados foram carregados e os componentes de visualização foram construídos.

Painel de Filtros: O módulo permite a seleção por cluster, oferecendo uma lista multisseleção com rótulos hierárquicos com o formato: TipoAnomalia_Ck_Si (onde Ck refere-se à cluster primário de índice k e Si à subcluster de índice i). O botão “Aplicar Filtros” executa a filtragem, retornando o número de instâncias retidas.

Painel de Visualização: O usuário escolhe entre Z (posição vertical) ou Camada (índice de deposição) para a variável do eixo Y do gráfico 2D. Em seguida, três ações estão disponíveis: “Gerar Gráfico 2D” (projeção bidimensional para tendências e densidades por camada/altura), “Gerar Gráfico 3D” (inspeção volumétrica do padrão espacial dos eventos

anômalos) e “Gerar Perfil Radar” (comparação multivariada das características sintetizadas por cluster/subcluster).

O dashboard consolida a etapa de análise, integrando os resultados da clusterização, filtragem por cluster/subclusters e tipo de anomalia; e visualização multiescala (2D/3D/radar), suportando a análise comparativa e geração de hipóteses sobre a origem e a morfologia das anomalias ao longo das camadas e do volume depositado.

The screenshot shows the 'Dashboard de Análise Unificado' interface. At the top, there is a header with the title 'DASHBOARD DE ANÁLISE UNIFICADO' and a toolbar with various icons. Below the header, there is a section titled 'Dashboard de Análise Final' with a sub-section '1. Painel de Filtros'. In this section, there is a dropdown menu titled 'Selecionar o Resultado para Analisar' with the value 'IF-02_resultados_clusterizados_acumulados.parquet'. Below the dropdown is a button labeled 'Carregar e Cons...'. A message indicates that data is being loaded from 'IF-02_resultados_clusterizados_acumulados.parquet...' and that data has been loaded and visualization panels are being constructed. A list of filters is shown, with 'Amplitude_C0' selected. Below the list is a button labeled 'Aplicar Filtros'. A message states that 2985071 anomalies have been selected. In the '2. Painel de Visualização' section, there is a dropdown for 'Eixo Y para Gráfico 2D' with 'Z' selected. Below this are three buttons: 'Gerar Gráfico 2D', 'Gerar Gráfico 3D', and 'Gerar Perfil Radar'.

Figura 4.36 – Dashboard de Análise Unificado.

4.5 Detecção de Anomalias

- **Modelo Autoencoder LSTM**

Para a modelagem de detecção de instabilidades com Autoencoder LSTM, empregou-se um subconjunto de variáveis de alta frequência, tensão, corrente, som e intensidade luminosa, selecionado por sua maior “sensibilidade” a instabilidades do arco.

Originalmente, os sinais eram amostrados a 25 kS/s, contudo, a execução do treinamento nessa taxa mostrou-se inviável no ambiente Colab devido ao consumo de memória inerente a sequências longas e ao estado interno das camadas LSTM (comprimento de janela e número de amostra). Para garantir a viabilidade computacional, adotou-se reamostragem para 5 kS/s, com janelas de 500 amostras, o que corresponde a 100 ms por janela (resolução temporal de 0,2 ms por amostra).

As demais variáveis, embora não utilizadas diretamente no treinamento do modelo, foram mantidas para clusterização, contextualização, validação cruzada (imagens, mapas de defeitos e registros operacionais) e investigação de causa raiz dos agrupamentos.

Para o treinamento do Autoencoder LSTM, aplicou-se a aprendizagem a partir de dados oriundos de “condições operacionais normais”, de deposição em regime de estabilidade, de modo que o modelo internalize o padrão de “normalidade” do processo e, posteriormente, apresente elevada sensibilidade a desvios, identificados por meio de aumentos no erro de reconstrução.

- **Construção do Modelo da Peça CF-04**

A seleção das amostras de “condições normais”, baseou-se na Tabela de Controle de Deposição, com aplicação de dois critérios: manutenção dos parâmetros de processo classificados como ideais nas etapas prévias de testes, e ausência de ocorrências indesejadas registradas (coluna “ocorrências”), indicando deposições com aspecto satisfatório e sem intercorrências.

Considerando os regimes transitórios típicos das camadas iniciais em manufatura aditiva por arco, associados à estabilização térmica, molhamento e formação geométrica, essas camadas foram excluídas do conjunto de referência. Após o filtro, obteve-se a Tab. 4.06, da qual foram selecionadas sete camadas representativas do regime estável do processo: 5, 6, 7, 44, 58, 63 e 65.

Tabela 4.06 – Camadas com condições operacionais normais

Camada	Parâmetros	Ocorrências
65	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK
63	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK
58	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK
44	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK
7	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK
6	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK
5	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	OK

Construiu-se um gráfico multivariado com as sete variáveis de processo para as sete camadas previamente classificadas como condição nominal. As séries temporais de cada camada foram organizadas na ordem de deposição, mostrado na Fig. 4.37, viabilizando a comparação direta entre perfis. A separação por camada é visível a partir dos eventos de abertura do arco, identificados por transitórios de alta amplitude nos sinais elétricos, tensão e corrente, que delimitam de forma clara o início de cada trecho de deposição. Dessa forma, as sequências correspondentes às camadas aparecem bem definidas e ordenadas como 5, 6, 7, 44, 58, 63 e 65. A inspeção do histórico de deposição indica que a camada 63 apresenta (de forma visível) a menor incidência de instabilidades, com baixa variabilidade e ausência de flutuações abruptas nas variáveis monitoradas (Fig. 4.38), caracterizando o comportamento mais estável entre as condições avaliadas.

Com base nesses resultados, a camada 63 foi adotada como conjunto de referência (“condição normal”), da peça CF-04, para o treinamento do modelo Autoencoder LSTM, assegurando que o modelo aprenda um padrão de operação estável e maximize a capacidade de detecção de anomalias via erro de reconstrução. A Tab. 4.07 sintetiza a arquitetura do modelo, previamente apresentado no item Planejamento Experimental do Capítulo III.

- Treinamento do modelo

O histórico do treinamento do modelo é apresentado na Fig. 4.39 por meio da função de perda, com as curvas de dados de treinamento (azul) e dados de validação (laranja). O histórico demonstra rápida convergência nas primeiras épocas, seguida de estabilização em torno de 0,085. As curvas de treino e validação evoluem de forma sobreposta, com diferença mínima e validação ligeiramente inferior ao treino após a fase inicial, o que indica boa capacidade de generalização e ausência de ajustes relevantes.

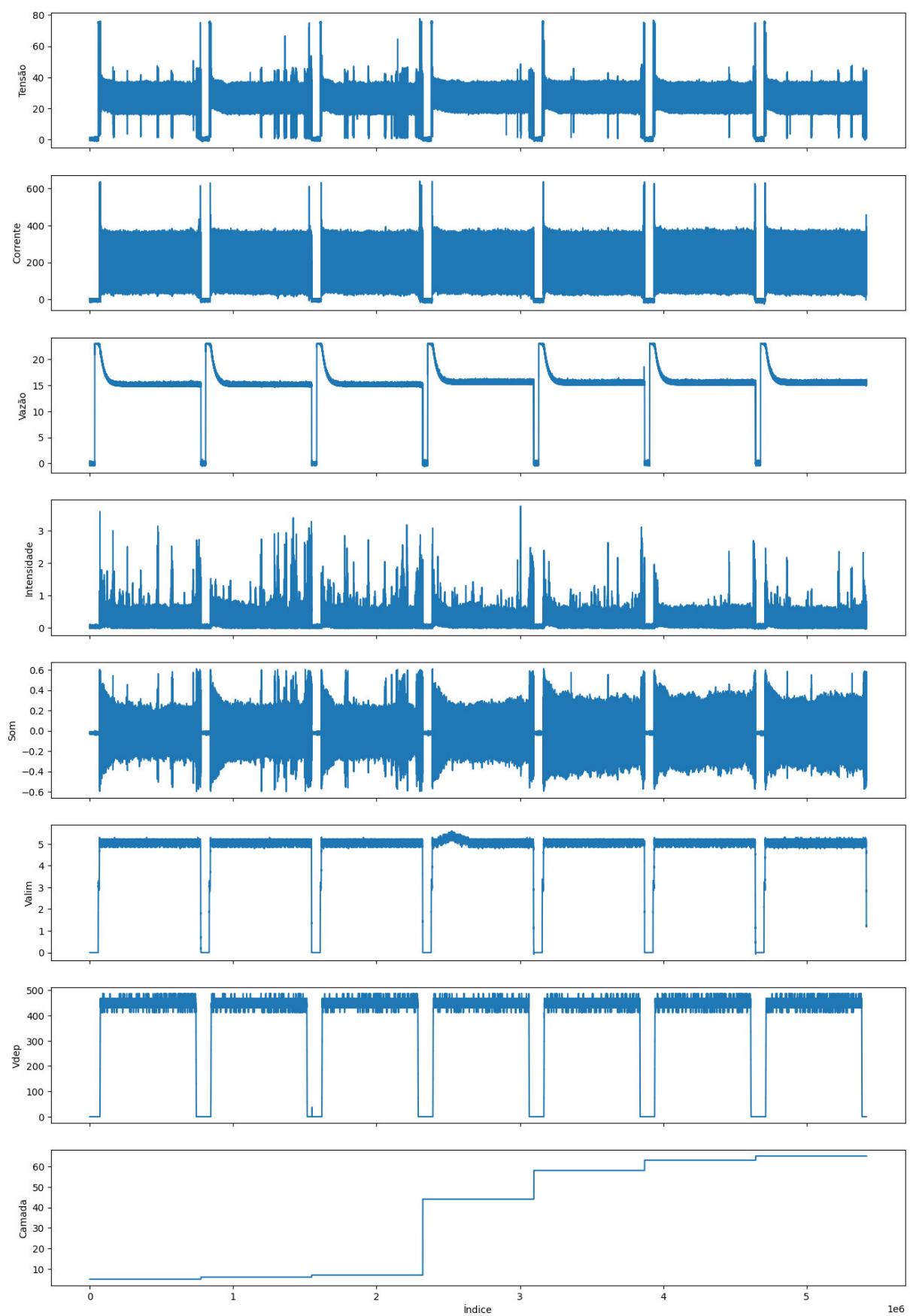


Figura 4.37 – Dados das camadas consideradas “normais”.

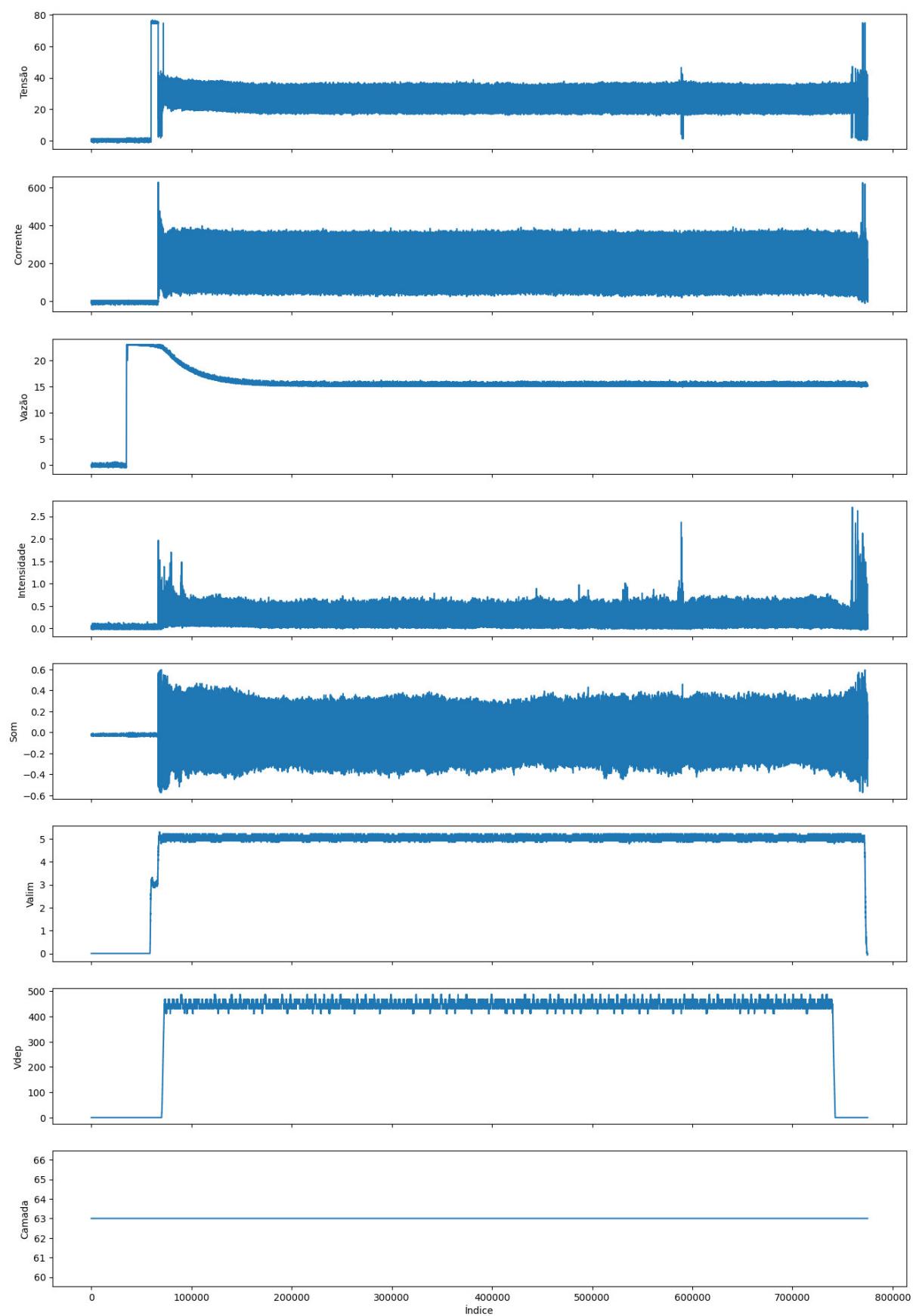


Figura 4.38 – Dados da camada de referência (63)

A distribuição do erro de reconstrução no conjunto de validação, mostrado na Fig. 4.40, apresenta comportamento unimodal com assimetria positiva, concentrando-se em valores baixos e exibindo cauda longa à direita. Tal característica demonstra adequada aprendizagem do regime apresentado pelo Autoencoder LSTM, concomitante à ocorrência esporádica de janelas com maior discrepância de reconstrução, a Fig. 4.41 apresenta o gráfico do erro de reconstrução ao longo da deposição para os dados de referência.

Tabela 4.07 – Arquitetura do Modelo Autoencoder LSTM

Modelo Autoencoder (LSTM) e Encoder construídos e prontos para o treinamento.

--- Resumo do Autoencoder Completo ---
Model: "functional"

Layer (type)	Output Shape	Param #
input_layer (InputLayer)	(None, 500, 4)	0
lstm (LSTM)	(None, 500, 128)	68,096
lstm_1 (LSTM)	(None, 64)	49,408
dense (Dense)	(None, 16)	1,040
repeat_vector (RepeatVector)	(None, 500, 16)	0
lstm_2 (LSTM)	(None, 500, 64)	20,736
lstm_3 (LSTM)	(None, 500, 128)	98,816
time_distributed (TimeDistributed)	(None, 500, 4)	516

Total params: 238,612 (932.08 KB)
Trainable params: 238,612 (932.08 KB)
Non-trainable params: 0 (0.00 B)

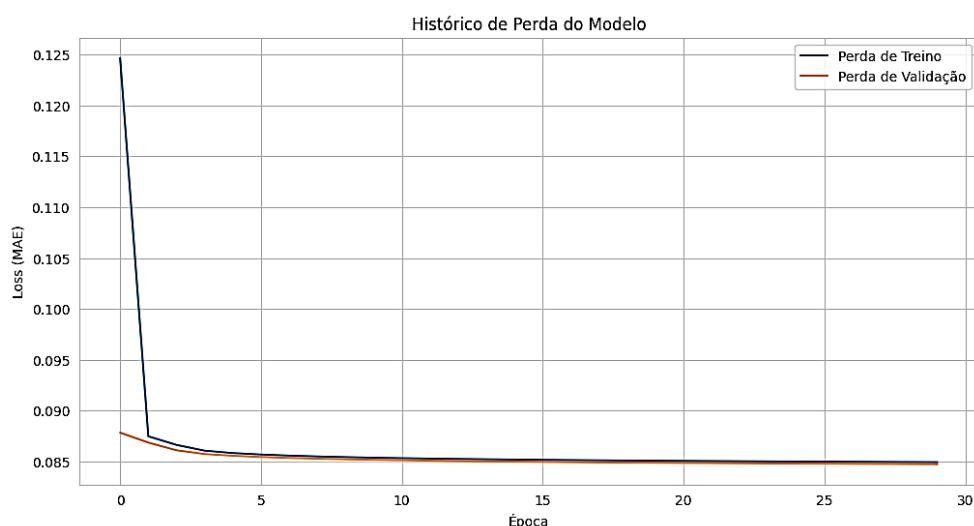


Figura 4.39 – Histórico do treinamento

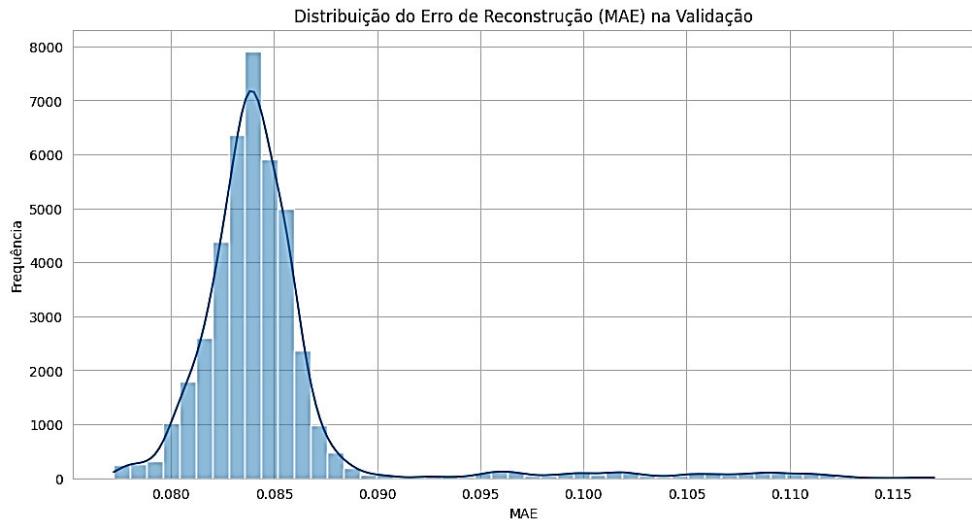


Figura 4.40 – Distribuição do Erro de Reconstrução

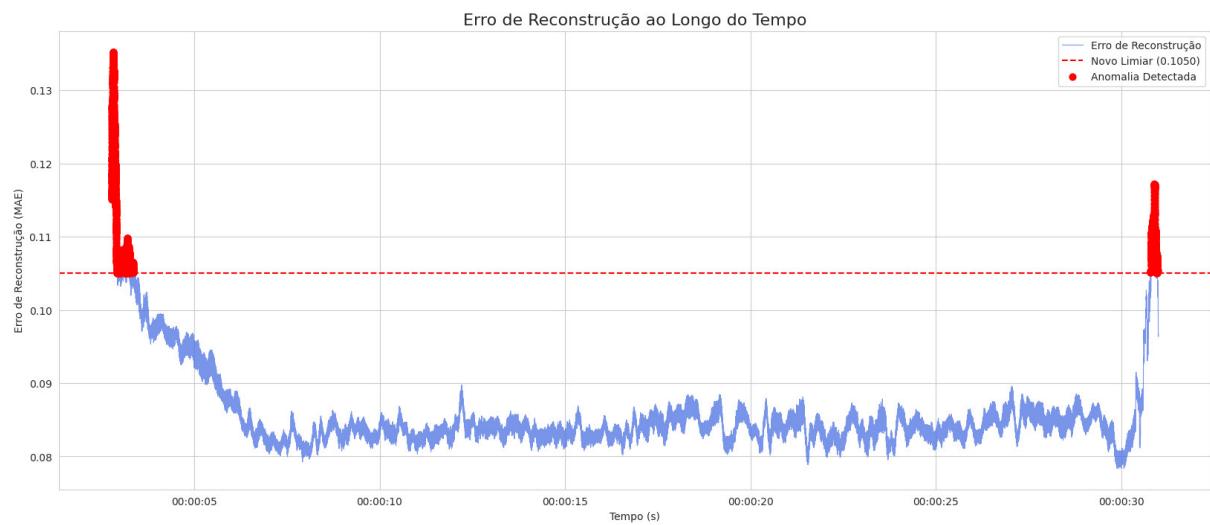


Figura 4.41 – Erro de Reconstrução dos dados de treinamento

- Análise de Anomalias da Peça CF-04 (Aço carbono)

Após a obtenção do modelo e em consonância com os fluxogramas dos algoritmos definido na etapa de Planejamento Experimental, todas as camadas da peça CF-04 foram submetidas ao Autoencoder LSTM treinado. Para cada janela temporal calculou-se o erro de reconstrução e o desvio-padrão móvel desse erro (utilizado como métrica de volatilidade). Com base nesses dois indicadores, produziram-se visualizações dedicadas à identificação de anomalias: série do erro de reconstrução com uma linha referente ao limiar de amplitude e série do desvio-padrão móvel com uma linha referente ao limiar de volatilidade, para captura de oscilações rápidas.

Os valores base dos limiares, para essa peça, foram definidos pelo percentil de 98%, com verificação posterior na ferramenta de sintonia fina. Adotaram-se os seguintes valores: limiar de amplitude = 0,105044 e limiar de volatilidade = 0,001594. Esses limiares foram então aplicados a todas as camadas da CF-04 para a sinalização automática de eventos atípicos.

Para análise integrada, criou-se um painel composto por (de cima para baixo): gráfico do erro de reconstrução com linha tracejada indicando o limiar de amplitude; gráfico do desvio-padrão móvel, que permite identificar oscilações do erro e, portanto, anomalias de volatilidade; registro fotográfico da vista frontal da camada depositada; vista superior da peça; mapa de defeitos extraído da planilha de controle; e registro da tabela de controle de deposição, destacando a ocorrência registrada para a camada avaliada.

Como estudo inicial, a Fig. 4.42 ilustra a análise de anomalias da camada de referência (camada 63). Os gráficos evidenciam comportamento correspondente à normalidade: o erro de reconstrução permanece sistematicamente abaixo do limiar de amplitude, assim como o desvio-padrão móvel, os valores só apresentam possível comportamento anômalo nas regiões iniciais e finais associadas à abertura/fechamento do arco, sem detecções no trecho da deposição. As imagens indicam o aspecto superficial regular, e as planilhas não indicam intercorrências.

Apresenta-se, em sequência, o painel de análise da camada 49, Fig. 4.43, integrando as séries do erro de reconstrução (amplitude) e do desvio-padrão móvel (volatilidade), com interpretação cruzada às evidências visuais e aos registros de processo, observa-se que no início da deposição há a ocorrência de elevação simultânea do indicador de amplitude e do sinal de volatilidade, caracterizando o transitório associado à abertura do arco. Na sequência imediata, ambos os indicadores retornam a níveis compatíveis com a normalidade. Adiante, identifica-se um episódio localizado de instabilidade, no qual ocorrem oscilações do erro que são coincidentes com incrementos do desvio-padrão móvel que cruzam o limiar de volatilidade, seguidos de um trecho de normalidade. Na região mais “a direita do registro”, evidencia-se uma região extensa de instabilidade: o erro de reconstrução apresenta flutuações relevantes e o sinal de volatilidade excede o limiar por período prolongado, corroborando a classificação de anomalia pela métrica de volatilidade.

A comparação com o registro fotográfico indica porosidade nas mesmas faixas temporais assinaladas pelas métricas, com ocorrências visíveis nas regiões verde, laranja e azul (regiões definidas no Plano Experimental). O mapa de defeitos e a planilha de controle confirmam o quadro e detalham as condições de processo: nível do líquido refrigerante (água) elevado e vazão de gás de proteção reduzida (10 l/min frente ao padronizado de 15 l/min). Tal combinação é consistente com o aumento de suscetibilidade à porosidade por insuficiência de proteção gasosa e entrada de umidade na poça de fusão.

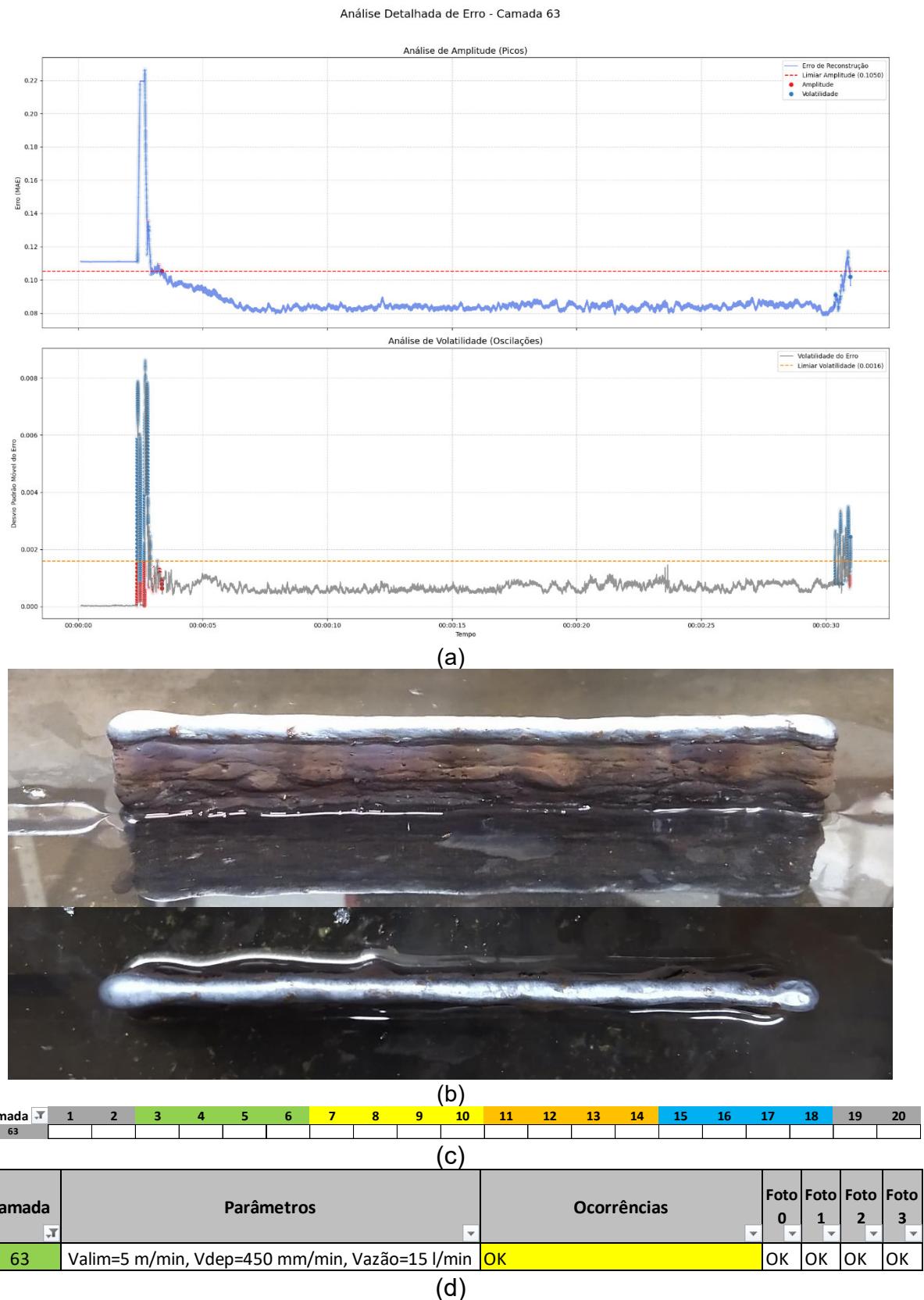


Figura 4.42 – Painel de análise de anomalias da camada 63 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.

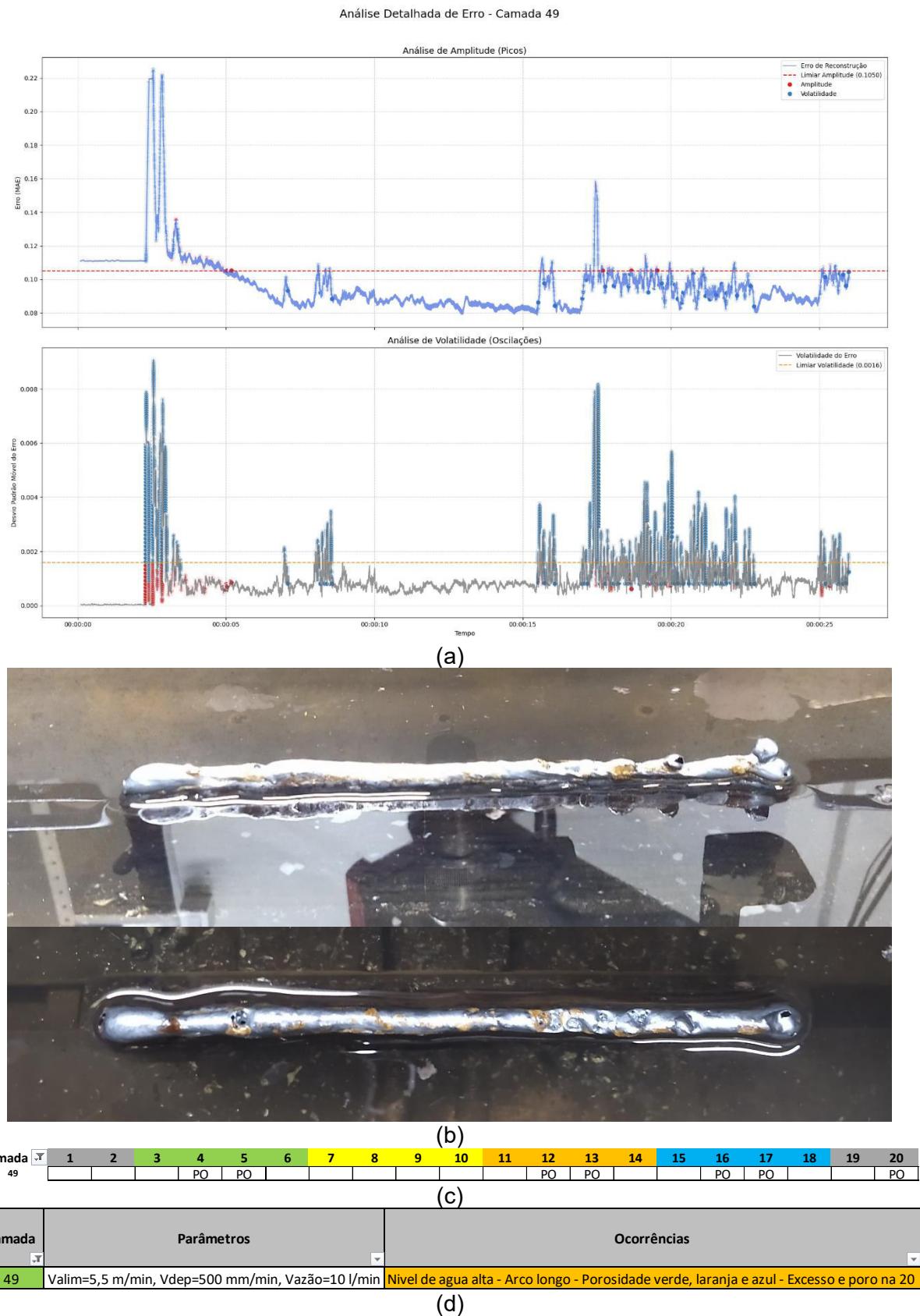


Figura 4.43 – Painel de análise de anomalias da camada 49 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.

Em síntese, a camada 49 apresenta evidências convergentes (sinais, imagens e registros operacionais) de anomalia por porosidade, com boa concordância entre os limiares aplicados e a inspeção visual.

A Fig. 4.44 apresenta o painel da camada 54, cujo comportamento difere dos casos anteriores. Observa-se, inicialmente, um pico simultâneo no indicador de amplitude e no marcador de volatilidade (desvio-padrão móvel do erro), caracterizando o transitório de abertura do arco. Superado esse trecho, o indicador de amplitude permanece acima do limiar ao longo de grande parte da deposição, com dois segmentos prolongados nos quais o excedente é mantido. Em paralelo, o marcador de volatilidade também se mantém elevado durante quase toda deposição, evidenciando oscilações persistentes do erro de reconstrução e, portanto, instabilidade contínua.

A análise cruzada com os registros fotográficos revela a presença de porosidade em toda a camada e duas regiões principais de escorramento, predominantemente na região amarela e nas regiões laranja e azul (conforme convenção do plano experimental). Os registros são convergentes com o mapa de defeitos e com a planilha de controle, que apontam porosidade generalizada e ocorrência de escorramento.

Do ponto de vista dos parâmetros de processo, esta camada foi executada com velocidade de alimentação de arame = 6,5 m/min, velocidade de deposição = 450 mm/min e vazão de gás = 10 l/min, isto é, alimentação acima e vazão de proteção abaixo (15 l/min) do padrão adotado. Sendo, compatível com os sinais e defeitos observados: a velocidade de alimentação elevada tende a aumentar a taxa de deposição, favorecendo excesso de material e desequilíbrios geométricos que se manifestaram como excedentes do indicador de amplitude (indicando o escorramento). Simultaneamente, a vazão de gás reduzida aumenta a suscetibilidade à “contaminação atmosférica” da região da poça de fusão e à transferência irregular, o que se expressa como volatilidade elevada e persistente e evidenciada pela porosidade extensa documentada nas imagens e nos registros operacionais.

De modo geral, a camada 54 apresenta instabilidade severa ao longo de praticamente toda a deposição, com anomalias de volatilidade e anomalias de amplitude em trechos extensos, coerentes com a configuração de 6,5 m/min, 450 mm/min, 10 L/min. A concordância entre métricas de anomalia, evidência visual e anotações de processo confere coerência à interpretação de porosidade generalizada e escorramento como principais não-conformidades identificadas.

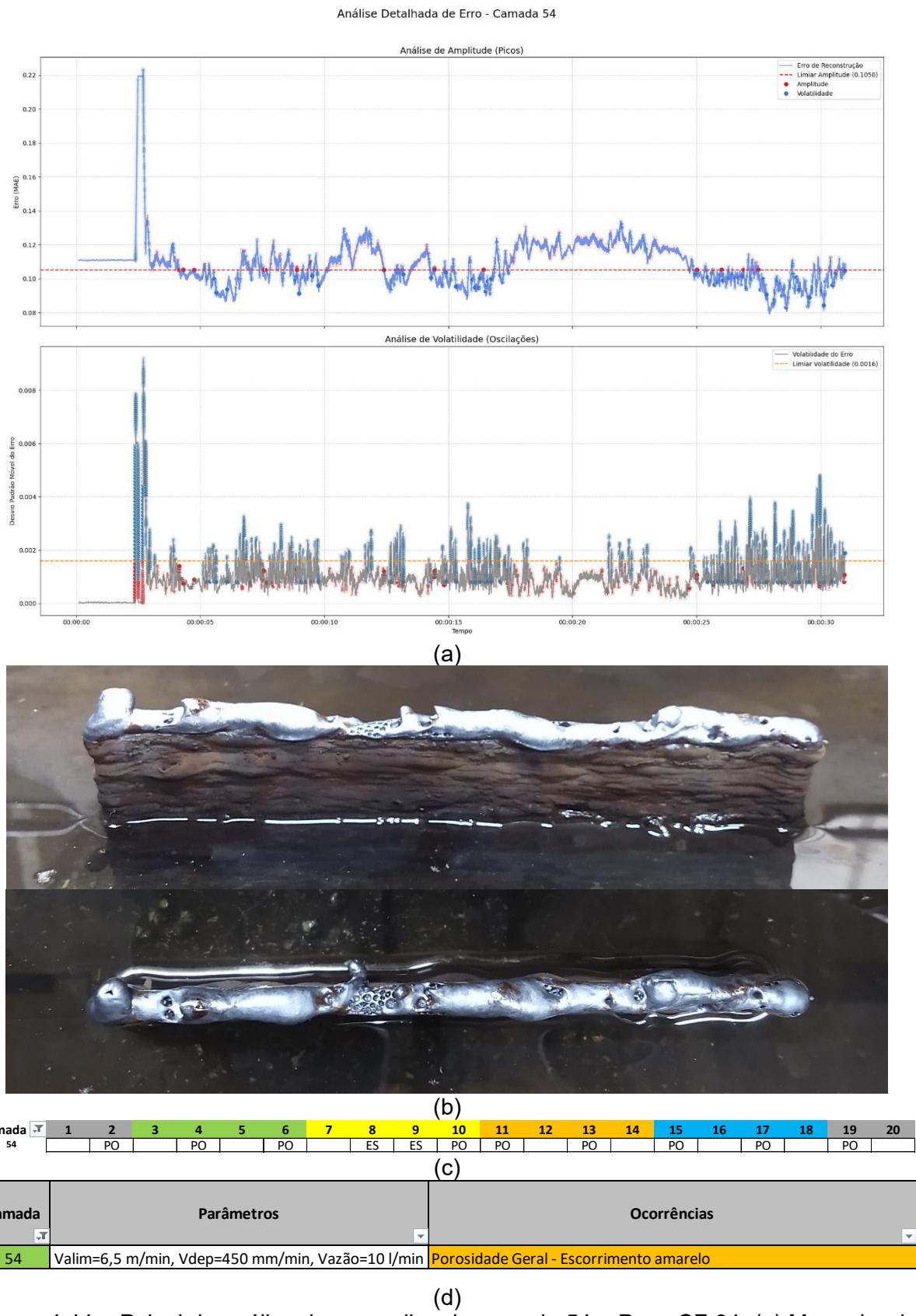


Figura 4.44 – Painel de análise de anomalias da camada 54 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.

A Fig. 4.45 apresenta o painel da camada 45. No indicador de amplitude, observa-se apenas a excursão inicial associada ao transitório de abertura do arco, inclusive com tentativa inicial malsucedida e subsequente estabilização, após a qual o erro de reconstrução permanece abaixo do limiar ao longo de praticamente toda a deposição. Em contraste, na primeira metade do cordão (regiões verde e amarela), o marcador de volatilidade (desvio-padrão móvel do erro) ultrapassa o limiar de forma sustentada, evidenciando oscilações do sinal compatíveis com instabilidade de processo.

A análise cruzada com o registro fotográfico confirma porosidade localizada nas regiões verde e amarela, em concordância com o mapa de defeitos e com as anotações da tabela de controle de deposição. Do ponto de vista operacional, a camada foi executada com velocidade de alimentação = 5,0 m/min, velocidade de deposição = 450 mm/min e vazão de gás = 12 l/min (ligeiramente abaixo de 15 l/min). Adicionalmente, foi induzida circulação de ar nas regiões verde e amarela, procedimento que reduz a eficácia da proteção gasosa e aumenta a suscetibilidade à flutuação do arco, mecanismo classicamente associado à formação de poros. A ausência de excedentes persistentes no indicador de amplitude sugere que desvios geométricos não foram evidenciados, por outro lado, a volatilidade elevada e localizada é coerente com a porosidade observada.

- Análise de Anomalias da Peça IF-02 (Aço Inoxidável)

Para ilustrar o desempenho do sistema de detecção de anomalias em peça de aço inoxidável, apresentam-se dois painéis de análise de anomalias referentes à peça IF-02:

O primeiro é relativo à Camada 45, mostrado na Fig. 4.46. No indicador de amplitude e, principalmente, no marcador de volatilidade, observa-se uma região central com oscilação acentuada e excedente de volatilidade por intervalos representativos. A análise cruzada com a tabela de ocorrências indica que, nessa região (região amarela e laranja, zona central), houve indução de instabilidade por fechamento da proteção gasosa. Embora não tenham sido evidenciados poros superficiais, o registro fotográfico e as tabelas de controle indicam uma região com aspecto rugoso onde a proteção foi reduzida.

O segundo painel é direcionado à camada 54, mostrado na Fig. 4.47. Diferentemente do caso anterior, o marcador de volatilidade se mantém, em geral, próximo do limiar, enquanto o indicador de amplitude ultrapassa o limiar de forma extensa, com valores elevados do erro de reconstrução praticamente ao longo de toda a deposição. As evidências visuais confirmam a leitura dos sinais, verifica-se escorramento em larga extensão, nas regiões sem escorramento, nota-se alargamento significativo do cordão, fato que foi indicado na planilha de controle, que registrou presença de escorramento nas regiões azul e laranja e alargamento de camada.

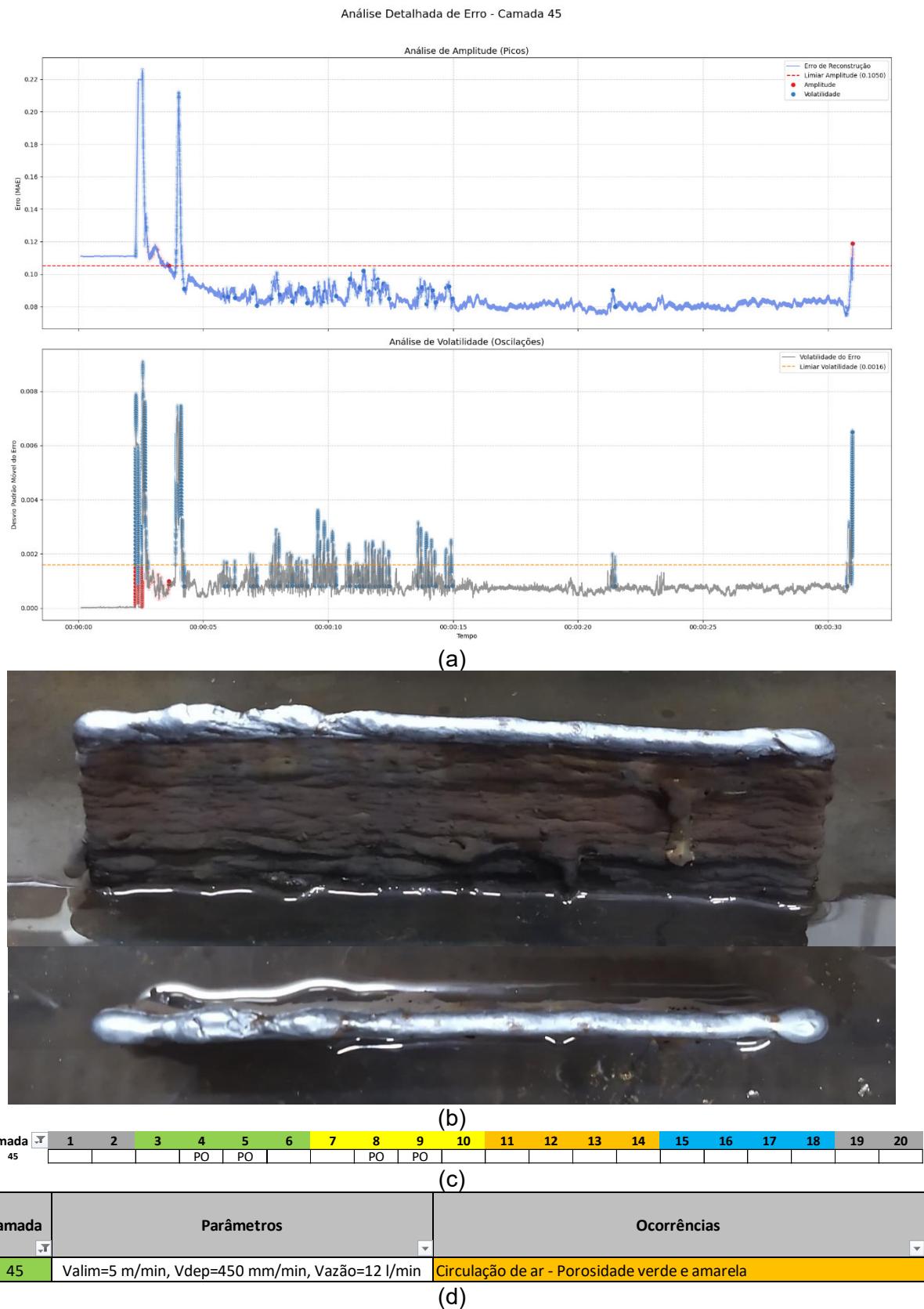


Figura 4.45 – Painel de análise de anomalias da camada 45 – Peça CF-04: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.

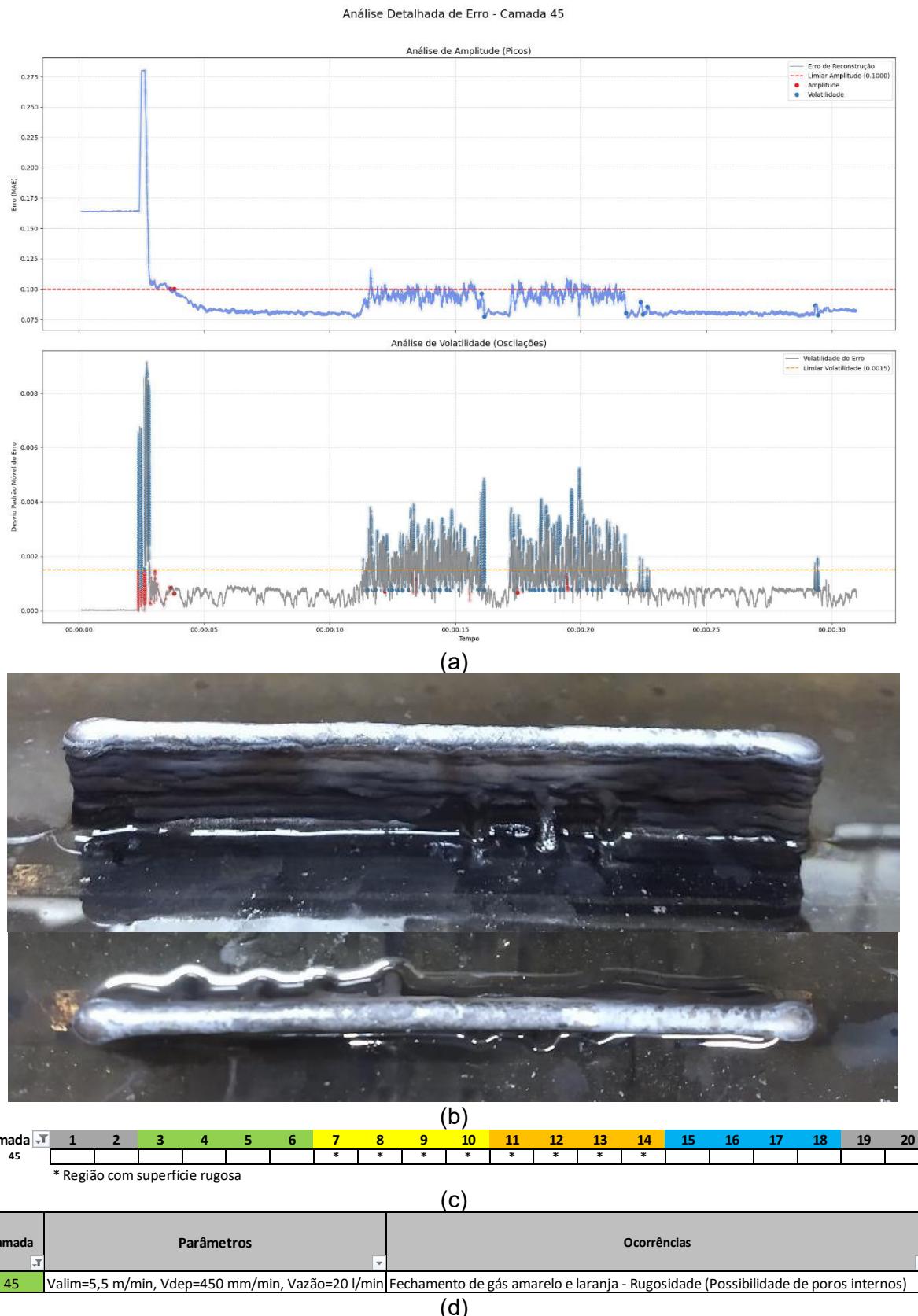


Figura 4.46 – Painel de análise de anomalias da camada 45 – Peça IF-02: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.

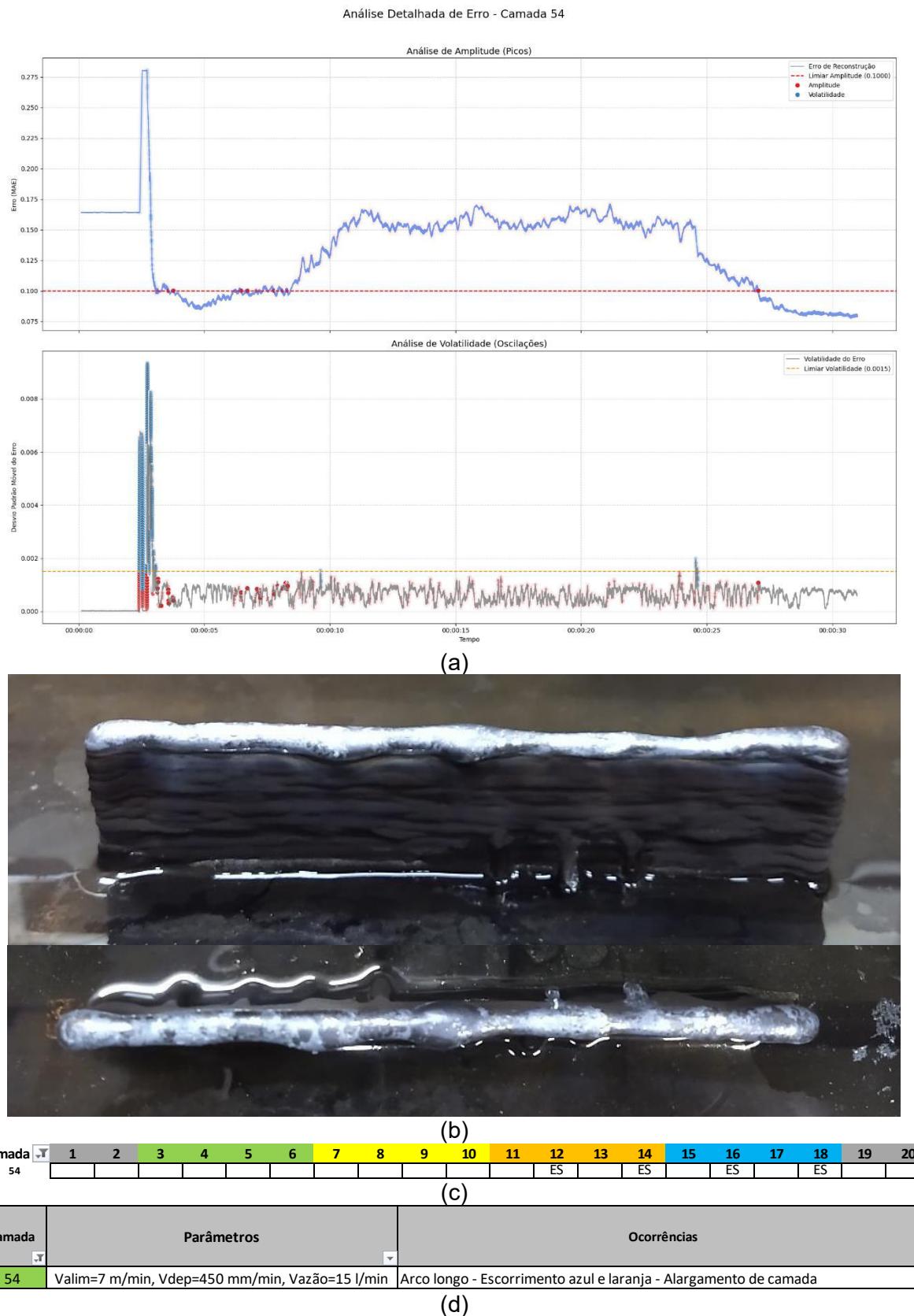


Figura 4.47 – Painel de análise de anomalias da camada 54 – Peça IF-02: (a) Marcador de amplitude e marcador de volatilidade; (b) Registro fotográfico; (c) Mapa de defeito; e (d) Controle de deposição.

Nos exemplos avaliados da peça IF-02, o critério de volatilidade mostrou-se particularmente sensível a perturbações de proteção gasosa (camada 45), manifestando-se como oscilações do erro de reconstrução e alterações de textura superficial sem, necessariamente, apresentar porosidade visível. Já o critério de amplitude evidenciou-se mais responsivo a desvios geométricos (camada 54), como escorramento e alargamento excessivo de camada, que se traduzem em discrepâncias em relação ao padrão aprendido.

- Clusterização

Após a etapa de detecção de anomalias, procedeu-se à clusterização dos dados classificados como anômalos. Inicialmente, foram filtrados por tipo de anomalia (amplitude e volatilidade). Em seguida, cada janela temporal foi representada pelas variáveis de processo e seus respectivos atributos (estatísticos e coeficientes de wavelet), os quais foram submetidas à redução de dimensionalidade, usando PCA, para mitigar colinearidade e ruído, preservando a variância explicativa essencial (maior ou igual à 95%).

O objetivo da clusterização é agrupar anomalias com assinaturas semelhantes, considerando a morfologia do sinal e contexto operacional, apoiando a investigação das prováveis causas dos defeitos e ocorrências (por exemplo: proteção gasosa insuficiente, flutuações do arco, parâmetros inadequados). Esse processo também busca identificar: “falsos-positivos” (flutuações que não se confirmaram), instabilidades que não geraram defeitos (anomalias de processo que não resultam em não-conformidades), e instabilidades que apresentam defeito confirmado (porosidade, escorramento). Como resultado, deseja-se obter grupos interpretáveis com assinaturas representativas e métricas internas, que fundamentam recomendações de ajuste de parâmetros, ações corretivas no processo, otimiza a priorização de inspeção e valida a relação entre sinais e evidências físicas.

Conforme mencionado, a etapa de clusterização utilizou todas as variáveis de processo monitoradas, para maximizar a representação das condições do sistema durante eventos de estabilidade, instabilidade e geração de defeitos.

- Clusters do IF-02

Para exemplificar os resultados de clusterização, selecionou-se a peça IF-02. Esta, apresentou uma estrutura de agrupamento reduzida em comparação às demais, o que favorece a apresentação dos resultados e evita redundâncias descriptivas. Iniciou-se a análise pelas anomalias do tipo amplitude. Para tal, empregou-se um vetor de características híbrido previamente calculado: para os sinais de alta taxa de variação (alta frequência), tensão, corrente, som e intensidade luminosa, foram extraídos coeficientes de *wavelet*; para variáveis de dinâmica mais lenta, velocidade de alimentação do arame, velocidade de deposição e

vazão do gás de proteção, foram usadas estatísticas descritivas. Em seguida, aplicou-se a PCA, para a redução de dimensionalidade, adotando cinco componentes principais que explicaram 95,53% da variância total. A etapa primária de agrupamento foi realizada com o algoritmo K-Means, definiu-se o número de clusters igual à 4 e o resultado da clusterização primária é apresentada nos gráficos subsequentes na Fig. 4.48.

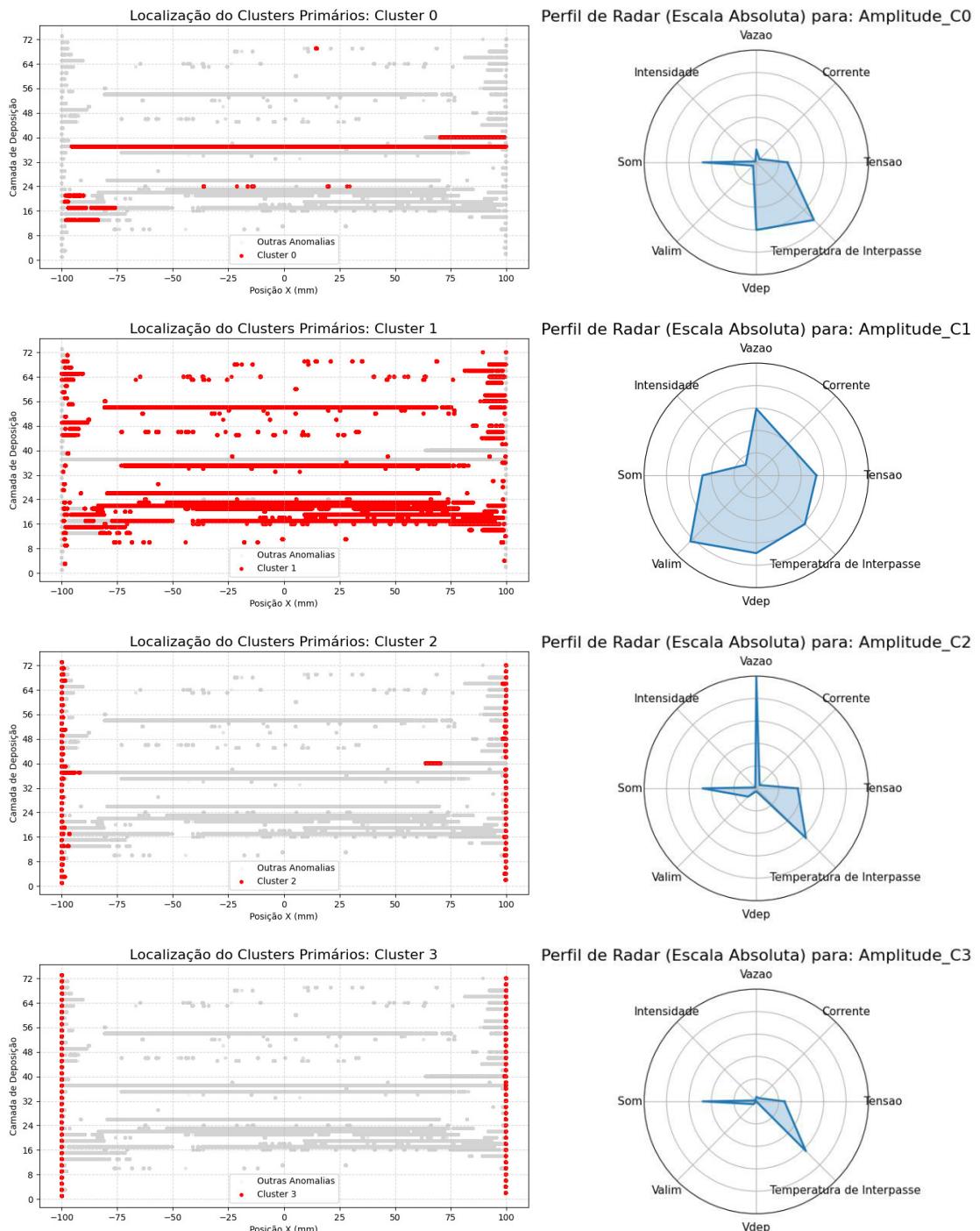


Figura 4.48 – Clusterização Primária das Anomalias de Amplitude da peça IF-02

A Fig. 4.48 apresenta, para cada cluster identificado, um par de gráficos, sendo à esquerda, o mapa de localização das regiões classificadas como anômalas e à direita, o gráfico radar que sintetiza o perfil médio das variáveis de processo associadas a cada grupo. Essa disposição permite correlacionar a distribuição das ocorrências com a assinatura multivariada dos sinais.

O Cluster 0 (Deslocamentos sem transferência de material), indica ocorrências de trechos onde há movimentação do sistema (velocidade de deposição diferente de zero), porém com variáveis tipicamente indicativas de deposição efetiva pouco expressivas. Essa combinação é compatível com falhas de deposição.

O Cluster 1 (Anomalias durante a deposição), apresenta distribuição ao longo das regiões em que as camadas são efetivamente depositadas. O radar mostra níveis compatíveis com deposição, para as variáveis de processo, sugerindo que as anomalias de amplitude surgiram durante a transferência material, provavelmente associadas a perturbações do regime de deposição.

O Cluster 2 (Abertura da válvula de gás e abertura do arco) se destaca por valores relativos superiores na vazão do gás de proteção e por concentrar-se espacialmente no trecho inicial da camada. A assinatura é consistente com a sequência de abertura de arco, quando ocorrem transientes de amplitude nos sinais pela comutação da fonte e pressurização da linha de gás.

O Cluster 3 (Período inicial de aquisição sem deposição), contém as ocorrências predominantemente na região inicial da camada e apresentam baixos níveis na maioria das variáveis de deposição, compatíveis com o intervalo em que o sistema de aquisição já está ativo, mas o arco ainda não foi aberto. Portanto, são janelas temporais relativas ao período de “pré-depósito”, que é o tempo entre o início da aquisição e a abertura do arco elétrico.

Depois de identificar o Cluster 1 como indicativo de anomalias durante a deposição, foi realizada sua subclusterização para aprimorar as assinaturas e confirmar a ligação com defeitos realmente observados (e não apenas com registros genéricos de anomalia e instabilidade). O Cluster 1 foi particionado em três subclusters, apresentados na Fig. 4.49, e analisados combinando o mapa de localização das ocorrências e gráficos radar das variáveis de processo:

Subcluster 0 (Alta velocidade de alimentação e baixa vazão de gás, sem defeito registrado). A Tab. 4.08 reúne as camadas associadas a este subcluster, nelas, verifica-se velocidade de alimentação relativamente alta combinada com vazão de gás reduzida. Embora o padrão de processo tenha sido considerado potencialmente crítico, não foram identificados defeitos nas ocorrências analisadas; no entanto, as camadas exibiram um alargamento excessivo.

Subcluster 1 (Transientes iniciais de deposição). Mostra predominância de ocorrências no início das camadas. O radar aponta uma alta vazão de gás, o que pode estar relacionado ao transiente de abertura do arco (abertura da válvula de gás logo antes do arco) e à possibilidade de desvios geométricos nas áreas de início e fim do cordão.

Subcluster 2 (Alta velocidade de alimentação e vazão de gás em valor padrão, com ocorrência de escorramento). As camadas mencionadas na Tabela 4.09 exibem uma velocidade de alimentação consideravelmente alta, enquanto a vazão de gás se mantém no nível de referência. Dentre três camadas destacadas, duas exibiram escorramento, o que sugere maior propensão desse subcluster ao defeito.

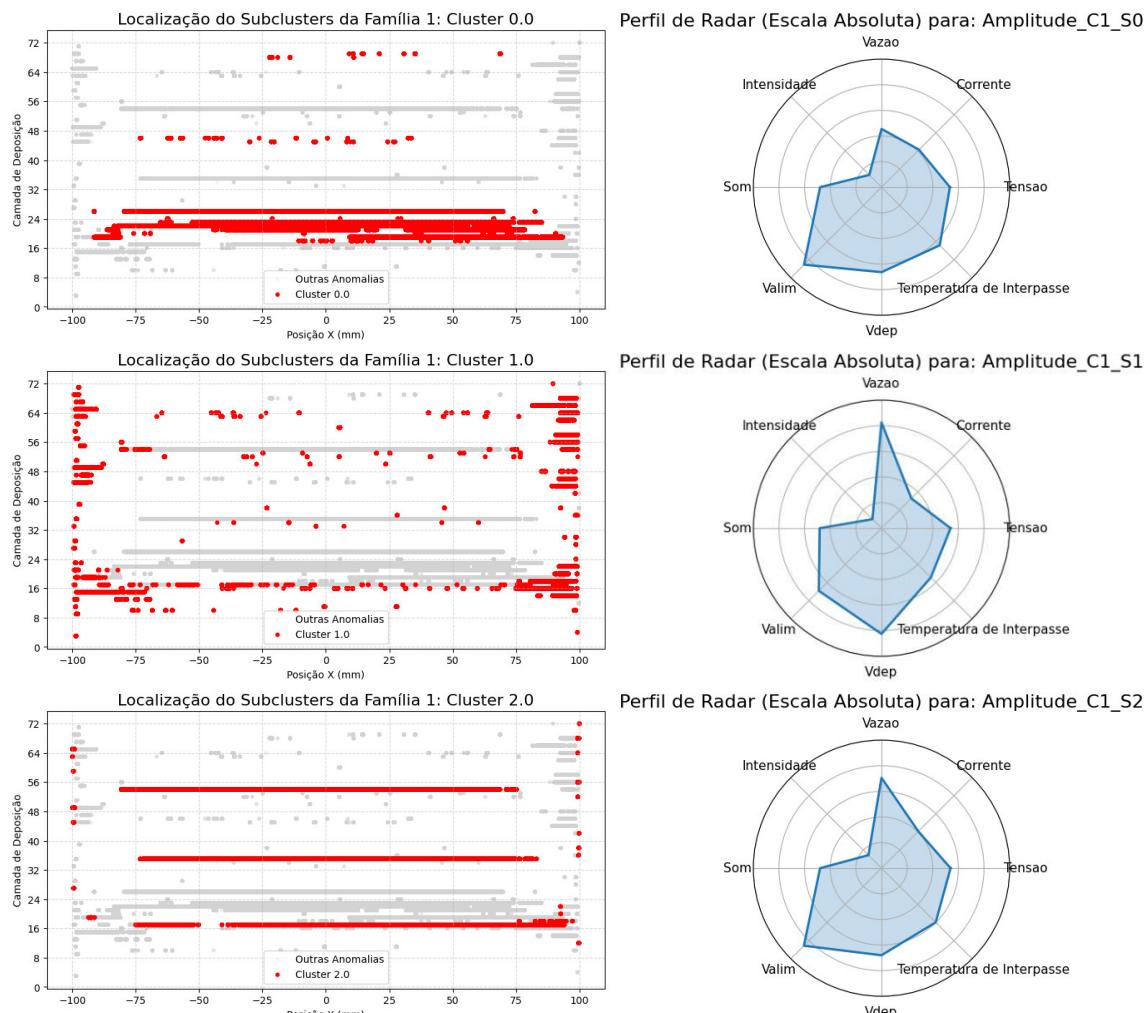


Figura 4.49 – Clusterização Secundária das Anomalias de Amplitude da peça IF-02

Com base na análise dos clusters primários de anomalias de amplitude, e na evidência empírica de que o Subcluster 2 (dentro do Cluster 1) apresenta a maior associação observada com ocorrências de escorramento, adota-se esse subcluster como assinatura preditiva do

referido defeito. Em outras palavras, as janelas temporais rotuladas como Subcluster 2 são tratadas como indicadores de alta probabilidade de escorramento na peça IF-02.

Tabela 4.08 – Registro das camadas do Cluster 1/Subcluster 0 da Anomalias de Amplitude

Camada	Parâmetros	Ocorrências
26	Valim=7 m/min, Vdep=350 mm/min, Vazão=10 l/min	Arco longo - OK
23	Valim=7 m/min, Vdep=350 mm/min, Vazão=10 l/min	OK
22	Valim=7 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=10 l/min	Arco longo - OK
21	Valim=7 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=10 l/min	Falha ao abrir o arco + Arco longo - OK
19	Valim=6,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=10 l/min	VA=6 verde e amarelo - VA=6,5 azul e laranja

Tabela 4.09 – Registro das camadas do Cluster 1/Subcluster 2 da Anomalias de Amplitude

Camada	Parâmetros	Ocorrências
54	Valim=7 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Arco longo - Escorramento azul e laranja - Alargamento de camada
35	Valim=7 m/min, Vdep=350 mm/min, Vazão=15 l/min	Arco longo - Escorramento Geral
17	Valim=6,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Falha ao abrir o arco - OK

A Fig. 4.50 apresenta a distribuição espacial das previsões de escorramento em três dimensões (coordenadas da peça), permitindo inspecionar a localização das anomalias de amplitude com as regiões de interesse ao longo do volume depositado. A interpretação do contexto geométrico das ocorrências evidenciadas é facilitada com a representação 3D, auxiliando o processo de inspeção.

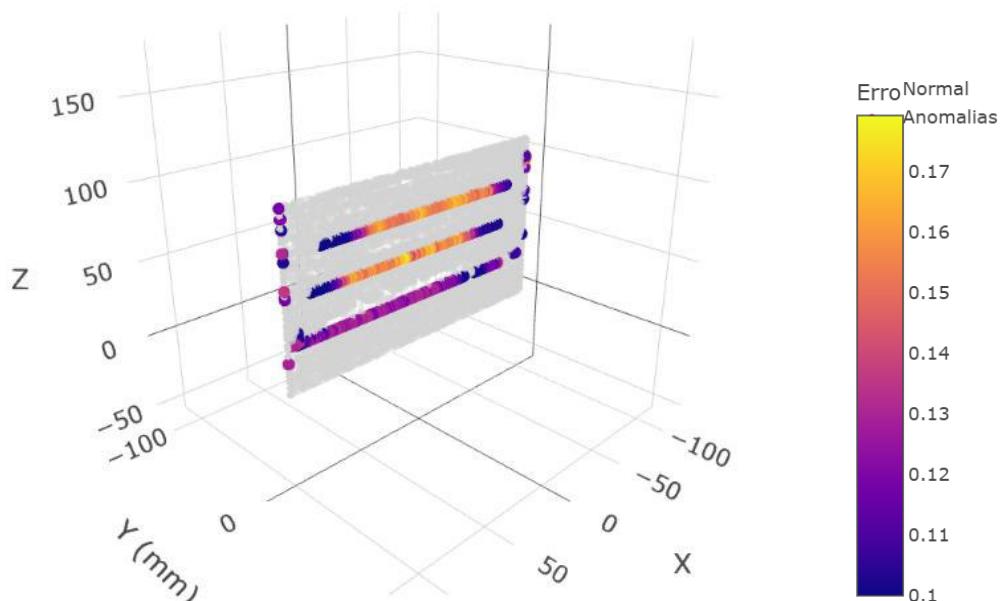


Figura 4.50 – Visualização 3D de Anomalia: previsão de Escorramento da peça IF-02.

Como forma de validação, a predição foi sobreposta à imagem de raio-X previamente apresentada na Fig. 4.31, para a peça IF-02. A Fig. 4.51 mostra a sobreposição entre as regiões previstas como escorramento (derivadas do Cluster 1/Subcluster 2) e as indicações radiográficas correspondentes. Essa comparação espacial, realizada após a calibração geométrica e alinhamento métrico entre os domínios da imagem e da peça, demonstra uma concordância qualitativa entre os sinais preditos e as descontinuidades observadas. Isso confirma a utilização do Subcluster 2 como preditor operacional de escorramento, uma vez que representa a assinatura com maior probabilidade de escorramento na IF-02.

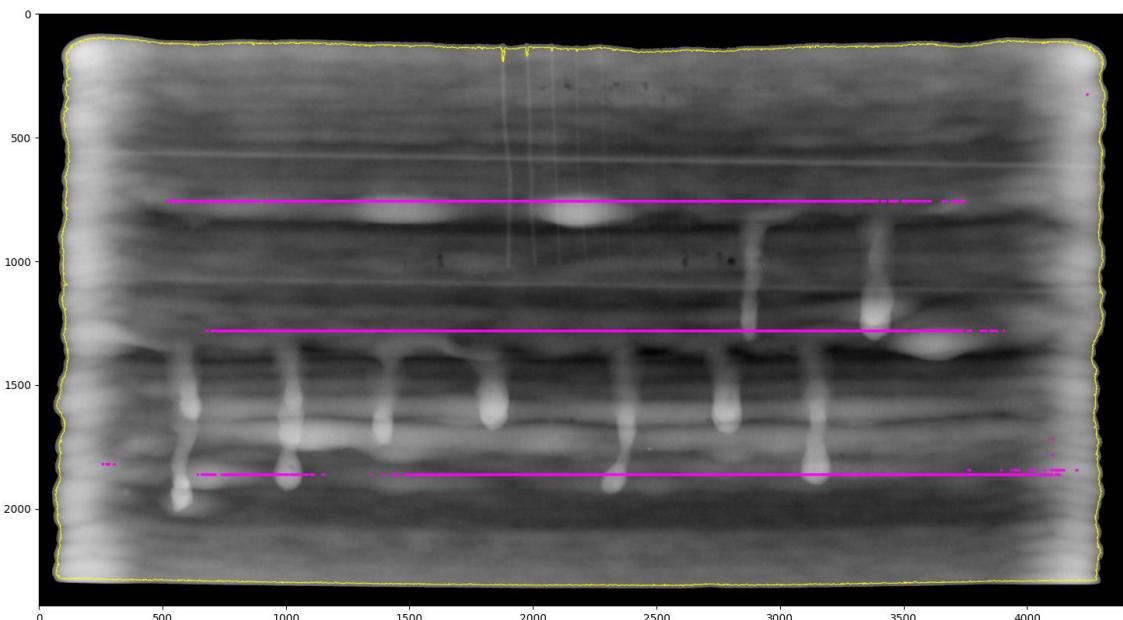


Figura 4.51 – Sobreposição da previsão de Escorramento da peça IF-02 com o Raio-X

Para fins ilustrativos, a Fig. 4.52 apresenta a sobreposição das ocorrências do Subcluster 0, derivadas das anomalias de amplitude do Cluster 1, com a imagem de raio-X da peça IF-02, observa-se concordância espacial consistente entre as regiões indicadas pelo Subcluster 0 e áreas que exibem desvios geométricos, em particular alargamento de camadas/cordões.

Concluída a etapa de clusterização e predição das anomalias de amplitude, procedeu-se, de forma análoga, à análise das anomalias de volatilidade. Utilizou-se as características híbridas (mesmo conjunto na etapa anterior), seguido de PCA com 12 componentes, mantendo 95,51% da variância explicada acumulada. O algoritmo K-Means ($k = 3$) executou o agrupamento, estabelecendo a clusterização primária para anomalias de volatilidade. Para cada cluster, a Fig. 4.53 mostra o gráfico de localização das ocorrências de anomalia (à esquerda) e o gráfico radar (à direita) com a assinatura média normalizada das variáveis.

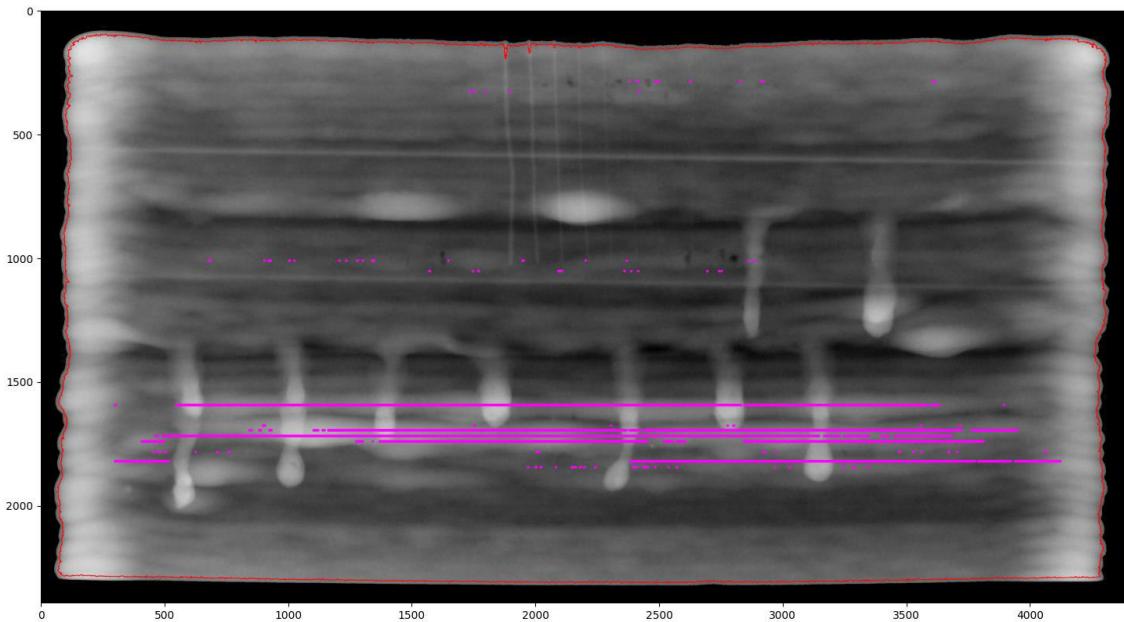


Figura 4.52 – Sobreposição da previsão de Desvio Geométrico da peça IF-02 com o Raio-X

A interpretação seguiu o mesmo procedimento adotado na etapa de amplitude, integrando: distribuição espacial das ocorrências, assinaturas multivariadas dos grupos (radar), planilha de controle de deposição (registro de ocorrência) e radiografia da peça. O cruzamento de evidências permitiu a identificação dos clusters com maior probabilidade de estar associados a defeitos. Nesta etapa, o defeito de interesse é a porosidade, selecionou-se os clusters candidatos com maior possibilidade de corresponder a regiões porosas, que foram aprofundados nas análises subsequentes (subclusterização e validações).

Cluster 0 (Assinatura compatível com porosidade). Nota-se uma coincidência espacial entre a distribuição dos poros mostrada na radiografia da IF-02 (Fig. 4.31) e as ocorrências deste cluster. O perfil radar mostra uma baixa vazão de gás de proteção, o que geralmente indica uma insuficiência de proteção gasosa e, consequentemente, aumenta a probabilidade de formação de poros. A topologia espacial e a assinatura multivariada, juntas, corroboram a sólida ligação do Cluster 0 com a porosidade.

Cluster 1 (Transientes de abertura do arco). A maior parte dos pontos está concentrada nos começos das camadas, e o radar mostra uma alta vazão de gás de proteção, compatível com o transiente de abertura do arco. Há um caso específico na camada 40, onde a anomalia se apresenta em posição fora do início de camada, a planilha de controle indica uma abertura de arco fora de posição, justificando a localização incomum e reforçando a relação do cluster com eventos transitórios de abertura de arco.

Cluster 2 (Instabilidades sob proteção gasosa). Possui o maior número de eventos e muitos pontos isolados em regiões de deposição efetiva. No entanto, o radar aponta que há

uma proteção gasosa adequada, o que indica que as anomalias possivelmente refletem instabilidades de processo (como oscilações transitórias) que não são diretamente relacionadas a uma falta de gás e que têm menor probabilidade de se correlacionarem com porosidade.

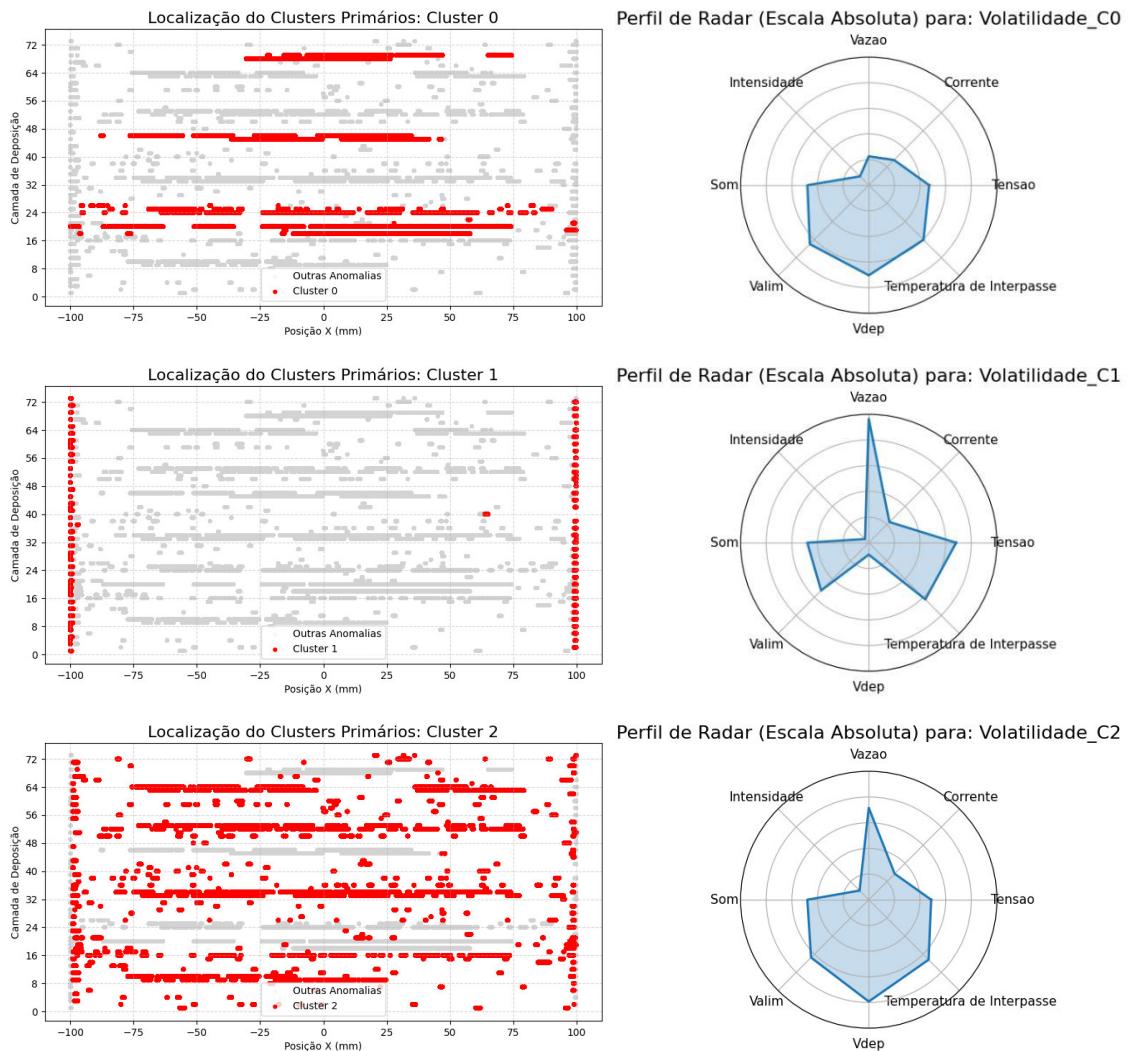


Figura 4.53 – Clusterização Primária das Anomalias de Volatilidade da peça IF-02

Dado o maior indício de associação a porosidade, o Cluster 0 foi decomposto em dois subclusters (Subcluster 0 e Subcluster 1), apresentados na Figura 4.54, cujas assinaturas no gráfico radar são semelhantes, porém, o Subcluster 0 demonstra nível de vazão de gás de proteção ligeiramente menor e a localização das suas ocorrências é altamente consistente com o padrão radiográfico de porosidade observado na IF-02, o raio-X indica duas regiões porosas aproximadamente nas camadas 45 e 68, ambas abrangidas pelo Subcluster 0. A análise da Tab. 4.10, registro de ocorrências de processo, indica que, nessas camadas, houve

a indução de instabilidade devido ao fechamento da válvula de gás em trechos específicos, oferecendo uma explicação para a formação de poros por deficiência de proteção gasosa.

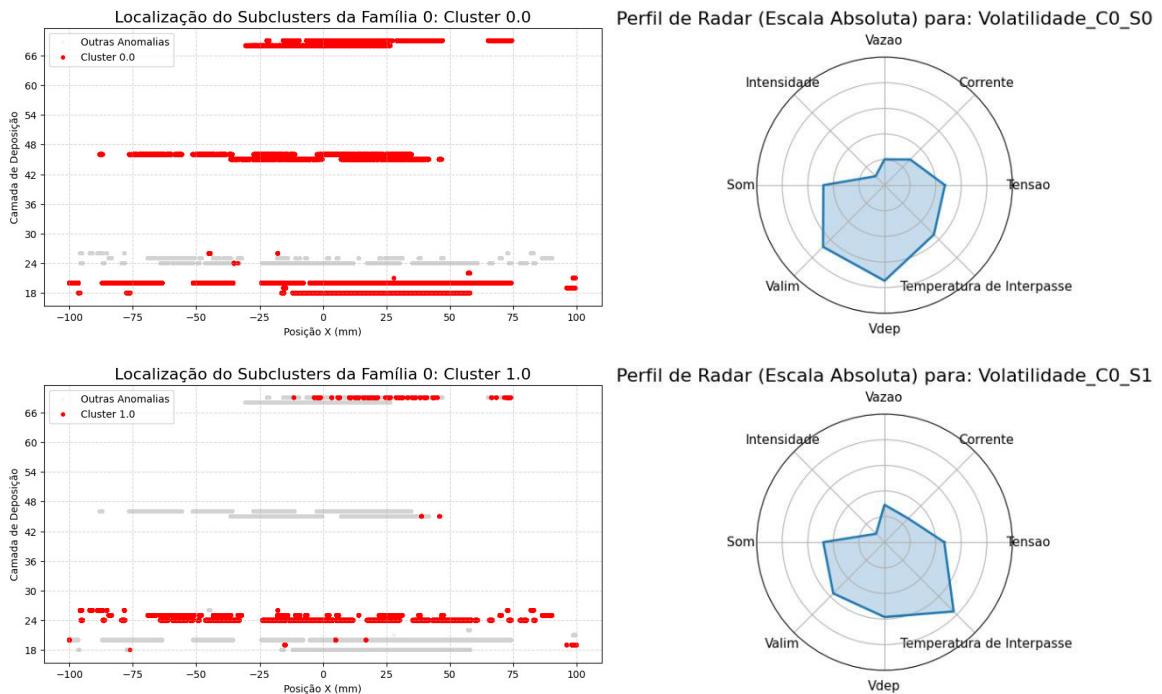


Figura 4.54 – Clusterização Secundária das Anomalias de Volatilidade da peça IF-02

O Subcluster 1, também exibe em sua assinatura a vazão de gás reduzida, embora menos acentuada do que no Subcluster 0. Os registros de processo, presentes na Tab. 4.11, mostram intervenções feitas para provocar instabilidade, no entanto, nas áreas radiografadas correspondentes, não foram encontrados defeitos, apenas instabilidades de regime relacionadas à anomalia de volatilidade, sem qualquer manifestação visual detectável.

Com base na concordância espacial (radiografia), na assinatura multivariada (radar) e na evidência operacional (fechamento de gás, Tabela 4.10), toma-se o Subcluster 0 do Cluster 0 como a assinatura de referência para a predição de porosidade na IF-02. Assim, ocorrências classificadas como Subcluster 0 são tratadas como indicadores preditivos de porosidade nas rotinas de inspeção e validação.

Tabela 4.10 – Registro das camadas do Cluster 0/Subcluster 0 da Anomalias de Volatilidade

Camada	Parâmetros	Ocorrências
69	Valim=5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Fechamento de gás amarelo e laranja - Rugosidade (Possibilidade de poros internos)
68	Valim=5,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=15 l/min	Fechamento de gás amarelo e laranja - Rugosidade (Possibilidade de poros internos)
46	Valim=5,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=20 l/min	Fechamento de gás amarelo e laranja - Rugosidade (Possibilidade de poros internos)
45	Valim=5,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=20 l/min	Fechamento de gás amarelo e laranja - Rugosidade (Possibilidade de poros internos)
20	Valim=5,5 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=10 l/min	Fechamento de gás geral - - Rugosidade (Possibilidade de poros internos)
18	Valim=6 m/min, Vdep=450 mm/min, Vazão=10 l/min	Fechamento de gás azul e laranja - Rugosidade (Possibilidade de poros internos)

Tabela 4.11 – Registro das camadas do Cluster 0/Subcluster 1 da Anomalias de Volatilidade

Camada	Parâmetros	Ocorrências
25	Valim=4,5 m/min, Vdep=350 mm/min, Vazão=10 l/min	Circulação de ar - Rugosidade superficial
24	Valim=4,5 m/min, Vdep=350 mm/min, Vazão=10 l/min	Fechamento de gás - Rugosidade superficial

Com base nos registros preditivos de porosidade para IF-02, foi criada uma visualização 3D das regiões com maior probabilidade de poros, a fim de auxiliar o inspetor no planejamento e na priorização da inspeção ao longo do volume depositado. A Fig. 4.55 representa, em três dimensões, a distribuição espacial das janelas temporais rotuladas pelo Subcluster 0 (Cluster 0), evidenciando as áreas com elevada propensão à porosidade. A distribuição espacial dos pontos relativos as camadas e progresso da deposição, permitiu contextualizar as ocorrências no ambiente geométrico da peça.

Em etapa complementar de validação, procedeu-se a comparação das previsões com a imagem de raio-X da IF-02. A Fig. 4.56 exibe a sobreposição entre as regiões previstas como porosas e as indicações radiográficas correspondentes, após calibração geométrica e alinhamento métrico entre os domínios da peça e da imagem. A concordância qualitativa verificada, com a localização consistente dos pontos preditos nas regiões apontadas pela radiografia, apoia a utilização do Subcluster 0 (Cluster 0) como um marcador funcional de porosidade.

Em resumo, a estratégia adotada (identificação de anomalias, clusterização, assinatura de volatilidade, mapeamento 3D, sobreposição radiográfica) oferece evidências consistentes da utilidade diagnóstica do Subcluster 0 (Cluster 0), direcionando inspeções focadas e medidas de mitigação em condições de maior risco de porosidade.

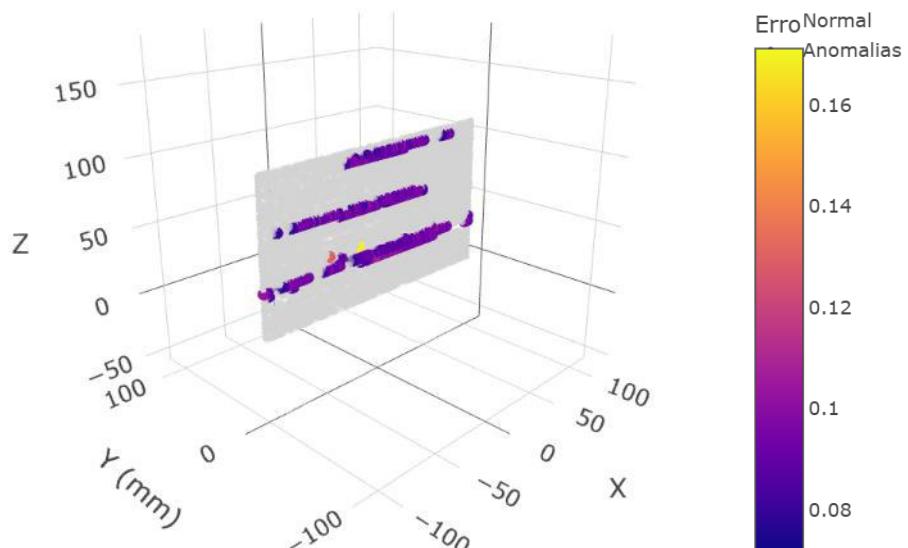


Figura 4.55 – Visualização 3D de Anomalia: previsão de Porosidade da peça IF-02

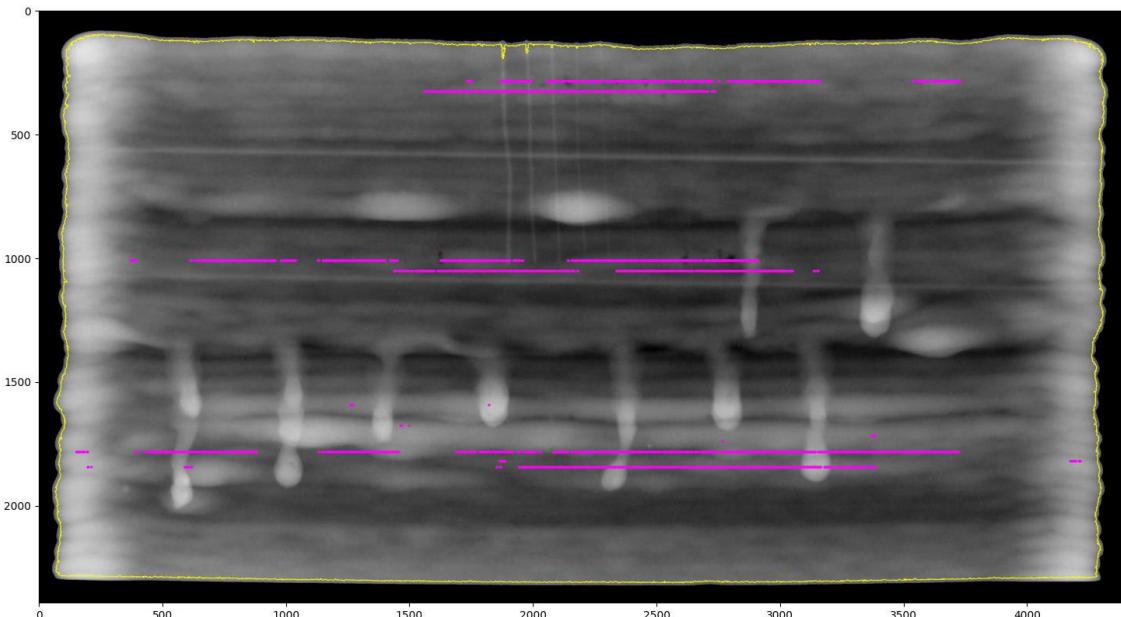


Figura 4.56 – Sobreposição da previsão de Porosidade da peça IF-02 com o Raio-X

- Validação da metodologia preditiva para as demais peças

Como parte de validação da estratégia metodológica, o procedimento adotado na peça IF-02, extração de características híbridas, redução de dimensionalidade e clusterização/subclusterização das anomalias de volatilidade, foi reproduzido integralmente nas outras peças do conjunto experimental. Os painéis de resultados sintetizados nas Figuras 4.57 a 4.61 apresentam, respectivamente, as previsões e validações para as peças IM-02, CM-01, IG-03, CG-04 e CF-04 mantendo o protocolo de análise: mapeamento espacial das ocorrências, assinatura multivariada via gráfico radar, cruzamento com a planilha de controle de deposição por camada e validação radiográfica por sobreposição.

Por se tratar de defeito interno, optou-se por priorizar a apresentação dos resultados das previsões de porosidade em todas as peças, pois apresentam detecção intrinsecamente mais desafiadora no exame visual, em comparação ao escorramento (defeito externo).

Observou-se consistência qualitativa entre as assinaturas selecionadas (clusters/subclusters) e as regiões porosas evidenciadas nas radiografias das cinco peças. Vale ressaltar que as ligas de aço carbono (CF-04, CM-01 e CG-04) foram mais propensas à indução de porosidade, os raios-x mostraram uma maior concentração de regiões porosas em comparação às peças de aço inoxidável. Além da indução por fechamento do gás de proteção, outras instabilidades induzidas também estiveram associadas à formação de poros, o que motivou, nessas peças, a adoção de mais de uma assinatura (cluster/subcluster) compatível com a previsão de porosidade.

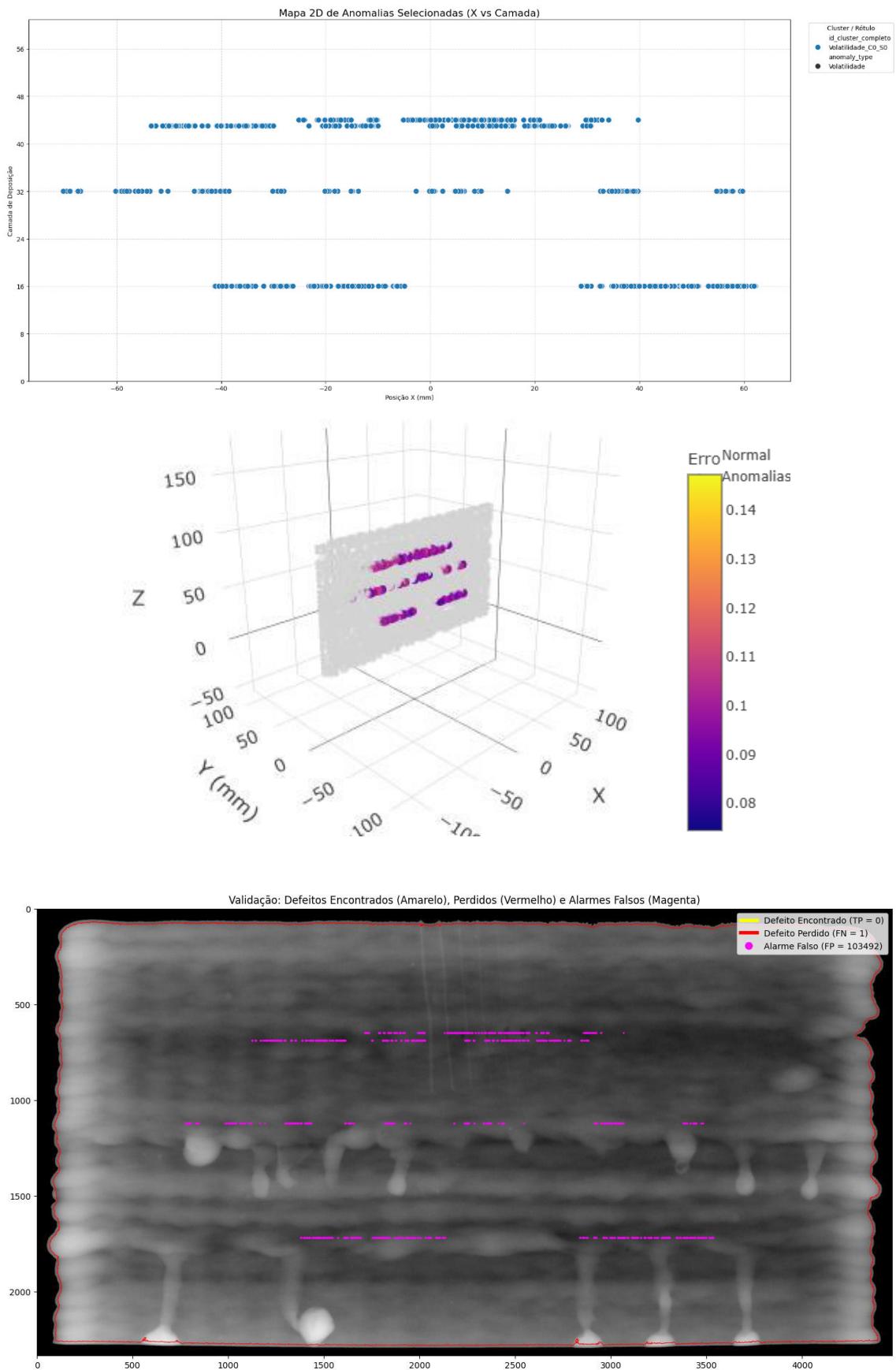


Figura 4.57 – Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça IM-02

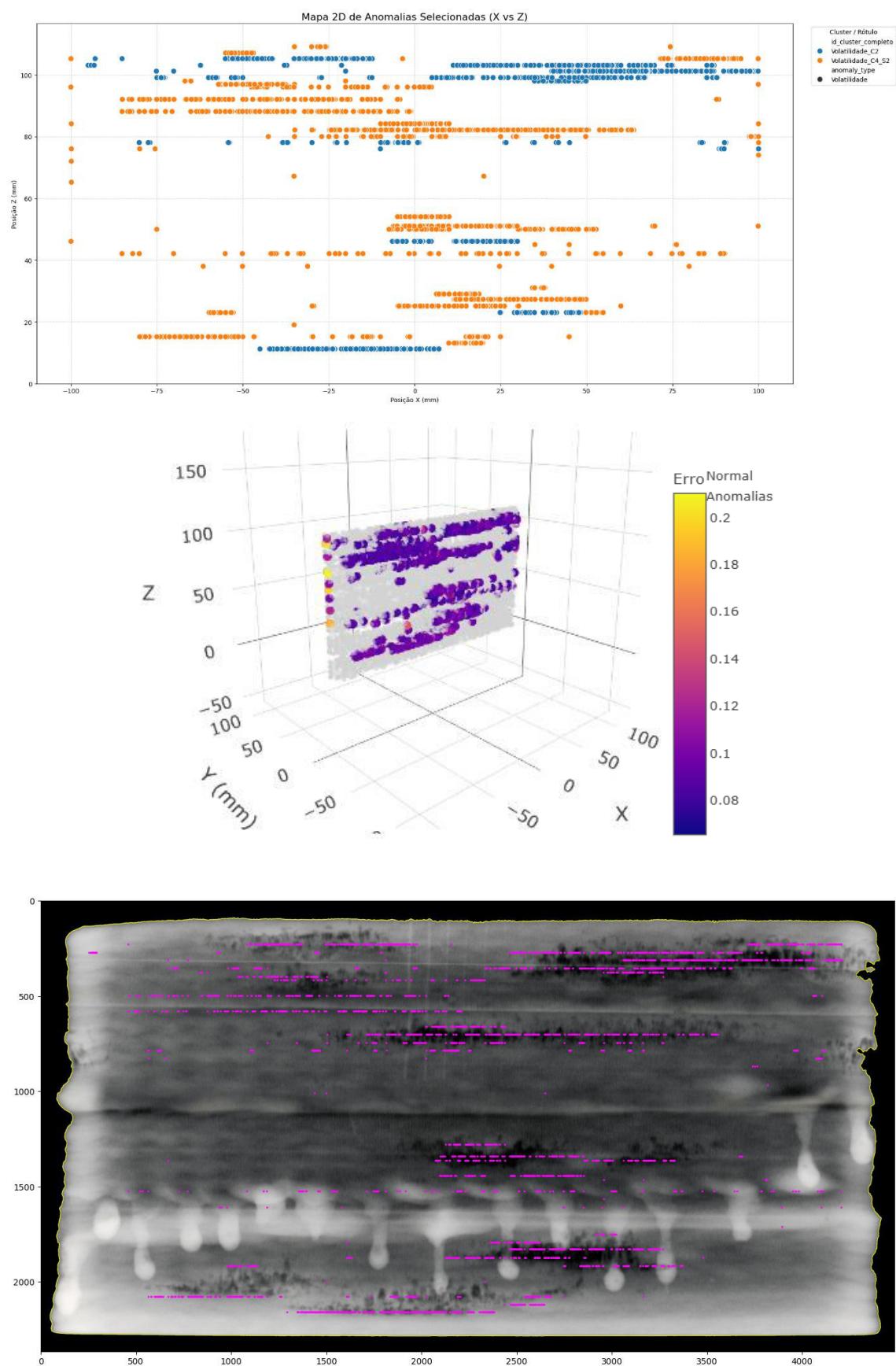
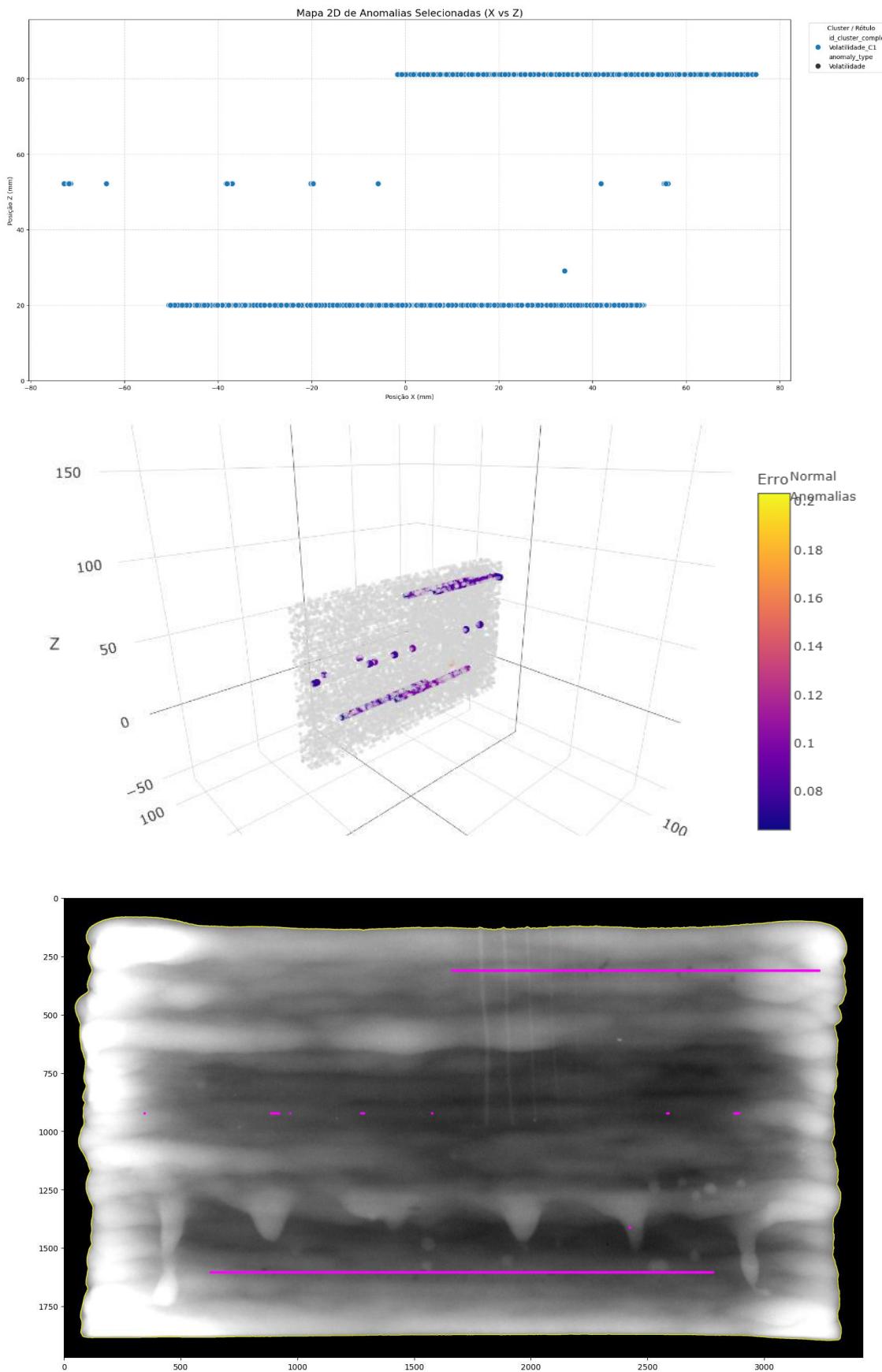


Figura 4.58 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça CM-01



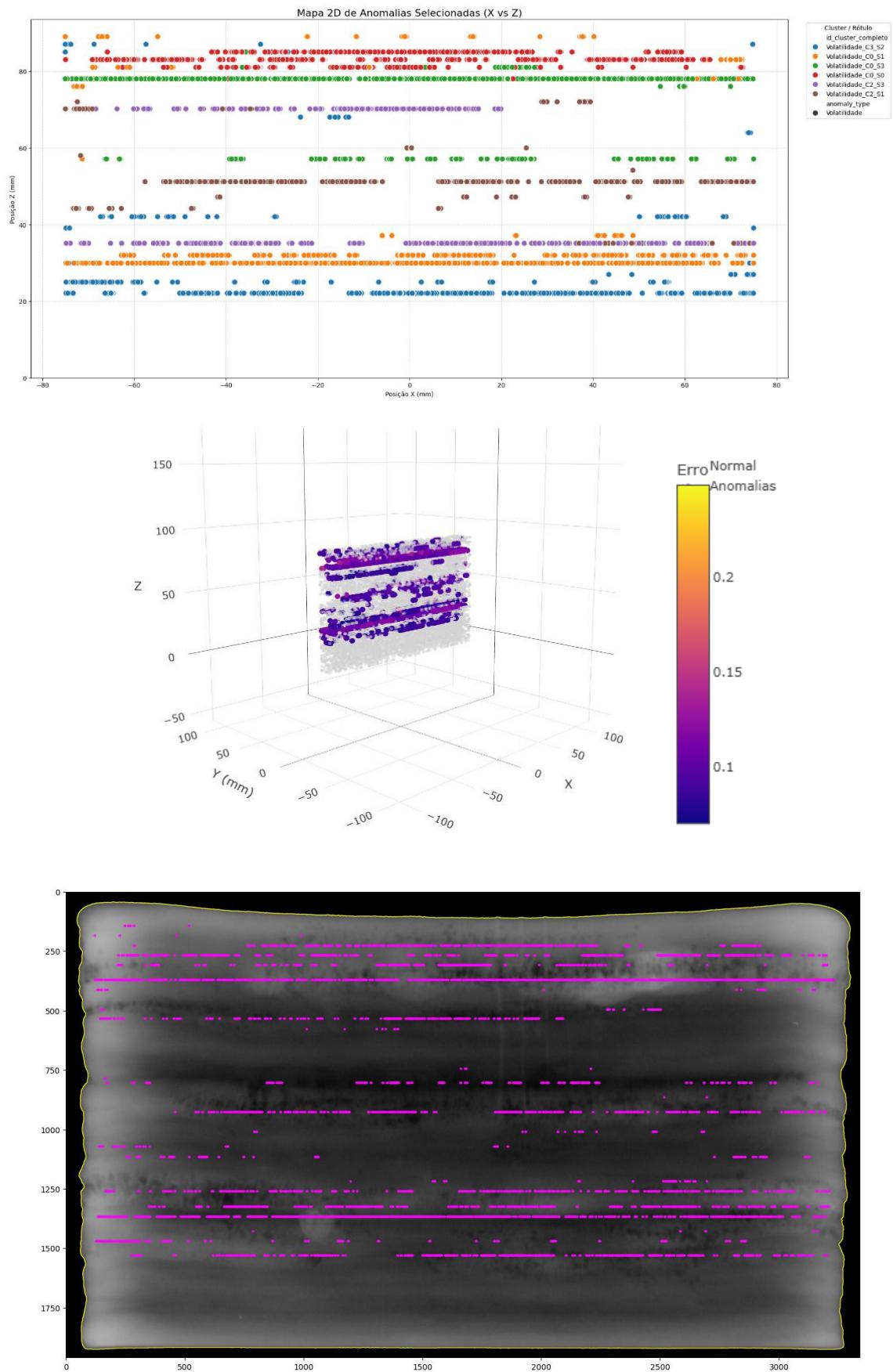


Figura 4.60 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça CG-04

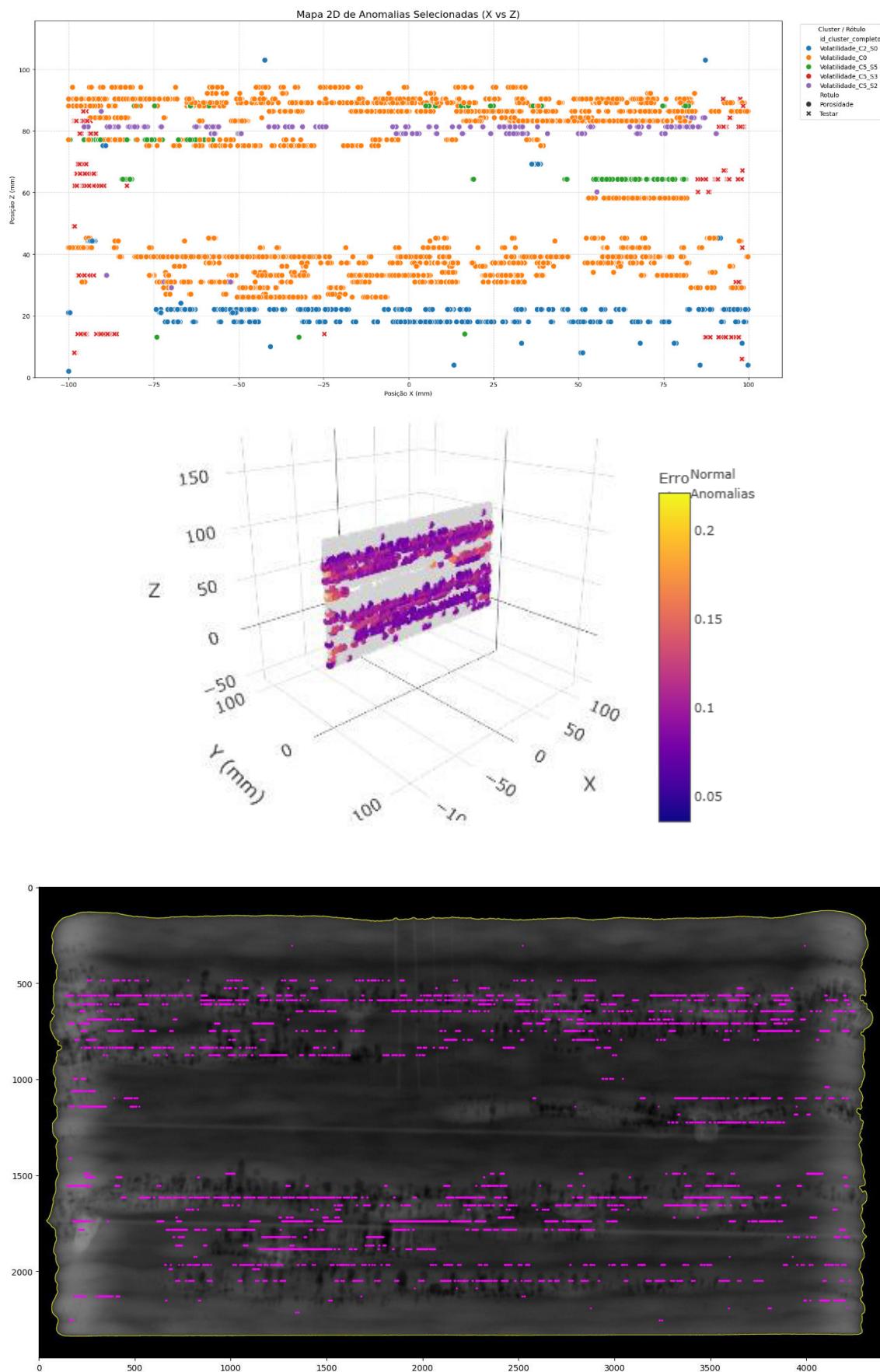


Figura 4.61 - Painel de Resultados da previsão de Porosidade da peça CF-04

Cada painel (Figuras 4.57 a 4.61) é organizado em três perspectivas complementares: Mapa bidimensional das anomalias reconhecidas como assinatura de porosidade, mostrando a distribuição plana das janelas previstas ao longo das camadas; Visualização em 3D das mesmas predições, possibilitando a análise da localização volumétrica dos pontos preditos no cenário geométrico da peça; e 'Sobreposição da predição ao raio-X, em que a máscara predita é alinhada metricamente à radiografia, demonstrando a convergência entre as regiões previstas e as ocorrências reais de porosidade.

Esse arranjo melhora a rastreabilidade espacial (2D/3D) e a verificação independente por END, aumentando a confiança diagnóstica do método.

- Avaliação da porosidade da peça CF-04

Usando a peça CF-04, realizou-se uma avaliação mais profunda da metodologia, a partir da integração do painel de resultados da Fig. 4.61 e um fluxo complementar de processamento da imagem de raio-X. Nessa etapa, a radiografia foi calibrada metricamente e registrada ao referencial da peça. Em seguida, aplicou-se segmentação para realçar e vetorizar os contornos dos poros efetivamente presentes. Esse arranjo garante a rastreabilidade geométrica das predições e estabelece a base para uma comparação ponto-a-ponto entre as previsões do sistema e as confirmações da radiografia.

Para que a validação seja justa e esteja fisicamente em conformidade com a natureza volumétrica do cordão, adotou-se uma tolerância espacial r ao confrontar predições e indicações radiográficas: considera-se acerto do sistema, quando a distância entre a predição e o contorno de um poro real é $\leq r$. Avaliou-se dois cenários, $r = 3$ mm (Fig. 4.62) e $r = 5$ mm (Fig. 4.63). A adoção desse raio de tolerância é tecnicamente justificada: A aquisição registra coordenadas discretas (XYZ) enquanto a deposição é um fenômeno espacialmente estendido, com largura e altura de cordão (a aquisição é pontual e a deposição é volumétrica); A deformação térmica, a peça é radiografada em condição fria e os dados/coordenadas geométricas são adquiridos em condição quente, não é adequado esperar que coincidam perfeitamente; Imprecisões na calibração e a segmentação da imagem podem introduzir incertezas métricas de alguns pixels; A formação do defeito pode deslocar-se do ponto onde a anomalia de volatilidade foi registrada, solidificando poros em vizinhanças próximas ao longo da camada.

A codificação visual adotada nas Figuras 4.62 e 4.63 torna a leitura e interpretação mais fácil: poros contornados em amarelo indicam coincidência entre predição e defeito radiográfico (verdadeiros positivos), poros em vermelho representam defeitos reais não previstos (falsos negativos) e os pontos lilás sinalizam predições sem correspondência radiográfica (falsos

positivos). Com essa convenção, a análise visual sintetiza, em uma única representação gráfica, a especificidade e a sensibilidade do método.

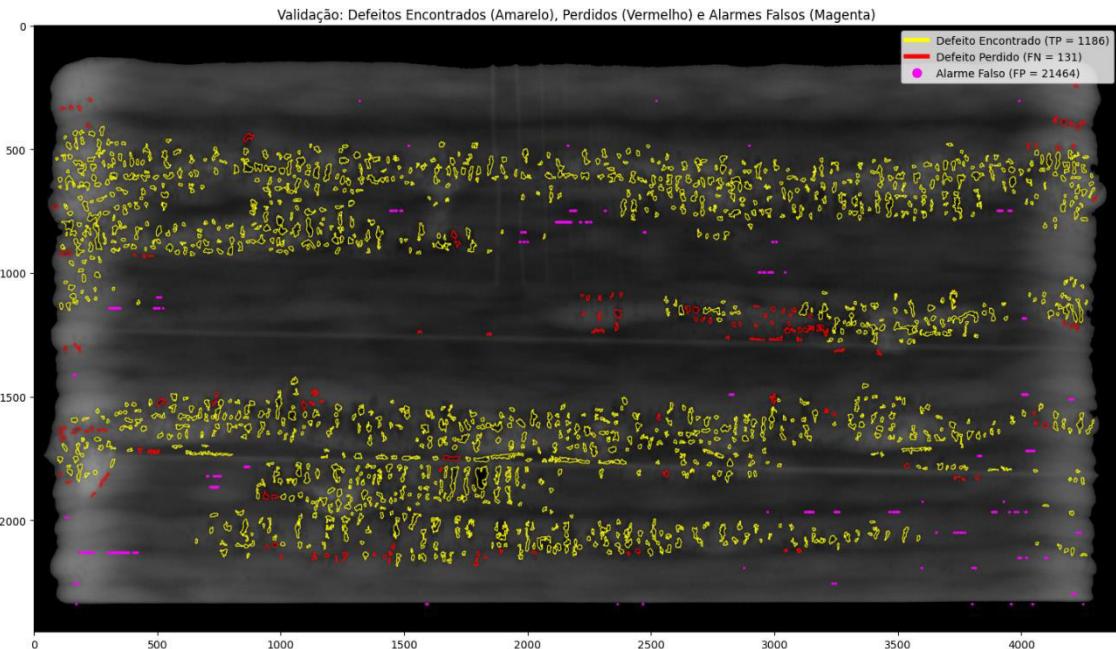


Figura 4.62 – Validação do modelo de previsão de porosidade da peça CF-04 ($r = 3 \text{ mm}$)

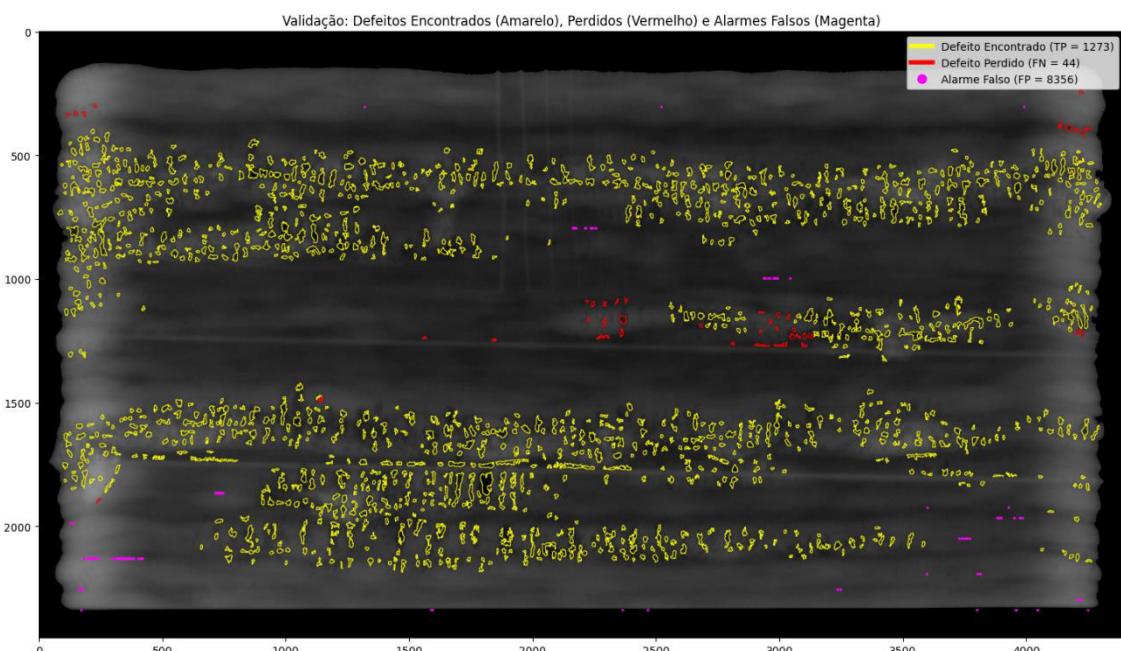


Figura 4.63 – Validação do modelo de previsão de porosidade da peça CF-04 ($r = 5 \text{ mm}$).

Os resultados quantitativos sintetizados na Tab. 4.12 são apresentados sob duas perspectivas complementares. Do ponto de vista do modelo (precisão), isto é, entre as

instâncias que o sistema classificou como defeito, a fração que de fato correspondeu a porosidade foi de 95,35 % para $r = 3$ mm e de 98,19 % para $r = 5$ mm. Já sob a perspectiva da radiografia (abrangência/sensibilidade), isto é, entre todas as regiões porosas identificadas no raio-X, o modelo recuperou 90,05 % com $r = 3$ mm e 96,66 % com $r = 5$ mm. Como indicador único, o F1-score, média harmônica entre precisão e sensibilidade, registrou um aumento de aproximadamente 92,62 % ($r = 3$ mm) para cerca de 97,42 % ($r = 5$ mm). Isso demonstra o incremento robustez do sistema ao considerar uma tolerância que se alinha com as incertezas espaciais do processo e da imagem.

Tabela 4.12 – Desempenho do Sistema de Previsão de Anomalia.

>> Análise da Perspectiva do MODELO (baseado em Pontos):		
Raio de Tolerância:	3 mm	5 mm
Total de Pontos de Cluster Analisados:	461504	461504
Pontos Próximos a um Defeito Real (TP_pontos):	440040	453148
Pontos Longe de Defeitos Reais (FP_pontos):	21464	8356
PRECISÃO:	95,35 %	98,19 %

>> Análise da Perspectiva do RAIO-X (baseado em Regiões):		
Raio de Tolerância:	3 mm	5 mm
Total de Defeitos Reais no Raio-X:	1317	1317
Defeitos Reais Encontrados (TP_regioes):	1186	1273
Defeitos Reais Perdidos (FN_regioes):	131	44
SENSIBILIDADE:	90,05 %	96,66 %

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

O presente trabalho, propõe o desenvolvimento e posterior validação de um sistema inteligente dedicado ao monitoramento do processo de Manufatura Aditiva por Deposição à Arco (MADA), o qual foi concebido para facilitar o processo de inspeção pós-fabricação ao indicar, de forma orientada, as regiões potencialmente defeituosas. A proposta apresenta suas contribuições divididas em três núcleos principais: (i) O sistema de aquisição e instrumentação e coleta de dados em alta frequência de amostragem; (ii) O pipeline de análise baseado em aprendizagem profunda, fusão de sensores e clusterização para detecção de anomalias; e (iii) A validação cruzada com imagem radiográfica para avaliação do desempenho do sistema.

Na parte experimental (núcleo i), a etapa de fabricação das peças principais e a aquisição de dados validou o planejamento e roteiro criado, assim como o sistema de aquisição de dados, a instrumentação e o sistema de monitoramento, pois gerou-se um grande volume de informação consistente, que abrange diferentes materiais (Aço Carbono e Aço Inoxidável), diferentes estratégias de deposições, variações de parâmetros de operação e indução de instabilidade.

A integração dos subsistemas apresentou comportamento adequado, produzindo dados brutos adquiridos à alta taxa de amostragem e referenciados por coordenadas X, Y, Z e a camada de deposição, das principais variáveis do processo: Tensão, Corrente, Vazão do Gás de Proteção, Intensidade Luminosa, Sinais sonoros, Velocidade de Alimentação e Velocidade de Deposição. Assim os seguintes objetivos específicos foram atingidos e validados: projetar e implementar um sistema de instrumentação multi-sensor para captura sincronizada das variáveis críticas do processo MADA e desenvolver uma metodologia experimental para geração controlada de instabilidades e defeitos em peças de aço carbono e inoxidável via MADA.

Na parte de análise (núcleo ii), o sistema foi desenvolvido de forma modular e utilizou-se a abordagem do Autoencoder LSTM para modelagem do comportamento “normal” do

processo e o erro de reconstrução foi adotado com indicador de normalidade. Assim estabeleceu-se dois marcadores para a avaliação: o limiar de amplitude, sensível a eventos de grande magnitude do erro de reconstrução e o limiar de volatilidade, que capta flutuações persistentes, ampliando assim, a análise e caracterização de comportamentos anômalos. Os painéis de análise de anomalias apresentados, por camadas, mostraram forte concordância entre os sinais marcadores de anomalias, registros fotográficos e análise visual pós deposição (Tabela de controle de deposição), onde identificou-se ligação entre ocorrências de defeitos de porosidade com anomalias de volatilidade e defeitos geométricos (escorrimientos) com anomalias de amplitude.

Logo após, aplicou-se a estratégia de fusão de sensores e clusterização de características híbridas (estatísticas e *wavelet*) com aplicação da redução de dimensionalidade (PCA) para obtenção de grupos (cluster e subcluster) com assinaturas/perfis compatíveis a regiões com probabilidade aumentada de ocorrência de defeitos. Assim, os seguintes objetivos específicos foram atingidos e validados: conceber uma arquitetura de fusão sensorial para integração temporal de dados heterogêneos do processo de manufatura aditiva, formular um modelo de detecção de anomalias baseado em Autoencoder LSTM com indicadores complementares de amplitude e volatilidade e propor um esquema de classificação de modos de falha através de técnicas de clusterização para assinatura de defeitos.

Na parte de validação (núcleo iii), desenvolveu-se um pipeline para processar as imagens radiográficas das peças fabricadas e criar um “gabarito” para avaliação e validação do sistema, através da sobreposição das previsões/detecção de anomalias sobre a respectiva imagem, permitindo a comparação das regiões indicadas pelo sistema e áreas defeituosas efetivamente evidenciadas.

A “co-localização” entre previsões e indícios radiográficos, indicam aplicabilidade prática do projeto desenvolvido. No estudo de caso da peça CF-04, a integração do painel “2D-3D-Sobreposição” e uso da tolerância espacial (raio de tolerância), validam a metodologia aplicada, mesmo no cenário mais restrito ($r = 3$ mm), pode-se observar valores de precisão e sensibilidade elevados (F1-score alto). Assim, o seguinte objetivo específico foi atingido e validado: validar a eficácia do sistema de monitoramento através de correlação cruzada entre anomalias detectadas e defeitos identificados via radiografia.

Os resultados obtidos fornecem subsídios para aplicação do sistema desenvolvido no processo de inspeção pós fabricação, fornecendo ferramentas de orientação de regiões de maior probabilidade de defeitos, auxílio no planejamento de ações de mitigação de ocorrências e possivelmente, redução de esforço e custos de ensaios não destrutivos. Na perspectiva científica, validam a utilização de Autoencoders LSTM na modelagem de séries

temporais multivariadas, características do processo MADA, combinado com detectores duplos de anomalias (Amplitude e Volatilidade), fusão de sensores, clusterização e validação com registro radiográfico.

CAPÍTULO IV

TRABALHOS FUTUROS

Buscando dar continuidade ao trabalho realizado e tendo em vista a relevância, abrangência, as possibilidades criadas, aprofundamentos e melhorias possíveis, assim como lacunas ainda não investigadas, apresenta-se as seguintes propostas de trabalhos para realização futura:

- Avaliar outras arquiteturas de RNA, como por exemplo: GRU e Transformers, ao problema investigando neste trabalho. Permitindo comparar a sensibilidade de diferentes modelos à dinâmicas temporal e instabilidades do processo. O objetivo é verificar se outros modelos podem se adequar ao presente estudo, trazer interpretações novas e apresentar melhor desempenho.
- Avaliar outros algoritmos de clusterização, diferentes algoritmos podem agrupar os dados anômalos em famílias de instabilidades distintas, revelando assinaturas não obtidas com os algoritmos empregados neste trabalho.
- Implementar a detecção de anomalias em tempo real, possibilitando aos operadores dos processos MADA tomar decisões rápidas no intuito de mitigar possíveis ocorrências no momento.
- Implementar ferramentas de Realidade Aumentada (RA) para apoio à inspeção, onde a previsão de regiões anômalas pode ser sobreposta na peça real, direcionando o trabalho do inspetor, permitindo a identificação rápida de possíveis defeitos, reduzindo tempo e custo de ensaios.

- Incorporar ao sistema proposto os registros da câmera térmica, permitindo investigar a ocorrência de anomalias relacionadas a dinâmica térmica e gradientes de resfriamento.
- Buscar algoritmo, ferramentas e estratégias de processamento de dados que viabilizem a utilização de grandes volumes de dados com altas taxas de amostragem em algoritmos de aprendizagem profunda como o apresentado neste trabalho.
- Projetar e integrar um filtro passa-baixas anti-aliasing (análogo, antes do ADC) especificamente ajustado às taxas de amostragem utilizadas, preservando transientes úteis do arco e atenuando componentes acima de Nyquist.
- Buscar sensores para medir e incorporar a altura real da camada ao algoritmo de previsão, o intuito é refinar a detecção e indicação de regiões com desvios geométricos.
- Testar o sistema proposto em outras células de manufatura do processo MADA, como células de deposição de duplo arame e células com sistema de movimentação realiza por robôs. Verificar a capacidade de generalização da solução proposta.
- Buscar métodos de otimização de limiares para melhor o desempenho do sistema de detecção de anomalias.
- Adequar o sistema de previsões à criticidade do defeito e sensibilidade do ensaio de inspeção. Alinhando as detecções e alarmes ao risco operacional e critérios de aceitação, minimizando o “escape” de defeito críticos.
- Avaliar a microestrutura das peças fabricadas e investigar a correlação dos descritores microestruturais com as dinâmicas dos sinais temporais adquiridos e marcadores de anomalias (amplitude e volatilidade).
- Integrar o sistema de previsão com o Thermo-Calc e softwares simuladores buscando maior interpretabilidade física das anomalias.
- Avaliar e aplicar o sistema em peças de geometria complexa (peças com curvaturas, variações de espessura, quinas, chanfros e mudanças abruptas de trajetória), frequentes em aplicações reais.

CAPÍTULO IV

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTINI, E. A., SILVA, L. J. D., & D'OLIVEIRA, A. S. (2014). Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem & Inspeção*, 19(2), 190-198.
<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.11>

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Section II, Part C: **Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals**. New York: ASME, 2019/2020.

AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods** – AWS A5.9/A5.9M. Miami: AWS, 2021.

AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding** – AWS A5.18/A5.18M. Miami: AWS, 2017.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Fabrication of Metal Components Using Additive Manufacturing** - AWS D20.1/D20.1M:2019. Miami: American Welding Society, 2019. ISBN 978-1-64322-026-0 (impresso). ISBN 978-1-64322-027-7 (online)

BAI, X., COLEGROVE, P., DING, J., ZHOU, X., DIAO, C., BRIDGEMAN, P., ... & WILLIAMS, S. (2018). Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 504-516.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.085>

BISONG, E. **Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform**. Berkeley: Apress, 2019.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8>

CHEN, Shujun; WU, Na; XIAO, Jun; LI, Tianming; LU, Zhenyang. Expulsion identification in resistance spot welding by electrode force sensing based on wavelet decomposition with multi-indexes and BP neural networks. *Applied Sciences*, v. 9, n. 19, 4028, 2019.
<https://doi.org/10.3390/app9194028>

CHATURVEDI, M.; SCUTELNICU, E.; RUSU, C. C.; MISTODIE, L. R.; MIHAILESCU, D.; SUBBIAH, A. V. Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization. **Metals**, v. 11, n. 6, art. 939, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11060939>

CHAURASIA, P. K.; FABRY, Ç.; PITTNER, A.; DE, A.; RETHMEIER, M. Automated in situ monitoring and analysis of process signatures and build profiles during wire arc directed energy deposition. **Progress in Additive Manufacturing**, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01333-9>

CHUA, Z. Y., AHN, I. H., & MOON, S. K. (2017). Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: Status and applications. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, 4(2), 235-245. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0029-7>

DEBROY, T., WEI, H. L., ZUBACK, J. S., MUKHERJEE, T., ELMER, J. W., MILEWSKI, J. O., ... & ZHANG, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, 92, 112-224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

DING, D. et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. International **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, p. 465–481, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>

DU, W.; et al. Process Optimization, Microstructure and Mechanical Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminum Alloy by Using DP-GMAW Based on Response Surface Method. **Materials**, v. 16, n. 16, p. 5716, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16165716>

FIGUEIREDO, G. G. de S.; PICCHI, I. B. de M.; SANTOS, M. L. dos; et al. Parametric study and response optimization for the wire + arc additive manufacturing of 316LSi via pulsed GMAW. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 129, p. 3073–3092, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12470-2>

FRONIUS INTERNATIONAL. TransPuls Synergic 2700/4000/5000 – **Operating Instructions**. Wels, AT: Fronius International GmbH, 2010.

HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A. E.; MONTEVECCHI, F.; CAMPATELLI, G. Effects of different WAAM current deposition modes on the mechanical properties of AISI H13 tool steel. **Welding in the World**, v. 66, p. 2259–2269, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01342-0>

HENCKELL, P.; GIERTH, M.; ALI, Y.; REIMANN, J.; BERGMANN, J. P. Reduction of Energy Input in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with Gas Metal Arc Welding (GMAW). **Materials**, v. 13, n. 11, art. 2491, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13112491>

HONEYWELL INTERNATIONAL. **AWM5000 Series Microbridge Mass Airflow Sensors: datasheet AWM5104VN**. Freeport, IL: Honeywell, [s.d.]. 10 p. Disponível em: <https://www.onlinecomponents.com/en/datasheet/awm5104vn-11928782>. Acesso em: 11 set. 2025.

IQBAL, H.; et al. Elucidating the effects of metal transfer modes and investigating the material properties in wire-arc additive manufacturing (WAAM). **Progress in Additive Manufacturing**, v. 10, p 3335–3360, 2025.

<https://doi.org/10.1007/s40964-024-00808-5>

ISO/ASTM 52900:2021 – **Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary**. ASTM International, 2021.

KOKARE, Samruddha; SHEN, Jiajia; FONSECA, Pedro P.; et al. Wire arc additive manufacturing of a high-strength low-alloy steel part: environmental impacts, costs, and mechanical properties. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 134, p. 453–475, 2024.

<https://doi.org/10.1007/s00170-024-14144-z>

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **Nature**, London, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.

<https://doi.org/10.1038/nature14539>

LEE, Y.; PARK, C.; KIM, N.; AHN, J.; JEONG, J. LSTM-Autoencoder Based Anomaly Detection Using Vibration Data of Wind Turbines. **Sensors**, v. 24, n. 9, art. 2833, 2024.

<https://doi.org/10.3390/s24092833>

LI, R.; MA, H.; WANG, R.; et al. Application of unsupervised learning methods based on video data for real-time anomaly detection in wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 143, p. 37–55, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.03.113>

LIU, J., XU, Y., GE, Y., HOU, Z., & CHEN, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, p. 149–198, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>

MACHADO, M. V. R. et al. (2019) Desenvolvimento de Tecnologias de União (Soldagem) 4.0 com Inovação, Gestão e Inclusão Social. **Congresso Nacional de Soldagem**. In: ABS, XLV Congresso Nacional de Soldagem. Camboriú.

MALEKI, S.; MALEKI, S.; JENNINGS, N. R. Unsupervised anomaly detection with LSTM autoencoders using statistical data-filtering. **Applied Soft Computing**, v. 108, art. 107443, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107443>

MARTINA, F. et al. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. **Additive Manufacturing**, v. 25, p. 545–550, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>

MATTERA, R.; ALBERTO, A.; IORIO, S.; et al. Monitoring the gas metal arc additive manufacturing process using unsupervised machine learning. **Welding in the World**, v. 68, n. 11, p. 2853–2867, 2024.

<https://doi.org/10.1007/s40194-024-01836-z>

MISHRA, D.; et al. Real time monitoring and control of friction stir welding process using multiple sensors. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 30, p. 1–11, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.03.004>

REZENDE, R. F.; ARIAS, A. R.; LIMA, E. J.; COELHO, F. G. F. Pulsed GMAW-based WAAM — Influence of droplet detachment mode on the geometry and mechanical properties of 308 L stainless steel. **Journal of Advanced Joining Processes**, v. 11, 100286, 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100286>

RODRIGUES, T. A.; DUARTE, V.; MIRANDA, R. M.; SANTOS, T. G.; OLIVEIRA, J. P. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). **Materials (Basel)**, v. 12, n. 7, art. 1121, 2019.

<https://doi.org/10.3390/ma12071121>

SHI, J., LI, F., CHEN, S., ZHAO, Y., & TIAN, H. (2018). Effect of in-process active cooling on forming quality and efficiency of tandem GMAW-based additive manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 101(5-8), 1349-1356.

<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2927-4>

SHUKLA, P.; CHITRAL, S.; KUMAR, T.; VENKATA KIRAN, D. The influence of GMAW correction parameters on stabilizing the deposition characteristics for wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 90, p. 54–68, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.075>

SILVA, B. H. S. (2020). **Avaliação e aplicabilidade de arame ultrafino em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia.

SILVA, L. J. da; SOUZA, D. M.; ARAÚJO, D. B. de; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 5–6, p. 1-12, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>

SKYPIX, 2022. **User Guide – SK-M320**.

TELEDYNE FLIR LLC. **FLIR A325sc: thermal camera for real-time analysis**. [S.I.]: Teledyne FLIR, [2014]. Disponível em: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_010/RND_010_US.pdf. Acesso em: 11 set. 2025.

TEXAS INSTRUMENTS, (2015). **OPT101 monolithic photodiode and single-supply transimpedance amplifier**. Texas Instruments: Dallas, TX, USA.

WANG, X., WANG, A., WANG, K., & LI, Y. (2019). Process stability for GTAW-based additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**.

<https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2018-0046>

WANI, Z. K.; ABDULLAH, A. Bead Geometry Control in Wire Arc Additive Manufactured Profile — A Review. **Pertanika Journal of Science & Technology**, [S.I.], v. 32, n. 2, p. 917–942, 2024.

<https://doi.org/10.47836/pjst.32.2.23>

WU, B., PAN, Z., DING, D., CUIURI, D., LI, H., XU, J., & NORRISH, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. **Journal of Manufacturing Processes**, 35, 127-139.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

XIA, C., PAN, Z., POLDEN, J., LI, H., XU, Y., CHEN, S., & ZHANG, Y. (2020). A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 31-45.

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>

XIA, C.; PAN, Z.; ZHANG, Y.; et al. Vision-based melt pool monitoring for wire-arc additive manufacturing using deep learning method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 120, p. 551–562, 2022.

<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08811-2>

XIONG, Y., DHARMAWAN, A. G., TANG, Y., FOONG, S., SOH, G. S., & ROSEN, D. W. (2020). A knowledge-based process planning framework for wire arc additive manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101135.

<https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101135>

XU, F., Dhokia, V., Colegrave, P., McAndrew, A., Williams, S., Henstridge, A., & Newman, S. T. (2018). Realisation of a multi-sensor framework for process monitoring of the wire arc additive manufacturing in producing Ti-6Al-4V parts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(8), 785-798.

<https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1466395>

APÊNDICES

APÊNDICE I – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DAS PEÇAS PRINCIPAIS



Figura A1.01 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IF-01.

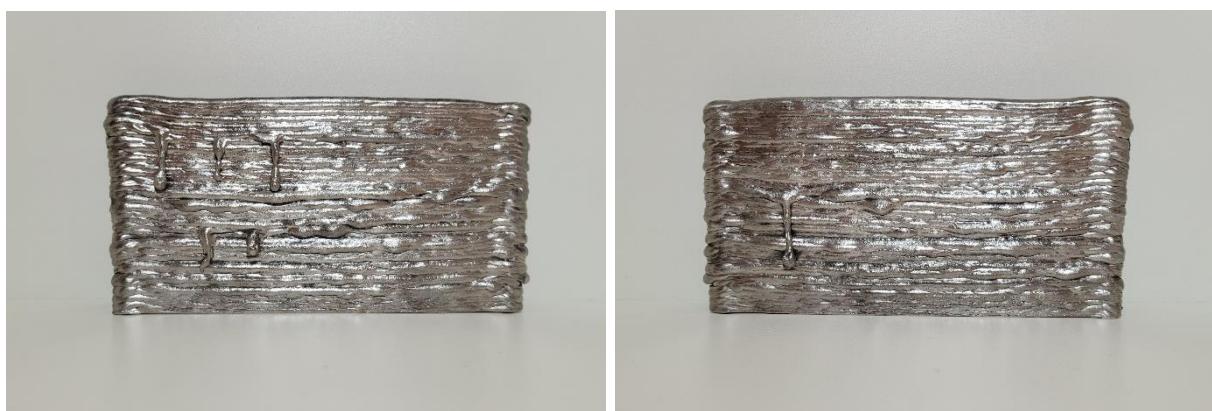


Figura A1.02 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IF-01.



Figura A1.03 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IF-02.



Figura A1.04 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IF-02.



Figura A1.05 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IF-03.

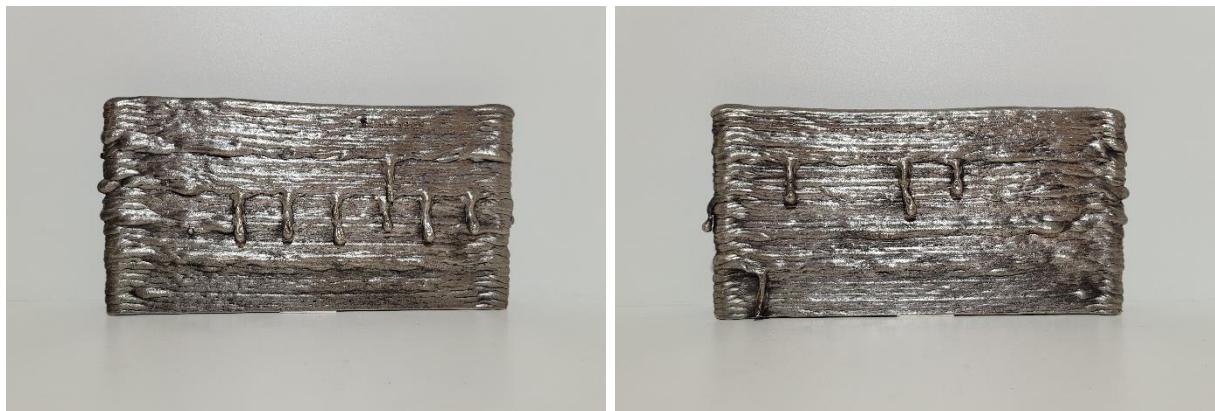


Figura A1.06 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IF-03.



Figura A1.07 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IF-04.



Figura A1.08 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IF-04.

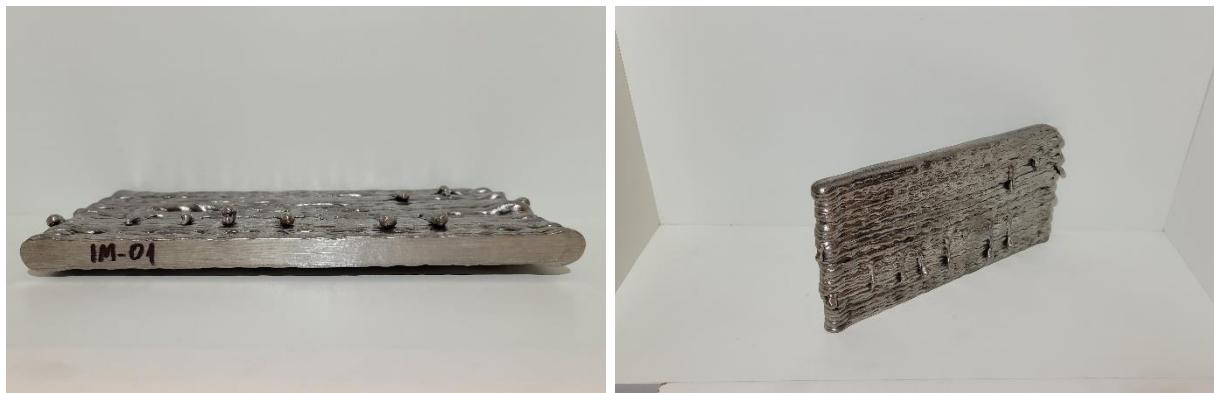


Figura A1.09 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IM-01.



Figura A1.10 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IM-01.



Figura A1.11 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IM-02.



Figura A1.12 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IM-02.



Figura A1.13 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IM-03.



Figura A1.14 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IM-03.



Figura A1.15 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IM-04.



Figura A1.16 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IM-04.



Figura A1.17 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IG-01.



Figura A1.18 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IG-01.



Figura A1.19 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IG-02.



Figura A1.20 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IG-02.



Figura A1.21 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IG-03.



Figura A1.22 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IG-03.



Figura A1.23 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal IG-04.



Figura A1.24 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal IG-04.



Figura A1.25 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CF-01.



Figura A1.26 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CF-01.



Figura A1.27 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CF-02.



Figura A1.28 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CF-02.



Figura A1.29 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CF-03.



Figura A1.30 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CF-03.



Figura A1.31 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CF-04.



Figura A1.32 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CF-04.



Figura A1.33 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CM-01.

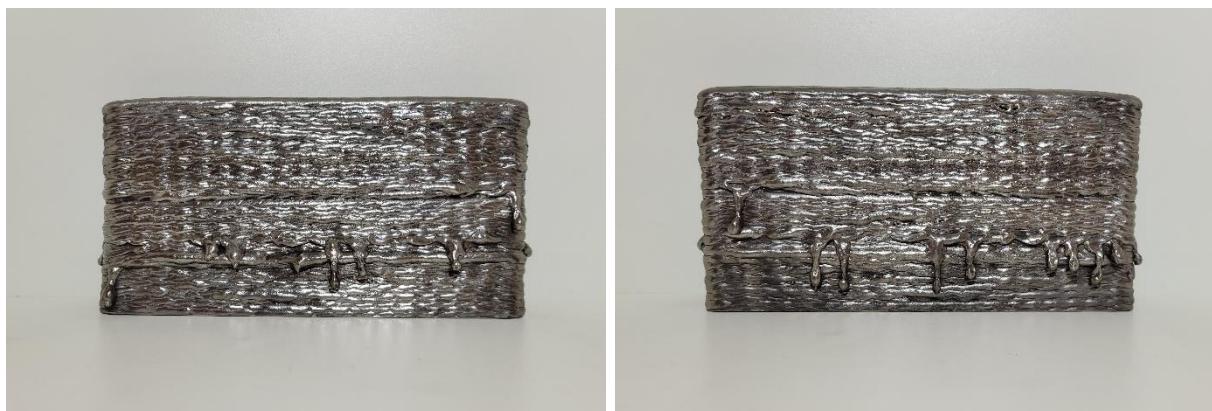


Figura A1.34 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CM-01.



Figura A1.35 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CM-02.



Figura A1.36 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CM-02.



Figura A1.37 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CM-03.



Figura A1.38 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CM-03.



Figura A1.39 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CM-04.

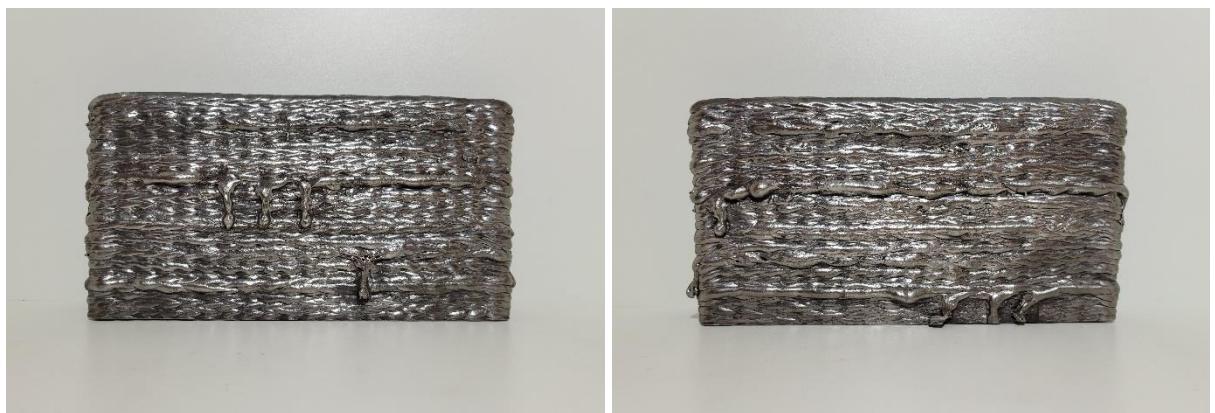


Figura A1.40 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CM-04.



Figura A1.41 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CG-01.

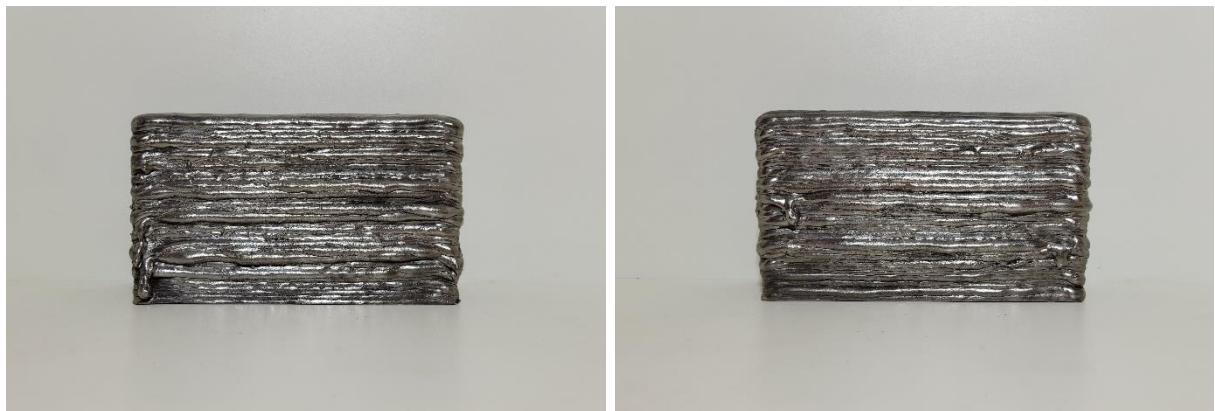


Figura A1.42 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CG-01.

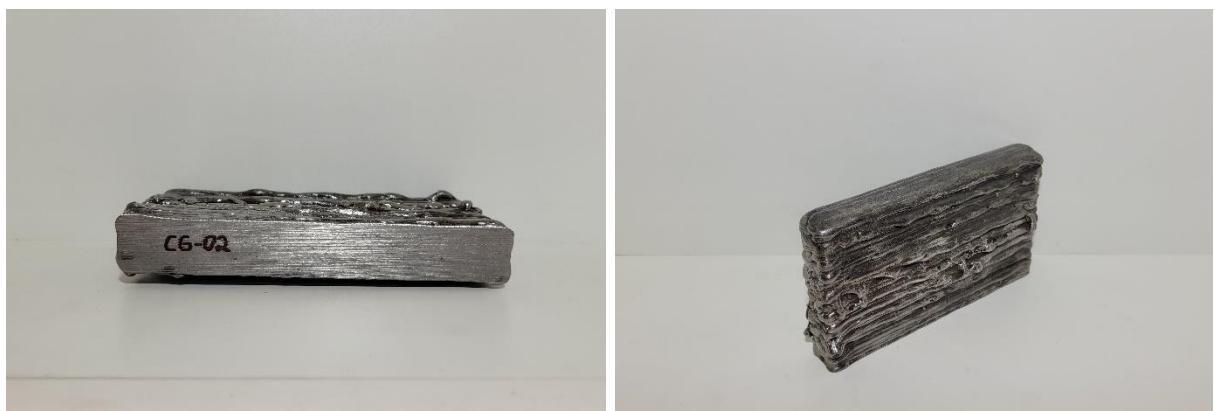


Figura A1.43 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CG-02.



Figura A1.44 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CG-02.



Figura A1.45 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CG-03.

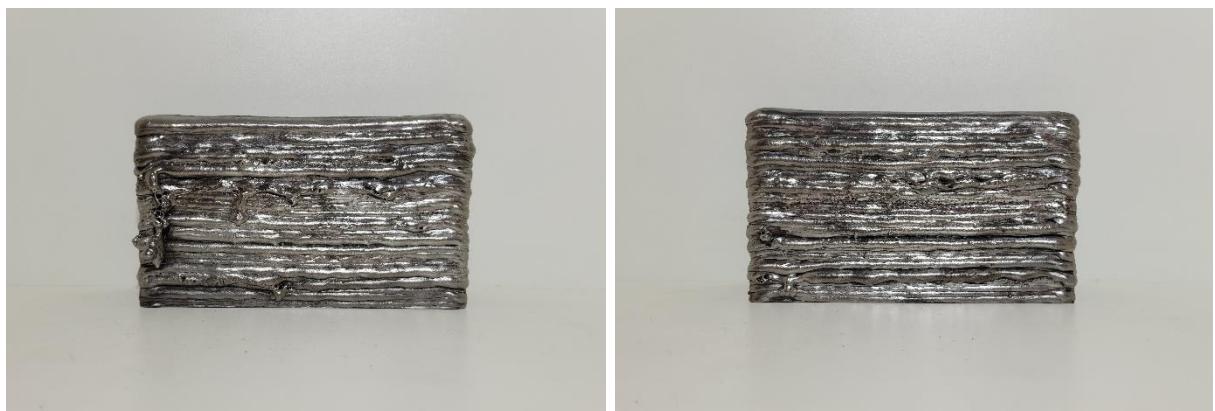


Figura A1.46 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CG-03.



Figura A1.47 – Vista inferior (à esquerda) e vista em perspectiva (à direita) da peça principal CG-04.

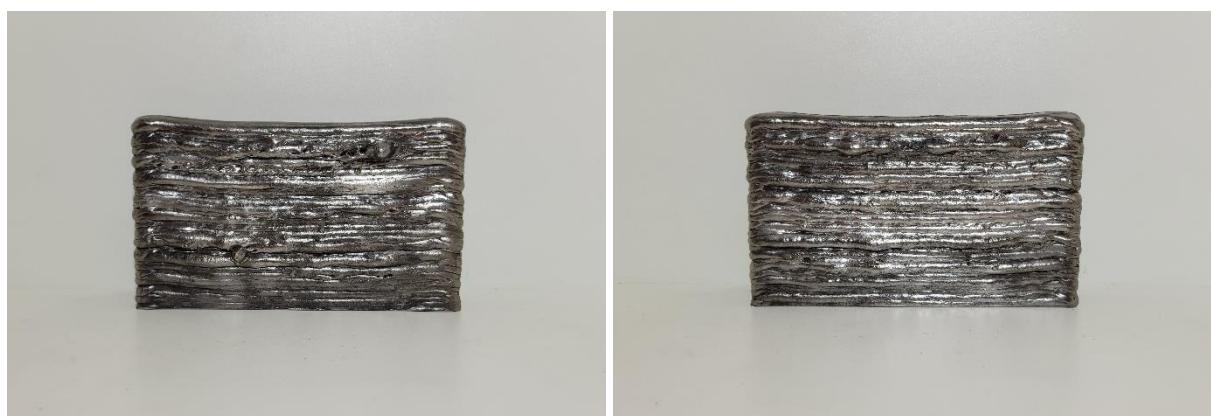


Figura A1.48 - Vista frontal (à esquerda) e vista posterior (à direita) da peça principal CG-04.

APÊNDICE II – ESTUDO DO PROCESSO E IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS

Através da observação do processo realizado junto às equipes de trabalho do laboratório Laprosolda, dois pontos principais foram levantados como possíveis melhorias: a troca da placa controladora de comunicação paralela por placa com comunicação *Universal Serial Bus (USB)* e a troca dos motores de passo por *Easy Servo* (motores de passo com encoders acoplados).

A troca da placa controladora se fez necessária, pois os equipamentos estavam utilizando placas com comunicação por porta paralela, como os computadores e notebook atuais não estão mais sendo comercializados com a devida porta de comunicação, optou-se por substituí-las por placas controladoras com portas USB.

Para realizar a substituição da placa paralela atual, foi especificada a placa controladora Eco Motion 2.0, mostrada na Fig. A2.01, que é projetada para trabalhar com o software Mach3®, usado no comando das mesas de impressão do Laprosolda. Esta placa possui suporte para 4 eixos, 4 entradas e 4 saídas de uso geral, permitindo a utilização do sensor *probe*, botão de parada de emergência, interruptores fim de curso e home, acionamento de relês e leds indicativos.

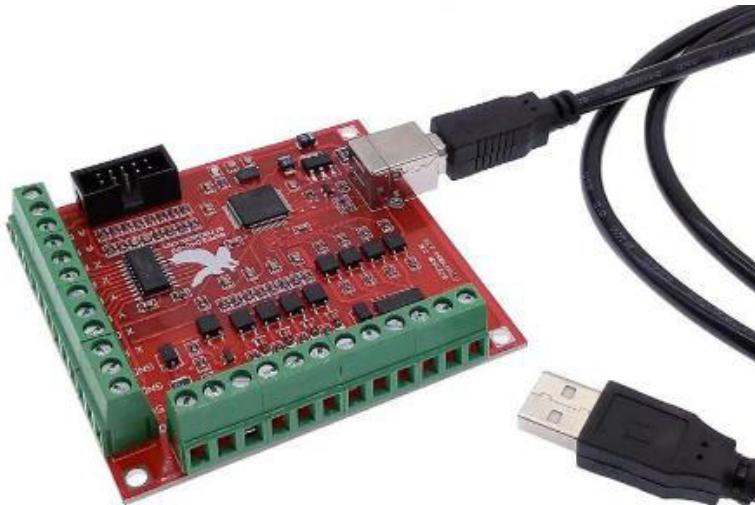


Figura A2.01 - Placa controladora Eco Motion 2.0.

A substituição dos motores de passo foi pensada para promover a instrumentação dos motores de passo usados nas mesas de impressão de Comando Numérico Computadorizado (CNC). Inicialmente, cogitou-se a instalação de encoders nos motores de passos de acionamento da mesa, porém o custo de aquisição dos mesmos seria superior à troca por motores *Easy Servo*, que basicamente são motores de passos com encoders acoplados, o

acionamento é feito normalmente pelo controle de direção e pulso, porém com a vantagem do sensor de deslocamento em malha fechada com o driver, possibilitando a correção de passos (em uma eventual perda de passos), tornando a aplicação mais precisa.

Para a substituição dos motores, foram sugeridos *Easy Servo* com as especificações próximas dos motores de passo anteriores, de modo a não afetar o funcionamento da mesa CNC:

- *Easy Servo* 45 kgf, Nema 34, ângulo de passo 1,8°, com Encoder Incremental de 2 500 pulsos e os relativos drivers (para os eixos X e Y);
- *Easy Servo* 20 kgf, Nema 23, ângulo de passo 1,8°, com Encoder Incremental de 2 500 pulsos e o relativo driver (para o eixo Z).

Após a especificação, compra e chegada dos componentes, realizou a montagem do novo sistema de acionamento da mesa CNC em bancada, com o objetivo de testar a integração Mach3®, placa controladora Eco Motion 2.0 e *Easy Servos*. O esquema de montagem é mostrado na Fig. A2.02. Além da integração, avaliou a utilização de chaves fim de cursos, comutadores elétricos para definição de “home” (o “zero” do equipamento) e o sensor probe para distanciamento automático do bico da tocha em relação ao substrato/camada superior.

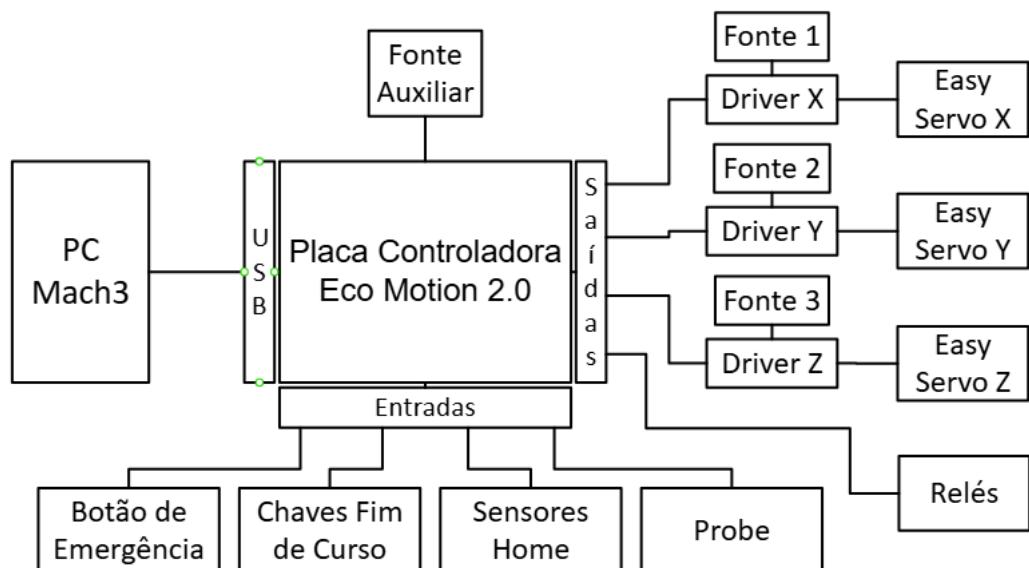


Figura A2.02 - Topologia do Sistema de Acionamento da Mesa Cartesiana.

A montagem em bancada relativa aos dispositivos de entradas, chaves fim de curso, home, sensor *probe* e botão de emergência é mostrada na Fig. A2.03 e a parte do acionamento, com as fontes, drivers e os motores *Easy Servos* pode-se ser vista na Fig. A2.04.

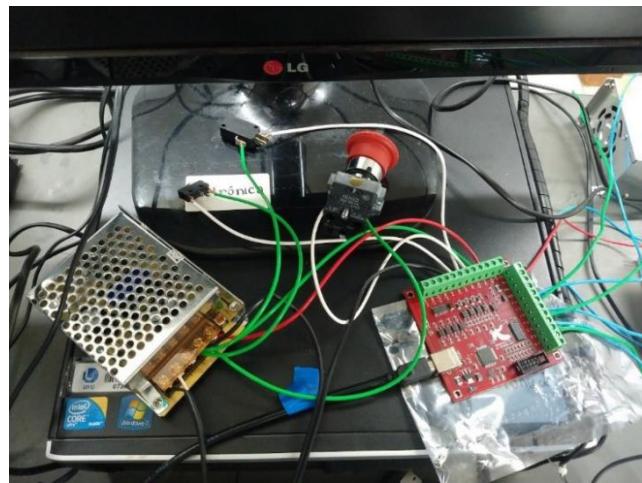


Figura A2.03 – Periféricos de entrada conectados à placa Eco Motion 2.0.



Figura A2.04 - Montagem do Acionamento com Fontes de Alimentação, Drivers e *Easy Servos*.

Após a realização de vários testes de movimentação e operação simulada, o sistema de acionamento proposto apresentou o funcionamento adequado a aplicação, a integração

Mach3®, Eco Motion 2.0 e *Easy Servos* mostrou a aplicabilidade almejada e os sensores usados adicionaram recursos relevantes ao processo.

Como teste adicional, realizou-se a montagem de uma parte do sistema de aquisição, visando testar a aquisição de dados, o condicionador de deslocamento da tocha, que será apresentado adiante, foi conectado aos encoders dos *Easy Servos*. Uma placa NI-USB 6215 da *National Instruments* recebeu os sinais do condicionador e uma versão simplificada do sistema de aquisição de dados, no Labview®, foi usada para a visualização dos dados obtidos, esta montagem é mostrada na Fig. A2.05. O funcionamento da montagem foi verificado com auxílio de um osciloscópio, modelo TPS 2014 da Tektronix, e os valores obtidos pelo sistema de aquisição de dados coincidiram com os valores indicados no software de comando Mach3®.

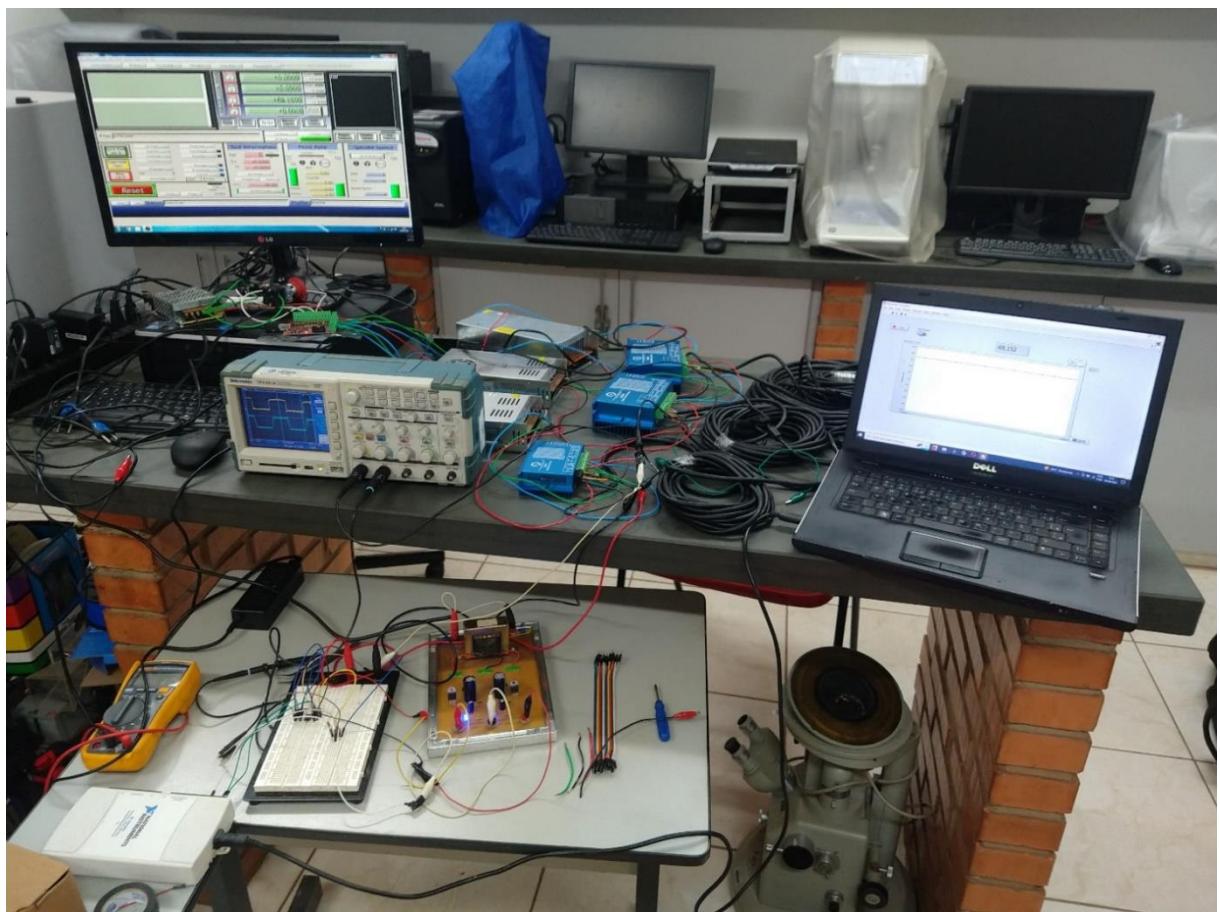


Figura A2.05 - Sistema de acionamento da mesa CNC e aquisição de dados.

Com a mudança da placa controladora e dos motores, surge a necessidade da construção um painel de comando para receber a montagem final do novo sistema de acionamento. O painel antigo, mostrado na Fig. A2.06, apresentava-se como uma solução funcional, porém restrita em termos de organização, segurança e manutenção. Os

componentes não estavam dispostos de maneira padronizada e os cabos estavam conectados de forma direta, resultando em um cabeamento solto, desordenado e de difícil rastreabilidade, também carecia de identificações, o que aumenta o tempo de manutenção e dificulta diagnósticos de falhas.

O novo painel foi construindo buscando atender requisitos de manutenção, operação e rastreabilidade. A parte interna do painel é apresentada na Fig. A2.07, os componentes foram dispostos em um arranjo linear e devidamente identificados. Os cabos foram organizados e canalizados gerando um aspecto limpo, a utilização de variadas cores, conforme a função do cabo, facilita o rastreio e os terminais colocados tendem a diminuir a ocorrência de mau contato. Uma régua de bornes foi instalada, permitindo que futuras intervenções e manutenções sejam facilitadas, o painel pode ser facilmente retirado, levado para uma bancada de testes e montado novamente. Além disso o painel conta com sistema de ventilação forçada, visando assegurar melhor dissipação térmica.



Figura A2.06 – Painel de comando da mesa de impressão antigo



Figura A2.07 – Painel de comando novo.

Na parte externa superior do painel, que pode ser vista na Fig. A2.08, foi disponibilizado ao operador uma chave seccionadora que tem a função de energizar todo painel, uma chave seletora responsável por habilitar a abertura do arco elétrico, com o intuito de evitar acionamentos indevidos da fonte de soldagem, sinalizadores para indicação do estado de operação e uma chave de emergência.

Ademais, foram feitas etiquetas para identificação e auxílio na manutenção e operação, a relação dos bornes colada na porta do painel é apresentada na Fig. A2.09.



Figura A2.08 – Vista superior do painel novo.

BORNEIRAS		
Nº Borne	COR CABO	CONEXÃO
1	AZUL	MOTOR X - EB+
2	VERDE	MOTOR X - EB-
3	PRETO	MOTOR X - EA+
4	AMARELO	MOTOR X - EA-
5	VERMELHO	MOTOR X - VCC
6	BRANCO	MOTOR X - EGND
7	VERMELHO	MOTOR X - A+
8	VERDE	MOTOR X - A-
9	AMARELO	MOTOR X - B+
10	AZUL	MOTOR X - B-
11	AZUL	MOTOR Y - EB+
12	VERDE	MOTOR Y - EB-
13	PRETO	MOTOR Y - EA+
14	AMARELO	MOTOR Y - EA-
15	VERMELHO	MOTOR Y - VCC
16	BRANCO	MOTOR Y - EGND
17	VERMELHO	MOTOR Y - A+
18	VERDE	MOTOR Y - A-
19	AMARELO	MOTOR Y - B+
20	AZUL	MOTOR Y - B-

BORNEIRAS		
Nº PINO	COR CABO	CONEXÃO
21	AZUL	MOTOR Z - EB+
22	VERDE	MOTOR Z - EB-
23	PRETO	MOTOR Z - EA+
24	AMARELO	MOTOR Z - EA-
25	VERMELHO	MOTOR Z - VCC
26	BRANCO	MOTOR Z - EGND
27	VERMELHO	MOTOR Z - A+
28	VERDE	MOTOR Z - A-
29	AMARELO	MOTOR Z - B+
30	AZUL	MOTOR Z - B-
31	VERDE	IN1 - FIM DE CURSO
32	VERDE	IN2 - HOME
33	VERDE	IN3 - PROBE
34	PRETO	DCM MACH3
35	AMARELO	ARCO - RELE1 NA
36	BRANCO	ARCO - RELE1 COM
37	VERDE	MOTOR A - 5V
38	AZUL	MOTOR A - PULSOS
39	BRANCO	MOTOR A - DIREÇÃO

Figura A2.09 – Etiqueta com relação de bornes.

APÊNDICE III – PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

- **Fonte de Alimentação**

Para suprir a alimentação dos circuitos eletrônicos e alguns componentes do sistema de aquisição que não possuem alimentação própria, foi projetado e produzido um sistema de fontes de alimentação. Na Fig. A3.01 é mostrado a topologia desse sistema, que pode ser conectado à uma bateria externa de 12 V ou à rede elétrica 100 Vac - 240 Vac, uma chave comutadora é responsável pela seleção da conexão. Na sequência o sistema possui dois conjuntos de conversores CC-CC, formados pelos modelos ASA00CC18-LS e ASA01A18-LS da ASTEC POWER, que fornecem respectivamente tensão simétrica de -15 V/+15 V e 5 V. A fonte 1 é formada por seis saídas com tensões de -15 V/+15 V, sendo duas delas isoladas, já a fonte 2 possuem duas saídas -15 V/+15 V e seis +5 V. Tem-se ainda um regulador de tensão ligado a fonte 1, responsável por fornecer uma saída simétrica de -5 V/+5 V.

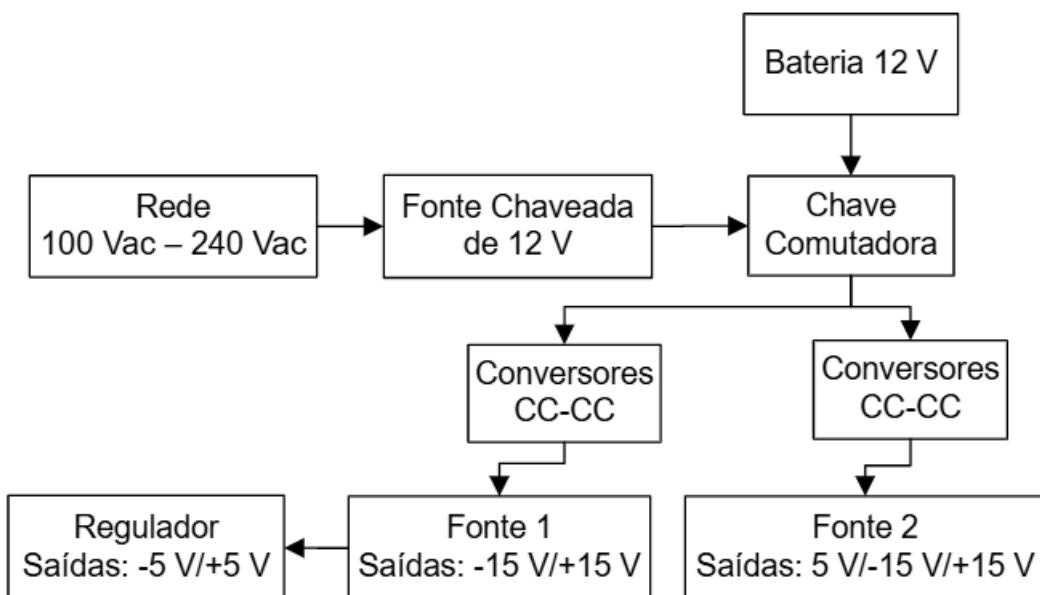


Figura A3.01 - Topologia das Sistema de Alimentação

- **Fonte 1**

O projeto do sistema de alimentação e dos condicionadores foi desenvolvido no software Proteus®. O diagrama elétrico da Fonte 1 é mostrado na Fig. A3.02, pode-se observar a presença de três conversores CC ASA00CC18-LS, na confecção das placas foram instalados capacitores para suprimir ruídos de comutação e garantir a estabilidade elétrica, e as seis saídas de tensão -15 V/+15 V, duas para cada conversor, sendo as duas primeiras isoladas (com GND independentes).

Conversor CC

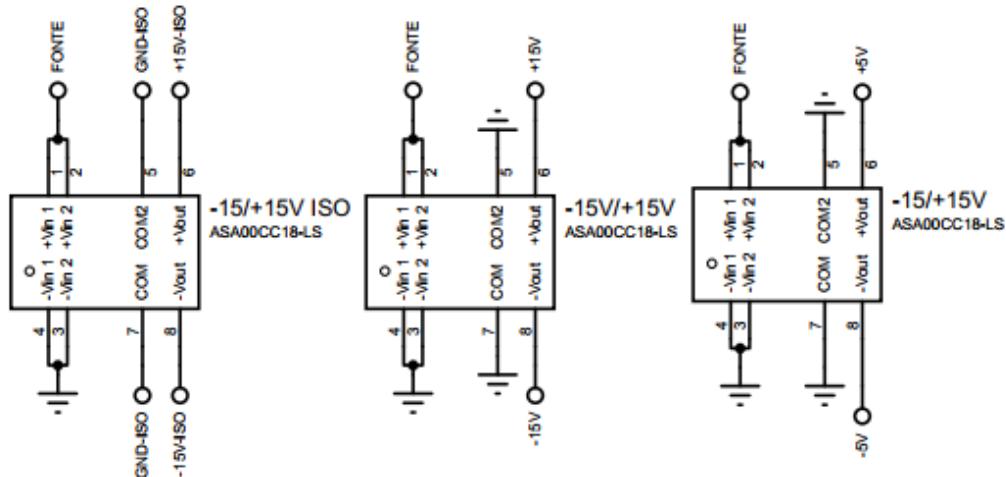


Figura A3.02 - Esquema elétrico da Fonte 1.

O projeto da placa da Fonte 1 com alocação de componentes e roteamento das trilhas pode ser visto na Fig. A3.03a, já o modelo 3D da placa de circuito impresso está na Fig. A3.03b e a placa fabricada é mostrada na Fig. A3.03c. Um ponto relevante considerado é a disposição dos componentes, a qual foi pensada e padronizada de modo a facilitar a etapa de montagem do Sistema de Aquisição. Os demais projetos de alocação, modelo 3D e placa fabricada dos condicionadores de sinais podem ser vistos no Apêndice IV – Projetos dos condicionadores de sinais.

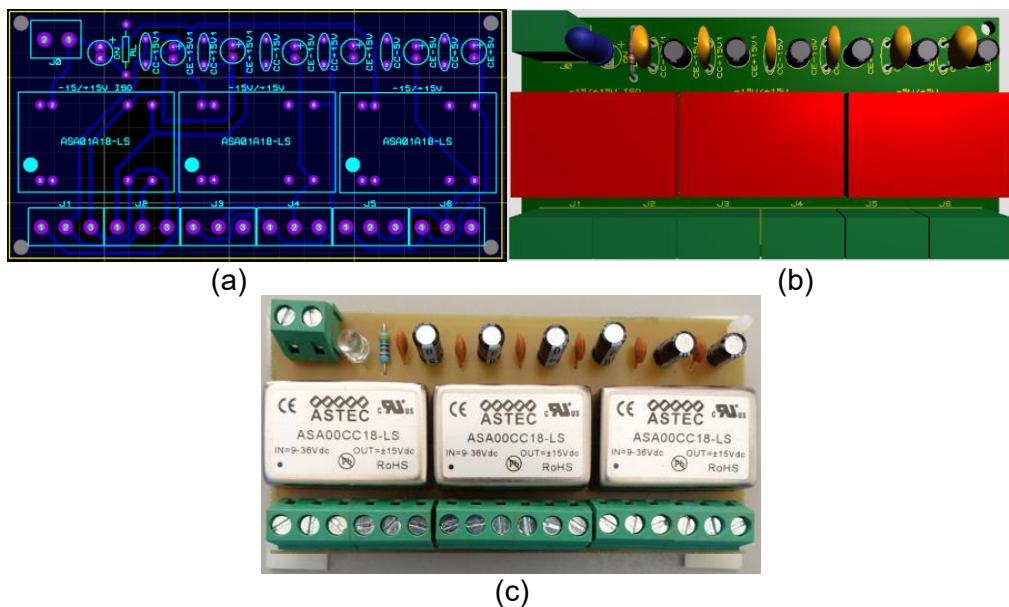


Figura A3.03 - Fonte 1 (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

- **Fonte 2**

O esquema elétrico da Fonte 2 é mostrado na Fig. A3.04, pode-se observar um conversor CC ASA00CC18-LS, responsável pelas duas saídas de tensão -15 V/+15 V, os dois conversores CC ASA01A18-LS e suas respectivas saídas de +5 V, sendo três saídas para cada um deles. Da mesma maneira da Fonte 1, foram instalados capacitores para manter o nível de tensão e para eliminar possíveis ruídos.

Conversor CC

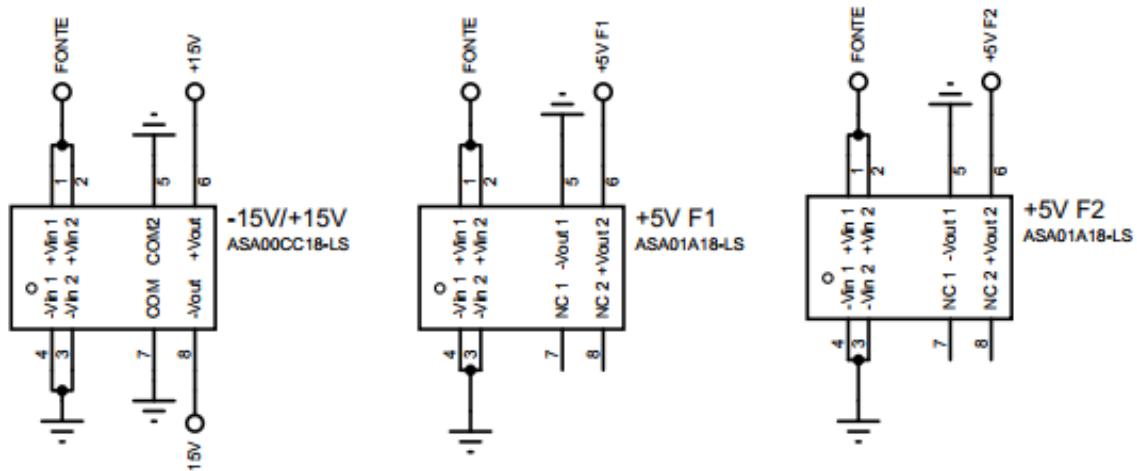


Figura A3.04 - Esquema elétrico da Fonte 2.

- **Regulador de Tensão**

O regulador de tensão foi projetado para fornecer os níveis de tensão -5 V/+5 V que foram usados pelos condicionadores de sinais. Este circuito, mostrado na Fig. A3.05, recebe alimentação da saída seis da Fonte 1, portanto -15 V/+15 V e através dos componentes 7805 e 7905, fornece respectivamente ao sistema os níveis de tensão +5 V e -5 V.

- **Relação de Saídas do Sistema de Alimentação**

Assim, este sistema é alimentado com uma tensão de 12 V, proveniente da bateria externa ou da fonte chaveada conectada à rede elétrica (110 Vac – 240 Vac) e fornece oito saídas -15 V/+15 V, seis saídas +5 V e uma -5 V/+5 V. Na Tab. A3.01, tem-se a relação das saídas do sistema de alimentação com os respectivos níveis de tensão nominal e os valores reais medidos através de um multímetro da marca Minipa, modelo ET-3130T, além do circuito eletrônico ao qual está conectada e é responsável pela devida alimentação.

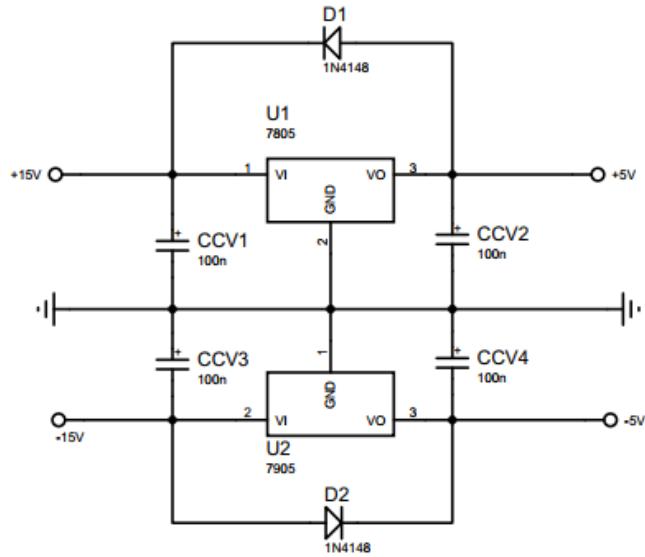


Figura A3.05 - Esquema elétrico do Regulador de Tensão

Tabela A3.01 - Saída e conexões do Sistema de Alimentação.

Fonte	Saída	Tensão Nominal	Tensão Medida (Multímetro)	Circuito Conectado
Fonte 1	Saída 1	-15 V/+15 V	-14,82 V/+14,88 V	Disponível
Fonte 1	Saída 2	-15 V/+15 V	-14,82 V/+14,88 V	Condicionador - Tensão
Fonte 1	Saída 3	-15 V/+15 V	-14,87 V/+14,85 V	Condicionador - Tensão
Fonte 1	Saída 4	-15 V/+15 V	-14,87 V/+14,85 V	Condicionador - Corrente
Fonte 1	Saída 5	-15 V/+15 V	-14,90 V/+14,77 V	Condicionador - Vazão
Fonte 1	Saída 6	-15 V/+15 V	-14,90 V/+14,77 V	Regulador de Tensão
Fonte 2	Saída 1	-15 V/+15 V	-14,85 V/+14,93 V	Condicionador - Temperatura
Fonte 2	Saída 2	-15 V/+15 V	-14,85 V/+14,93 V	Condicionador - Intensidade Luminosa
Fonte 2	Saída 3	+5 V	+4,94 V	Condicionador - Vazão
Fonte 2	Saída 4	+5 V	+4,94 V	Condicionador - Velocidade de Alimentação
Fonte 2	Saída 5	+5 V	+4,94 V	Condicionador - Posição X/Y/Z
Fonte 2	Saída 6	+5 V	+4,94 V	Sensor/Condicionador - Intensidade Luminosa
Fonte 2	Saída 7	+5 V	+4,94 V	Condicionador - Temperatura
Fonte 2	Saída 8	+5 V	+4,94 V	Disponível
Regulador	Saída 1	-5 V/+5 V	-4,96 V/+4,98 V	Condicionador - Tensão/Corrente

- Condicionadores de Sinal - Tensão de Soldagem;

Para o projeto do condicionador do sinal da Tensão de Soldagem é necessário o conhecimento dos limites mínimo e máximo da variável, sendo então definido para este projeto os valores de referência como -70 V a 70 V. O sinal é obtido através da ligação de dois cabos condutores, um ligado no positivo da fonte de soldagem (na tocha) e outro no negativo. Como mostrado na Fig. A3.06, um circuito divisor de tensão é utilizado de adequar o nível de tensão obtido ao nível de tensão especificado para o sistema de aquisição, definido como -5 V a 5 V, assim esta etapa do condicionador fornece uma espécie de escala de redução da tensão de soldagem. Com o intuito de proteger o sistema de aquisição, o sinal é submetido à um isolador galvânico, deste modo os condicionadores e a placa de aquisição não estejam conectados eletricamente com a fonte de soldagem e um eventual distúrbio nesta, não danifique os componentes do sistema de aquisição. Então, o sinal isolado é direcionado ao circuito grampeador de tensão que é responsável por limitar os valores mínimo e máximo de saída do condicionador de sinal. O sinal adquirido da Tensão de Soldagem está conectado a entrada analógica AI.1 da placa NI-USB-6341.



Figura A3.06 - Topologia da Aquisição da Tensão de Soldagem.

O esquema elétrico deste condicionador é mostrado na Fig. A3.07, pode-se notar inicialmente o divisor de tensão formado por dois resistores em série, dimensionados de modo que, para a tensão máxima de trabalho de +70 V, a tensão sobre o resistor R2 seja de +5 V e para a tensão mínima -70 V, a tensão em R2 é igual a -5 V.

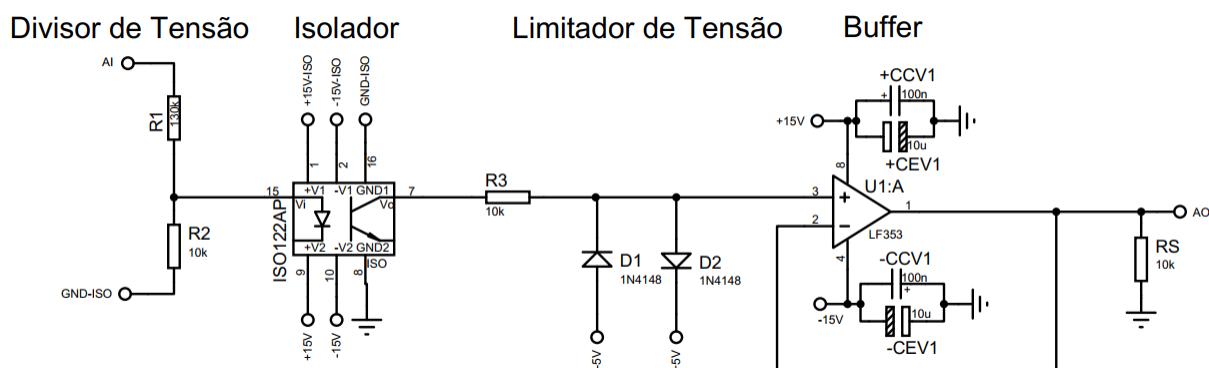


Figura A3.07 - Esquema elétrico do Condicionador da Tensão de Soldagem.

Na sequência tem-se o isolador ISO122P que é alimentado por duas saídas do sistema de alimentação isoladas entre si de -15 V/+15 V, o sinal de saída do isolador tem o mesmo valor do sinal de entrada, porém estão eletricamente isolados e então o limitador de tensão formado por dois diodos, um polarizado diretamente e o outro reversamente e ligados à tensões de referência +5 V e -5 V e por fim um buffer (seguiror de tensão) projetado com amplificador operacional, através do circuito integrado LF353 alimentado com -15 V/15 V.

- Condicionadores de Sinal - Corrente de Soldagem;

Para adquirir o sinal da Corrente de Soldagem foi selecionado o sensor de efeito Hall HTA600S da fabricante LEM, apresentado na Fig. A3.08.



Figura A3.08 - Sensor de Efeito Hall HTA600S.

Este sensor fornece uma saída em tensão na faixa de -4 V a +4 V proporcional a uma entrada de corrente entre -600 A e +600 A, valores dentro da faixa de operação da fonte de soldagem usada no projeto. A alimentação deste, deve ser realizada por fonte simétrica com valor de -15 V/+15 V, assim foi disponibilizado no condicionador uma saída para atender tal demanda.

Na topologia do condicionador, mostrada na Fig. A3.09, pode-se observar que o sinal obtido pelo sensor passa para um *buffer* e posteriormente um limitador para garantir os níveis de tensão adequados para a placa de aquisição. O sinal adquirido da Corrente de Soldagem está conectado a entrada analógica AI.2 da placa NI-USB-6341.

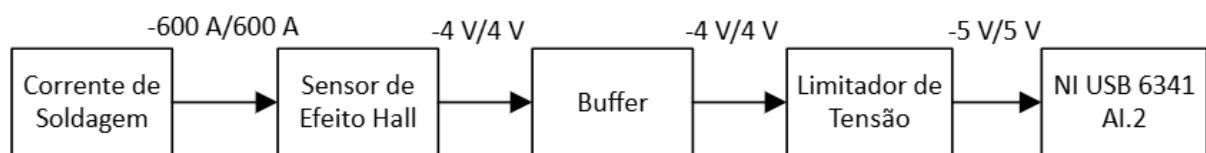


Figura A3.09 - Topologia da Aquisição da Corrente de Soldagem.

O esquema elétrico do condicionador pode ser visto na Fig. A3.10, onde tem-se o limitador de tensão formado por dois diodos, um polarizado diretamente e o outro reversamente e ligados as tensões de referência +5 V e -5 V e os buffers de entrada e saída, projetados com amplificador operacional, através do circuito integrado LF353 alimentado com -15 V/15 V.

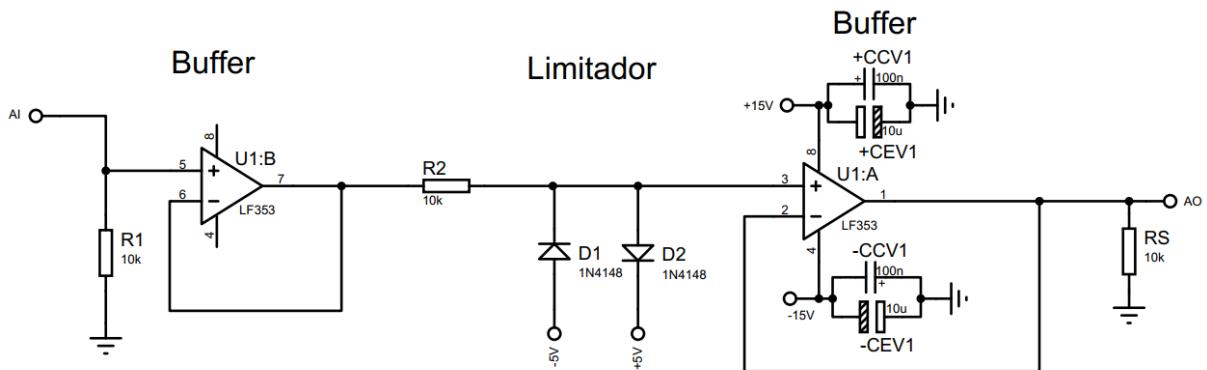


Figura A3.10 - Esquema elétrico do Condicionador da Corrente de Soldagem.

- Condicionadores de Sinal - Vazão de Gás de Proteção;

O medidor de vazão do gás de proteção especificado para o projeto foi o AMW5104 da empresa Honeywell, mostrado na Fig. A3.11, este apresenta como principal característica a curva de saída analógica linear e proporcional ao fluxo do gás, assim como níveis de tensão adequados as especificações do projeto, onde 1 V corresponde à vazão de 0 l/min e 5 V à vazão de 20 l/min, conforme pode-se observar na Fig. A3.12 (HONEYWELL INTERNATIONAL, [s.d.])



Figura A3.11 - Medidor de Vazão de Gás de Proteção: AWM5104

A topologia do condicionador de Vazão do Gás de Proteção, evidenciada na Fig. A3.13, é similar ao da Corrente de Soldagem, o sinal obtido pelo sensor passa para um *buffer* e posteriormente um limitador para garantir os níveis de tensão adequados para a placa de

aquisição. O sinal adquirido da Vazão de Gás está conectado a entrada analógica AI.3 da placa NI-USB-6341.

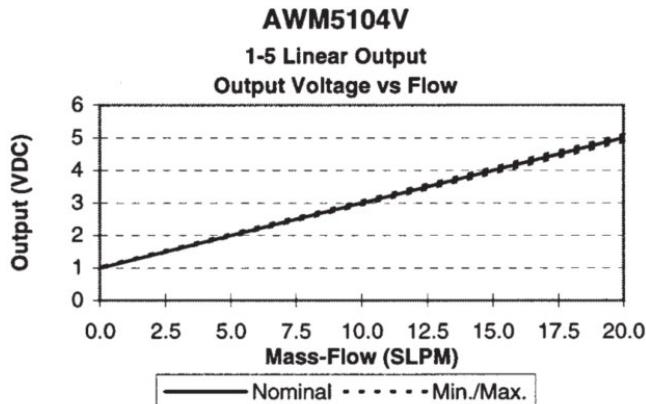


Figura A3.12 - Curva da Tensão de Saída em função da Vazão de Gás (HONEYWELL INTERNATIONAL, [s.d.]).

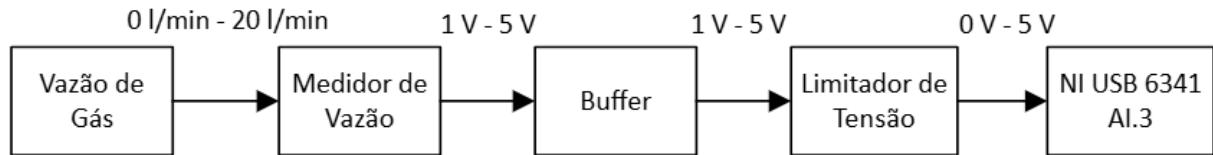


Figura A3.13 - Topologia da Aquisição da Vazão de Gás.

O esquema elétrico do condicionador, presente na Fig. A3.14, é formado por um *buffer* de entrada que recebe o sinal de vazão, um limitador de tensão, formado por um diodo polarizado diretamente e ligado a tensão de referência +5 V, limitando o nível superior do sinal e o *buffer* de saída, projetado com um diodo na saída do amplificador operacional, limitando o nível inferior do sinal em 0 V, ambos os *buffers* são realizados com o circuito integrado LF353 alimentado com -15 V/+15 V.

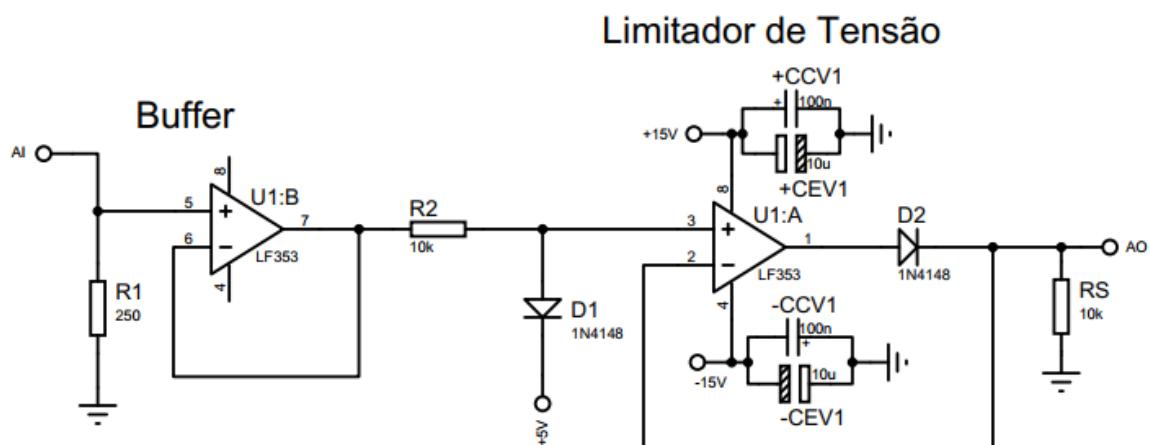


Figura A3.14 - Esquema elétrico do Condicionador da Vazão de Gás.

- Condicionadores de Sinal - Intensidade Luminosa;

O sensor de intensidade luminosa selecionado para utilização neste trabalho é o OPT101 da Texas Instruments, mostrado na Fig. A3.15, este é um sensor analógico que integra um fotodiodo monolítico com um amplificador de transimpedância em um único chip, com isso elimina alguns problemas comumente encontrados, como erros de corrente de fuga, captação de ruído e pico de ganho por capacitância parasita. O sensor trabalha com alimentação simples ou dupla, operando de 2,7 V a 36 V. A curva de resposta do sensor em relação ao comprimento onda e a linearidade da tensão de saída com a intensidade luminosa, mostradas na Fig. A3.16 (Texas Instruments, 2015), foram características importantes para sua escolha. Ressalta-se que foi necessário o encapsulamento e utilização de lentes de filtros de proteção de soldagem para evitar a saturação.

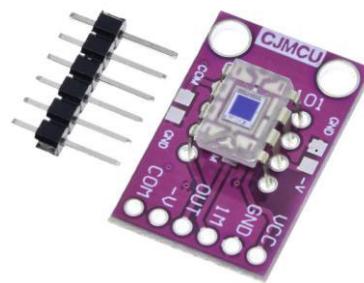
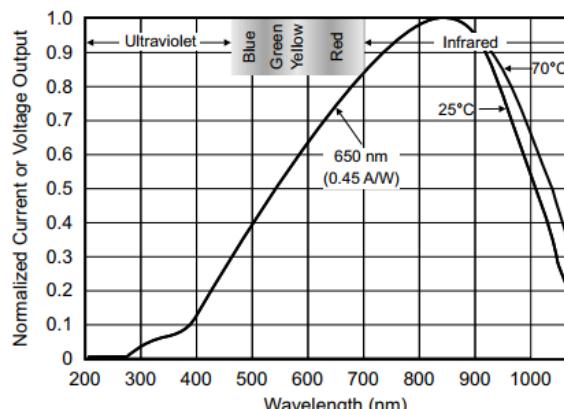
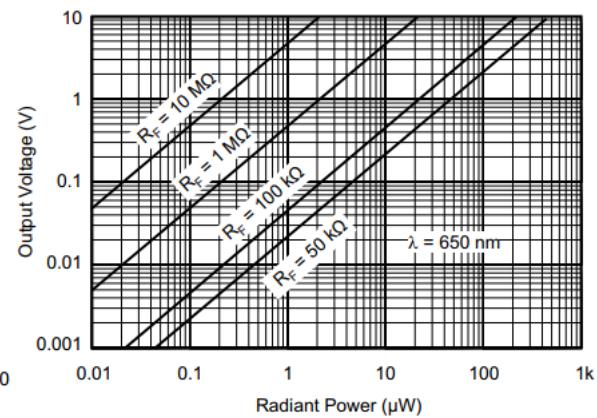


Figura A3.15 - Sensor Analógico de Intensidade Luminosa OPT101.



(a)



(b)

Figura A3.16 – Sensor OPT101 (a) Curva de resposta do Comprimento de Onda e (b) Tensão de Saída em função da Intensidade Luminosa (Texas Instruments, 2015).

A topologia do condicionador de sinal da intensidade luminosa, presente na Fig. A3.17, é mais simples que as anteriores, optou-se por alimentar o sensor com a tensão de 5 V, de

modo que, o nível de tensão do sinal de saída esteja adequado ao padronizado neste projeto. Assim, utilizou-se apenas um *buffer* antes de conexão do sinal à entrada analógica AI.4 da placa NI-USB-6341.

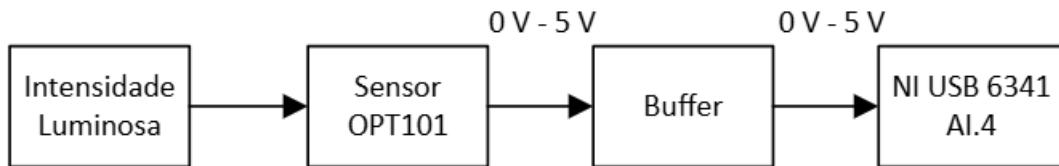


Figura A3.17 - Topologia da Aquisição da Intensidade Luminosa.

O esquema elétrico do condicionador, presente na Fig. A3.18, apresenta o circuito elétrico, dividido em duas partes, a primeira é relativa à seleção do resistor de realimentação, o OPT101 possui internamente um resistor de $1\text{ M}\Omega$ para realimentação do amplificador de transimpedância, porém é possível a utilização de um resistor externo com valor diferente, com o intuito de possibilitar o ajuste da sensibilidade do sensor, conforme as necessidades do projeto, assim o condicionador foi projetado com um jumper de seleção do resistor de realimentação, podendo ser interno ou externo. A segunda parte do circuito elétrico é o buffer implementado com o circuito integrado LF353 e alimentado com $-15\text{ V}/+15\text{ V}$.

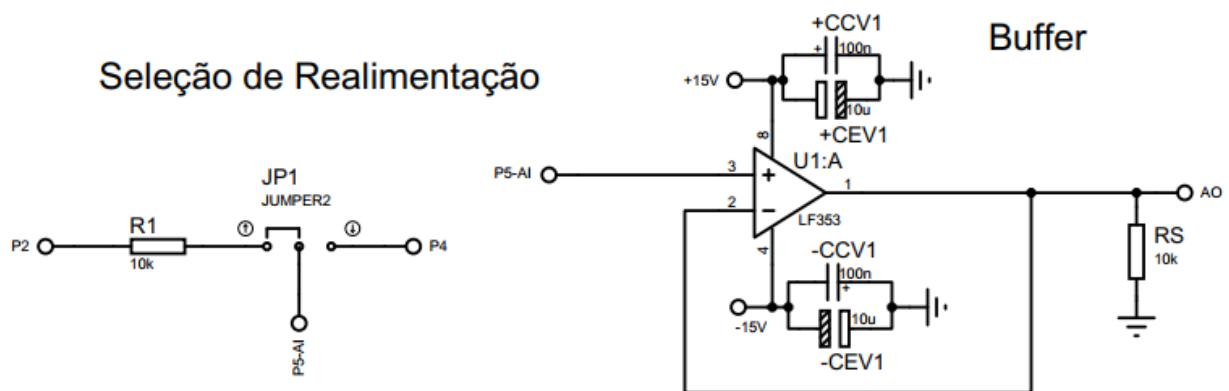


Figura A3.18 - Esquema elétrico do Condicionador da Intensidade Luminosa.

- Som da Deposição;

Para captar os sons provenientes da deposição de material, foi utilizado o microfone direcional SK-M320 da Skypix, mostrado na Fig. A3.19. Este, é um microfone condensador de eletreto e polaridade super cardioide (possui um padrão de captação bem direcional para a frente, ideal para focar na fonte de som e reduzir ruído lateral), que foi projetado para rejeitar o ruído ambiente e focar na captura do áudio na direção em que ele é ajustado (SKYPIX, 2022).



Figura A3.19 - Microfone Direcional SK-M320.

Como a alimentação do microfone selecionado é independente, realizada por uma pilha AA de 1,5 V (a qual foi frequente e rigorosamente substituída para evitar atenuação acentuada do sinal) e os níveis máximo e mínimo do sinal estarem dentro da faixa definida neste trabalho, optou-se por conectá-lo diretamente à placa de aquisição, evitando possíveis ruídos e distorções, como visto na topologia, apresentada na Fig. A3.20, o sinal obtido foi direcionado para a entrada analógica AI.0 da placa NI-USB-6341.



Figura A3.20 - Topologia da aquisição dos Sinais Sonoros.

- Temperatura de Interpasse;

Para o monitoramento da Temperatura de Interpasse utilizou a câmera termográfica FLIR A325, que segundo o fabricante é um modelo de alto desempenho projetado para análise em tempo real em aplicações industriais e de pesquisa (TELEDYNE FLIR, 2014). Os registros obtidos não possuem integração direta com o sistema de aquisição, ficando toda a gravação armazenada inicialmente no computador de operação dedicado a câmera. O comando para iniciar uma gravação é realizado via teclado, assim procedeu toda a configuração do software de operação para o registro correta das imagens e estabeleceu a tecla F5 como comando de início. Para que as gravações ocorressem de forma automática e simultânea a deposição, instalou-se o circuito de um teclado USB e um modulo relé dentro do sistema de aquisição, que podem ser vistos na Fig. A3.21. Nesta configuração, um canal digital da NI USB-6341 aciona o relé responsável pela comutação dos terminais dedicados ao disparo/ativação da

câmera termográfica, previamente foram identificados quais terminais do circuito do teclado eram acionados quando se “aperta a tecla F5”. A topologia do sistema de acionamento da câmera termográfica é apresentada na Fig. A3.22, onde observa-se a representação da estrutura descrita anteriormente.

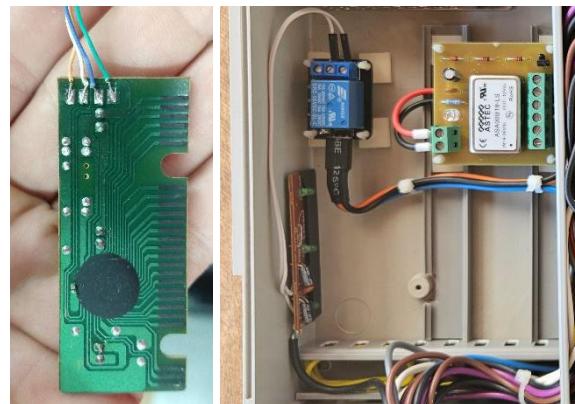


Figura A3.21 - Circuito do teclado USB e Módulo Relé.

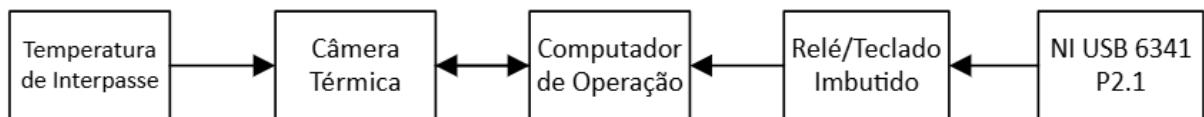


Figura A3.22 - Topologia do sistema de acionamento da Câmera Térmica.

- Condicionadores de Sinal - Velocidade de Alimentação do Arame (Valim);
- A Velocidade de Alimentação do Arame foi adquirida através do encoder incremental E6B2-CWZ6C da empresa Omron, apresentado na Fig. A3.23, o qual possui três canais de informação, codificador óptico, resolução de 2 000 pulsos por revolução e alimentação de 5 V a 24 V.



Figura A3.23 - Encoder E6B2-CWZ6C.

Este encoder opera em modo de coletor aberto, exigindo a utilização de resistores de *pull-up* para a garantia de nível lógico estável para leitura dos sinais. Assim o condicionador para este instrumento relativamente simples, podendo ser visto na Fig. A3.24, precisando apenas de três resistores de $2\text{ k}\Omega$, dispostos entre a alimentação de 5 V e cada canal de medição. Para a leitura das medições efetuadas, os canais A e B foram conectados ao contador CTR.3 da placa NI-USB-6341, seguindo a topologia apresentada na Fig. A3.25.

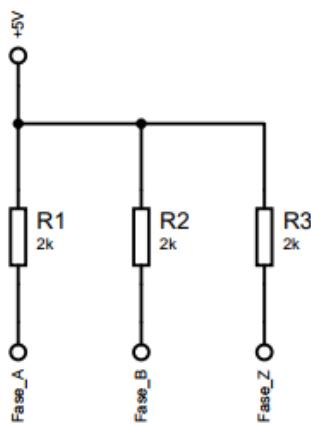


Figura A3.24 - Esquema elétrico do Condicionador da Velocidade de Alimentação.

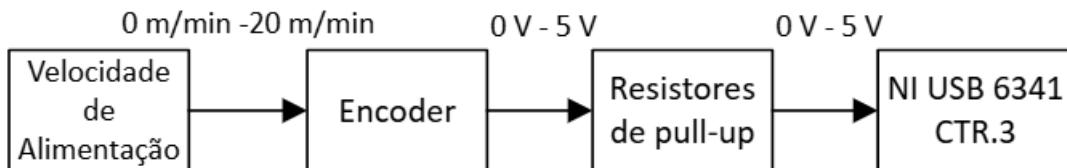


Figura A3.25 - Topologia da Aquisição da Velocidade de Alimentação.

- Condicionadores de sinal - Deslocamento do sistema;

Com a substituição dos motores de passos por *Easy Servos*, mostrado na Fig. A3.26, o deslocamento do sistema, foi obtido através da captura do sinal dos encoder acoplados.

Como o deslocamento do sistema se dá nos eixos X, Y e Z, temos três *Easy Servos*, portanto, três encoders, estes com 2 500 pulsos por revolução e dois canais cada (A e B), assim na topologia da aquisição definida, destacada na Fig. A3.27, é previsto um *buffer* para cada canal, totalizando seis *buffers*. Para o deslocamento em Z, os canais A e B foram conectados ao CTR.0, contador 0 da placa NI-USB-6341, para o deslocamento em Y, os canais A e B foram conectados ao CTR.1, contador 1 e para o deslocamento em X, os canais A e B foram conectados ao CTR.2, contador 2.



Figura A3.26 - Easy Servo.

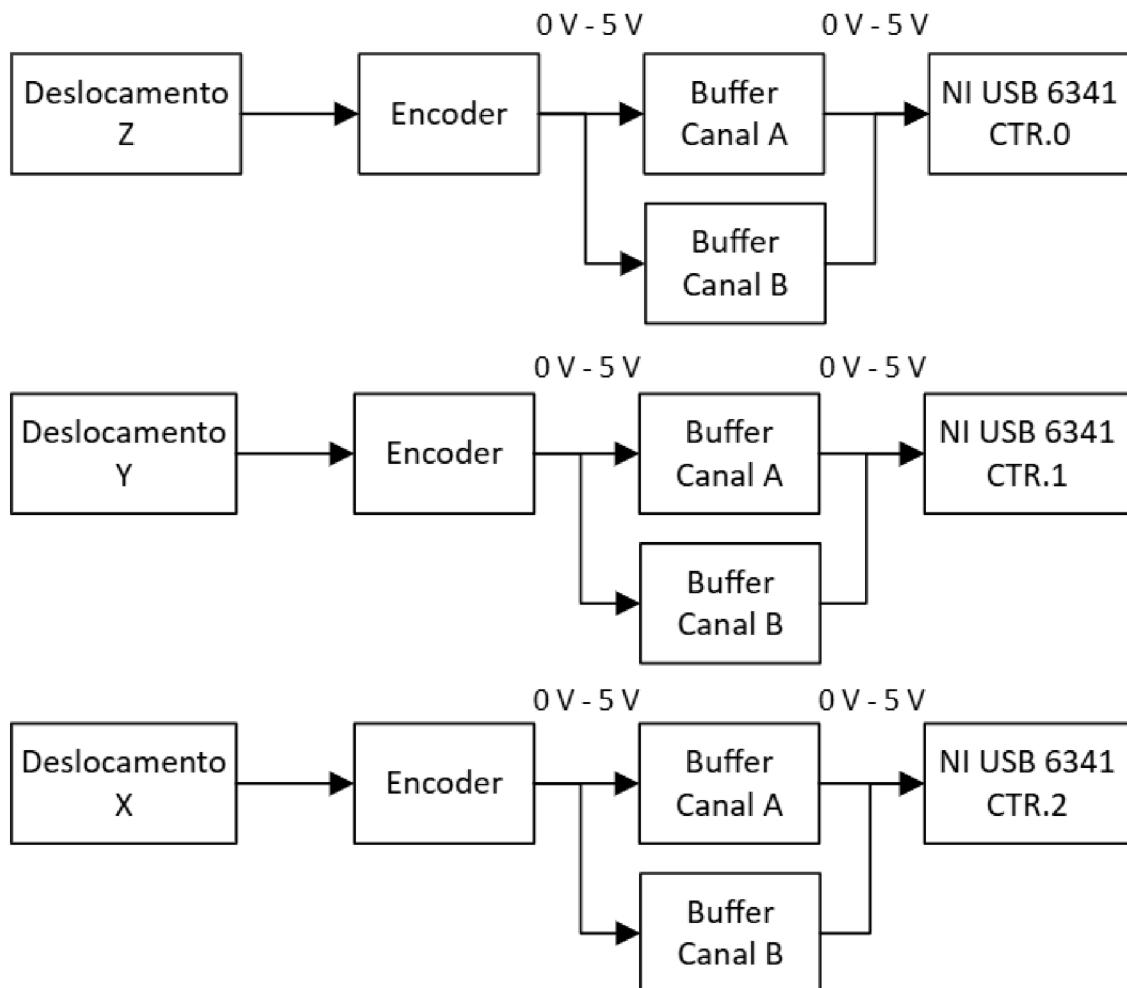


Figura A3.27 - Topologia da Aquisição do Deslocamento.

O esquema elétrico da Fig. A3.28, prevê os seis *buffers* para os seis canais provenientes dos três encoders, os quais são obtidos através de amplificadores operacionais configurados como seguidores de tensão, através do circuito integrado LF353 alimentado com -15 V/15 V.

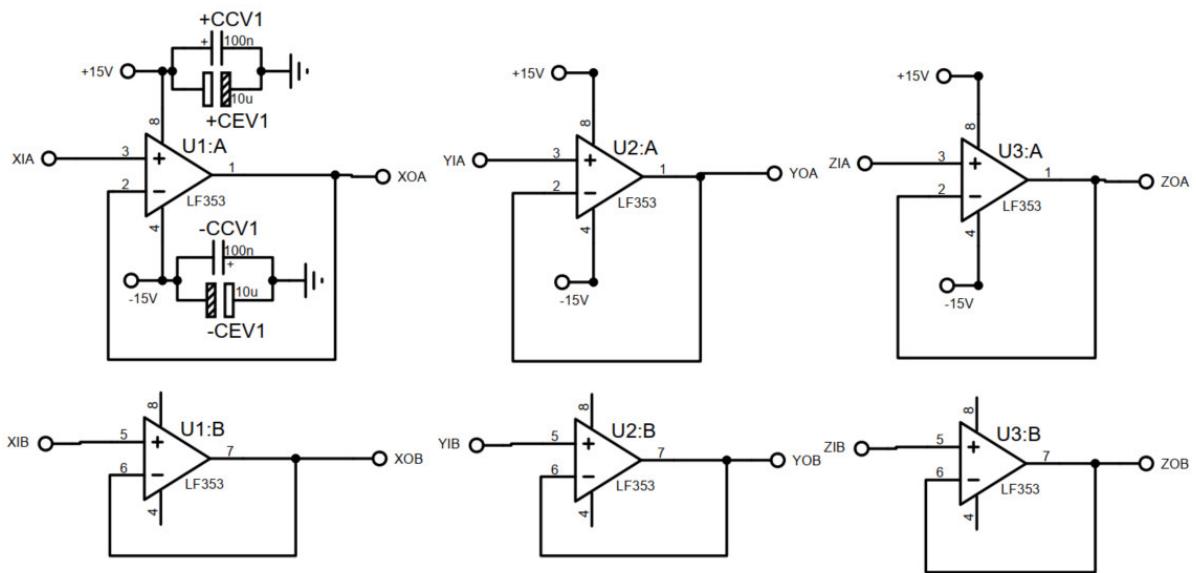


Figura A3.28 - Esquema elétrico do Condicionador do Deslocamento.

- **Escolha da Placa de Aquisição**

É importante salientar que, a escolha da placa de aquisição baseou-se em requisitos técnicos, disponibilidade e compatibilidade com outros sistemas do Laprosolda. A placa especificada para o projeto proposto e as relativas características principais são:

- NI USB 6341 - Dispositivo USB de E/S multifuncionais, 24 canais digitais bidirecionais, 2 saídas analógicas (900 kS/s), 16 entradas analógicas (16 bits, 500 kS/s) e 4 contadores de 32 bits;

- **Montagem do Sistema de Aquisição**

Com o intuito de proteger as placas fabricadas dos condicionadores, sistemas de alimentação, placas de aquisição e demais componentes, além de melhorar o acabamento estético, a montagem do sistema de aquisição foi realizada em uma caixa Patola PB-290/100, mostrada na Fig. A3.29, feita de ABS cinza, acabamento fosco e medindo 107 mm de altura, 302 mm de largura e 280 mm de comprimento.

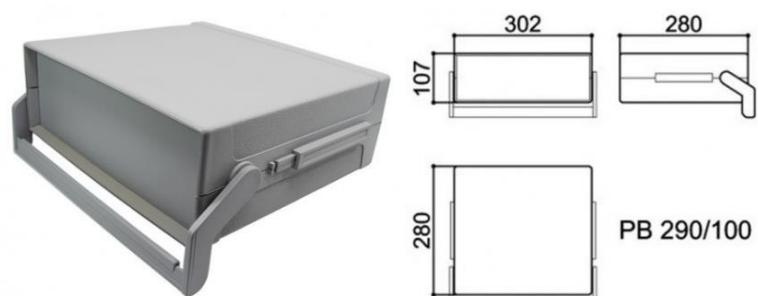


Figura A3.29 - Caixa Patola PB-290/100.

Assim, a caixa foi dividida internamente por canaletas, de modo a facilitar a passagem e conexão dos cabos que interligam os componentes do sistema alimentação, as placas dos condicionadores de sinal, os conectores de entrada dos sensores e as placas de aquisição. Visando facilitar a montagem inicial, futuras manutenções e a rápida identificação, as cores dos cabos utilizados foram padronizadas de acordo com sua função no sistema de aquisição, registrado na Tab. A3.02. Os cabos utilizados são flexíveis e bitola de 0,5 mm².

Tabela A3.02 - Padronização das cores dos cabos de acordo com a função.

+15 V	Vermelho
-15 V	Verde
GND	Preto
+5 V	Laranja
-5 V	Azul
AI	Amarelo
AO	Branco
S1	Roxo
S2	Marrom
S3	Cinza

Posteriormente, definiu-se a utilização de conectores do padrão MIKE para servirem de interface entre o sistema de aquisição e os cabos provenientes dos sensores, com exceção do microfone, que utilizou um conector P10. Para evitar erros de conexão, onde um sensor pudesse ser ligado a outro condicionador de sinal (condicionador errado), o que poderia danificar os próprios sensores, os condicionadores e até as placas de aquisição, padronizou-se para cada variável a ser adquirida um conector diferente (quantidade de vias). O padrão adotado é apresentado na Tab. A3.03, juntamente com a pinagem de cada conector, que é destacada na cor padronizada dos cabos para sua função. Os conectores citados foram instalados na tampa frontal da caixa, juntamente com um conector MIKE-8 de reserva para uma possível expansão.

Para facilitar as conexões internas, usando os padrões citados anteriormente, criou-se uma tabela (Tab. A3.04), com a identificação da função de cada pino dos bornes de todas as placas fabricadas para o projeto, novamente as cores dos cabos foram usadas para dar destaque na função.

Tabela A3.03 - Pinagem dos conectores dos sensores.

Tabela A3.04 - Pinagem dos Bornes das Placas Fabricadas.

Após as definições e padronizações anteriores, procedeu-se a montagem do sistema de aquisição, demonstrado na sequência de figuras a seguir:

- Abertura da caixa e estudo da locação de componentes, Fig. A3.30;
- Instalação dos conectores Mike e do botão de liga/desliga do sistema, Fig. A3.31;
- Divisão do espaço interno e instalação das canaletas, Fig. A3.32;
- Posicionamento dos componentes, Fig. A3.33;
- Conexão do sistema de alimentação com os condicionares, Fig. A3.34;
- Conexão dos conectores Mike com os condicionadores, Fig. A3.35;
- Vista frontal do sistema de aquisição, Fig. A3.36;
- Vista traseira do sistema de aquisição, Fig. A3.37.



Figura A3.30 - Caixa Patola Aberta.



Figura A3.31 - Instalação dos conectores Mike e do botão de liga/desliga do sistema.

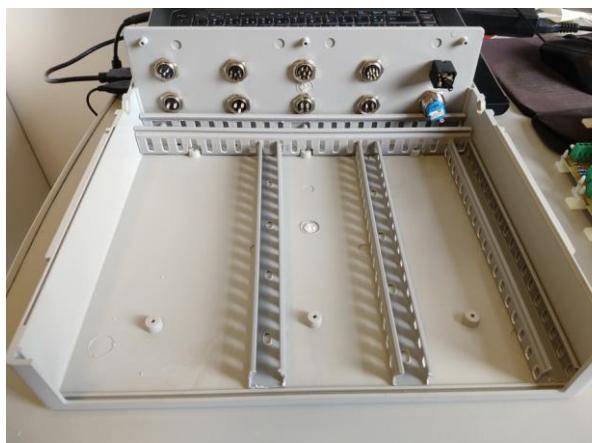


Figura A3.32 - Instalação das canaletas.



Figura A3.33 - Posicionamento dos componentes.

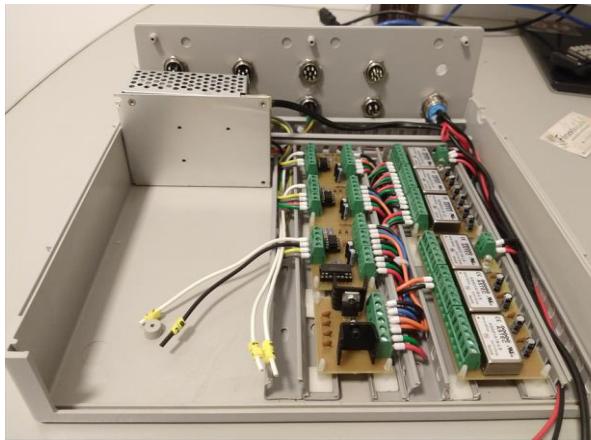


Figura A3.34 - Conexão do sistema de alimentação com os condicionadores.



Figura A3.35 - Conexão dos conectores Mike com os condicionadores.



Figura A3.36 - Vistas Frontal do Sistema de Aquisição.



Figura A3.37 - Vista Traseira do Sistema de Aquisição.

APÊNDICE IV – PROJETOS DOS CONDICIONADORES DE SINAIS

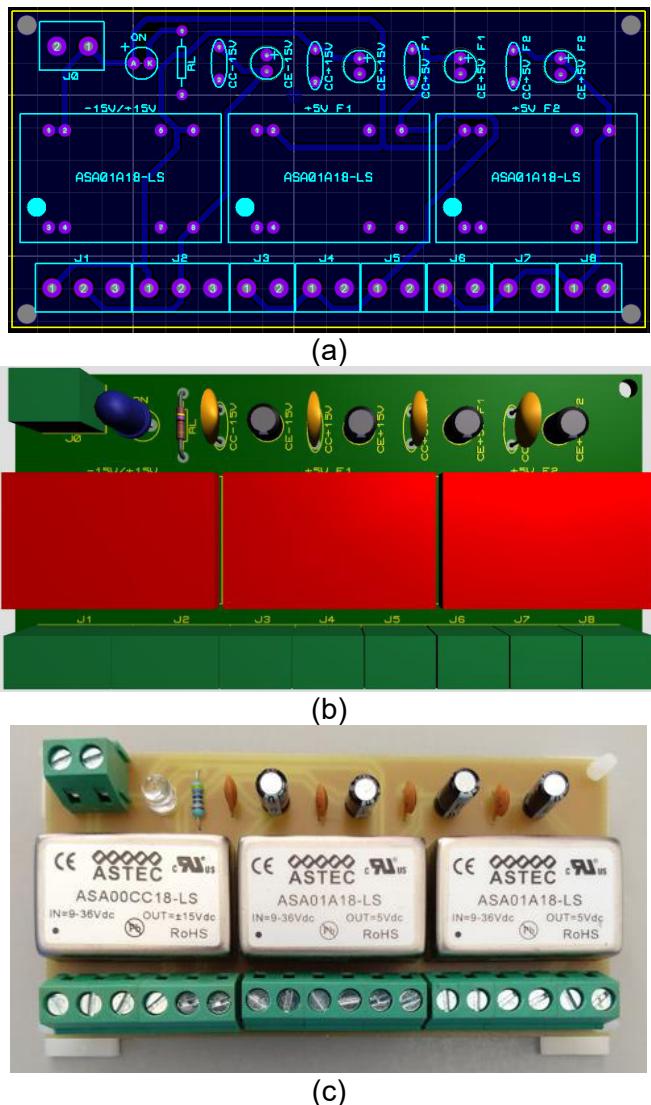


Figura A4.01 – Fonte 2 (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

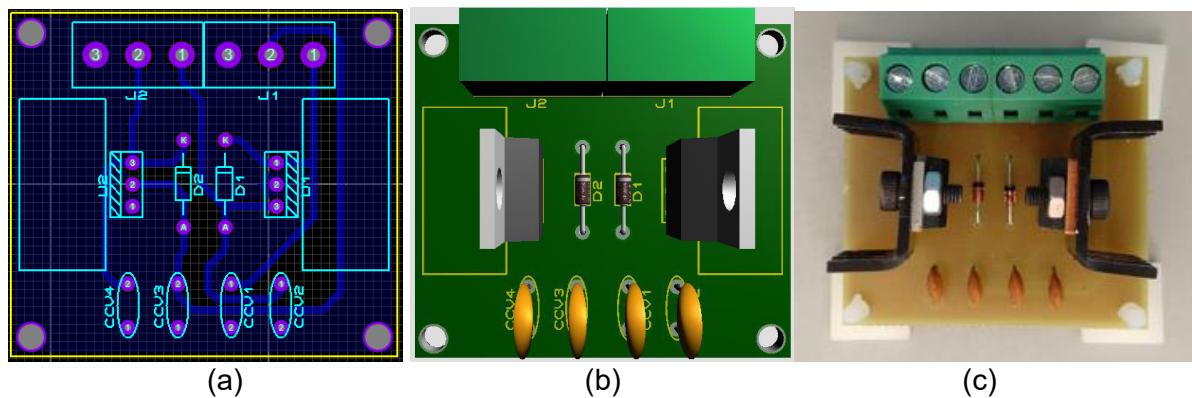


Figura A4.02 - Regulador de Tensão (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

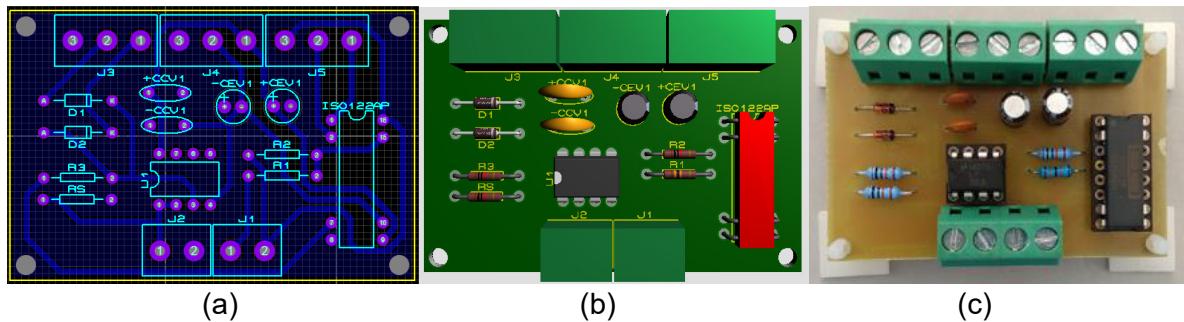


Figura A4.03: Condicionador da Tensão de Soldagem (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

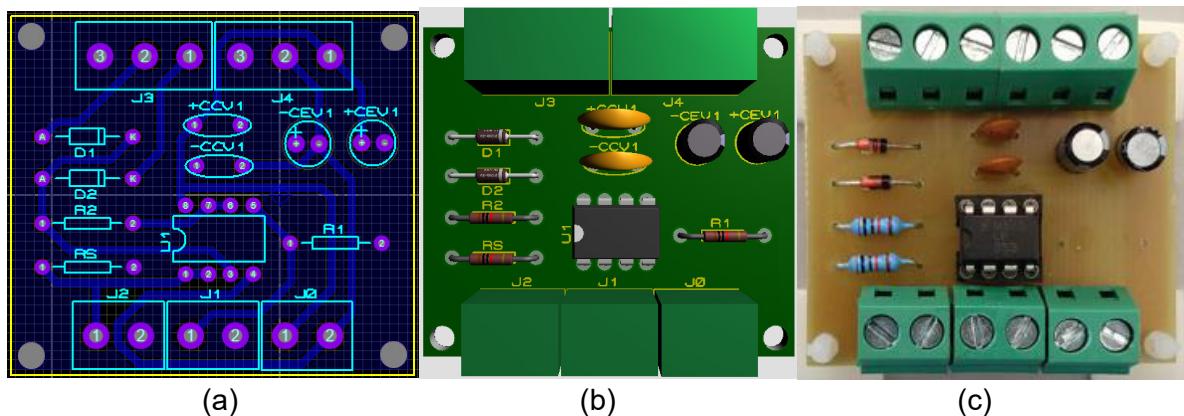


Figura A4.04: Condicionador da Corrente de Soldagem (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

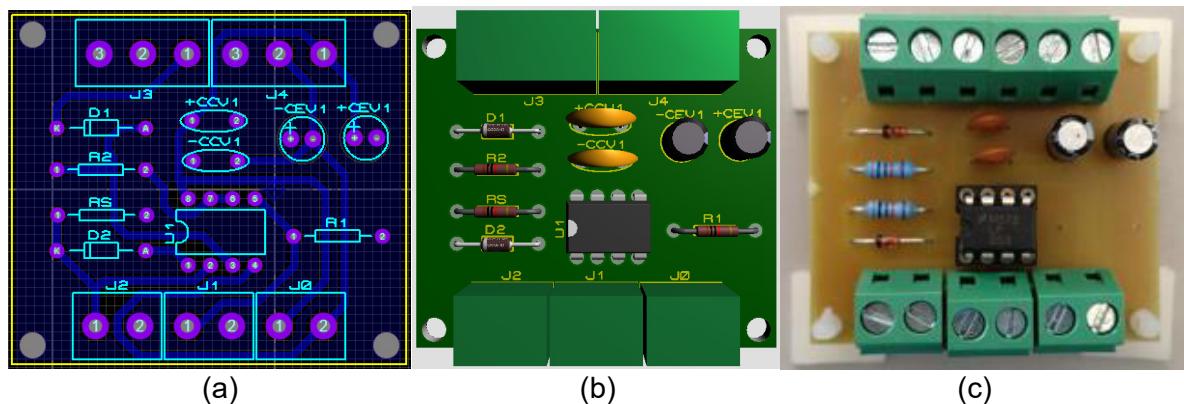


Figura A4.05: Condicionador da Vazão de Gás (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

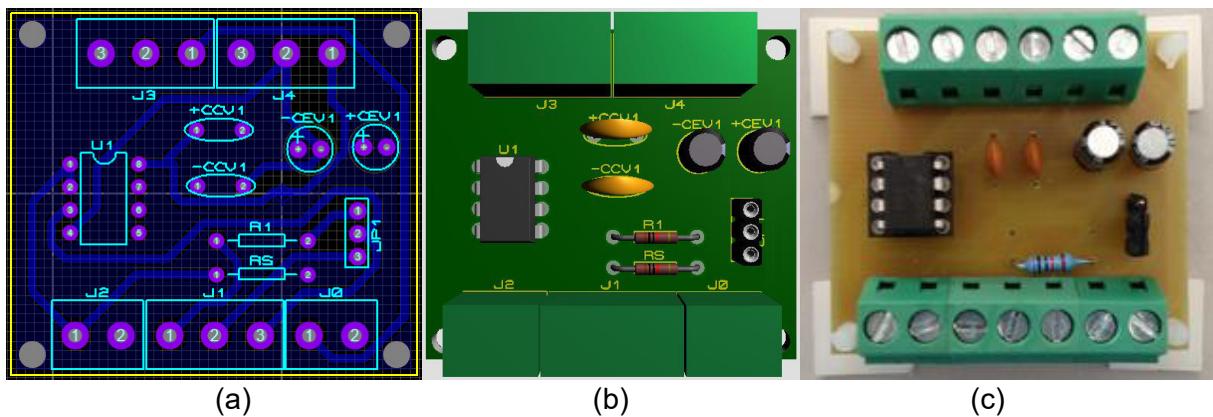


Figura A4.06: Condicionador da Intensidade Luminosa (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

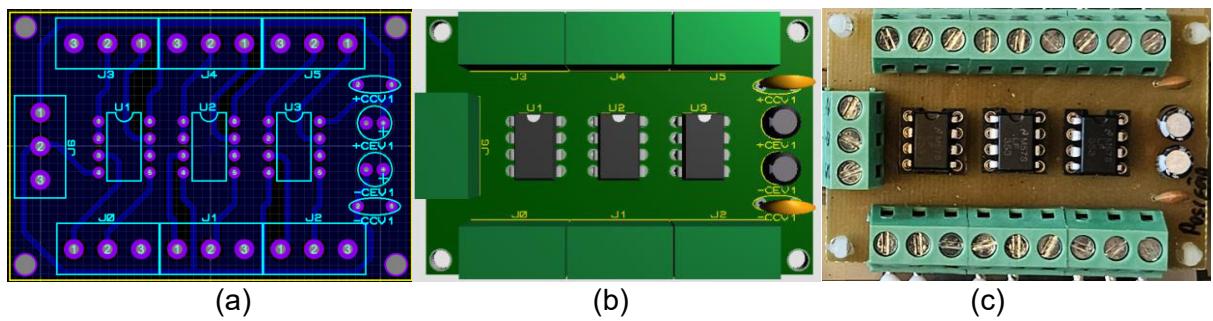


Figura A4.07: Condicionador do Deslocamento (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

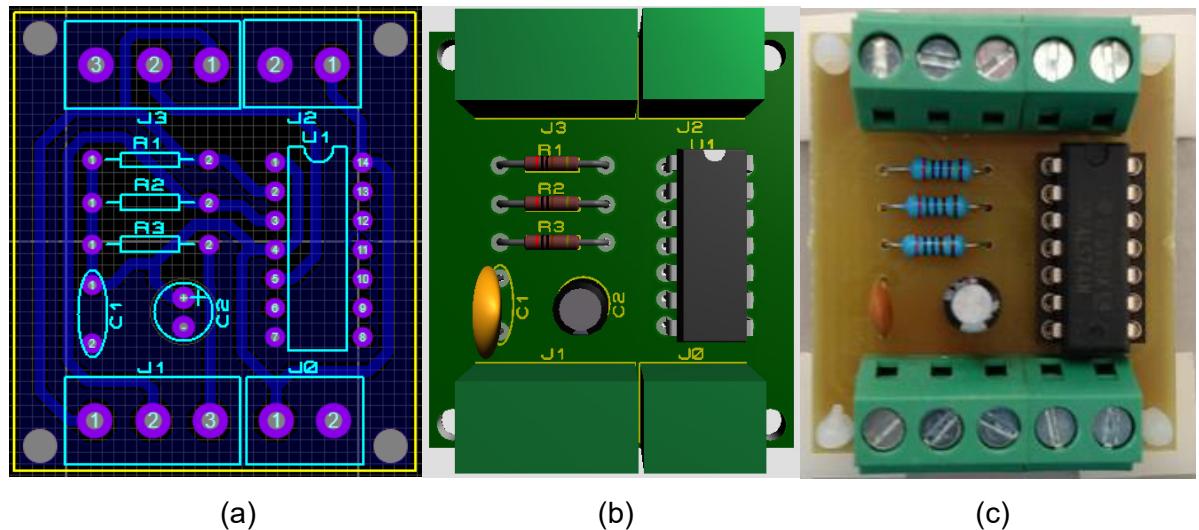


Figura A4.08: Condicionador da Velocidade de Alimentação (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.

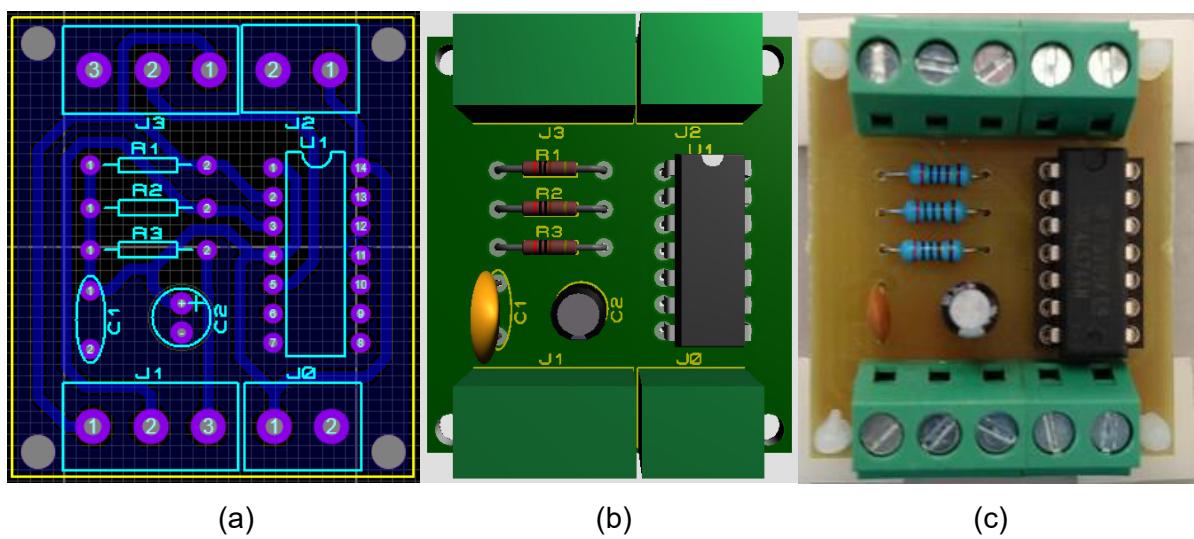


Figura A4.09: Condicionador da Velocidade de Alimentação (a) Placa Roteada no Proteus®, (b) Modelo 3D da Placa e (c) Placa de Circuito Impresso Fabricada.