

LEONARDO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DE PRÉ-FORMAS MULTIMATERIAIS
EM AÇO CARBONO E AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO DEPOSITADAS VIA MANUFATURA
ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
UBERLÂNDIA - MG

2026

LEONARDO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DE PRÉ-FORMAS MULTIMATERIAIS EM AÇO
CARBONO E AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADAS VIA
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

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

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

UBERLÂNDIA - MG

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P436a
2026
Pereira, Leonardo, 1992-
Avaliação de pré-formas multimateriais em aço carbono e aço inoxidável austenítico depositadas via manufatura aditiva por deposição a arco [recurso eletrônico] / Leonardo Pereira. - 2026.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.5521>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

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

CDU: 621.01

André Carlos Francisco
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



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: | Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 681, PPGEM | | | | |
| Data: | 27/02/2026 | Hora de início: | 09:30 | Hora de encerramento: | 11:20 |
| Matrícula: | 12322EMC005 | | | | |
| Nome do Discente: | Leonardo Pereira | | | | |
| Título do Trabalho: | Avaliação de Pré-formas Multimateriais em Aço Carbono e Aço Inoxidável Austenítico Depositadas via Manufatura Aditiva por Deposição a Arco | | | | |
| 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: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva - UFU; Prof. Dr. Leandro João da Silva - UFPR e Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho - UFU; orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, 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 presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

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

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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/02/2026, às 11:25, 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 **Leandro João da Silva, Usuário Externo**, em 27/02/2026, às 11:26, 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 27/02/2026, às 11:26, 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 **7072412** e o código CRC **1D4564C9**.

Referência: Processo nº 23117.009621/2026-94

SEI nº 7072412

LEONARDO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DE PRÉ-FORMAS MULTIMATERIAIS EM AÇO
CARBONO E AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO DEPOSITADAS VIA
MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO**

Dissertação APROVADA pelo Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho – UFU – Orientador

Prof. Dr. Leandro João da Silva - UFPR

Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva - UFU

Uberlândia, 27 de fevereiro de 2026

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Milton Pereira e Maria Aparecida Souza Pereira, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos valores transmitidos ao longo da vida, que foram fundamentais para a minha formação pessoal e profissional.

Aos meus irmãos, Milton Pereira Junior, Thiago Pereira, Edmar Pereira (in memoriam) e Milena Pereira, pela convivência, pelo apoio e pelo incentivo ao longo da minha trajetória pessoal e acadêmica. A memória de Edmar Pereira, que partiu dias antes do início deste mestrado, permanece como fonte de força, reflexão e motivação ao longo desta caminhada.

À minha esposa, Anna Myrian, por caminhar ao meu lado durante todo esse processo, pela compreensão, paciência, apoio emocional e por acreditar em mim mesmo nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu filho Gael, que foi fonte diária de inspiração, motivação e força para a conclusão deste trabalho, e ao meu filho Ravi, que está por vir, representando esperança, renovação e novos sentidos para essa conquista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, pela orientação, confiança, ensinamentos, disponibilidade e contribuição decisiva para o meu desenvolvimento acadêmico, científico e profissional ao longo do mestrado.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC/UFU), pela infraestrutura, pelo apoio institucional e pelo ambiente acadêmico proporcionado ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (PPGEM/UFU), pela formação acadêmica oferecida, pelo suporte administrativo e pela contribuição para o desenvolvimento científico e profissional ao longo do curso de mestrado.

Aos técnicos do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva (LAPROSOLDA), Douglas Trindade Mazer, Neandro Teodoro e Thiago Menezes do Prado, pelo suporte técnico, pela colaboração nas atividades experimentais e pelo acolhimento durante a realização desta pesquisa.

Aos colegas e pesquisadores do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem e Manufatura Aditiva (LAPROSOLDA), em especial aos engenheiros Daniel Dominices de Souza, Diandro Bailoni Fernandes e Edmundo Benedetti, pelas valiosas contribuições técnicas, discussões científicas e auxílio nas atividades práticas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Paulo Cesar Santos Gonçalves, pela amizade verdadeira construída ao longo da pós-graduação, pelo apoio, pelas conversas e pela ajuda nos momentos importantes dessa caminhada acadêmica.

À Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras, pelo apoio institucional e pela contribuição indireta ao desenvolvimento das atividades de pesquisa, fundamentais para a viabilização e consolidação deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento à pesquisa por meio da concessão da bolsa de estudos, essencial para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio institucional e pelo fomento de recursos que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa tão importante da minha trajetória acadêmica, o meu sincero agradecimento.

PEREIRA, L. **Avaliação de Pré-formas Multimateriais em Aço Carbono e Aço Inoxidável Austenítico Depositadas via Manufatura Aditiva por Deposição a Arco**. 2026. 89 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal e Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Neste trabalho é realizada a avaliação metalúrgica e da adesão na interface entre aço carbono e aço inoxidável em paredes cladeadas e multimateriais produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Foram produzidas duas pré-formas (paredes) utilizando-se arames AWS A5.18 ER70S-6 como material de base e AWS A5.9 ER309LSi como material de revestimento, por meio de deposição coordenada com dois robôs de soldagem operando de forma paralela. As paredes diferiram quanto à distância entre as tochas de deposição, adotando-se espaçamentos de 50 mm e 100 mm, sendo mantidos constantes todos os demais parâmetros de processo. A avaliação da adesão e da integridade da interface cladeada foi realizada por meio de ensaios de dobramento guiado conforme a ASTM A264:2019, empregando-se dobramento até 180°, com o revestimento mantido em compressão. A caracterização metalúrgica foi conduzida por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e ensaios de microdureza Vickers, permitindo a análise do material de base, da interface e do revestimento. Os mapas de microdureza foram obtidos conforme a ASTM E384:2011, possibilitando a avaliação dos gradientes de dureza ao longo da interface cladeada. Os resultados permitiram correlacionar as características microestruturais e os perfis de microdureza com o comportamento observado nos ensaios de dobramento, evidenciando a influência da distância entre as tochas de deposição na formação da interface e na integridade da ligação metalúrgica entre o revestimento em aço inoxidável e o material de base em aço carbono produzidos por manufatura aditiva por deposição a arco.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco; Parede cladeada; Materiais Dissimilares; Revestimento em Aço Inoxidável; Parede multimaterial.

PEREIRA, L. **Evaluation of Multimaterial Preforms in Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel Printed via Additive Manufacturing by Arc Deposition**. 2026. 89 f. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

In this work, the metallurgical evaluation and adhesion at the interface between carbon steel and stainless steel in clad and multimaterial pre-forms (walls) produced by wire-arc additive manufacturing (WAAM) are carried out. Two walls were produced using AWS A5.18 ER70S-6 wires as the base material and AWS A5.9 ER309LSi as the coating material, through coordinated deposition with two welding robots operating in parallel. The walls differed exclusively in terms of the distance between the deposition torches, adopting spacing of 50 mm and 100 mm, keeping all other process parameters constant. The evaluation of the adhesion and integrity of the clad interface was carried out by guided bending tests according to ASTM A264:2019, using bending up to 180°, with the coating maintained in compression. The metallurgical characterization was conducted by optical microscopy, scanning electron microscopy and Vickers microhardness tests, allowing the analysis of the base material, the interface and the coating. The microhardness maps were obtained according to ASTM E384:2011, allowing the evaluation of hardness gradients along the clad interface. The results allowed to correlate the microstructural characteristics and microhardness profiles with the behavior observed in the bending tests, evidencing the influence of the distance between the deposition torches on the formation of the interface and on the integrity of the metallurgical bond between the stainless-steel coating and the carbon steel base material produced by additive manufacturing by arc deposition.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing; Cladded Wall; Dissimilar Materials; Stainless Steel Coating; Multimaterial Wall.

ABREVIATURAS

AF – Austenítico-Ferrítico

AM – Additive Manufacturing / Manufatura Aditiva

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

AWS – *American Welding Society*

CAD – Computer-Aided Design / Projeto Auxiliado por Computador

CFC – Cubic Face-Centered / Estrutura Cúbica de Faces Centradas

CNC – *Computer Numerical Control* / Controle Numérico por Computador

DED – Directed Energy Deposition / Deposição por Energia Direcionada

EBM – Electron Beam Melting / Fusão por Feixe de Elétrons

FA – Ferrítico-Austenítico

FGMs – *Functionally Graded Materials* / Materiais com Gradiente Funcional

GMAW – Gas Metal Arc Welding / Soldagem a Arco com Eletrodo Metálico

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding / Soldagem a Arco com Eletrodo de Tungstênio

LPBF – Laser Powder Bed Fusion / Fusão a Laser em Leito de Pó

MADA – Manufatura Aditiva por Deposição / Wire Arc Additive Manufacturing

NIAC – *Near-Immersion Active Cooling* / *Resfriamento Ativo Quase por Imersão*

PTA – *Plasma Transferred Arc* / *Arco Transferido por Plasma*

RAQI – *Resfriamento Ativo Quase por Imersão* / *Near-Immersion Active Cooling*

SLM – *Selective Laser Melting* / *Fusão Seletiva a Laser*

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing / Manufatura Aditiva por Deposição a Arco

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

ZPF – Zona Parcialmente Fundida

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO I | 11 |
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 OBJETIVOS | 12 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 12 |
| 1.1.2 Objetivos específicos..... | 12 |
| CAPÍTULO II | 14 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1 MANUFATURA ADITIVA (MA): CONCEITOS, CLASSIFICAÇÃO E APLICAÇÕES | 14 |
| 2.1.1 Evolução histórica da manufatura aditiva metálica..... | 14 |
| 2.1.2 Classificação dos processos de manufatura aditiva..... | 16 |
| 2.1.3 Principais aplicações industriais e limitações atuais | 17 |
| 2.2 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA) | 19 |
| 2.2.1 Princípios de funcionamento do processo MADA | 19 |
| 2.2.2 Fontes de energia e modos de transferência metálica..... | 21 |
| 2.2.3 Consumíveis: arames metálicos e gases de proteção | 22 |
| 2.2.4 Vantagens, limitações e desafios do processo..... | 25 |
| 2.2.5 Comparação entre MADA e outros processos de MA metálica | 26 |
| 2.3 ESTRATÉGIAS DE DEPOSIÇÃO E CONTROLE TÉRMICO EM MADA | 28 |
| 2.3.1 Trajetórias de deposição e estratégias de tecimento | 28 |
| 2.3.2 Influência do ciclo térmico e do aporte de calor | 30 |
| 2.3.3 Controle de temperatura entre camadas | 32 |
| 2.3.4 Técnicas de resfriamento ativo e passivo..... | 32 |
| 2.3.5 Efeitos do controle térmico na microestrutura e nas propriedades | 33 |
| 2.4 FABRICAÇÃO MULTIMATERIAL E ESTRUTURAS CLADEADAS POR MA | 34 |
| 2.4.1 Técnicas de cladding por processos de soldagem e MA | 35 |
| 2.4.2 Aplicações industriais de estruturas cladeadas..... | 36 |
| 2.5 METALURGIA DA INTERFACE EM SISTEMAS DISSIMILARES | 37 |
| 2.5.1 Diferenças metalúrgicas entre aços carbono e aços inoxidáveis | 37 |
| 2.5.2 Mecanismos de diluição e mistura química na interface | 39 |
| 2.5.3 Formação de zonas parcialmente fundidas e zonas afetadas pelo calor..... | 40 |
| 2.6 MICROESTRUTURA E TRANSFORMAÇÕES DE FASE EM DEPÓSITOS MADA | 42 |
| 2.6.1 Microestrutura típica do aço carbono depositado por MADA | 43 |
| 2.6.2 Microestrutura do aço inoxidável austenítico depositado | 44 |
| 2.6.3 Caracterização microestrutural..... | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7 GRADIENTES DE PROPRIEDADES MECÂNICAS EM INTERFACES CLADEADAS | 46 |
| 2.7.1 Conceito de heterogeneidade mecânica em materiais depositados | 46 |
| 2.7.2 Gradientes de dureza em sistemas dissimilares | 47 |
| 2.7.3 Relação entre microestrutura, diluição e dureza | 48 |
| 2.8 ADESÃO E INTEGRIDADE DA LIGAÇÃO METALÚRGICA | 50 |
| 2.8.1 Fatores que influenciam a adesão em cladding metálico | 51 |
| CAPÍTULO III | 53 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 53 |
| 3.1 METODOLOGIA GERAL | 53 |
| 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, INSUMOS E ANÁLISE DOS DADOS | 57 |
| 3.2.1 Ensaio mecânicos de dobramento | 57 |
| 3.2.2 Ensaio de microdureza | 58 |
| 3.2.3 Análises microestruturais | 58 |
| CAPÍTULO IV | 60 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 60 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO E ANÁLISE MACROESTRUTURAL | 60 |
| 4.2 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE | 62 |
| 4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL | 65 |
| 4.3.1 Microscopia Óptica (Mo) | 65 |
| 4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (Mev) | 67 |
| 4.3.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva (Eds) | 71 |
| 4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA | 73 |
| 4.5 ENSAIO DE DOBRAMENTO CONFORME ASTM A264 | 76 |
| 4.6 ENSAIOS DE DOBRAMENTO ADICIONAIS – AVALIAÇÃO DA INTERFACE CONFORME AWS D1.1 | 79 |
| 4.7 DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS | 81 |
| CAPÍTULO V | 83 |
| 5. CONCLUSÕES | 83 |
| CAPÍTULO VI | 85 |
| 6. TRABALHOS FUTUROS | 85 |
| CAPÍTULO VII | 86 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 86 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções industriais que aliem desempenho mecânico, eficiência de materiais e flexibilidade de projeto tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias avançadas de manufatura. Nesse contexto, a Manufatura Aditiva (MA) destaca-se como um conjunto de processos capazes de produzir componentes diretamente a partir de modelos digitais, por meio da deposição controlada de material camada a camada, permitindo a fabricação de geometrias complexas, a redução de desperdícios e a customização de propriedades funcionais (ISO/ASTM, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022).

Dentre as diferentes categorias de processos de manufatura aditiva metálica, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), internacionalmente denominada *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), tem recebido atenção significativa em aplicações industriais de médio e grande porte. Esse processo baseia-se na utilização de fontes de soldagem a arco elétrico e arame metálico como insumo, apresentando elevada taxa de deposição, baixo custo relativo e elevada eficiência de material, o que o torna particularmente atrativo para a fabricação de pré-formas estruturais, componentes de grande escala e reparo ou recuperação de peças (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2024).

Um dos avanços mais relevantes associados à MADA é a possibilidade de fabricação de componentes multimateriais ou cladeados, nos quais diferentes ligas metálicas são depositadas de forma controlada em regiões específicas do componente, combinando propriedades distintas, como resistência mecânica, resistência à corrosão e desempenho térmico (HERZOG *et al.*, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023). Nesse cenário, o emprego de aço carbono como material estrutural de base, associado ao revestimento em aço inoxidável, constitui uma solução amplamente utilizada em setores como petróleo e gás, indústria química e geração de energia, devido à combinação entre custo reduzido e elevada resistência à corrosão superficial (DAVIS, 1994; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Entretanto, a produção de estruturas cladeadas por MADA impõe desafios metalúrgicos relevantes, especialmente no que se refere à formação e à integridade da interface entre materiais dissimilares. Diferenças significativas na composição química, nos coeficientes de expansão térmica, nos mecanismos de solidificação e nos comportamentos de transformação de fase podem resultar em gradientes microestruturais acentuados, tensões

residuais elevadas e, em casos críticos, falhas de adesão ou descontinuidades interfaciais (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; HU *et al.*, 2024; YANG *et al.*, 2025).

Entre os diversos parâmetros de processo que influenciam a qualidade da interface cladeada em MADA, destacam-se as condições térmicas impostas durante a deposição, as quais estão diretamente relacionadas à estratégia de deposição adotada. Em sistemas com deposição coordenada de múltiplos arcos, como no caso da utilização simultânea de dois robôs de soldagem, a distância entre as tochas de deposição assume papel fundamental no controle do ciclo térmico, da diluição entre os materiais e da evolução microestrutural da interface. Apesar de sua relevância, a influência específica da distância entre tochas na adesão e no comportamento metalúrgico da interface em paredes cladeadas produzidas por MADA ainda é pouco explorada de forma sistemática na literatura técnica.

A justificativa deste estudo fundamenta-se na necessidade de ampliar a compreensão dos fenômenos metalúrgicos envolvidos na fabricação de estruturas multimateriais por MADA, contribuindo para o estabelecimento de parâmetros de processo mais robustos e confiáveis. A avaliação sistemática da adesão interfacial, associada à caracterização microestrutural e à análise dos gradientes de dureza, fornece subsídios técnicos essenciais para a aplicação segura e eficiente de componentes cladeados produzidos por manufatura aditiva, especialmente em aplicações críticas submetidas a solicitações mecânicas e ambientais severas.

Além disso, o uso de ensaios normalizados de dobramento guiado, aliado à caracterização por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e mapeamento de microdureza Vickers, permite uma abordagem integrada e comparável a práticas industriais consolidadas, fortalecendo a relevância técnica e científica dos resultados obtidos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar estudo de avaliação metalúrgica e da adesão na interface entre aço carbono e aço inoxidável em paredes cladeadas e multimateriais produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

1.1.2 Objetivos específicos

- Produzir e avaliar pré-formas metálicas obtidas por manufatura aditiva por deposição a arco (MADA/WAAM);

- Analisar a adesão e a integridade da ligação metalúrgica entre um material de base em aço carbono e um revestimento (*cladding*) em aço inoxidável; e
- Analisar os efeitos do processo na microestrutura e na distribuição de dureza ao longo da interface, caracterizando um sistema de materiais dissimilares.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura, que fundamenta teoricamente o desenvolvimento do presente estudo, abordando de forma sistemática os principais conceitos, tecnologias e fenômenos metalúrgicos relacionados à manufatura aditiva metálica, com ênfase na manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) e na fabricação de estruturas cladeadas e multimateriais. A revisão foi estruturada de modo a estabelecer uma progressão lógica, partindo de conceitos gerais até aspectos específicos diretamente relacionados à adesão metalúrgica e à integridade interfacial em sistemas dissimilares.

2.1 Manufatura Aditiva (MA): conceitos, classificação e aplicações

De acordo com a ISO/ASTM 52900 (2021), a manufatura aditiva compreende um conjunto de tecnologias que utilizam dados provenientes de modelos CAD para controlar a deposição seletiva de material, permitindo elevada liberdade geométrica, integração funcional e otimização do uso de matéria-prima. Diferentemente de processos convencionais, nos quais o material é removido ou deformado até a obtenção da geometria final, a MA constrói o componente de forma progressiva, o que possibilita a fabricação de geometrias complexas, estruturas internas otimizadas e componentes personalizados.

A manufatura aditiva não se restringe a uma única tecnologia, mas engloba diversas categorias de processos, classificadas de acordo com o mecanismo de deposição e a forma do material de alimentação, como fusão em leito de pó, deposição de energia direcionada e extrusão de material, entre outras (ISO/ASTM 52900, 2021).

Além disso, a definição proposta pela ISO/ASTM 52900 (2021) enfatiza o papel central da integração entre projeto digital, controle de processo e fabricação, posicionando a manufatura aditiva como um elemento estratégico dentro do conceito de manufatura avançada e da Indústria 4.0.

2.1.1 Evolução histórica da manufatura aditiva metálica

A manufatura aditiva metálica teve sua evolução fortemente associada ao avanço dos sistemas de prototipagem rápida, do processamento digital de dados e das tecnologias de

fontes de energia concentradas. Seus primeiros desenvolvimentos remontam à década de 1980, período em que surgiram os conceitos iniciais de fabricação camada a camada a partir de modelos tridimensionais, inicialmente voltados à produção de protótipos geométricos e não funcionais (LEHMANN *et al.*, 2022).

No final da década de 1980 e início dos anos 1990, os primeiros processos de manufatura aditiva metálica começaram a ser desenvolvidos, destacando-se tecnologias baseadas na fusão seletiva de pós metálicos por feixe de laser ou feixe de elétrons. Processos como *Selective Laser Melting* (SLM) e *Electron Beam Melting* (EBM) permitiram, pela primeira vez, a produção de componentes metálicos densos com propriedades mecânicas comparáveis às obtidas por rotas convencionais, marcando a transição da prototipagem para a fabricação funcional (HERZOG *et al.*, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Paralelamente às tecnologias baseadas em fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion – PBF*), desenvolveram-se os processos de deposição de energia direcionada (*Directed Energy Deposition – DED*), nos quais o material metálico, na forma de pó ou arame, é alimentado diretamente em uma poça de fusão gerada por uma fonte de alta densidade de energia. Esses processos apresentaram maior flexibilidade para reparo, adição de material e fabricação de componentes de maior porte, ampliando o escopo industrial da manufatura aditiva metálica (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

A partir dos anos 2000, impulsionada pela necessidade de fabricação de estruturas metálicas de grande escala e pela redução de custos operacionais, ganhou destaque a manufatura aditiva por deposição a arco, também conhecida como Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Essa abordagem passou a utilizar fontes de soldagem convencionais, como GMAW, GTAW e plasma, associadas a sistemas robóticos e arame metálico como matéria-prima. O processo MADA destacou-se por suas elevadas taxas de deposição, eficiência de material próxima a 100% e viabilidade econômica para componentes estruturais de médio e grande porte (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

Nos anos mais recentes, a evolução da manufatura aditiva metálica tem sido marcada pela consolidação de aplicações industriais, pela integração com conceitos de manufatura digital e pela ampliação das possibilidades de fabricação multimaterial e funcionalmente gradiente. Avanços no controle de processo, no monitoramento em tempo real, na modelagem térmica e na compreensão dos fenômenos metalúrgicos associados à solidificação e aos ciclos térmicos repetitivos têm permitido maior previsibilidade das propriedades mecânicas e microestruturais dos componentes produzidos (DEBROY *et al.*, 2018; ISO/ASTM 52900, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022).

2.1.2 Classificação dos processos de manufatura aditiva

A manufatura aditiva metálica compreende um conjunto de processos distintos, os quais são classificados de acordo com o mecanismo de deposição de material, a forma do insumo metálico e a fonte de energia empregada. A norma ISO/ASTM 52900 (2021) estabelece uma classificação padronizada que agrupa os processos de manufatura aditiva em sete categorias principais, das quais algumas são especificamente aplicáveis à fabricação de componentes metálicos.

Entre essas categorias, destacam-se os processos de fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion* – PBF), nos quais uma camada de pó metálico é seletivamente fundida por uma fonte de alta densidade de energia, como laser ou feixe de elétrons. Exemplos representativos dessa classe incluem o *Selective Laser Melting* (SLM) e o *Electron Beam Melting* (EBM), amplamente utilizados na fabricação de componentes de elevada complexidade geométrica e tolerâncias dimensionais rigorosas (HERZOG *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

Outra categoria relevante é a deposição de energia direcionada (*Directed Energy Deposition* – DED), caracterizada pela alimentação simultânea de material metálico, na forma de pó ou arame, diretamente em uma poça de fusão gerada por uma fonte concentrada de energia. Os processos DED destacam-se pela elevada flexibilidade geométrica, pela possibilidade de reparo e pela fabricação de componentes de médio e grande porte, sendo amplamente empregados em aplicações industriais e aeroespaciais (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Os processos baseados em jato de ligante (*Binder Jetting*) também integram a classificação da manufatura aditiva metálica, consistindo na deposição seletiva de um ligante sobre um leito de pó metálico, seguida de etapas posteriores de sinterização e, em alguns casos, infiltração. Embora apresentem elevada produtividade, esses processos dependem de tratamentos térmicos subsequentes para obtenção das propriedades mecânicas finais, o que limita sua aplicação em componentes estruturais críticos (LEHMANN *et al.*, 2022).

Dentro da categoria DED, encontra-se a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), que utiliza o arame metálico como insumo e fontes de soldagem a arco elétrico como fonte de energia. Essa abordagem diferencia-se dos demais processos de manufatura aditiva metálica por apresentar elevadas taxas de deposição, elevada eficiência de material e viabilidade econômica para a fabricação de estruturas metálicas de grande escala (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

A Tabela 2.1 apresenta um resumo comparativo das diferenças entre processos de manufatura aditiva.

Tabela 2.1 - Resumo comparativo entre processos de manufatura aditiva. Fonte: (DEBROY *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2021; MANSOR *et al.*, 2024)

| Processo | Fonte de energia | Tipo de material | Ambiente de processamento | Precisão / Acabamento | Taxa de deposição | Aplicações típicas |
|-----------------------|---|------------------|--|---|-------------------|---|
| LPBF | Laser de alta potência | Pó metálico fino | Atmosfera inerte (Ar, N ₂ , Ar + H ₂) | Alta precisão e bom acabamento | Média | Peças complexas, moldes, próteses, componentes aeroespaciais. |
| EBM | Feixe de elétrons | Pó metálico | Vácuo | Alta precisão, porém rugosidade superior à LPBF | Alta | Turbinas, implantes, ligas de titânio. |
| DED | Laser, feixe de elétrons ou arco elétrico | Pó ou arame | Atmosfera controlada ou vácuo | Média precisão | Alta | Reparo e revestimento de componentes, pré-formas metálicas. |
| MADA | Arco elétrico (GMAW, GTAW) | Arame metálico | Atmosfera controlada | Baixa precisão e rugosidade elevada | Muito alta | Estruturas metálicas grandes, naval, aeroespacial e civil. |
| Binder Jetting | Aglutinante líquido | Pó metálico | Ambiente aberto, sem fusão | Baixa antes da sinterização | Muito alta | Ferramentas, moldes, protótipos e peças de baixo custo. |

2.1.3 Principais aplicações industriais e limitações atuais

A manufatura aditiva metálica tem apresentado crescimento significativo em aplicações industriais nas últimas décadas, impulsionada pela capacidade de fabricar componentes com elevada complexidade geométrica, redução de desperdício de material e integração funcional. Entre os setores que mais se beneficiam dessa tecnologia destacam-se as indústrias aeroespacial, de energia, naval, automotiva e de petróleo e gás, nas quais a otimização estrutural e a customização de componentes são fatores estratégicos (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Na indústria aeroespacial, a manufatura aditiva metálica é amplamente empregada na produção de componentes estruturais e funcionais de ligas de titânio, alumínio e superligas à base de níquel, permitindo a redução de massa e a consolidação de múltiplas peças em um único componente. Processos como *Powder Bed Fusion* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED) são utilizados tanto na fabricação de novas peças quanto no reparo de componentes

de alto valor agregado, como pás de turbinas e estruturas de suporte (HERZOG *et al.*, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

No setor de energia e petróleo e gás, a manufatura aditiva metálica tem sido aplicada na fabricação e recuperação de componentes submetidos a ambientes severos, como válvulas, flanges, conectores e estruturas cladeadas resistentes à corrosão. Nesse contexto, destaca-se o uso de processos de deposição por arame, como o MADA, devido à sua elevada taxa de deposição e viabilidade econômica para componentes de grande porte, além da possibilidade de fabricação multimaterial, combinando aços carbono e ligas resistentes à corrosão (LEHMANN *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022).

A indústria naval e de defesa também tem explorado a manufatura aditiva metálica para a produção de estruturas de grande escala, reparo de componentes e redução do tempo de fabricação de peças sobressalentes. O emprego de processos baseados em arco elétrico possibilita a produção de pré-formas estruturais robustas, que posteriormente podem ser usinadas para atender aos requisitos dimensionais finais (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023).

Apesar das vantagens e do crescente número de aplicações industriais, a manufatura aditiva metálica ainda apresenta limitações técnicas e operacionais que restringem sua adoção mais ampla. Entre os principais desafios destacam-se o controle do aporte térmico e dos ciclos térmicos repetitivos, que podem resultar em microestruturas heterogêneas, tensões residuais elevadas e distorções geométricas, especialmente em componentes de grande porte (HERZOG *et al.*, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Outra limitação relevante está associada à variabilidade microestrutural e às propriedades mecânicas anisotrópicas, decorrentes da solidificação direcional e da deposição camada a camada. Além disso, a fabricação de estruturas multimateriais impõe desafios adicionais relacionados à formação e à integridade das interfaces entre materiais dissimilares, exigindo estudos específicos para a avaliação da adesão metalúrgica e do desempenho mecânico dessas regiões (SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Aspectos relacionados à padronização, qualificação de processos e certificação de componentes também representam entraves à disseminação industrial da manufatura aditiva metálica. Embora normas internacionais, como a ISO/ASTM 52900, tenham avançado na padronização de terminologias e princípios, ainda existem lacunas normativas quanto à aceitação de componentes estruturais críticos produzidos por manufatura aditiva, especialmente em setores regulados (ISO/ASTM 52900, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022).

Dessa forma, as aplicações industriais da manufatura aditiva metálica coexistem com limitações técnicas e normativas que demandam contínuos esforços de pesquisa e

desenvolvimento, particularmente no entendimento dos fenômenos metalúrgicos, no controle de processo e na avaliação da integridade estrutural dos componentes produzidos.

2.2 Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)

2.2.1 Princípios de funcionamento do processo MADA

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é um processo de fabricação metálica baseado nos princípios da soldagem por arco elétrico, associado ao controle automatizado da deposição de material camada a camada. Nesse processo, o material metálico é alimentado continuamente na forma de arame e fundido por meio de um arco elétrico, formando uma poça de fusão que se solidifica de maneira controlada, dando origem à geometria tridimensional desejada a partir de dados digitais de projeto (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2024) (Figura 2.1)

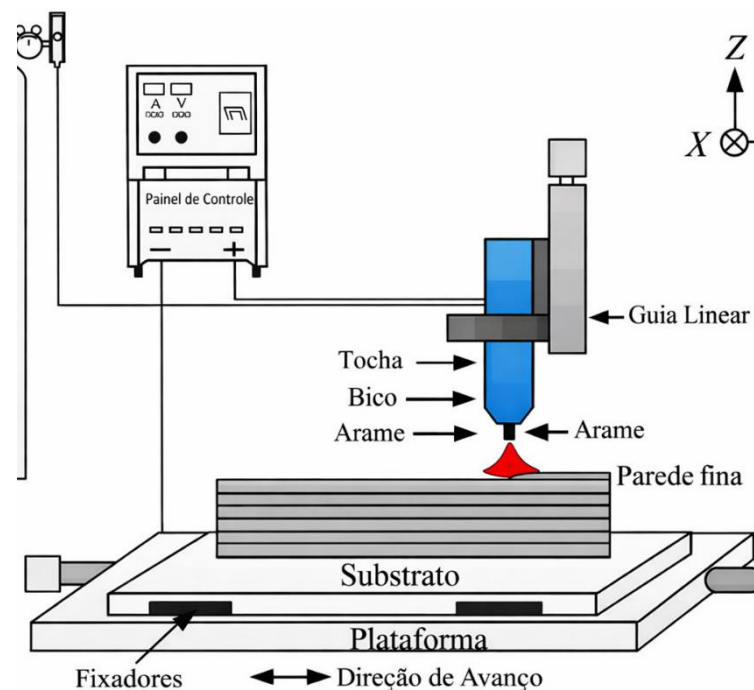


Figura 2.1 - Representação esquemática do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Fonte: Xiong *et al.*, (2018)

O funcionamento do processo MADA envolve a integração entre uma fonte de soldagem, um sistema de alimentação de arame, um dispositivo de movimentação, geralmente um robô industrial ou um sistema CNC, e um sistema de controle computacional responsável pela sincronização dos parâmetros de deposição e da trajetória da tocha. A partir

do modelo CAD do componente, o caminho de deposição é definido e segmentado em camadas sucessivas, permitindo a construção incremental da peça (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

A fonte de energia empregada no MADA pode variar conforme a aplicação, sendo utilizados processos de soldagem como GMAW, GTAW, plasma ou suas variantes controladas. O uso de modos de transferência metálica pulsada é comum, pois proporciona maior estabilidade do arco, melhor controle da poça de fusão e redução de respingos, fatores essenciais para a obtenção de cordões com geometria uniforme e boa qualidade superficial (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

O aporte térmico no processo MADA é determinado principalmente pelos parâmetros elétricos de soldagem, como corrente e tensão, bem como pela velocidade de alimentação do arame e pela velocidade de deslocamento da tocha. Esses parâmetros influenciam diretamente o tamanho da poça de fusão, a taxa de solidificação e o ciclo térmico imposto ao material depositado e às camadas previamente solidificadas. Como consequência, o controle adequado desses parâmetros é fundamental para garantir a estabilidade geométrica, a repetibilidade do processo e as propriedades metalúrgicas do componente fabricado (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Um aspecto característico do funcionamento do MADA é a ocorrência de ciclos térmicos repetitivos decorrentes da deposição sequencial de camadas. Esses ciclos promovem reaquecimentos sucessivos do material depositado, afetando a evolução microestrutural, a distribuição de dureza e o desenvolvimento de tensões residuais. Estratégias de controle térmico, como o ajuste do tempo entre passes, a orientação da trajetória de deposição e o emprego de técnicas de resfriamento controlado, são frequentemente adotadas para mitigar distorções e promover maior homogeneidade microestrutural (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

No contexto da fabricação multimaterial e de estruturas cladeadas, o processo MADA permite a deposição controlada de diferentes ligas metálicas ao longo da geometria do componente, possibilitando a obtenção de interfaces metalurgicamente ligadas. Entretanto, a formação dessas interfaces é fortemente influenciada pelas condições térmicas e pela estratégia de deposição adotada, tornando essencial a avaliação da adesão e da integridade da ligação metalúrgica, especialmente em sistemas de materiais dissimilares, como aço carbono e aço inoxidável.

2.2.2 Fontes de energia e modos de transferência metálica

No processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), a fonte de energia desempenha papel fundamental no controle da poça de fusão, na estabilidade do arco elétrico e na qualidade do material depositado. Diferentemente de processos de manufatura aditiva baseados em feixes concentrados, como laser ou feixe de elétrons, o MADA utiliza fontes de soldagem convencionais, amplamente empregadas na indústria, o que contribui para sua viabilidade econômica e escalabilidade industrial (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

As principais fontes de energia utilizadas no MADA incluem os processos de soldagem a arco com eletrodo consumível e não consumível, como o *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), o *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e o arco plasma. O processo GMAW destaca-se pela elevada taxa de deposição e pela facilidade de automação, sendo amplamente empregado em aplicações de MADA voltadas à fabricação de componentes estruturais e pré-formas metálicas de grande porte. O GTAW, por sua vez, oferece maior controle da poça de fusão e menor aporte térmico, sendo indicado para aplicações que demandam maior precisão geométrica e controle microestrutural (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

No contexto do MADA, os modos de transferência metálica associados ao processo GMAW assumem particular relevância, uma vez que influenciam diretamente a estabilidade do arco, a geometria do cordão e a quantidade de calor transferida ao material depositado. Os principais modos de transferência metálica incluem a transferência por curto-circuito (*short-circuit transfer*), a transferência globular (*globular transfer*), a transferência spray (*spray transfer*) e a transferência pulsada (*pulsed transfer*) (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023) (Figura 2.2).

A transferência por curto-circuito caracteriza-se pelo contato periódico entre o arame e a poça de fusão, resultando em baixo aporte térmico, porém com maior instabilidade do arco e maior incidência de respingos, o que limita sua aplicação em MADA. A transferência globular ocorre em níveis mais elevados de corrente, apresentando gotas de maior diâmetro e instabilidade significativa, sendo geralmente evitada em aplicações de deposição aditiva (LEHMANN *et al.*, 2022).

A transferência spray é caracterizada pela formação de gotas finas e de alta frequência, promovendo elevada estabilidade do arco e maior taxa de deposição. No entanto, esse modo está associado a elevado aporte térmico, o que pode resultar em diluição excessiva, crescimento de grão e distorções geométricas, especialmente em processos com deposição camada a camada, como o MADA (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

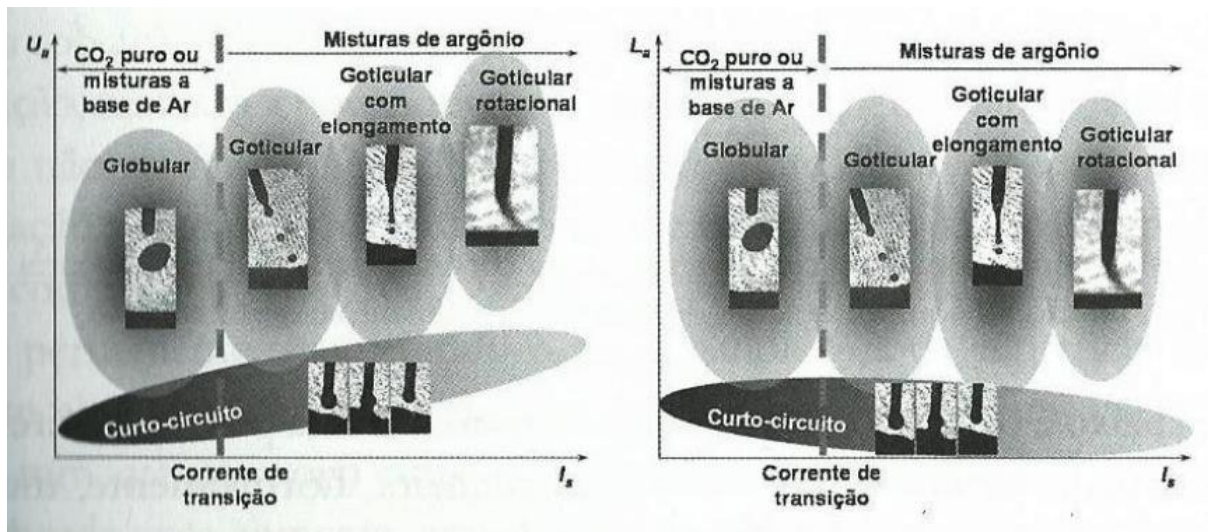


Figura 2.2 – Representação dos principais modos de transferência metálica na soldagem a arco., em função da corrente e da tensão (à esquerda) e do comprimento de arco (à direita).
Fonte: Scotti e Ponomarev (2014)

Nesse contexto, a transferência metálica pulsada tem sido amplamente adotada no processo MADA, por combinar a estabilidade da transferência spray com a redução do aporte térmico. Nesse modo, a corrente alterna entre níveis de pico e base, permitindo a transferência controlada de uma gota por pulso, o que resulta em melhor controle da poça de fusão, redução de respingos e maior repetibilidade do processo. Essas características tornam a transferência pulsada particularmente adequada para aplicações de manufatura aditiva, nas quais o controle térmico e a qualidade geométrica são críticos (WILLIAMS *et al.*, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Portanto, a seleção adequada da fonte de energia e do modo de transferência metálica é um fator determinante para o sucesso do processo MADA, influenciando diretamente a estabilidade do arco, o aporte térmico, a microestrutura formada e as propriedades mecânicas do material depositado.

2.2.3 Consumíveis: arames metálicos e gases de proteção

No processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), os insumos desempenham papel determinante na estabilidade do processo, na formação da poça de fusão e nas características metalúrgicas do material depositado. Entre os principais insumos utilizados destacam-se os arames metálicos, que constituem a matéria-prima do processo, e os gases de proteção, responsáveis pela estabilização do arco elétrico e pela proteção da poça de fusão contra a contaminação atmosférica (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Os arames metálicos empregados no MADA apresentam, como principal vantagem, elevada eficiência de material, uma vez que praticamente todo o insumo alimentado é incorporado ao componente final. Esses arames são produzidos conforme normas técnicas consolidadas, como as especificações da *American Welding Society (AWS)*, garantindo controle químico, consistência dimensional e propriedades mecânicas adequadas. A seleção do arame deve considerar a composição química, o diâmetro, a compatibilidade metalúrgica com o material de base e os requisitos funcionais do componente fabricado (LEHMANN *et al.*, 2022).

No contexto de aplicações multimateriais e cladeadas, o uso de arames dissimilares possibilita a combinação de diferentes ligas metálicas em um mesmo componente, permitindo, por exemplo, a utilização de aços carbono como material estrutural e aços inoxidáveis como revestimento resistente à corrosão. Entretanto, diferenças na composição química e nos comportamentos de solidificação podem resultar em gradientes microestruturais acentuados e na formação de zonas de diluição complexas, tornando essencial o controle dos parâmetros de deposição e da estratégia de deposição adotada (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; LEHMANN *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2024).

O diâmetro do arame influencia diretamente a taxa de deposição, a estabilidade do arco e o controle da poça de fusão. Arames de maior diâmetro permitem maiores taxas de deposição, porém demandam maiores correntes e aportes térmicos, enquanto arames de menor diâmetro oferecem maior controle geométrico e são frequentemente empregados em aplicações que exigem maior precisão dimensional (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

Os gases de proteção têm como função principal proteger a poça de fusão e o metal fundido contra a oxidação e a contaminação por gases atmosféricos, além de influenciar a estabilidade do arco e o modo de transferência metálica (Figura 2.3). Em processos MADA baseados em GMAW, são comumente utilizados gases inertes ou misturas de gases inertes com pequenas adições de gases ativos, como argônio puro ou argônio com adições controladas de dióxido de carbono ou oxigênio (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

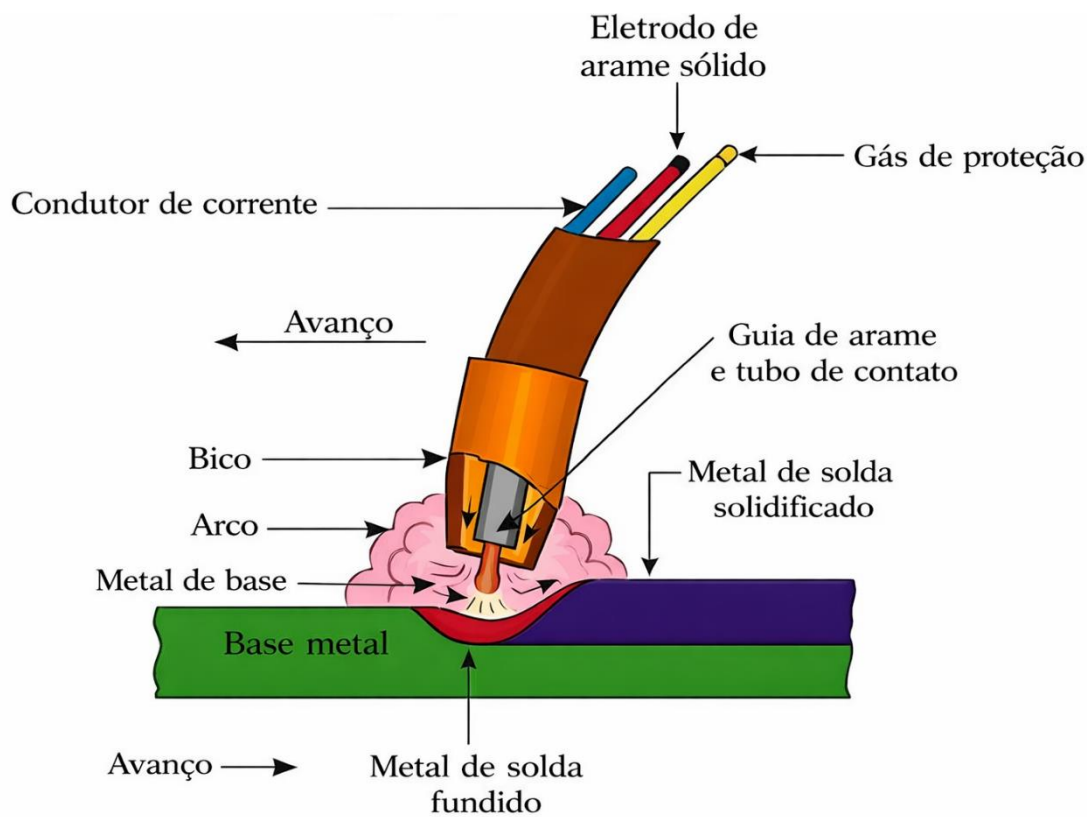


Figura 2.3 - Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG (GMAW), destacando a cortina de gás de proteção. Fonte: Natesan et al. (2023).

O uso de argônio como gás de proteção favorece a estabilidade do arco e a transferência metálica spray ou pulsada, sendo amplamente empregado na deposição de aços inoxidáveis e ligas especiais. A adição de pequenas quantidades de CO_2 ou O_2 pode melhorar a molhabilidade do metal fundido e a estabilidade do arco, porém adições excessivas podem aumentar a oxidação do metal depositado e influenciar negativamente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão, especialmente em aços inoxidáveis (LEHMANN *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022).

Portanto, a seleção criteriosa dos arames metálicos e dos gases de proteção é essencial para o sucesso do processo MADA, influenciando diretamente a estabilidade do arco, o controle térmico, a microestrutura formada e a integridade das interfaces metalurgicamente ligadas em componentes multimateriais. A compreensão desses fatores é particularmente relevante em estudos voltados à avaliação da adesão e do comportamento metalúrgico em sistemas dissimilares produzidos por manufatura aditiva.

2.2.4 Vantagens, limitações e desafios do processo

Entre as principais vantagens do processo MADA destaca-se a elevada produtividade, com taxas de deposição significativamente superiores às observadas em processos baseados em leito de pó, podendo atingir valores superiores a 5 kg/h, dependendo do material e da fonte de energia utilizada. Essa característica torna o processo particularmente atrativo para a fabricação de componentes de grandes dimensões, reduzindo o tempo de produção e os custos associados (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022). Além disso, o uso de arames metálicos como insumo confere elevada eficiência de material, com aproveitamento próximo de 100%, minimizando desperdícios e etapas posteriores de reciclagem (LEHMANN *et al.*, 2022).

Outra vantagem relevante é a possibilidade de utilização de ligas metálicas amplamente disponíveis no mercado de soldagem, incluindo aços carbono, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, titânio e níquel. Essa característica facilita a adoção industrial do processo, uma vez que se baseia em consumíveis normalizados e em fontes de soldagem consolidadas tecnologicamente (LEHMANN *et al.*, 2022). Adicionalmente, o processo MADA permite a fabricação de estruturas multimateriais e cladeadas, ampliando as possibilidades de projeto funcional e otimização de propriedades localizadas, como resistência mecânica, resistência à corrosão e custo do componente (SUÁREZ *et al.*, 2022; LEHMANN *et al.*, 2022).

Apesar dessas vantagens, o processo MADA apresenta limitações significativas, principalmente associadas ao elevado aporte térmico inerente aos processos a arco elétrico. O alto aporte de calor pode resultar em ciclos térmicos severos, promovendo crescimento de grão, formação de microestruturas heterogêneas e acúmulo de tensões residuais, os quais podem comprometer as propriedades mecânicas e a estabilidade dimensional das peças produzidas (LEHMANN *et al.*, 2022). Consequentemente, componentes fabricados por MADA frequentemente requerem etapas adicionais de usinagem e, em alguns casos, tratamentos térmicos pós-processo (DEBROY *et al.*, 2018).

Outra limitação importante refere-se ao controle geométrico e ao acabamento superficial. Em comparação com processos de manufatura aditiva baseados em pó, o MADA apresenta menor resolução dimensional e maior rugosidade superficial, o que restringe sua aplicação em componentes que exigem tolerâncias dimensionais rigorosas ou superfícies de alta qualidade sem pós-processamento (LEHMANN *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Os desafios atuais do processo MADA concentram-se, principalmente, no controle do aporte térmico, na previsibilidade microestrutural e na garantia de repetibilidade do processo. Estratégias como o uso de modos de transferência metálica de baixo aporte térmico, controle ativo da temperatura intercamadas, resfriamento assistido e otimização das trajetórias de

deposição têm sido amplamente investigadas para mitigar esses efeitos. No caso de aplicações multimateriais e cladeadas, os desafios são ainda mais complexos, envolvendo o controle da diluição química, a formação de fases indesejadas na interface e a garantia da integridade da ligação metalúrgica entre materiais dissimilares.

2.2.5 Comparação entre MADA e outros processos de MA metálica

Nesse contexto, o processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) apresenta características específicas que o distinguem de outras tecnologias amplamente utilizadas.

Uma das principais diferenças entre o MADA e os processos baseados em leito de pó, como LPBF e EBM, está relacionada à taxa de deposição e à escala dos componentes fabricados. Enquanto processos LPBF e EBM operam com taxas de deposição relativamente baixas, tipicamente inferiores a 0,5 kg/h, o MADA pode alcançar taxas superiores a 5 kg/h, tornando-se mais adequado para a fabricação de componentes de grandes dimensões e aplicações estruturais (WILLIAMS *et al.*, 2016). Em contrapartida, os processos em leito de pó oferecem maior resolução geométrica, melhor acabamento superficial e controle mais preciso da microestrutura, sendo preferencialmente empregados na fabricação de componentes complexos de pequeno e médio porte (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

No que se refere aos insumos, o MADA utiliza arames metálicos, enquanto LPBF e EBM empregam pós metálicos. O uso de arames confere ao MADA maior eficiência de material e menores custos operacionais, além de reduzir riscos associados ao manuseio de pós metálicos, como contaminação, explosividade e degradação do material. Por outro lado, o uso de pós possibilita maior flexibilidade composicional e a produção de geometrias internas complexas, como canais internos e estruturas reticuladas, que são de difícil obtenção por processos a arco (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Quando comparado aos processos de deposição de energia direcionada (DED), o MADA pode ser considerado uma subcategoria que utiliza o arco elétrico como fonte de energia, enquanto outros processos DED empregam lasers de alta potência ou feixes de elétrons. Em relação ao DED a laser, o MADA apresenta menor custo de investimento em equipamentos e maior robustez operacional, porém com menor precisão dimensional e maior aporte térmico. Já o DED por feixe de elétrons oferece alta eficiência energética e operação em atmosfera controlada, mas exige câmaras a vácuo, o que limita o tamanho das peças e eleva os custos do sistema (ISO/ASTM, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022).

Do ponto de vista metalúrgico, o elevado aporte térmico do MADA resulta em ciclos térmicos mais longos e taxas de resfriamento inferiores às observadas em processos a laser ou feixe de elétrons. Essa condição favorece o crescimento de grão e a formação de microestruturas mais grosseiras, o que pode impactar negativamente propriedades mecânicas como resistência e tenacidade. Em contrapartida, os processos baseados em leito de pó promovem taxas de resfriamento elevadas, possibilitando microestruturas refinadas e, em alguns casos, metaestáveis (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Em termos de aplicações industriais, o MADA é particularmente indicado para a fabricação de componentes estruturais de grande porte, reparo e recuperação de peças e produção de estruturas cladeadas e multimateriais, onde a elevada taxa de deposição e a flexibilidade de uso de ligas comerciais são vantagens determinantes. Por sua vez, processos como LPBF e EBM são mais adequados para aplicações que exigem alta complexidade geométrica, precisão dimensional e controle microestrutural rigoroso, como componentes aeroespaciais, biomédicos e de alta performance (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

A Tabela 2.2 apresenta a síntese da comparação entre o processo MADA e outras tecnologias da MA metálica. Dessa forma, a escolha entre o processo MADA e outros processos de manufatura aditiva metálica deve considerar critérios como escala do componente, requisitos geométricos, propriedades mecânicas desejadas, custo, produtividade e complexidade metalúrgica.

Tabela 2.2 - Comparação entre o processo MADA e outras tecnologias de manufatura aditiva metálica. Fonte: Williams *et al.* (2016), DebRoy *et al.* (2018), ISO/ASTM 52900 (2021) e Lehmann *et al.* (2022).

| Critério | MADA (WAAM / Arc-DED) | LPBF (Laser Powder Bed Fusion) | EBM (Electron Beam Melting) | DED a laser |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Fonte de energia | Arco elétrico (GMAW, GTAW, Plasma) | Laser de alta potência | Feixe de elétrons | Laser de alta potência |
| Forma do insumo | Arame metálico | Pó metálico | Pó metálico | Pó ou arame metálico |
| Taxa de deposição | Alta (\approx 3–10 kg/h ou superior) | Baixa ($<$ 0,5 kg/h) | Baixa a moderada | Moderada (\approx 0,5–3 kg/h) |
| Escala dos componentes | Grande porte (estrutural, metros) | Pequeno a médio porte | Médio porte | Médio a grande porte |
| Resolução geométrica | Baixa a moderada | Muito alta | Alta | Moderada |

| | | | | |
|--|--|---|--------------------------------------|---|
| Acabamento superficial | Rugoso (necessita usinagem) | Excelente | Bom | Moderado |
| Aporte térmico | Elevado | Baixo | Moderado | Moderado |
| Taxa de resfriamento | Baixa | Muito elevada | Elevada | Moderada |
| Microestrutura típica | Grãos colunares, microestrutura mais grosseira | Microestrutura refinada e, em alguns casos, metaestável | Microestrutura refinada | Intermediária |
| Controle microestrutural | Limitado (dependente do controle térmico) | Muito preciso | Preciso | Moderado |
| Eficiência de material | Muito alta (>95%) | Moderada (perdas de pó) | Moderada | Variável |
| Custo de equipamento | Baixo a médio | Elevado | Elevado | Elevado |
| Complexidade de operação | Baixa a moderada | Alta | Alta (câmara a vácuo) | Alta |
| Capacidade multimaterial / cladding | Elevada | Limitada | Limitada | Elevada |
| Principais aplicações | Estruturas de grande porte, reparo, cladding, multimateriais | Componentes complexos, aeroespacial, biomédico | Aeroespacial, titânio | Reparos, reforços, componentes funcionais |
| Principais limitações | Precisão dimensional e acabamento superficial | Baixa produtividade e alto custo | Limitação de tamanho e custo elevado | Custo e complexidade do sistema |

2.3 Estratégias de deposição e controle térmico em MADA

2.3.1 Trajetórias de deposição e estratégias de tecimento

No processo de MADA, as trajetórias de deposição e as estratégias de tecimento exercem influência direta sobre a geometria final do componente, a estabilidade do processo, o controle térmico e o desenvolvimento microestrutural do material depositado. O MADA utiliza trajetórias contínuas, normalmente associadas a movimentos coordenados de robôs industriais ou sistemas CNC, tornando o planejamento do caminho de deposição um fator crítico para a qualidade do produto final (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; NOVELINO *et al.*, 2022).

As trajetórias de deposição referem-se ao caminho percorrido pela tocha de soldagem durante a deposição de cada cordão, bem como à sequência de deposição entre camadas

sucessivas. Estratégias simples, como trajetórias retilíneas unidirecionais, são frequentemente empregadas devido à sua facilidade de implementação e boa repetibilidade. No entanto, esse tipo de trajetória pode resultar em acúmulo localizado de calor, gradientes térmicos elevados e deformações residuais, especialmente em paredes altas ou componentes de grande volume (DEBROY *et al.*, 2018; PAES *et al.*, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022; NOVELINO *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Para mitigar esses efeitos, são amplamente adotadas estratégias de alternância de sentido de deposição entre camadas consecutivas, nas quais a tocha percorre a trajetória em sentidos opostos a cada passe. Essa abordagem contribui para uma distribuição mais homogênea do calor, reduzindo a assimetria térmica e a tendência à distorção do componente. Além disso, o uso de trajetórias segmentadas ou intercaladas pode auxiliar no controle da geometria e na uniformidade da largura e altura dos cordões depositados (PAES *et al.*, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022; NOVELINO *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; BENEDETTI FILHO, 2024).

As estratégias de tecimento consistem na superposição de um movimento oscilatório transversal à trajetória principal de deposição, sendo amplamente utilizadas para aumentar a largura efetiva do cordão, melhorar a molhabilidade do metal fundido e promover uma melhor sobreposição entre passes adjacentes. O tecimento pode assumir diferentes padrões, como zigue-zague, senoidal, circular ou retangular, sendo a escolha do padrão dependente da geometria desejada, do material depositado e das condições térmicas do processo (DEBROY *et al.*, 2018; PAES *et al.*, 2021).

No contexto do MADA, o tecimento em padrão zigue-zague é frequentemente empregado na fabricação de paredes largas ou pré-formas estruturais, pois permite maior controle dimensional e melhor distribuição do material depositado. Entretanto, o aumento da amplitude e da frequência de tecimento pode elevar o aporte térmico local e prolongar o tempo de residência da poça de fusão, influenciando a microestrutura formada e o crescimento de grão, especialmente em aços e ligas sensíveis aos ciclos térmicos (DEBROY *et al.*, 2018; PAES *et al.*, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022).

Além dos aspectos geométricos, as trajetórias de deposição e estratégias de tecimento afetam diretamente os ciclos térmicos intercamadas, influenciando a formação de microestruturas colunares ou equiaxiais, a diluição química em sistemas dissimilares e o comportamento metalúrgico da interface em aplicações cladeadas e multimateriais. Em componentes fabricados por MADA, a otimização das trajetórias e do tecimento tem sido apontada como uma estratégia eficaz para o controle de tensões residuais e para a melhoria da integridade metalúrgica da peça (DEBROY *et al.*, 2018; PAES *et al.*, 2021; KABALDIN *et al.*, 2023).

2.3.2 Influência do ciclo térmico e do aporte de calor

A MADA caracteriza-se por um aporte térmico elevado e por ciclos térmicos repetitivos e sobrepostos, decorrentes da deposição sucessiva de múltiplas camadas (DEBROY *et al.*, 2018; BENEDETTI FILHO, 2024).

O aporte de calor no MADA é função direta dos parâmetros de soldagem, incluindo corrente, tensão, velocidade de deposição, eficiência térmica do processo e modo de transferência metálica. Valores elevados de aporte térmico promovem poças de fusão maiores e tempos de solidificação mais longos, resultando em taxas de resfriamento relativamente baixas quando comparadas a processos como LPBF. Essa condição favorece o crescimento de grãos colunares epitaxiais ao longo da direção de extração de calor, especialmente em aços e ligas de alumínio, influenciando diretamente a anisotropia das propriedades mecânicas do material depositado (WILLIAMS *et al.*, 2016; NOVELINO *et al.*, 2022; BENEDETTI FILHO, 2024).

Os ciclos térmicos repetidos associados à deposição camada a camada provocam sucessivos aquecimentos e resfriamentos das regiões previamente depositadas, caracterizando um efeito de revenimento térmico parcial (Figura 2.4).

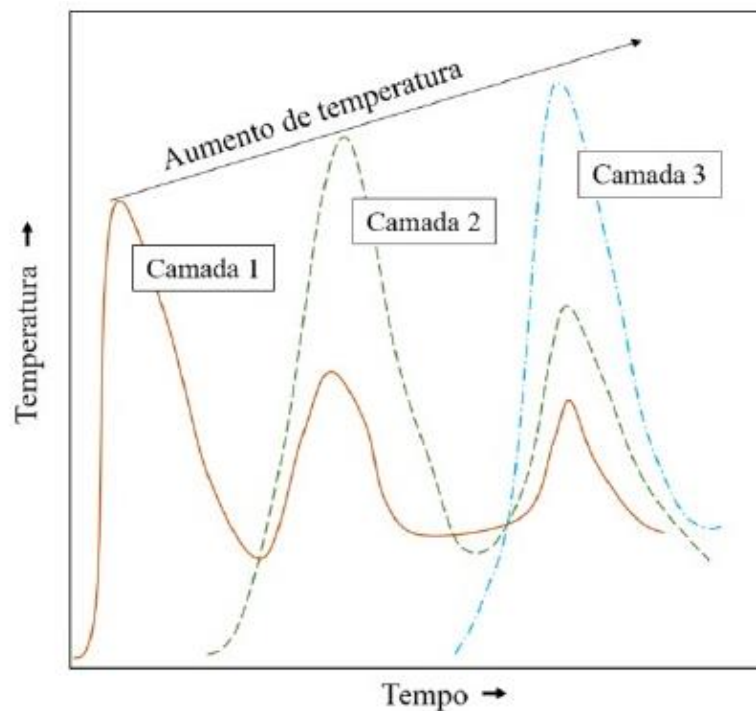


Figura 2.4 - Ciclo térmico em camadas subsequentes. Fonte: Dass e Moridi (2019)

Em aços carbono e baixa liga, esse fenômeno pode resultar em transformações microestruturais complexas, como a formação de ferrita acicular, bainita ou martensita

revenida, dependendo da composição química e das taxas de resfriamento envolvidas (DEBROY *et al.*, 2018; BENEDETTI FILHO, 2024).

Em aplicações cladeadas e multimateriais, os ciclos térmicos inerentes ao processo MADA exercem influência adicional sobre a diluição química e sobre a largura da zona de transição entre materiais dissimilares. Estudos recentes demonstram que o controle do aporte térmico e da estratégia de deposição é fundamental para limitar a mistura excessiva entre os materiais, evitar a formação de fases indesejadas e garantir a integridade metalúrgica da interface, especialmente em sistemas envolvendo aços carbono e aços inoxidáveis (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022).

O acúmulo de calor ao longo do processo, particularmente em componentes de grande altura, pode levar ao aumento progressivo da temperatura intercamadas, alterando significativamente as condições de solidificação das camadas superiores. Esse efeito pode resultar em microestruturas mais grosseiras, redução da resistência mecânica e aumento da suscetibilidade à formação de defeitos metalúrgicos, como porosidade e trincas a quente (LEHMANN *et al.*, 2022; NOVELINO *et al.*, 2022). Além disso, gradientes térmicos elevados contribuem para a geração de tensões residuais, que podem comprometer a estabilidade dimensional e o desempenho em serviço do componente.

Para mitigar os efeitos adversos do aporte térmico elevado, diversas estratégias de controle térmico têm sido investigadas no contexto do MADA, incluindo o controle da temperatura intercamadas, a otimização das trajetórias de deposição, a alternância do sentido de deposição e o uso de técnicas de resfriamento ativo ou assistido. Essas abordagens visam reduzir o acúmulo de calor, promover ciclos térmicos mais homogêneos e refinar a microestrutura formada (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022, NOVELINO *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Em sistemas dissimilares, como a deposição de aços inoxidáveis sobre aços carbono, o controle do ciclo térmico e do aporte de calor assume importância ainda maior, uma vez que diferenças nos coeficientes de expansão térmica, nas temperaturas de transformação e nos comportamentos de solidificação podem intensificar tensões residuais e favorecer a formação de microestruturas indesejadas na interface. Assim, a compreensão aprofundada da influência do ciclo térmico e do aporte de calor é essencial para garantir a integridade metalúrgica e o desempenho dos componentes produzidos por MADA (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

2.3.3 Controle de temperatura entre camadas

No processo de manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), o controle da temperatura entre camadas constitui um dos principais parâmetros para a estabilidade do processo e para a obtenção de propriedades metalúrgicas adequadas. Devido ao elevado aporte térmico inerente aos processos a arco, a deposição sucessiva de camadas pode resultar em acúmulo progressivo de calor, elevando a temperatura intercamadas e alterando significativamente as condições de solidificação e os ciclos térmicos impostos ao material previamente depositado (WILLIAMS *et al.*, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; NOVELINO *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A temperatura entre camadas influencia diretamente a morfologia da poça de fusão, a geometria dos cordões e a taxa de resfriamento do material. Temperaturas intercamadas elevadas tendem a reduzir as taxas de resfriamento, favorecendo o crescimento de grão e a formação de microestruturas mais grosseiras, enquanto temperaturas mais baixas promovem solidificação mais rápida e microestruturas refinadas. Assim, o controle da temperatura intercamadas é amplamente utilizado como estratégia para reduzir gradientes térmicos excessivos, minimizar distorções e melhorar a repetibilidade do processo (DEBROY *et al.*, 2018; NOVELINO *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

2.3.4 Técnicas de resfriamento ativo e passivo

O controle térmico pode ser implementado por meio de técnicas de resfriamento passivo e ativo. As técnicas de resfriamento passivo baseiam-se, principalmente, no ajuste do tempo de espera entre camadas, permitindo a dissipação natural do calor por condução, convecção e radiação. Embora simples e de baixo custo, essa abordagem pode resultar em tempos de fabricação elevados e em variações térmicas significativas ao longo da construção, especialmente em componentes de grande porte (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Em contrapartida, as técnicas de resfriamento ativo envolvem a remoção forçada de calor durante ou após a deposição, por meio de diferentes estratégias, como o uso de jatos de ar ou gás, sistemas de refrigeração líquida, placas refrigeradas e técnicas de resfriamento por quase imersão (*Near-Immersion Active Cooling* – NIAC ou RAQI) (SILVA, 2019) (Figura 2.5). Essas abordagens permitem maior controle da temperatura intercamadas, redução do tempo de fabricação e maior homogeneidade térmica ao longo do componente, sendo particularmente eficazes em aplicações que exigem controle rigoroso da microestrutura e das propriedades mecânicas (WILLIAMS *et al.*, 2016; KOHLER *et al.*, 2019).

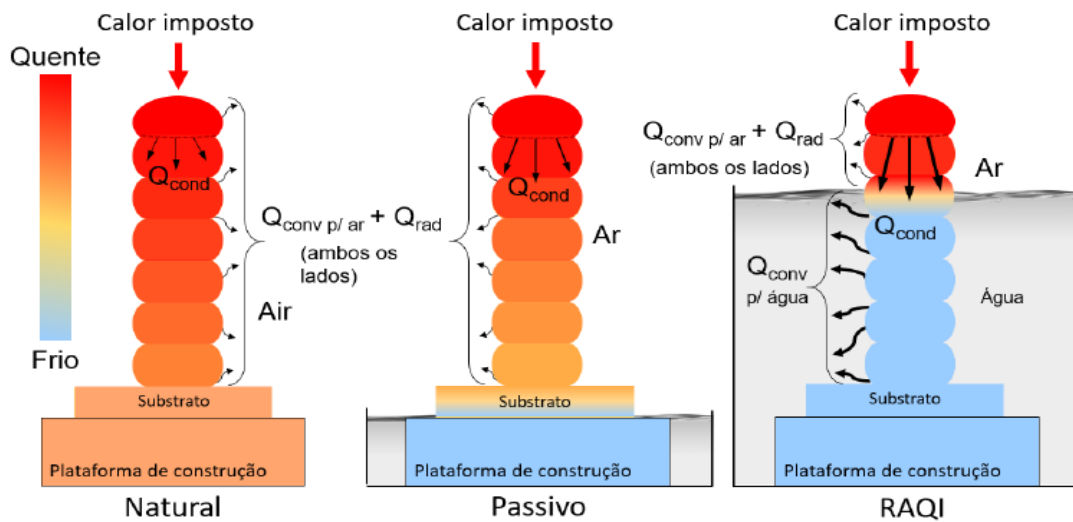


Figura 2.5 - Ilustração de modelo físico simplificado do regime térmico imposto no processo em deposições com resfriamento natural, passivo e ativo (RAQI), onde Q_{cond} = calor por condução, Q_{conv} = calor por convecção, Q_{rad} = calor irradiado Fonte: Silva (2019)

2.3.5 Efeitos do controle térmico na microestrutura e nas propriedades

Os efeitos do controle térmico na microestrutura e nas propriedades dos componentes produzidos por MADA são amplamente reportados na literatura. A redução do acúmulo de calor e o aumento das taxas de resfriamento podem promover o refinamento microestrutural, reduzir a fração de grãos colunares e favorecer a formação de microestruturas mais homogêneas. Em aços, por exemplo, o controle térmico adequado pode influenciar a formação de ferrita, bainita ou martensita revenida, impactando diretamente propriedades como dureza, resistência mecânica e tenacidade (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; NOVELINO *et al.*, 2022).

Estudos recentes em MADA demonstram que estratégias de controle da temperatura intercamadas e de resfriamento ativo são eficazes para limitar o crescimento de grão e reduzir a anisotropia microestrutural típica de processos a arco, contribuindo para maior uniformidade de propriedades mecânicas ao longo do componente fabricado. Resultados semelhantes foram observados em estruturas de grande escala e em sistemas com múltiplos arames, nos quais o controle térmico adequado resultou em melhorias significativas na homogeneidade microestrutural e no desempenho mecânico global (KOHLENER *et al.*, 2019; LEHMANN *et al.*, 2022; BENEDETTI FILHO, 2024; GANESAN *et al.*, 2025).

Além disso, o controle da temperatura intercamadas contribui para a mitigação de tensões residuais e para a melhoria da estabilidade dimensional dos componentes. Em sistemas dissimilares e cladeados, o controle térmico assume importância ainda maior, uma

vez que diferenças nos coeficientes de expansão térmica e nos comportamentos de solidificação dos materiais podem intensificar tensões na interface. Nesses casos, a adoção de estratégias de resfriamento controlado favorece a integridade da ligação metalúrgica e reduz a probabilidade de defeitos interfaciais, como trincas e descontinuidades (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; GANESAN *et al.*, 2025).

Dessa forma, o controle da temperatura entre camadas, aliado à aplicação criteriosa de técnicas de resfriamento ativo ou passivo, constitui um elemento essencial para o sucesso do processo MADA, influenciando diretamente a microestrutura, as propriedades mecânicas e a confiabilidade de componentes monomateriais e multimateriais produzidos por essa tecnologia.

2.4 Fabricação multimaterial e estruturas cladeadas por MA

Os multimateriais correspondem a sistemas projetados a partir da combinação intencional de dois ou mais materiais distintos em um único componente, visando integrar propriedades físicas, mecânicas ou químicas complementares em diferentes regiões da peça. Diferentemente dos materiais convencionais homogêneos, os sistemas multimateriais permitem a otimização localizada do desempenho, como resistência mecânica, resistência à corrosão, condutividade térmica ou custo, de acordo com as exigências funcionais de cada região do componente (SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2024; YADAV, A. *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2025).

Nesse contexto, os *Functionally Graded Materials* (FGMs) representam uma classe específica de materiais multimateriais caracterizada pela variação gradual e contínua da composição química, microestrutura ou propriedades ao longo de uma ou mais direções do componente. Essa transição progressiva reduz descontinuidades abruptas entre materiais distintos, minimizando concentrações de tensões e melhorando a integridade estrutural do sistema, especialmente em aplicações sujeitas a gradientes térmicos e mecânicos severos (ZHANG, C. *et al.*, 2019; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A MA tem se consolidado como uma das principais tecnologias viabilizadoras da produção de materiais multimateriais e FGMs, uma vez que permite o controle preciso da deposição de material ao longo do processo de fabricação. Processos como a manufatura aditiva por deposição de energia direcionada, incluindo o MADA, possibilitam a variação controlada da composição química por meio da alimentação sequencial ou simultânea de diferentes insumos metálicos, permitindo a produção de gradientes composicionais discretos

ou contínuos (DEBROY *et al.*, 2018; ISO/ASTM 52900, 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2024; YANG *et al.*, 2025).

Em sistemas multimateriais produzidos por MADA, como a deposição de aços inoxidáveis sobre aços carbono, a interface entre os materiais pode assumir caráter abrupto ou gradualmente diluído, dependendo da estratégia de deposição e do controle dos parâmetros de processo. Embora não configurem, em todos os casos, FGMs no sentido estrito do termo, esses sistemas compartilham princípios fundamentais com os materiais gradualmente funcionais, especialmente no que se refere à gestão de gradientes de propriedades e à integridade metalúrgica da interface (SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; GANESAN *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2025).

2.4.1 Técnicas de *cladding* por processos de soldagem e MA

O *cladding* metálico consiste na aplicação de uma camada de material sobre um substrato com o objetivo de conferir propriedades superficiais específicas, como resistência à corrosão, ao desgaste ou a altas temperaturas, mantendo-se um material estrutural de menor custo como base. Tradicionalmente, técnicas de *cladding* têm sido amplamente empregadas por meio de processos de soldagem, sendo posteriormente incorporadas e expandidas no contexto da manufatura aditiva (MA), que oferece maior controle geométrico e composicional sobre o revestimento depositado (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2025). Destaca-se que a nomenclatura “*weld overlay*” é usualmente mais conhecida para a realização de revestimentos em soldagem. Entretanto, como a expressão *cladding* é a mais encontrada na literatura consultada, ela será utilizada neste trabalho.

Entre as técnicas de *cladding* por processos de soldagem, destacam-se os processos a arco elétrico, como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e SAW (*Submerged Arc Welding*). Esses processos são amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez, versatilidade e capacidade de deposição de grandes volumes de material. O *cladding* por GMAW, em particular, apresenta elevada taxa de deposição e facilidade de automação, sendo frequentemente empregado na aplicação de revestimentos em aços carbono utilizando ligas resistentes à corrosão ou ao desgaste. No entanto, o elevado aporte térmico característico desses processos pode resultar em diluição significativa entre o revestimento e o material de base, exigindo controle rigoroso dos parâmetros de soldagem (GARG; SINGH, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2025).

Processos de soldagem de maior densidade de energia, como o PTA (*Plasma Transferred Arc*), têm sido amplamente utilizados para aplicações de *cladding* de alta

qualidade, uma vez que oferecem maior controle da poça de fusão e menor diluição quando comparados a processos convencionais a arco. O PTA permite a deposição de ligas especiais com elevada precisão, sendo frequentemente empregado em aplicações que exigem revestimentos com propriedades superiores e controle microestrutural mais rigoroso (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

No contexto da manufatura aditiva, as técnicas de *cladding* evoluíram para processos de deposição camada a camada, nos quais o revestimento pode ser aplicado de forma controlada e integrada à fabricação do componente. Processos de deposição de energia direcionada (*Directed Energy Deposition* – DED), utilizando laser, feixe de elétrons ou arco elétrico, são amplamente explorados para aplicações de *cladding* e reparo de componentes, permitindo a deposição localizada de material com controle preciso da geometria e da composição química (ISO/ASTM 52900, 2021; LEHMANN *et al.*, 2022; GANESAN *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2025).

O processo MADA pode ser considerado uma extensão das técnicas tradicionais de *cladding* por soldagem, adaptada ao conceito de manufatura aditiva. Nesse processo, a deposição coordenada de materiais dissimilares possibilita a fabricação de estruturas cladeadas e multimateriais, com potencial para o desenvolvimento de gradientes funcionais discretos.

2.4.2 Aplicações industriais de estruturas cladeadas

As estruturas cladeadas consistem na combinação de um material estrutural de base com um revestimento superficial dotado de propriedades específicas, como resistência à corrosão, ao desgaste ou a ambientes severos. A Manufatura Aditiva (MA), em especial os processos de deposição de energia direcionada e a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), tem ampliado significativamente o escopo de aplicações industriais dessas estruturas, ao permitir maior controle da geometria, da espessura do revestimento e da composição química depositada (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

No setor de óleo e gás, estruturas cladeadas são amplamente utilizadas em componentes expostos a ambientes corrosivos e a altas pressões, como válvulas, flanges, dutos e vasos de pressão. Nesses casos, materiais de base em aço carbono ou baixa liga são revestidos com aços inoxidáveis ou ligas à base de níquel, proporcionando elevada resistência à corrosão e à fadiga térmica, ao mesmo tempo em que se mantém a viabilidade econômica do componente. A aplicação de MA nesse contexto permite a fabricação e o reparo localizado desses componentes, reduzindo custos e tempos de parada (DEBROY *et al.*, 2018; GANESAN *et al.*, 2025).

Na indústria naval e offshore, a utilização de estruturas cladeadas é fundamental para garantir durabilidade em ambientes marinhos agressivos. A MA possibilita a produção de painéis, reforços estruturais e componentes de grande porte com revestimentos resistentes à corrosão, além de permitir reparos *in situ* em estruturas danificadas. O uso do processo MADA destaca-se nesse setor devido à sua elevada taxa de deposição e à compatibilidade com componentes de grandes dimensões (WILLIAMS *et al.*, 2016; LEHMANN *et al.*, 2022).

O setor aeroespacial também tem se beneficiado do uso de estruturas cladeadas produzidas por manufatura aditiva, especialmente em componentes sujeitos a gradientes térmicos elevados, como suportes estruturais, carcaças e partes de sistemas de propulsão. Nesses casos, a combinação de materiais com diferentes propriedades térmicas e mecânicas permite otimizar o desempenho estrutural e reduzir massa, atendendo aos rigorosos requisitos do setor (DEBROY *et al.*, 2018).

Na indústria de geração de energia, incluindo usinas térmicas, nucleares e de energias renováveis, estruturas cladeadas são empregadas em componentes expostos a altas temperaturas, ambientes corrosivos e ciclos térmicos severos, como tubos, trocadores de calor e componentes de turbinas. A MA possibilita a aplicação precisa de revestimentos funcionais e a fabricação de geometrias complexas, contribuindo para o aumento da vida útil e da confiabilidade desses sistemas (DEBROY *et al.*, 2018; LEHMANN *et al.*, 2022).

Além disso, a manufatura aditiva tem impulsionado o desenvolvimento de aplicações emergentes, como ferramentas e moldes com revestimentos resistentes ao desgaste, componentes para a indústria química e estruturas multimateriais com gradientes funcionais. A capacidade de integrar *cladding* e fabricação estrutural em uma única etapa torna a MA uma tecnologia estratégica para a produção de componentes de alto valor agregado e desempenho otimizado (ISO/ASTM 52900, 2021; GANESAN *et al.*, 2025).

Dessa forma, as aplicações industriais de estruturas cladeadas produzidas por manufatura aditiva abrangem diversos setores estratégicos, destacando-se pela combinação de desempenho técnico, flexibilidade de projeto e eficiência econômica.

2.5 Metalurgia da interface em sistemas dissimilares

2.5.1 Diferenças metalúrgicas entre aços carbono e aços inoxidáveis

Os aços carbono e os aços inoxidáveis constituem duas classes fundamentais de ligas ferrosas amplamente utilizadas na engenharia, apresentando diferenças metalúrgicas significativas decorrentes, principalmente, de sua composição química, comportamento termodinâmico, transformações de fase e resposta aos ciclos térmicos. Essas diferenças

assumem particular relevância em aplicações que envolvem a união ou a deposição conjunta desses materiais, como em estruturas cladeadas e sistemas multimateriais produzidos por manufatura aditiva (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; YANG *et al.*, 2025).

Os aços carbono são essencialmente ligas de ferro e carbono, com teores de carbono tipicamente inferiores a 0,8%, podendo conter pequenas quantidades de elementos residuais, como manganês, silício e fósforo. Suas propriedades mecânicas e microestruturais são fortemente influenciadas pelo teor de carbono e pelas transformações de fase associadas ao sistema Fe–C, como a formação de ferrita, perlita, bainita e martensita, dependendo do ciclo térmico imposto ao material (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Em processos térmicos intensos, como soldagem ou manufatura aditiva por deposição a arco, os aços carbono podem apresentar zonas termicamente afetadas com variações significativas de dureza e microestrutura.

Por sua vez, os aços inoxidáveis caracterizam-se pela adição de elementos de liga, principalmente cromo em teores iguais ou superiores a 10,5%, responsável pela formação de uma camada passiva de óxido de cromo que confere elevada resistência à corrosão. Além do cromo, elementos como níquel, molibdênio, manganês e silício são frequentemente adicionados para estabilizar fases específicas e melhorar propriedades mecânicas e de processamento (DEBROY *et al.*, 2018).

Do ponto de vista microestrutural, os aços inoxidáveis podem ser classificados em famílias distintas, como ferríticos, martensíticos, austeníticos e duplex, cada uma apresentando comportamentos metalúrgicos específicos. Os aços inoxidáveis austeníticos, amplamente utilizados em aplicações de *cladding*, apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), elevada ductilidade e ausência de transformações martensíticas induzidas por resfriamento rápido, o que os torna menos sensíveis a variações bruscas de dureza em ciclos térmicos intensos (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Uma diferença metalúrgica crítica entre aços carbono e aços inoxidáveis reside nos coeficientes de expansão térmica e na condutividade térmica. Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam coeficientes de expansão térmica mais elevados e menor condutividade térmica em comparação aos aços carbono. Essas diferenças podem gerar gradientes térmicos acentuados e tensões residuais significativas quando ambos os materiais são combinados em uma mesma estrutura, especialmente em processos com elevado aporte térmico, como o MADA (DEBROY *et al.*, 2018).

2.5.2 Mecanismos de diluição e mistura química na interface

A diluição e a mistura química na interface entre materiais distintos constituem fenômenos metalúrgicos fundamentais para a formação e a integridade da ligação metalúrgica. A diluição pode ser definida como a fração do material de base que é fundida e incorporada ao metal depositado, resultando em uma região interfacial com composição química intermediária entre o substrato e o material de adição (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; HU *et al.*, 2024; YANG *et al.*, 2025).

O principal mecanismo responsável pela diluição é a fusão parcial do material de base promovida pelo aporte térmico do processo. Em processos a arco elétrico, o elevado aporte de calor gera uma poça de fusão relativamente ampla, favorecendo a incorporação de material do substrato ao metal depositado. A extensão dessa região fundida depende de parâmetros como corrente, tensão, velocidade de deposição, eficiência térmica e modo de transferência metálica, sendo possível controlar a diluição por meio do ajuste desses parâmetros (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; HU *et al.*, 2024).

Além da fusão do material de base, a convecção na poça de fusão desempenha papel relevante na mistura química. Fenômenos de convecção térmica e eletromagnética, bem como os efeitos associados às forças de Marangoni, promovem o transporte de soluto no interior da poça, contribuindo para a homogeneização química do metal fundido antes da solidificação. Em sistemas dissimilares, esses mecanismos podem resultar em gradientes composicionais complexos ao longo da interface, especialmente quando há diferenças significativas de densidade, ponto de fusão e condutividade térmica entre os materiais envolvidos (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; HU *et al.*, 2024).

Outro mecanismo importante de mistura química é a difusão no estado sólido, que ocorre durante os ciclos térmicos subsequentes à solidificação inicial. Em processos de deposição camada a camada, como o MADA, as regiões previamente solidificadas são repetidamente aquecidas, favorecendo a difusão de elementos de liga através da interface. Em sistemas aço carbono/aço inoxidável, a difusão do carbono do material de base para o revestimento inoxidável é particularmente relevante, podendo resultar na formação de zonas enriquecidas em carbono e na precipitação de carbonetos de cromo, com impacto direto na resistência à corrosão e na dureza local (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022).

A estratégia de deposição e o controle do ciclo térmico influenciam significativamente os mecanismos de diluição e mistura química. Trajetórias de deposição, temperatura intercadas, tempo entre passes e técnicas de resfriamento afetam tanto a extensão da fusão do material de base quanto a intensidade da difusão em estado sólido. Em aplicações de *cladding* e materiais multimateriais, busca-se, geralmente, um equilíbrio entre diluição

suficiente para garantir boa adesão metalúrgica e diluição limitada para preservar as propriedades do revestimento (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023).

Dessa forma, a compreensão dos mecanismos de diluição e mistura química na interface é essencial para o projeto e a otimização de processos de manufatura aditiva e soldagem envolvendo materiais dissimilares. O controle desses fenômenos permite minimizar a formação de microestruturas indesejadas, assegurar a integridade da ligação metalúrgica e garantir o desempenho funcional de estruturas cladeadas produzidas por MADA.

2.5.3 Formação de zonas parcialmente fundidas e zonas afetadas pelo calor

Em processos de soldagem e manufatura aditiva metálica, particularmente na MADA, a interação térmica entre o material depositado e o substrato resulta na formação de regiões metalurgicamente distintas, destacando-se a zona parcialmente fundida (ZPF) e a zona afetada pelo calor (ZAC) (Figura 2.6). Essas regiões exercem influência direta sobre a integridade da interface, a microestrutura e o desempenho mecânico de estruturas cladeadas e multimateriais (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2025).

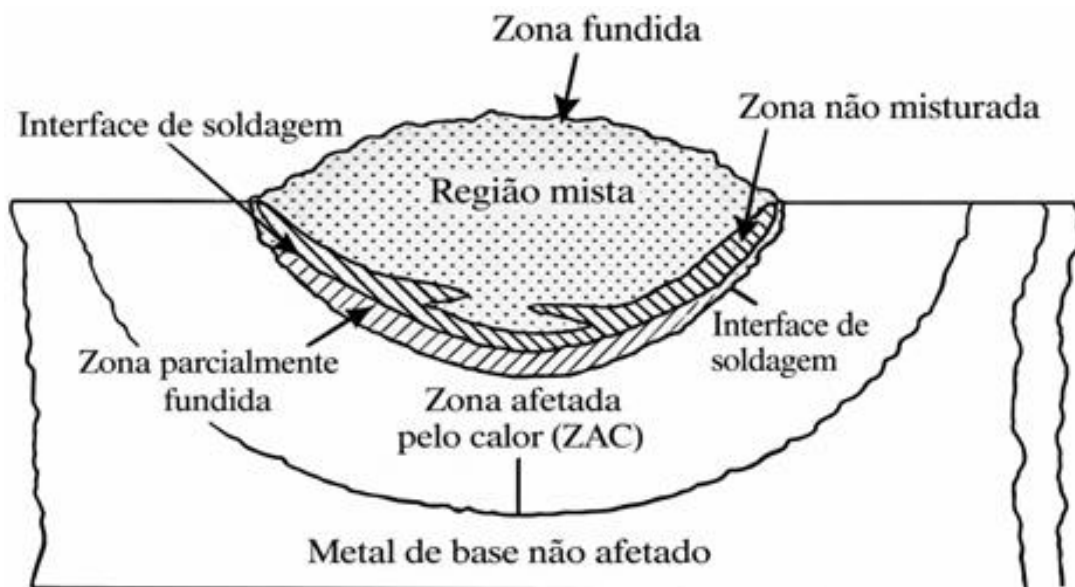


Figura 2.6 – Representação esquemática das regiões metalúrgicas formadas durante a soldagem, evidenciando a zona de ligação (ZL) ou zona fundida, a zona parcialmente fundida (ZPF) adjacente à interface de soldagem, a zona afetada pelo calor (ZAC), caracterizada por transformações microestruturais sem fusão, e o metal de base não afetado. Fonte: Yusup *et al.* (2024)

A zona parcialmente fundida corresponde à região adjacente à linha de fusão na qual o material atinge temperaturas entre o *solidus* e o *liquidus*, promovendo a fusão localizada de constituintes de menor ponto de fusão, como eutéticos ou regiões enriquecidas em determinados elementos de liga. Em sistemas dissimilares, como aço carbono e aço inoxidável, a ZPF pode apresentar composição química heterogênea, resultante da diluição localizada e da segregação de elementos durante a solidificação, favorecendo a formação de microestruturas frágeis (WEI *et al.* 2021; YADAV, L. *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2025).

Já a zona afetada pelo calor é caracterizada por alterações microestruturais no material de base que não chega a fundir, mas sofre transformações devido aos ciclos térmicos impostos pelo processo. No caso de aços carbono, a ZAC pode apresentar regiões com crescimento de grão, formação de martensita ou bainita e variações significativas de dureza, dependendo do pico de temperatura e da taxa de resfriamento. Em aços inoxidáveis, especialmente os austeníticos, a ZAC pode apresentar sensibilização associada à precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, afetando a resistência à corrosão (ZHANG, C. *et al.*, 2019; DEBROY *et al.*, 2021; LONG *et al.*, 2021; HU *et al.*, 2024; YANG *et al.*, 2025).

A presença da ZPF e da ZAC está intimamente relacionada à ocorrência de defeitos interfaciais, que podem comprometer a adesão e a integridade da ligação metalúrgica. Entre os defeitos mais relevantes destacam-se as trincas, que podem ser classificadas como trincas a quente ou a frio. As trincas a quente estão associadas à solidificação e à presença de filmes líquidos enriquecidos em elementos segregantes na ZPF, enquanto as trincas a frio podem ocorrer devido à combinação de microestruturas endurecidas, tensões residuais elevadas e, em alguns casos, presença de hidrogênio (LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; YADAV, L. *et al.*, 2025; YANG *et al.*, 2025).

Além das trincas, descontinuidades interfaciais, como falta de fusão localizada e descolamento parcial do revestimento, podem surgir em função de aporte térmico insuficiente ou instabilidade da poça de fusão. Em processos de manufatura aditiva, a deposição camada a camada intensifica esses efeitos, uma vez que a geometria da poça e as condições térmicas variam ao longo da construção, aumentando a complexidade do controle interfacial (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022).

Outro aspecto crítico refere-se às segregações químicas na interface, resultantes tanto da solidificação não equilibrada quanto da difusão durante ciclos térmicos sucessivos. A segregação de elementos como carbono, cromo e níquel pode levar à formação de zonas enriquecidas ou empobrecidas, alterando localmente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. Em estruturas cladeadas aço carbono/aço inoxidável, essas segregações são particularmente relevantes, pois podem favorecer a precipitação de fases

frágeis ou a degradação da camada de revestimento (WU, B. *et al.*, 2020; WEI *et al.* 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2025).

Dessa forma, a formação da ZPF e da ZAC, bem como a ocorrência de defeitos interfaciais associados, constitui um dos principais desafios metalúrgicos em processos de MADA e *cladding*. O controle do aporte térmico, da estratégia de deposição e das condições de resfriamento é essencial para minimizar esses efeitos, assegurando uma interface íntegra, com microestrutura adequada e desempenho compatível com as exigências de serviço.

2.6 Microestrutura e transformações de fase em depósitos MADA

A solidificação do metal fundido é um dos fenômenos metalúrgicos mais relevantes em processos de soldagem e manufatura aditiva metálica, uma vez que controla diretamente a microestrutura final e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas e funcionais do material produzido. Em processos como MADA, caracterizados por elevados aportes térmicos e ciclos térmicos repetitivos, a solidificação ocorre sob condições fortemente não equilibradas, favorecendo a formação de microestruturas colunares e dendríticas (DEBROY *et al.*, 2018; WEI *et al.* 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; BENEDETTI FILHO, 2024).

O crescimento colunar está associado à solidificação direcional a partir da interface sólido-líquido, geralmente orientada no sentido oposto ao fluxo de calor. Em processos a arco, o gradiente térmico elevado e a direção preferencial de extração de calor em direção ao substrato promovem o crescimento de grãos colunares epitaxiais, que se estendem da linha de fusão em direção ao centro do cordão ou da camada depositada. Esse crescimento epitaxial ocorre quando os grãos do material previamente solidificado atuam como núcleos para a solidificação subsequente, resultando em microestruturas altamente orientadas (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022).

A estrutura dendrítica é uma consequência direta do crescimento colunar sob condições de super-resfriamento constitucional. À medida que a frente de solidificação avança, a rejeição de soluto para o líquido adjacente gera gradientes de composição que, combinados com o gradiente térmico, favorecem a instabilidade da interface sólido-líquido e a formação de dendritas. Essas dendritas podem apresentar morfologia celular ou ramificada, dependendo da relação entre gradiente térmico e velocidade de solidificação, parâmetros fortemente influenciados pelo aporte de calor e pela velocidade de deposição (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; BENEDETTI FILHO, 2024; YANG *et al.*, 2025).

Em processos de manufatura aditiva, a deposição camada a camada intensifica a anisotropia microestrutural, uma vez que as camadas previamente solidificadas são parcialmente refundidas e submetidas a novos ciclos térmicos. Esse efeito tende a reforçar o

crescimento colunar contínuo ao longo da direção de construção, resultando em grãos alongados e orientação cristalográfica preferencial. Embora esse tipo de microestrutura possa ser benéfico para determinadas aplicações, ele também pode levar a comportamento mecânico anisotrópico, com variações de resistência e ductilidade em função da direção de carregamento (DEBROY *et al.*, 2018; WU, B. *et al.*, 2020; WEI *et al.* 2021; BENEDETTI FILHO, 2024;).

No caso de sistemas dissimilares, como estruturas cladeadas de aço carbono e aço inoxidável, a solidificação colunar e dendrítica na região interfacial é ainda mais complexa. Diferenças na composição química, no coeficiente de difusão e no ponto de fusão dos materiais favorecem gradientes composicionais acentuados, que podem resultar em segregação interdendrítica e na formação de fases secundárias. Esses fenômenos têm impacto direto na dureza local, na resistência à trinca e na integridade da ligação metalúrgica (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; YADAV, L. *et al.*, 2025).

2.6.1 Microestrutura típica do aço carbono depositado por MADA

O aço carbono depositado por MADA apresenta, de modo geral, uma microestrutura predominantemente ferrítico-perlítica, podendo conter frações variáveis de bainita ou martensita, dependendo da composição química do arame, do aporte térmico e da taxa de resfriamento imposta pelo processo. Devido à solidificação direcional e ao crescimento epitaxial, é comum a formação de grãos colunares alongados ao longo da direção de construção, com orientação preferencial em relação ao fluxo de calor (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Os ciclos térmicos sucessivos associados à deposição camada a camada promovem o reaquecimento das camadas previamente solidificadas, resultando em fenômenos de refino ou crescimento de grão na zona afetada pelo calor intercamadas. Em regiões submetidas a resfriamento relativamente rápido, pode ocorrer a formação localizada de microestruturas endurecidas, como bainita ou martensita, especialmente em aços de maior teor de carbono ou com adições de elementos de liga (WEI *et al.* 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022).

Adicionalmente, a segregação interdendrítica durante a solidificação pode levar à distribuição heterogênea de carbono e outros elementos, influenciando os perfis de dureza ao longo da parede depositada. Essa heterogeneidade microestrutural é uma característica recorrente em componentes produzidos por MADA e deve ser considerada na análise do comportamento mecânico e da anisotropia do material (DEBROY *et al.*, 2018; WU, B. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022).

2.6.2 Microestrutura do aço inoxidável austenítico depositado

O aço inoxidável austenítico depositado por MADA, como os consumíveis do tipo ER309L ou ER309LSi, apresenta microestrutura predominantemente austenítica, com a possível presença de ferrita delta (δ) em forma de ilhas ou redes interdendríticas. A presença controlada de ferrita delta é comum em aços inoxidáveis austeníticos soldados e depositados, sendo considerada benéfica para a mitigação de trincas a quente durante a solidificação (DEBROY *et al.*, 2018; LONG *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A solidificação desses aços ocorre, em geral, segundo os modos ferrítico-austenítico (FA) ou austenítico-ferrítico (AF), dependendo do equilíbrio entre elementos estabilizadores de ferrita e austenita, como cromo e níquel. Em processos de MADA, os elevados gradientes térmicos e a solidificação rápida favorecem a formação de estruturas dendríticas austeníticas com ferrita delta localizada nas regiões interdendríticas (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

Os ciclos térmicos repetitivos podem promover a redistribuição de elementos de liga e, em determinadas condições, a precipitação de fases secundárias, como carbonetos de cromo, especialmente se houver enriquecimento local de carbono proveniente do material de base. Esse fenômeno é particularmente relevante em estruturas cladeadas aço carbono/aço inoxidável, pois pode afetar a resistência à corrosão e a dureza da região interfacial (WEI *et al.* 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; YADAV, L. *et al.*, 2025).

De modo geral, a microestrutura do aço inoxidável austenítico depositado por MADA apresenta grãos colunares epitaxiais, alinhados com a direção de extração de calor, resultando em anisotropia microestrutural semelhante à observada no aço carbono. A compreensão dessas características é fundamental para a correta interpretação dos resultados de microdureza, ensaios mecânicos e análises microestruturais em estudos envolvendo deposição multimaterial por manufatura aditiva a arco.

2.6.3 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural desempenha papel central na compreensão do comportamento metalúrgico de componentes produzidos por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), uma vez que esse processo é intrinsecamente marcado por ciclos térmicos complexos, solidificação direcional e sucessivos eventos de reaquecimento das camadas previamente depositadas. Esses fatores resultam em microestruturas heterogêneas, tanto ao longo da altura do componente quanto transversalmente à direção de deposição,

tornando indispensável o uso de técnicas microestruturais para a avaliação da qualidade metalúrgica e do desempenho mecânico das peças produzidas (DEBROY *et al.*, 2018; WILLIAMS *et al.*, 2016).

Entre as técnicas mais empregadas na caracterização microestrutural em MADA, destacam-se a microscopia óptica (MO) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV), frequentemente associadas a análises químicas locais por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A microscopia óptica é amplamente utilizada como etapa inicial de avaliação, permitindo a identificação das principais regiões metalúrgicas do depósito, como metal de base, zona fundida, zona parcialmente fundida e zona afetada pelo calor, além de possibilitar a análise da morfologia dos grãos, da continuidade interfacial e da presença de defeitos macroscópicos, como falta de fusão ou trincas (ASM INTERNATIONAL, 2018).

A microscopia eletrônica de varredura, por sua vez, oferece maior resolução espacial, sendo particularmente adequada para a investigação detalhada da morfologia da solidificação, do crescimento colunar ou dendrítico e da presença de descontinuidades em escala micrométrica. Em depósitos produzidos por MADA, o MEV tem sido amplamente empregado para analisar a interface entre camadas sucessivas e, em sistemas multimateriais, para caracterizar a região de transição metalúrgica entre materiais dissimilares, permitindo uma avaliação mais precisa da integridade da ligação por fusão (GOLDSTEIN *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022).

De forma complementar, a espectroscopia de energia dispersiva (EDS), acoplada ao MEV, é uma ferramenta fundamental para a análise da redistribuição composicional de elementos de liga em componentes produzidos por MADA. Essa técnica possibilita a avaliação qualitativa e semiquantitativa da diluição química, da extensão da mistura entre materiais distintos e da formação de gradientes composicionais ao longo da interface e da zona fundida. Em processos de deposição a arco, nos quais o aporte térmico é relativamente elevado, o EDS tem sido amplamente utilizado para correlacionar o histórico térmico do processo com a extensão da zona de transição metalúrgica e com as variações locais de propriedades mecânicas, como dureza (AHSAN *et al.*, 2020; KABALDIN *et al.*, 2023).

Estudos na literatura indicam que a microestrutura resultante em MADA é fortemente influenciada por parâmetros como aporte de calor, estratégia de deposição, velocidade de soldagem, controle térmico entre camadas e interação térmica entre passes sucessivos. Essas variáveis afetam diretamente o tamanho de grão, a morfologia de solidificação e a formação de zonas heterogêneas, reforçando a importância de uma caracterização microestrutural detalhada para o entendimento dos mecanismos metalúrgicos envolvidos no processo (DEBROY *et al.*, 2018; GANESAN *et al.*, 2021).

Assim, a caracterização microestrutural por meio de MO, MEV e EDS constitui uma abordagem essencial na avaliação de componentes produzidos por MADA, fornecendo subsídios técnicos para a correlação entre parâmetros de processo, microestrutura, composição química e propriedades mecânicas. Essa compreensão é particularmente relevante em aplicações multimateriais e cladeadas, nas quais a integridade da interface metalúrgica é um requisito crítico para o desempenho estrutural e a confiabilidade do componente final.

2.7 Gradientes de propriedades mecânicas em interfaces cladeadas

2.7.1 Conceito de heterogeneidade mecânica em materiais depositados

A heterogeneidade mecânica em materiais metálicos depositados refere-se à variação espacial das propriedades mecânicas, como dureza, resistência, ductilidade e tenacidade, ao longo do volume do material produzido. Em processos de soldagem e manufatura aditiva metálica, especialmente na manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), essa heterogeneidade é uma característica intrínseca do processo, decorrente da natureza localizada da fonte de calor, da deposição camada a camada e dos ciclos térmicos repetitivos impostos ao material durante a fabricação (DEBROY *et al.*, 2018; WEI *et al.* 2021; KABALDIN *et al.*, 2023; BENEDETTI FILHO, 2024; YANG *et al.*, 2025).

Um dos principais fatores responsáveis pela heterogeneidade mecânica é a variação microestrutural ao longo da direção de construção e entre diferentes regiões do material, como o metal depositado, a zona parcialmente fundida e a zona afetada pelo calor. Alterações no tamanho de grão, na morfologia dos grãos (colunares ou equiaxiais) e na fração de fases presentes resultam em diferenças locais de comportamento mecânico, refletindo diretamente nos perfis de dureza e resistência (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; YANG *et al.*, 2025).

Em processos de MADA, os ciclos térmicos sucessivos promovem o reaquecimento parcial de camadas previamente solidificadas, levando a fenômenos de revenimento, recristalização parcial ou crescimento de grão, dependendo da temperatura atingida e do tempo de exposição. Como consequência, regiões depositadas em estágios iniciais do processo podem apresentar propriedades mecânicas distintas daquelas depositadas nas camadas superiores, mesmo quando a composição química do material é homogênea (DEBROY *et al.*, 2018; 2021; BENEDETTI FILHO, 2024; YANG *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante da heterogeneidade mecânica está relacionado à anisotropia induzida pelo processo. A solidificação direcional e o crescimento colunar de grãos

ao longo da direção de extração de calor resultam em propriedades mecânicas dependentes da orientação de carregamento. Em materiais depositados por MADA, é comum observar diferenças significativas de resistência e ductilidade entre direções paralelas e perpendiculares à direção de deposição, o que deve ser considerado no projeto e na avaliação estrutural de componentes fabricados por manufatura aditiva (DEBROY *et al.*, 2018; WU, B. *et al.*, 2020).

Em estruturas multimateriais e cladeadas, a heterogeneidade mecânica é ainda mais pronunciada, uma vez que diferentes materiais apresentam comportamentos mecânicos intrinsecamente distintos. A interface entre materiais dissimilares pode concentrar gradientes de dureza e tensões residuais, influenciando o desempenho em serviço e a suscetibilidade à iniciação de trincas. Nesse contexto, técnicas de caracterização local, como mapas de microdureza, tornam-se ferramentas essenciais para a avaliação da distribuição espacial das propriedades mecânicas e para a correlação com a microestrutura observada (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; YADAV, L. *et al.*, 2025).

2.7.2 Gradientes de dureza em sistemas dissimilares

Em sistemas metálicos dissimilares obtidos por processos de soldagem e manufatura aditiva metálica, como a MADA, a presença de gradientes de dureza ao longo da interface entre materiais distintos é uma característica recorrente e de grande relevância metalúrgica. Esses gradientes resultam da combinação de diferenças intrínsecas de composição química, microestrutura e propriedades mecânicas dos materiais envolvidos, bem como dos efeitos impostos pelos ciclos térmicos e pelo aporte de calor do processo (GARG; SINGH, 2016; DEBROY *et al.*, 2018; WEI *et al.* 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A principal origem dos gradientes de dureza em sistemas dissimilares está associada às transformações microestruturais que ocorrem no material de base, na zona parcialmente fundida e no material depositado. Em sistemas aço carbono/aço inoxidável, por exemplo, o aço carbono pode apresentar endurecimento localizado devido à formação de microestruturas como martensita ou bainita na zona afetada pelo calor, enquanto o aço inoxidável austenítico mantém, em geral, uma dureza mais uniforme, controlada pela fração de ferrita delta e pela morfologia dendrítica resultante da solidificação (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; BENEDETTI FILHO, 2024).

Outro fator determinante é a diluição química na região interfacial, que gera zonas com composição intermediária entre os dois materiais. A incorporação de carbono do aço carbono no metal depositado inoxidável pode elevar a dureza local, especialmente se houver precipitação de carbonetos ricos em cromo. De forma análoga, a diluição de elementos como

cromo e níquel no aço carbono adjacente à interface pode modificar sua microestrutura e resistência mecânica, contribuindo para gradientes acentuados de dureza (LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; WEI *et al.* 2021).

Os ciclos térmicos repetitivos característicos da MADA intensificam esses gradientes, uma vez que as camadas previamente depositadas são submetidas a reaquecimentos sucessivos, promovendo revenimento parcial, crescimento de grão ou novas transformações de fase. Como resultado, a dureza pode variar significativamente tanto ao longo da direção de construção quanto transversalmente à interface, evidenciando a heterogeneidade mecânica do sistema (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; YADAV, L. *et al.*, 2025).

A presença de gradientes de dureza elevados tem implicações diretas no comportamento mecânico e na integridade estrutural de componentes multimateriais. Regiões com transições abruptas de dureza tendem a concentrar tensões sob carregamento mecânico ou térmico, aumentando a suscetibilidade à iniciação de trincas e à falha interfacial. Por esse motivo, o controle dos gradientes de dureza é considerado um dos principais desafios no projeto de estruturas cladeadas e multimateriais produzidas por manufatura aditiva (GARG; SINGH, 2016; KABALDIN *et al.*, 2023; SUÁREZ *et al.*, 2022; WEI *et al.* 2021).

Nesse contexto, a utilização de mapas de microdureza conforme normas técnicas, como a ASTM E384 (ASTM, 2011), constitui uma ferramenta essencial para a caracterização quantitativa dos gradientes de dureza em sistemas dissimilares. Esses mapas permitem correlacionar a distribuição espacial da dureza com as microestruturas observadas, fornecendo subsídios técnicos para a otimização de parâmetros de processo, estratégias de deposição e controle térmico, visando à obtenção de interfaces com transições mecânicas mais graduais e maior integridade metalúrgica (DEBROY *et al.*, 2018).

2.7.3 Relação entre microestrutura, diluição e dureza

Em processos de soldagem e manufatura aditiva metálica, particularmente na MADA, existe uma relação direta e intrínseca entre microestrutura, diluição química e dureza, a qual exerce influência determinante sobre o desempenho estrutural de componentes monomateriais e, sobretudo, multimateriais. As condições térmicas impostas pelo processo controlam a solidificação, as transformações de fase e os mecanismos de difusão, resultando em microestruturas heterogêneas que se refletem em variações locais de propriedades mecânicas (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; WEI *et al.* 2021).

A diluição na interface entre materiais distintos promove a formação de regiões com composição química intermediária, nas quais a microestrutura resultante difere tanto do material de base quanto do material depositado. Em sistemas aço carbono/aço inoxidável, a incorporação de carbono no metal de solda inoxidável pode favorecer o aumento da dureza local devido à precipitação de carbonetos e ao endurecimento por solução sólida, enquanto a diluição de elementos como cromo e níquel no aço carbono pode modificar os produtos de transformação na zona afetada pelo calor, elevando ou reduzindo a dureza conforme o ciclo térmico aplicado (LIU, J. *et al.*, 2020; KABALDIN *et al.*, 2023; WEI *et al.* 2021).

A microestrutura formada nessas regiões é fortemente dependente das condições de solidificação e resfriamento. Estruturas dendríticas finas, associadas a maiores taxas de resfriamento, tendem a apresentar maiores valores de dureza, enquanto microestruturas mais grosseiras, resultantes de resfriamento lento ou de ciclos térmicos repetitivos, podem apresentar dureza reduzida. Em processos de MADA, os sucessivos reaquecimentos intercadas podem promover revenimento ou crescimento de grão, alterando progressivamente a dureza ao longo da direção de construção (DEBROY *et al.*, 2018).

Essas variações microestruturais e composicionais resultam na formação de gradientes de dureza ao longo da interface e entre diferentes regiões do material depositado. Gradientes abruptos de dureza indicam transições mecânicas acentuadas, frequentemente associadas a concentrações de tensões sob carregamento mecânico ou térmico. Em estruturas cladeadas, tais concentrações podem atuar como sítios preferenciais para a iniciação de trincas, comprometendo a integridade da ligação metalúrgica e o desempenho estrutural do componente (SUÁREZ *et al.*, 2022; WEI *et al.* 2021; YADAV, L. *et al.*, 2025).

Do ponto de vista do desempenho estrutural, gradientes mecânicos pronunciados podem afetar negativamente propriedades como resistência à fadiga, tenacidade à fratura e comportamento sob deformação plástica. Regiões mais duras e frágeis adjacentes a regiões mais dúcteis tendem a apresentar incompatibilidade de deformação, favorecendo o acúmulo de tensões residuais e a propagação de trincas ao longo da interface. Esse efeito é particularmente crítico em componentes submetidos a solicitações cíclicas ou a dobramentos severos, como aqueles avaliados por ensaios de dobramento guiado (LIU, J. *et al.*, 2020; KABALDIN *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a correlação entre microestrutura, diluição e dureza, por meio de análises microestruturais e mapas de microdureza, torna-se essencial para a compreensão do comportamento mecânico de sistemas dissimilares produzidos por MADA. O controle do aporte térmico, da estratégia de deposição e das condições de resfriamento permite ajustar a extensão da diluição e mitigar gradientes mecânicos excessivos, contribuindo para a obtenção

de interfaces com transições mais graduais de propriedades e desempenho estrutural mais confiável (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

2.8 Adesão e integridade da ligação metalúrgica

A adesão metalúrgica e a ligação por fusão constituem os princípios fundamentais que asseguram a integridade estrutural de juntas soldadas, revestimentos (*cladding*) e componentes produzidos por manufatura aditiva metálica. Em processos como a MADA, a formação de uma ligação metalúrgica efetiva entre o material depositado e o substrato é condição indispensável para o desempenho mecânico e funcional do componente final (DEBROY *et al.*, 2018; 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022).

A adesão metalúrgica pode ser definida como a união entre dois materiais resultante da interação atômica na interface, possibilitada pela fusão parcial ou total de um ou de ambos os materiais e pela subsequente solidificação conjunta. Diferentemente de mecanismos de adesão puramente mecânicos ou físicos, a adesão metalúrgica envolve a formação de continuidade cristalina ou, ao menos, de uma zona interfacial coesa, na qual ocorre difusão de átomos e compartilhamento de ligações metálicas (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A ligação por fusão é o mecanismo predominante de adesão metalúrgica em processos de soldagem e MADA. Nesse mecanismo, o aporte térmico fornecido pela fonte de energia promove a fusão do material de adição e a fusão parcial do material de base, originando uma poça de metal líquido comum. Durante a solidificação, ocorre o crescimento epitaxial dos grãos a partir do material previamente solidificado, resultando em uma ligação contínua entre o substrato e o material depositado (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022).

A qualidade da ligação por fusão depende de diversos fatores, incluindo o grau de diluição, a estabilidade da poça de fusão, o controle do ciclo térmico e a compatibilidade metalúrgica entre os materiais envolvidos. Diluição insuficiente pode resultar em falta de fusão localizada e descontinuidades interfaciais, enquanto diluição excessiva pode comprometer as propriedades do material depositado, especialmente em sistemas dissimilares (SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023, WEI *et al.* 2021; YADAV, L. *et al.*, 2025).

Em estruturas cladeadas e multimateriais, a adesão metalúrgica por fusão assume complexidade adicional devido às diferenças de composição química, coeficiente de expansão térmica e comportamento de solidificação entre os materiais. Em sistemas aço carbono/aço inoxidável, por exemplo, a ligação por fusão deve ser cuidadosamente controlada para evitar a formação de microestruturas frágeis, trincas ou segregações químicas

excessivas na interface, que podem comprometer a integridade da união (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; GOGULRAJ; RAJAMURUGAN, 2025).

A avaliação da adesão metalúrgica é comumente realizada por meio de ensaios mecânicos específicos, como ensaios de dobramento guiado, tração ou cisalhamento, associados à análise microestrutural da interface. Esses métodos permitem verificar a continuidade da ligação por fusão, a ausência de descontinuidades e a capacidade da interface de suportar deformações plásticas sem separação significativa, sendo amplamente empregados em normas técnicas para qualificação de revestimentos e juntas soldadas (ISO/ASTM, 2021; KABALDIN *et al.*, 2023).

2.8.1 Fatores que influenciam a adesão em cladding metálico

Entre os principais fatores que influenciam a adesão destaca-se o aporte térmico, que deve ser suficiente para promover a fusão parcial do material de base e assegurar a ligação por fusão, sem, contudo, gerar diluição excessiva ou microestruturas indesejadas. Parâmetros como corrente, tensão, velocidade de deposição e modo de transferência metálica controlam diretamente a geometria da poça de fusão e a extensão da zona parcialmente fundida, influenciando a continuidade da ligação metalúrgica (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; WEI *et al.* 2021).

A compatibilidade metalúrgica entre o material de base e o material de revestimento também exerce papel fundamental. Diferenças significativas de composição química, coeficiente de expansão térmica e comportamento de solidificação podem favorecer a formação de tensões residuais elevadas e microestruturas frágeis na interface. Em sistemas dissimilares, como aço carbono/aço inoxidável, o controle da diluição e da mistura química é essencial para evitar segregações excessivas e a precipitação de fases prejudiciais ao desempenho mecânico e à resistência à corrosão (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; GOGULRAJ; RAJAMURUGAN, 2025).

As condições térmicas intercamadas, incluindo temperatura entre passes e tempo de resfriamento, influenciam diretamente a adesão ao afetar a microestrutura da interface e a magnitude das tensões residuais. Em processos de deposição camada a camada, o reaquecimento sucessivo das regiões previamente solidificadas pode promover tanto o alívio de tensões quanto a degradação microestrutural, dependendo do controle térmico adotado (DEBROY *et al.*, 2018; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; YADAV, L. *et al.*, 2025).

Entre as falhas típicas em interfaces cladeadas, destacam-se a falta de fusão localizada, a separação interfacial, a formação de trincas e a presença de descontinuidades ou inclusões

na região de ligação. A falta de fusão está geralmente associada a aporte térmico insuficiente ou instabilidade da poça de fusão, enquanto as trincas podem resultar de tensões residuais elevadas, gradientes mecânicos abruptos ou da formação de microestruturas frágeis na zona parcialmente fundida. Segregações químicas excessivas e a formação de filmes líquidos enriquecidos em elementos de baixo ponto de fusão também podem comprometer a coesão interfacial (DEBROY *et al.*, 2018; LIU, J. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A importância da integridade interfacial é particularmente evidente em aplicações críticas, como componentes utilizados nos setores de óleo e gás, geração de energia, indústria química e estruturas sujeitas a solicitações mecânicas severas ou ambientes corrosivos. Nesses casos, a falha da interface cladeada pode resultar em perda de contenção, degradação acelerada do componente ou falha catastrófica do sistema. Assim, a integridade da ligação metalúrgica é um requisito fundamental para garantir segurança operacional, confiabilidade e vida útil adequada do componente (DEBROY *et al.*, 2018; ISO/ASTM 52900, 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022).

Dessa forma, o controle rigoroso dos fatores que influenciam a adesão em *cladding* metálico, aliado à caracterização microestrutural e à aplicação de ensaios mecânicos normatizados, é essencial para assegurar interfaces íntegras e confiáveis. Em processos de MADA, esse controle torna-se ainda mais relevante devido à complexidade térmica e geométrica inerente à deposição camada a camada, reforçando a necessidade de abordagens sistemáticas para o projeto e a avaliação de estruturas cladeadas em aplicações de elevada criticidade (DEBROY *et al.*, 2018; WEI *et al.* 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas detalhadamente as etapas do procedimento experimental adotado, permitindo a avaliação sistemática da adesão e do comportamento metalúrgico da interface entre aço carbono e aço inoxidável em paredes cladeadas produzidas por manufatura aditiva por deposição a arco. O procedimento experimental compreendeu a produção controlada das paredes dissimilares, com a definição criteriosa dos parâmetros de deposição, além da aplicação de técnicas padronizadas de caracterização mecânica e microestrutural, em conformidade com normas técnicas reconhecidas. Dessa forma, buscou-se estudar a influência da distância entre as tochas sobre a formação da interface, e a integridade da ligação metalúrgica, assegurando uma análise consistente e tecnicamente fundamentada do sistema de materiais dissimilares estudados.

3.1 Metodologia geral

Foram produzidas duas pré-formas (paredes) cladeadas depositadas via Manufatura Aditiva por Deposição a arco (MADA), utilizando-se arames AWS A5.18 ER70S-6 como material de base e AWS A5.9 ER309L-Si como material de revestimento (AWS, 2020a,b). As composições químicas nominais dos consumíveis empregados, conforme especificado pelo fabricante em seu catálogo de consumíveis, são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química nominal (%) dos consumíveis ER70S-6 e ER309LSi

| Consumível | C | Si | Mn | Ni | Cr |
|------------|-------|------|------|-------|-------|
| ER70S-6 | 0,08 | 0,90 | 1,50 | – | – |
| ER309LSi | <0,03 | 0,80 | 1,80 | 13,00 | 24,00 |

Fonte: Adaptado do Catálogo de Consumíveis da ESAB (ESAB, 2022).

O processo de deposição foi realizado por meio de dois robôs industriais operando de forma coordenada, cada um conectado a uma fonte de soldagem Fronius TPS 600i. O Robô 01 foi responsável pela deposição do aço carbono, enquanto o Robô 02 realizou a deposição do revestimento em aço inoxidável (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Representação esquemática do campo de trabalho do sistema MADA, disposição dos robôs, do substrato metálico e da cuba de água empregada para controle térmico durante o processo. Fonte: autor (2026)

As paredes se diferenciam pela distância entre as tochas de deposição, sendo 50 mm e 100 mm de defasagem ao longo da trajetória de deposição. Todos os demais parâmetros de processo foram mantidos constantes, de modo a isolar a influência da distância entre as tochas na formação da interface e na adesão entre os materiais.

Em ambas as configurações, foi utilizado o modo de transferência metálica pulsado, com distância bico de contato à peça de 18 mm, arames de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção a mistura $\text{Ar}+2\%\text{CO}_2$, com vazão constante de 16 L/min. Para o aço carbono ER70S-6 foi empregada corrente média de 250 A, tensão média de 23,8 V e velocidade de alimentação de arame de 6,6 m/min, enquanto para o aço inoxidável ER309L-Si utilizou-se corrente média de 112 A, tensão média de 18,8 V e velocidade de alimentação de arame de

3,6 m/min, a velocidade de deposição para dos dois robôs utilizou-se 2,5mm/s. Esses valores foram obtidos a partir de ensaios experimentais preliminares, visando obter condição regular de deposição, sem a geração de respingos e com controle da poça fundida, sem escorrimento.

A trajetória de deposição do aço carbono seguiu um movimento de tecimento em padrão zigue-zague, com percurso retangular, enquanto a deposição do aço inoxidável foi realizada de forma contínua e retilínea. Em cada passe, ambos os robôs percorriam a trajetória no mesmo sentido, retornando no sentido oposto no passe subsequente. Para o controle térmico das paredes e mitigação de distorções, foi empregada a técnica de resfriamento por quase imersão (NIAC) (Figura 3.2).

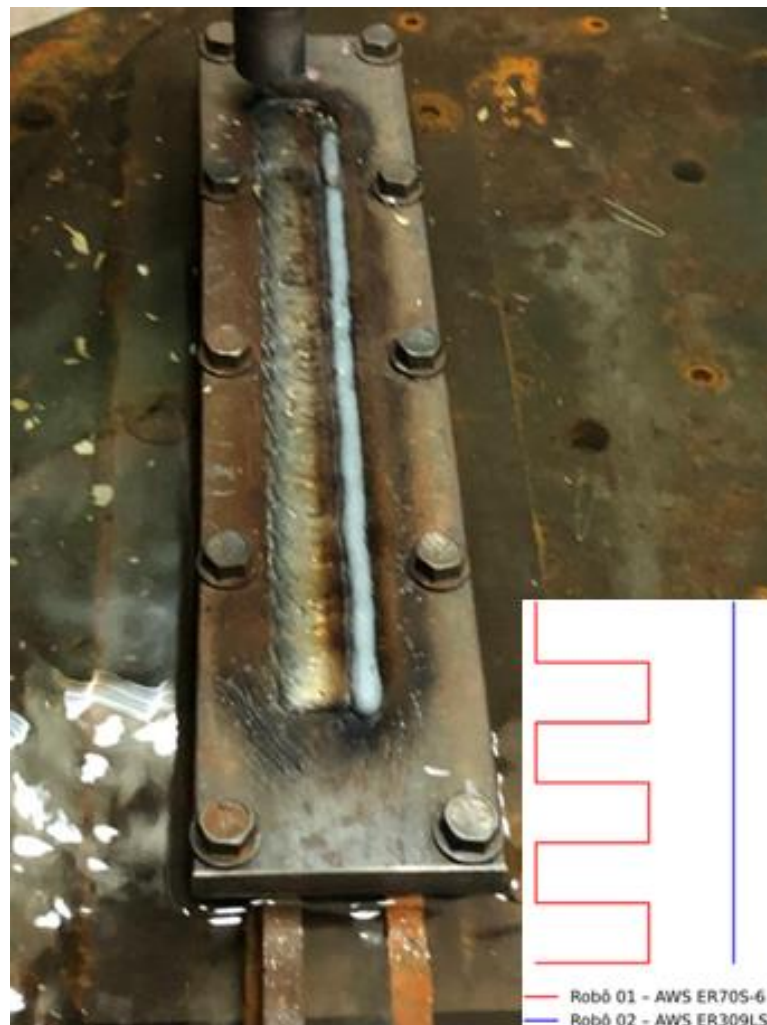


Figura 3.2 - Esquema das trajetórias de deposição utilizadas no processo MADA, mostrando o tecimento em zigue-zague com percurso retangular para o aço carbono e a deposição retilínea do aço inoxidável. Fonte: autor (2026)

As paredes foram constituídas por 57 camadas depositadas, atingindo aproximadamente 152 mm de altura e 270 mm de comprimento. Conforme figura 3.3.



Figura 3.3 - Vista geral da pré-forma depositada por MADA, composta por 57 camadas, com dimensões finais aproximadas de 152 mm de altura e 270 mm de comprimento. Fonte: autor (2026)

Após a deposição das pré-formas, procedeu-se à usinagem por fresamento, removendo-se as irregularidades superficiais até que a espessura final ficasse em aproximadamente 28 mm, sendo 8 mm de espessura em aço inoxidável e 20 mm em aço carbono. Após o fresamento, procedeu-se à avaliação da qualidade do depósito por meio de Ensaio Não-destrutivo de Líquido Penetrante, conforme ASTM E165 (2023).

Após a usinagem da pré-forma, foram extraídas amostras, a partir da região central de cada parede, contendo o material de base, a interface e o revestimento, destinadas às análises microestruturais e aos ensaios de microdureza. Já os corpos de prova para os ensaios mecânicos de dobramento, por demandarem maiores dimensões, foram retirados das regiões remanescentes das paredes, sendo desprezadas as bordas laterais. Os corpos de prova de dobramento foram orientados de modo a avaliar as condições críticas de solicitação da interface base-revestimento, visando à verificação da integridade da ligação metalúrgica.

A Figura 3.4 traz a representação esquemática do local de retirada dos corpos de prova das pré-formas usinadas. A retirada das amostras foi realizada via Usinagem por Descargas Elétricas a Fio (Eletroerosão a Fio).

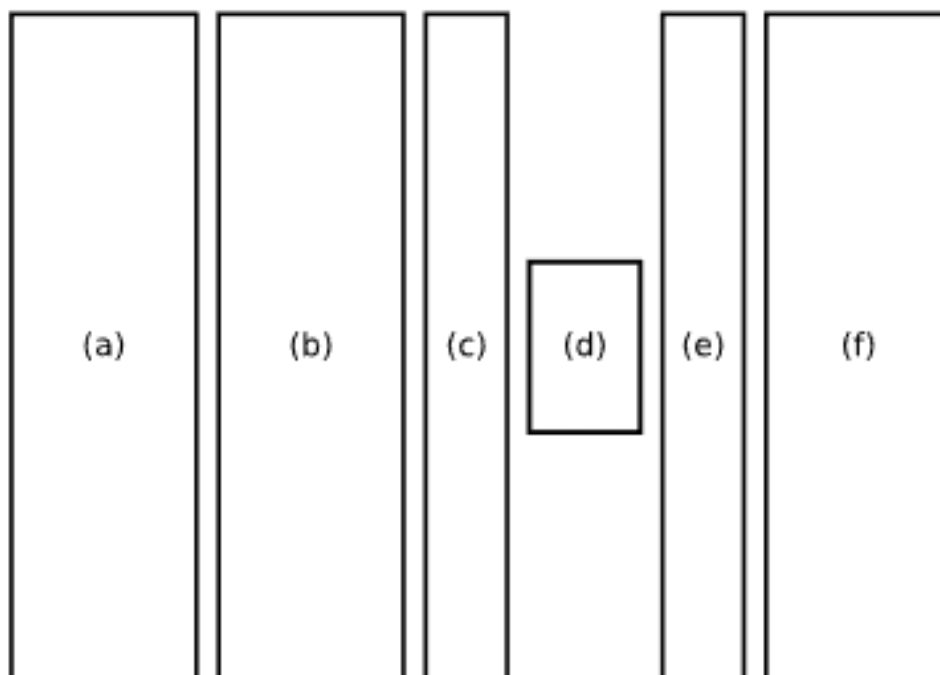


Figura 3.4 – Representação esquemática da retirada e disposição dos corpos de prova obtidos a partir da pré-forma fabricada por MADA: (a) e (b) corpos de prova para ensaio de dobramento conforme ASTM A264; (c) e (e) corpos de prova de dobramento adicionais segundo AWS D1.1; (d) amostra central destinada às análises de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS) e microdureza; (f) corpo de prova para ensaio de dobramento conforme ASTM A264. Fonte: autor (2026)

3.2 Procedimentos experimentais, insumos e análise dos dados

3.2.1 Ensaios mecânicos de dobramento

Os ensaios mecânicos de dobramento foram inicialmente conduzidos conforme a norma ASME BPVC Seção IX, Artigo VI, utilizando dobramento guiado com cutelo de 38 mm de diâmetro (ASME, 2002). Nessa condição preliminar, observou-se a ruptura completa de um corpo de prova, com o aço carbono submetido à compressão e o revestimento em aço inoxidável à tração. Em função desse comportamento, foi adotando o ensaio de dobramento guiado conforme a ASTM A264 (2019). O dobramento foi realizado até 180°, mantendo-se o revestimento em compressão.

O diâmetro do cutelo de 50 mm foi definido com base nas recomendações das normas ASTM A6/A6M (ASTM, 2024a,b) e ASTM A20/A20M (ASTM, 2020), considerando a espessura do corpo de prova e a orientação da dobra paralela ao sentido principal de deposição. O critério de aceitação seguiu a ASTM A264 (2019), considerando-se aceitável a condição em que pelo menos dois dos três corpos de prova apresentassem no máximo 50%

de separação interfacial entre o revestimento e o material de base em ambas as bordas da região dobrada (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Ensaio de dobramento guiado conforme ASTM A264: (a) cutelo de diâmetro 50 mm e posicionamento do corpo de prova antes do ensaio; (b–c) corpos de prova após o dobramento, evidenciando a condição da interface entre o revestimento e o material de base para avaliação do critério de aceitação. Fonte: autor (2026)

3.2.2 Ensaio de microdureza

A caracterização mecânica local foi complementada por ensaios de microdureza Vickers, realizados conforme a ASTM E384 (2011). Para cada condição de deposição, correspondente às distâncias de 50 mm e 100 mm entre as tochas, foi retirado um corpo de prova seccionado transversalmente na direção de deposição, abrangendo o material de base, a interface e o revestimento. A preparação da superfície foi feita por lixamento sequencial com lixas de granulometria 80, 120, 220, 320, 600 e 1200, seguido de polimento com alumina de 1 μm . Os ensaios foram realizados em um microdurômetro Shimadzu HMV-G, com carga de 0,5 kgf e tempo de aplicação de 15 s, sendo realizadas 441 indentações em uma área de 4 mm \times 4 mm, permitindo a construção de mapas de microdureza.

3.2.3 Análises microestruturais

A caracterização microestrutural permite correlacionar as condições de processamento com a microestrutura resultante e, conseqüentemente, com as propriedades mecânicas e o desempenho do material. Nesse contexto, foi realizada uma análise microestrutural por

microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Tais técnicas são amplamente empregadas na investigação de interfaces dissimilares e estruturas cladeadas (ASM INTERNATIONAL, 2018; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Para a revelação da microestrutura, as amostras foram submetidas a ataque químico conforme recomendações do *ASM Handbook – Metallography and Microstructures* (ASM INTERNATIONAL, 2018).

Inicialmente, foi aplicada água régia a 10%, por passadas, priorizando a revelação do revestimento em aço inoxidável. Em seguida, utilizou-se Nital a 10%, por imersão, durante 10 s, revelando da microestrutura da região de manufatura aditiva em aço carbono, possibilitando a observação simultânea do material de base, da interface e do revestimento.

As análises por microscopia óptica (MO) foram conduzidas em um microscópio Zeiss AX10, com ampliações de 50×, 100×, 200× e 500×. As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram realizadas em um microscópio Hitachi TM4000 Plus, empregando ampliações de 500×, 1000× e 2000×.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do processo de deposição e análise macroestrutural



Figura 4.1 – Pré-formas produzidas via MADA, evidenciando a geometria final, dimensões e espessura do cladding, com aproximadamente 152 mm de altura, 270 mm de comprimento, 38 mm de espessura e 57 camadas depositadas. Fonte: autor (2026)

As pré-formas analisadas apresentavam as mesmas dimensões geométricas e foram produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) utilizando duas tochas operando em robôs distintos. Uma tocha foi dedicada à deposição do metal de base em aço carbono ER70S-6, enquanto a segunda foi responsável pela deposição do revestimento em aço inoxidável ER309L-Si.

Foram avaliadas duas configurações de deposição, variando-se exclusivamente a distância entre as tochas, fixada em 50 mm e 100 mm, mantendo-se constantes os demais parâmetros de processo. Em ambas as configurações, o processo foi iniciado com a deposição do metal de base e, ao atingir aproximadamente 50 mm de comprimento, a tocha responsável pelo revestimento passou a atuar, realizando a deposição do aço inoxidável sobre o aço carbono previamente depositado.

Esse resultado indica que a deposição coordenada por duas tochas, mesmo em condição multimaterial, não comprometeu a estabilidade global do processo, corroborando estudos recentes que apontam o MADA/WAAM como uma tecnologia robusta para a fabricação de componentes de médio e grande porte, inclusive em aplicações cladeadas e multimateriais (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; MONTEVECCHI *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A estratégia adotada caracteriza um método de deposição lado a lado (*side-by-side / overlapping*), no qual os cordões são parcialmente sobrepostos para garantir continuidade geométrica e adequada fusão metalúrgica entre os materiais dissimilares. Debroy *et al.* (2019) e BOUSSINOT *et al.* (2021) indicam que estratégias de sobreposição parcial são essenciais em sistemas dissimilares produzidos por deposição de energia direcionada, pois favorecem a fusão metalúrgica contínua e reduzem a ocorrência de defeitos macroscópicos, como falta de fusão intercamadas ou descolamento do revestimento (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; BOUSSINOT *et al.*, 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A análise macroestrutural evidenciou boa estabilidade geométrica das paredes depositadas, com adequada sobreposição entre os cordões e ausência de defeitos globais associados à falta de fusão entre camadas. Em outras palavras, a análise macroestrutural evidenciou ausência de defeitos globais, tais como falta de fusão entre camadas, colapsos geométricos ou instabilidade excessiva dos cordões. Esse comportamento sugere que o aporte térmico empregado foi suficiente para promover fusão parcial do material de base e a formação de uma poça de fusão estável, condição considerada crítica para a integridade interfacial em processos MADA multimateriais (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; WU, Q. *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023). Estudos recentes ressaltam que, em aplicações cladeadas, o equilíbrio entre aporte térmico e estabilidade geométrica é determinante para o sucesso do processo, sendo mais relevante do que a simples maximização da taxa de deposição (TOMAR *et al.*, 2022).

A comparação entre as duas distâncias entre tochas indica que, dentro da faixa investigada, a variação do espaçamento não resultou em alterações macroestruturais significativas. Esse resultado está de acordo com trabalhos recentes que demonstram que, desde que exista interação térmica suficiente entre as fontes de deposição, variações moderadas no espaçamento não comprometem a continuidade geométrica nem a formação da ligação por fusão, especialmente quando o processo opera em modo pulsado e com controle térmico ativo (AHSAN *et al.*, 2020; MONTEVECCHI *et al.*, 2018; GANESAN *et al.*, 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023).

A sequência de deposição, iniciando-se pelo aço carbono e posteriormente pelo revestimento em aço inoxidável, segue uma abordagem amplamente reportada na literatura

recente para aplicações cladeadas, na qual o material estrutural é depositado primeiramente e o material funcional é aplicado de forma controlada sobre o substrato previamente consolidado. Estudos entre 2019 e 2024 indicam que essa estratégia favorece a estabilidade geométrica inicial e reduz a probabilidade de defeitos macroscópicos no revestimento, desde que o controle térmico intercadas seja adequado (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; JADHAV *et al.*, 2025).

Adicionalmente, a combinação de tecimento em zigue-zague para o aço carbono e trajetória retilínea para o aço inoxidável contribuiu para a boa conformação geométrica observada. Trabalhos recentes mostram que o tecimento no material de base auxilia na estabilização da largura da parede e na dissipação térmica, enquanto trajetórias retilíneas são mais indicadas para revestimentos, pois reduzem variações locais de diluição e espessura do cladding (WU, B. *et al.*, 2019; WACKER *et al.*, 2021).

De forma geral, os resultados macroestruturais demonstram que o processo MADA, operando com deposição coordenada e estratégia side-by-side / overlapping, é tecnicamente viável para a produção de paredes cladeadas aço carbono/aço inoxidável com boa estabilidade geométrica e ausência de defeitos macroscópicos, independentemente da distância entre tochas avaliada.

4.2 Ensaio de líquido penetrante

Após a usinagem por fresamento das pré-formas, foi realizado o ensaio de líquido penetrante, conforme Figura 4.2 para o espaçamento de 50 mm entre tochas e Figura 4.3 para o espaçamento de 100 m. Para ambas as pré-formas foram identificadas trincas superficiais concentradas, predominantemente nas bordas das peças. Essas regiões coincidem com os pontos de abertura e fechamento do arco elétrico durante a deposição e com a atuação quase sequencial de dois arcos, resultando em maior concentração de aporte térmico e intensificação dos gradientes térmicos (DEBROY *et al.*, 2018; WU, B. *et al.*, 2019).

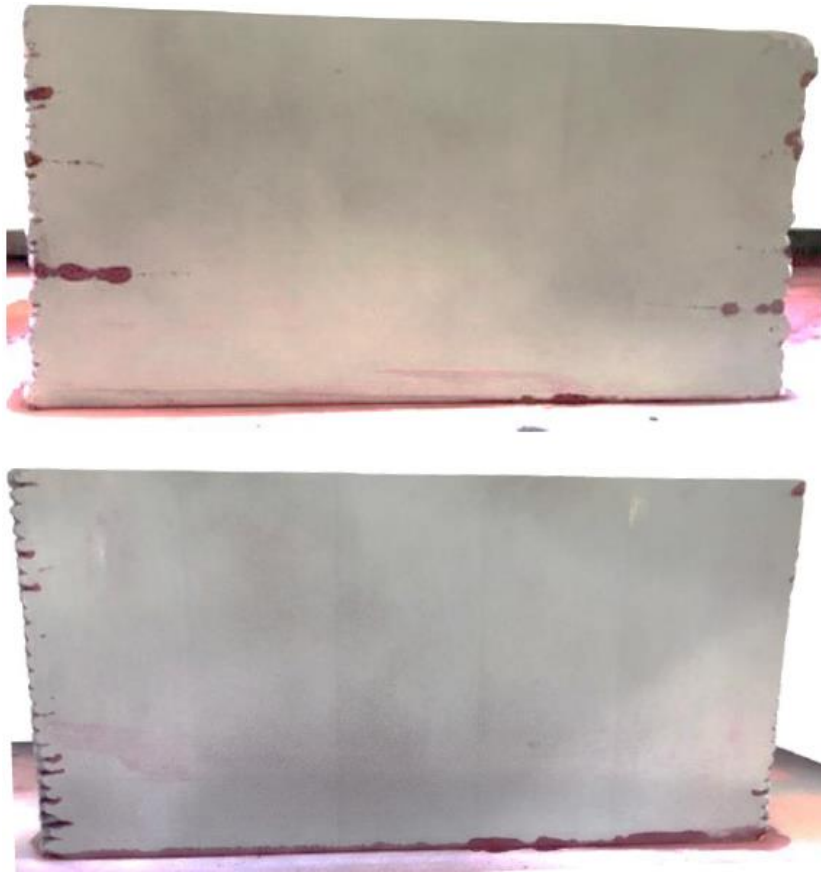


Figura 4.2 – Ensaio por líquido penetrante na pré-forma usinada (espaçamento de 50mm entre tochas), com imagem superior correspondente ao aço carbono ER70S-6 e inferior ao aço inoxidável ER309LSi. Fonte: autor (2026)



Figura 4.3 - Ensaio por líquido penetrante na pré-forma usinada (100mm entre tochas): com imagem superior correspondente ao aço carbono ER70S-6 e inferior ao aço inoxidável ER309LSi. Fonte: autor (2026)

Além disso, no presente estudo, as bordas das pré-formas também coincidem com a atuação quase sequencial de dois arcos elétricos, característica intrínseca à estratégia de deposição coordenada empregada. Trabalhos recentes indicam que, em sistemas multi-tocha ou multi-arco, a superposição temporal de ciclos térmicos pode gerar acúmulo localizado de calor, elevadas taxas de aquecimento e resfriamento e, conseqüentemente, níveis mais elevados de tensões residuais, especialmente em regiões periféricas da geometria depositada (MONTEVECCHI *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022).

Observou-se maior incidência e maior comprimento das trincas na pré-forma produzida com distância entre tochas de 50 mm (Figura 4.1), quando comparada à pré-forma fabricada com espaçamento de 100 mm (Figura 4.2). As regiões contendo trincas foram descartadas previamente à confecção dos corpos de prova para os ensaios mecânicos. Estudos recentes demonstram que a redução da distância entre tochas em processos MADA multi-tochas aumenta a interação térmica entre os arcos, intensificando o aporte térmico local e reduzindo o tempo disponível para dissipação de calor entre passes consecutivos, o que favorece a formação de tensões residuais trativas superficiais e, conseqüentemente, a nucleação de trincas (WU, Q. *et al.*, 2020; GANESAN *et al.*, 2021).

Em contraste, a pré-forma produzida com espaçamento de 100 mm entre as tochas apresentou menor densidade e menor extensão das trincas superficiais, indicando que o maior afastamento proporcionou uma dissipação térmica mais eficiente e uma redução dos gradientes térmicos locais. Esse comportamento está alinhado com resultados reportados na literatura recente, nos quais o aumento controlado da distância entre fontes de deposição contribui para a mitigação de defeitos associados a tensões residuais, sem comprometer a estabilidade geométrica global do componente (MONTEVECCHI *et al.*, 2018; WACKER *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a combinação de materiais dissimilares (aço carbono/aço inoxidável) pode ter contribuído para a suscetibilidade à formação de trincas nas regiões de borda. Diferenças nos coeficientes de expansão térmica, no comportamento de solidificação e na condutividade térmica entre os materiais intensificam os gradientes mecânicos e térmicos, sobretudo em regiões onde o fluxo de calor não é simétrico, como nos extremos das pré-formas (DEBROY *et al.*, 2018; JADHAV *et al.*, 2025).

A decisão de descartar as regiões contendo trincas antes da confecção dos corpos de prova está de acordo com práticas recomendadas em estudos experimentais recentes e com procedimentos normativos, uma vez que tais descontinuidades poderiam mascarar o comportamento real da interface metalúrgica sob carregamento mecânico, comprometendo a interpretação dos resultados de adesão e integridade interfacial (ASTM, 2019; TOMAR *et al.*, 2022).

De forma geral, os resultados do ensaio de líquido penetrante evidenciam que a distância entre tochas é um parâmetro crítico no controle de defeitos superficiais em processos MADA multitocha, especialmente em aplicações cladeadas e multimateriais. A maior propensão a trincas observada na condição de 50 mm reforça a necessidade de abordagens sistemáticas de gerenciamento térmico, como otimização do espaçamento entre fontes de calor, controle da sequência de deposição e uso de estratégias complementares de resfriamento, conforme amplamente discutido na literatura recente (DEBROY *et al.*, 2018; GANESAN *et al.*, 2021; JADHAV *et al.*, 2025).

4.3 Análise microestrutural

4.3.1 Microscopia óptica (MO)

A microscopia óptica foi empregada como primeira etapa da caracterização microestrutural, permitindo a avaliação global da morfologia da interface entre o aço carbono ER70S-6 e o revestimento em aço inoxidável ER309L-Si, bem como a identificação das

regiões características do sistema cladeado, incluindo o metal de base, a zona de transição metalúrgica e o revestimento. Essa abordagem é particularmente adequada para processos de manufatura aditiva por deposição a arco, nos quais a solidificação direcional e os ciclos térmicos sucessivos geram heterogeneidades microestruturais em diferentes escalas.

A Figura 4.4 traz a micrografia de microscopia óptica da interface ER70S-6/ER309L-Si para a condição de afastamento entre tochas de 50 mm e a Figura 4.5 para a condição de afastamento de 100 mm.

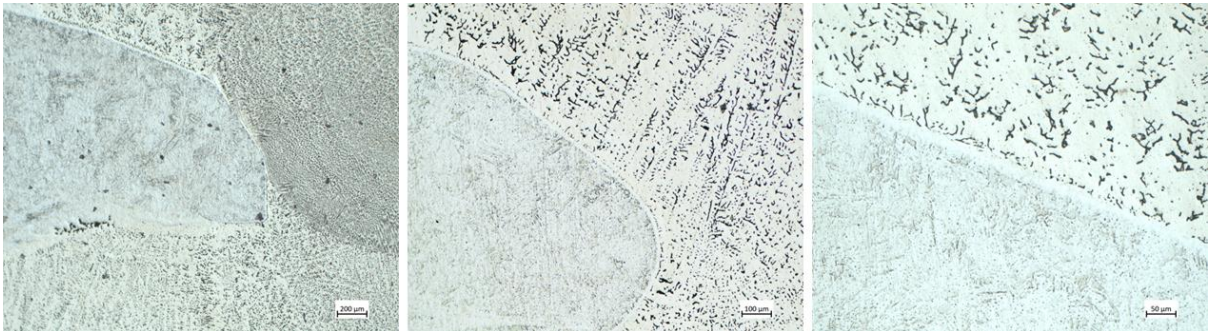


Figura 4.4 - Micrografia por microscopia óptica da interface ER70S-6/ER309L-Si na condição de 50 mm entre as tochas. Fonte: autor (2026)

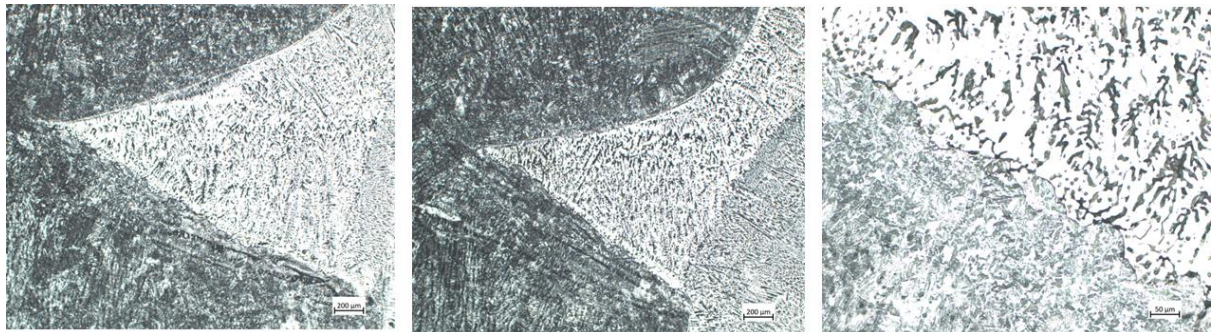


Figura 4.5 - Micrografia por microscopia óptica da interface ER70S-6/ER309L-Si na condição de 100 mm entre as tochas. Fonte: autor (2026)

De modo geral, as imagens obtidas por MO evidenciaram a formação de uma interface contínua e bem definida em ambas as configurações de deposição avaliadas, sem a presença de descontinuidades macroscópicas, trincas ou falta de fusão ao longo da linha de ligação. A interface apresentou morfologia irregular, característica de processos baseados em fusão parcial do metal previamente depositado, refletindo a dinâmica da poça de fusão e a interação térmica entre os passes sucessivos, comportamento amplamente descrito na literatura para sistemas cladeados produzidos por WAAM (DEBROY *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022).

Na condição com espaçamento de 50 mm entre as tochas, a microscopia óptica revelou uma zona de transição metalúrgica mais ampla, com evidências de mistura mais intensa entre

o metal de base e o revestimento. Essa característica está associada ao menor intervalo entre a deposição do ER70S-6 e a aplicação do revestimento em ER309L-Si, de modo que o aço carbono ainda se encontrava termicamente ativo no momento da deposição subsequente, favorecendo maior diluição e interação metalúrgica local.

Por outro lado, na condição com espaçamento de 100 mm entre as tochas, observou-se, por MO, uma zona de transição mais estreita e visualmente mais definida, indicando menor extensão de mistura entre os materiais. O maior percurso percorrido pela tocha de deposição do aço carbono antes da aplicação do revestimento proporcionou maior tempo de resfriamento do metal de base, reduzindo a interação térmica direta entre os arcos e resultando em uma interface mais controlada do ponto de vista morfológico.

No revestimento em ER309L-Si, as imagens de MO evidenciaram uma microestrutura típica de solidificação direcional, com morfologia predominantemente dendrítica, enquanto o metal de base ER70S-6 apresentou microestrutura bainítica com a presença de martensita característica, com indícios de crescimento de grão nas regiões adjacentes à interface. Esse crescimento é atribuído aos ciclos térmicos impostos pelo processo de deposição camada a camada, que promovem reaquecimento sucessivo das camadas previamente solidificadas, fenômeno amplamente reportado em estudos de WAAM e MADA (GANESAN *et al.*, 2021; TOMAR *et al.*, 2022).

A comparação entre as duas configurações de espaçamento indica que a estratégia de deposição exerce influência direta sobre a morfologia da interface e sobre a extensão da zona de transição metalúrgica, mesmo quando a ligação permanece contínua e isenta de defeitos macroscópicos. Esses resultados obtidos por microscopia óptica fornecem a base para as análises subsequentes por MEV e EDS, bem como para a interpretação dos gradientes de microdureza e do comportamento mecânico apresentados nas seções seguintes.

4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das pré-formas multimateriais produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), considerando as distâncias entre tochas de deposição de 50 mm e 100 mm, respectivamente. As imagens contemplam, para ambas as condições, o material de base em aço carbono ER70S-6, o revestimento em aço inoxidável austenítico ER309L-Si e a região interfacial entre os materiais, permitindo a avaliação da continuidade metalúrgica, da morfologia da interface e do efeito das diferentes condições térmicas impostas pelo espaçamento entre as tochas de deposição.

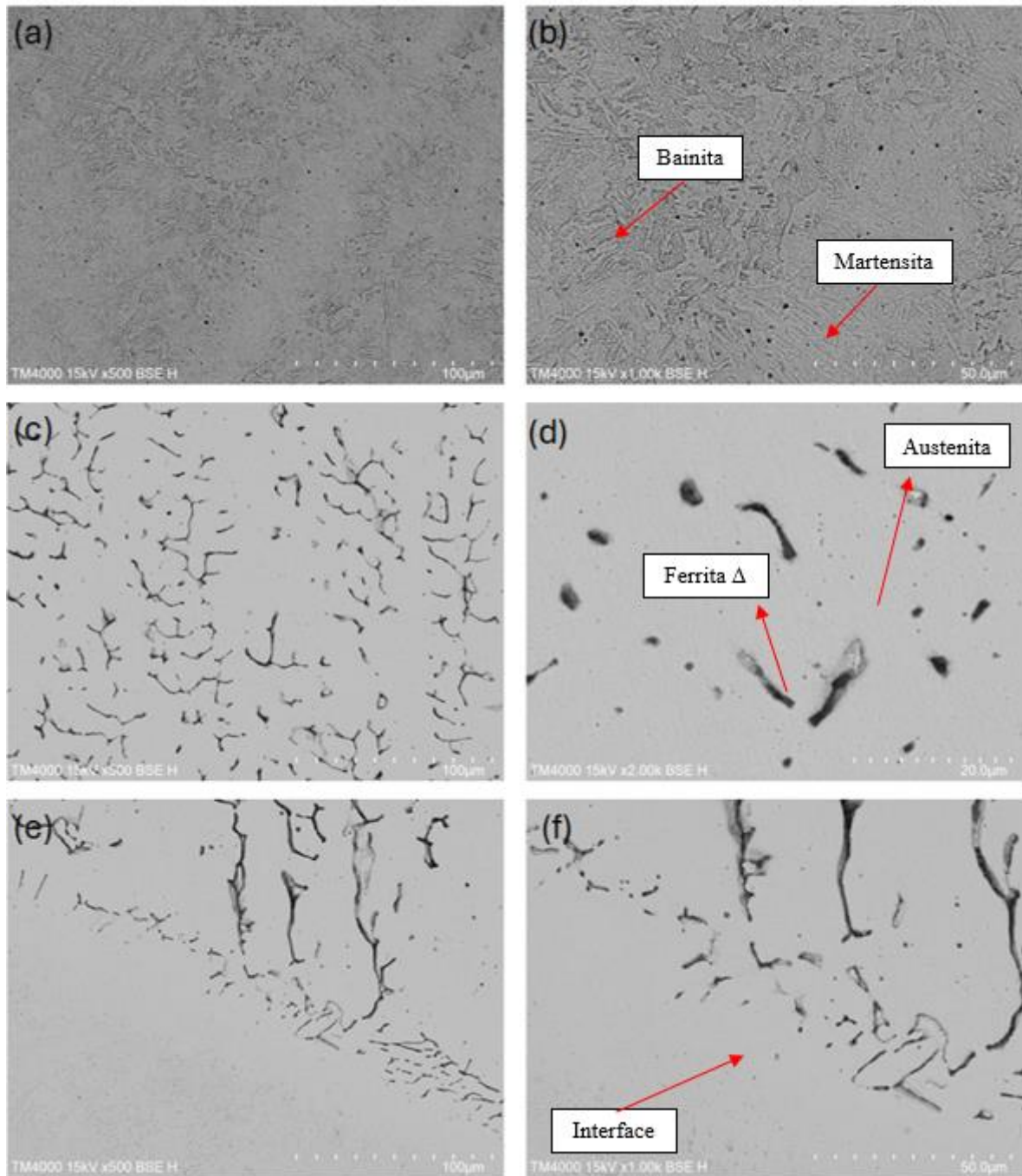


Figura 4.6 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da pré-forma multimaterial fabricada por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), com distância entre as tochas de deposição de 50 mm: (a) e (b) microestrutura do material de base em aço carbono; (c) e (d) microestrutura do revestimento em aço inoxidável austenítico; e (e) e (f) região da interface metalúrgica entre o aço carbono e o aço inoxidável austenítico. Fonte: autor (2026)

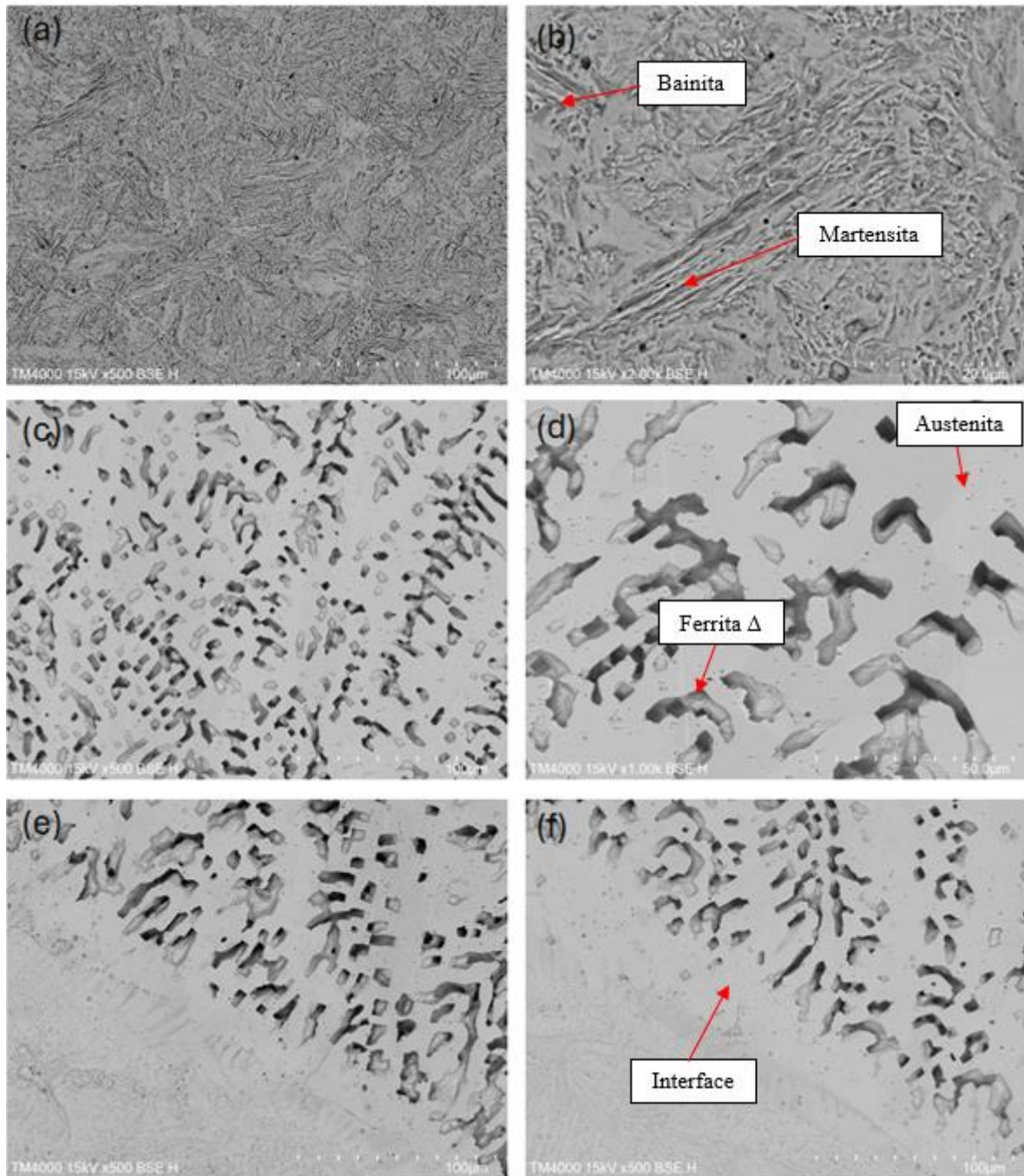


Figura 4.7 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da pré-forma multimaterial fabricada por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), com distância entre as tochas de deposição de 100 mm: (a) e (b) microestrutura do material de base em aço carbono; (c) e (d) microestrutura do revestimento em aço inoxidável austenítico; e (e) e (f) região da interface metalúrgica entre o aço carbono e o aço inoxidável austenítico. Fonte: autor (2026)

A análise por microscopia eletrônica de varredura evidenciou a formação de uma interface metalurgicamente contínua entre o aço carbono ER70S-6 e o revestimento em aço inoxidável ER309L-Si, característica fundamental para a integridade estrutural de sistemas cladeados produzidos por manufatura aditiva por deposição a arco. A ausência de

descontinuidades contínuas ao longo da interface indica que o aporte térmico e a estratégia de deposição adotados foram suficientes para promover ligação por fusão efetiva, em consonância com os princípios clássicos de soldagem e com observações recentes em processos MADA multitoche (DEBROY *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022).

Observou-se a presença de uma zona de transição metalúrgica bem definida, sem descontinuidades contínuas ao longo da interface. Em processos de MADA, essa região é considerada essencial para garantir continuidade mecânica e transferência eficiente de tensões entre materiais dissimilares, desde que não haja formação de microestruturas frágeis ou segregações excessivas (SUÁREZ *et al.*, 2022; WACKER *et al.*, 2021; KABALDIN *et al.*, 2023; JADHAV *et al.*, 2025).

A região de ligação apresentou morfologia irregular, característica de processos de deposição com fusão parcial e diluição controlada. A morfologia irregular observada na interface é típica de processos baseados em fusão parcial do substrato, nos quais a geometria da linha de fusão reflete a dinâmica da poça metálica, a oscilação térmica intercamadas e a interação entre os arcos elétricos (MONTEVECCHI *et al.*, 2018; WU, B. *et al.*, 2019).

No revestimento observou-se microestrutura predominantemente austenítica com a presença de ferrita delta, enquanto o metal de base apresentou microestrutura predominantemente bainítica com a presença de martensita. Estudos recentes apontam que, em processos de MADA, a solidificação rápida associada a elevados gradientes térmicos favorece a formação de estruturas dendríticas austeníticas, com possível presença de ferrita delta em regiões interdendríticas, ainda que nem sempre claramente distinguível em imagens de MEV sem análise química complementar (DEBROY *et al.*, 2018; YADAV, A. *et al.*, 2025). Essa microestrutura é considerada favorável do ponto de vista metalúrgico, pois contribui para a mitigação de trincas a quente e para a estabilidade da interface em sistemas multimateriais.

O metal de base em aço carbono ER70S-6 apresentou microestrutura bainítica com a presença de martensita, com evidências de crescimento de grão nas regiões adjacentes à interface, associado aos ciclos térmicos impostos pelo processo de deposição camada a camada. Esse comportamento está amplamente documentado na literatura recente, que aponta que o reaquecimento sucessivo das camadas previamente depositadas promove o crescimento de grão na zona afetada pelo calor e pode alterar localmente as propriedades mecânicas, especialmente a dureza e a tenacidade (TOMAR *et al.*, 2022; GANESAN *et al.*, 2021).

A ausência de trincas interfaciais visíveis por MEV sugere que, apesar da presença de gradientes térmicos e de diferenças significativas de composição química entre os materiais, a compatibilidade metalúrgica do sistema ER70S-6/ER309L-Si foi adequada para a estratégia de deposição empregada. Trabalhos recentes destacam que ligas do tipo 309L apresentam

ampla tolerância à diluição e favorecem a formação de interfaces estáveis em aplicações cladeadas, desde que o controle térmico seja adequado (WACKER *et al.*, 2021; JADHAV *et al.*, 2025).

De forma geral, os resultados da análise por MEV corroboram os achados macroestruturais e mecânicos do presente estudo, indicando que a estratégia de deposição adotada possibilitou a formação de uma ligação metalúrgica contínua e estruturalmente íntegra. A morfologia observada na interface e as microestruturas identificadas são consistentes com aquelas relatadas na literatura recente para sistemas dissimilares produzidos por MADA, reforçando a viabilidade do processo para a fabricação de estruturas cladeadas com desempenho metalúrgico adequado (DEBROY *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022).

4.3.3 Espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

Foram realizadas análises por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nas paredes produzidas com espaçamento entre tochas de 50 mm e 100 mm, com o objetivo de avaliar a redistribuição composicional dos elementos de liga nas diferentes regiões do material cladeado. As composições químicas médias obtidas para o material de base (MA), a região interfacial e o revestimento, em ambas as condições de espaçamento, são apresentadas nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.1 – Composição química por EDS do material de base (MA) das paredes produzidas por MADA com espaçamento entre tochas de 50 mm e 100 mm (% em massa). Fonte: autor (2026)

| Condição (pré-forma) | Fe [| Cr [| Ni [| Mo | S | Si | V | Al | P | Ti |
|----------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MA – 50 mm | 94,00 ± 0,14 | 1,65 ± 0,35 | 0,80 ± 0,00 | 0,10 ± 0,14 | 0,05 ± 0,07 | 0,90 ± 0,00 | 0,05 ± 0,07 | 1,00 ± 0,28 | 0,00 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 |
| MA – 100 mm | 94,20 ± 0,42 | 1,85 ± 0,07 | 0,95 ± 0,21 | 0,00 ± 0,00 | 0,05 ± 0,07 | 0,75 ± 0,07 | 0,00 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 |

Tabela 4.2 – Composição química por EDS da zona de ligação (interface) das paredes produzidas por MADA com espaçamento entre tochas de 50 mm e 100 mm (% em massa). Fonte: autor (2026)

| Condição (pré-forma) | Fe | Cr | Ni | Mo | Mn | Si | S | P | Al | V | Nb | Ti |
|----------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Interface – 50 mm | 72,50 ± 5,23 | 15,85 ± 3,61 | 8,10 ± 1,27 | 0,15 ± 0,21 | 1,45 ± 0,07 | 0,80 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 | 0,05 ± 0,07 | 0,85 ± 0,21 | 0,10 ± 0,14 | 0,10 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Interface – 100 mm | 65,85 ± 0,07 | 20,05 ± 0,07 | 11,10 ± 0,14 | 0,10 ± 0,14 | 1,60 ± 0,14 | 0,80 ± 0,00 | 0,05 ± 0,07 | 0,00 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 | 0,10 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 | 0,00 ± 0,00 |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|

Tabela 4.3 – Composição química por EDS do revestimento em aço inoxidável 309LSi das paredes produzidas por MADA com espaçamento entre tochas de 50 mm e 100 mm (% em massa). Fonte: autor (2026)

| Condição (pré-forma) | Fe | Cr | Ni | Mo | Mn | Si | S | P | Al | V | Nb | Ti |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Revestimento o – 50 mm | 62,4 0 ± 0,99 | 20,9 5 ± 0,35 | 11,8 0 ± 0,28 | 0,0 5 ± 0,0 7 | 1,6 5 ± 0,0 7 | 0,9 0 ± 0,0 0 | 0,0 0 ± 0,0 0 | 0,0 5 ± 0,0 7 | 1,1 0 ± 0,1 4 | 0,1 0 ± 0,0 0 | 0,0 0 ± 0,0 0 | 0,0 0 ± 0,0 0 |
| Revestimento o – 100 mm | 63,1 5 ± 0,78 | 21,6 0 ± 0,14 | 11,7 5 ± 0,64 | 0,2 0 ± 0,1 4 | 1,8 0 ± 0,0 0 | 0,7 0 ± 0,0 0 | 0,0 0 ± 0,0 0 | 0,0 0 ± 0,0 0 | 0,0 5 ± 0,0 7 | 0,1 0 ± 0,0 0 | 0,0 5 ± 0,0 7 | 0,0 0 ± 0,0 0 |

Conforme apresentado na tabela 3.1, as composições químicas nominais dos consumíveis ER70S-6 e ER309LSi, fornecidas pelo fabricante, indicam a predominância de Fe no material de base e teores elevados de Cr e Ni no revestimento, característicos do aço inoxidável austenítico. De modo geral, as composições obtidas por EDS nas diferentes regiões analisadas refletem esse comportamento esperado, sendo observadas variações locais associadas aos ciclos térmicos e aos fenômenos de diluição inerentes ao processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco.

No material de base (ER70S-6), os resultados de EDS indicaram a predominância de Fe, com a detecção de teores residuais de Cr e Ni em ambas as condições analisadas. As variações observadas entre as paredes produzidas com espaçamento de 50 mm e 100 mm situam-se na mesma ordem de grandeza, sugerindo que a incorporação desses elementos ocorreu de forma localizada, associada à influência térmica da deposição subsequente do revestimento, sem diferenças composicionais expressivas atribuíveis exclusivamente à variação do espaçamento entre as tochas.

Para o revestimento em aço inoxidável ER309LSi, as composições químicas obtidas por EDS mostraram-se semelhantes para as duas condições avaliadas, com pequenas variações nos teores de Cr, Ni e Fe. Esses resultados indicam estabilidade composicional do revestimento para os parâmetros de deposição adotados, evidenciando que o aumento do espaçamento entre tochas não promoveu alterações significativas na composição química média do material depositado.

Na região interfacial, ambas as condições apresentaram uma transição composicional contínua entre o material de base e o revestimento, sem a ocorrência de descontinuidades químicas abruptas. Observou-se que, na condição de 100 mm, os valores médios de Cr e Ni foram superiores, enquanto o teor de Fe foi inferior em relação à condição de 50 mm,

indicando variações locais na redistribuição dos elementos de liga associadas ao histórico térmico imposto pelo maior intervalo entre as deposições. Ressalta-se que os resultados de EDS representam tendências composicionais locais, não permitindo a inferência direta da extensão geométrica da zona de transição metalúrgica.

De modo geral, as análises por EDS evidenciam que o espaçamento entre tochas influencia predominantemente a redistribuição local dos elementos de liga na região interfacial, enquanto o material de base e o revestimento mantêm composições químicas médias semelhantes entre as duas condições avaliadas. Esse comportamento está em concordância com estudos da literatura sobre estruturas bimetálicas ER70S-6/ER309LSi produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, que destacam o papel do ciclo térmico e do intervalo entre deposições sucessivas na mistura química e na diluição local (KABALDIN *et al.*, 2023; AHSAN *et al.*, 2020).

4.4 Ensaio de microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza nas paredes produzidas com espaçamento entre tochas de 50 mm e 100 mm, abrangendo o material de base, a região interfacial e o revestimento, com o objetivo de comparar a distribuição dos valores de dureza entre as duas condições de deposição. Os mapas de microdureza correspondentes às paredes de 50 mm e 100 mm são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9, respectivamente, e servem de base para a análise dos efeitos do espaçamento entre tochas sobre a resposta mecânica local do material cladeado.

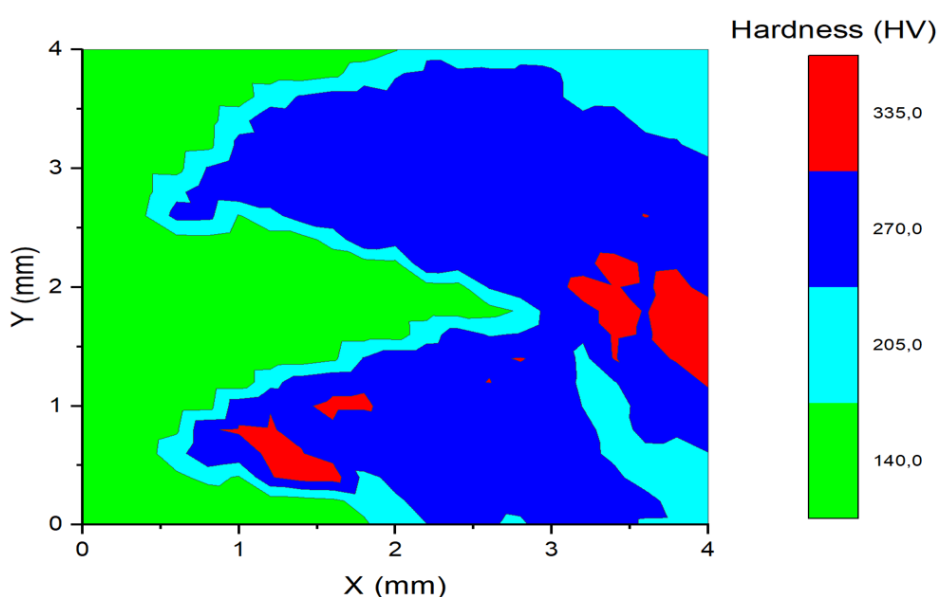


Figura 4.8 - Mapa de microdureza Vickers (HV) da seção transversal da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 50 mm entre as tochas, evidenciando

o gradiente de dureza entre o metal de base, a zona de transição metalúrgica e o revestimento. Fonte: autor (2026)

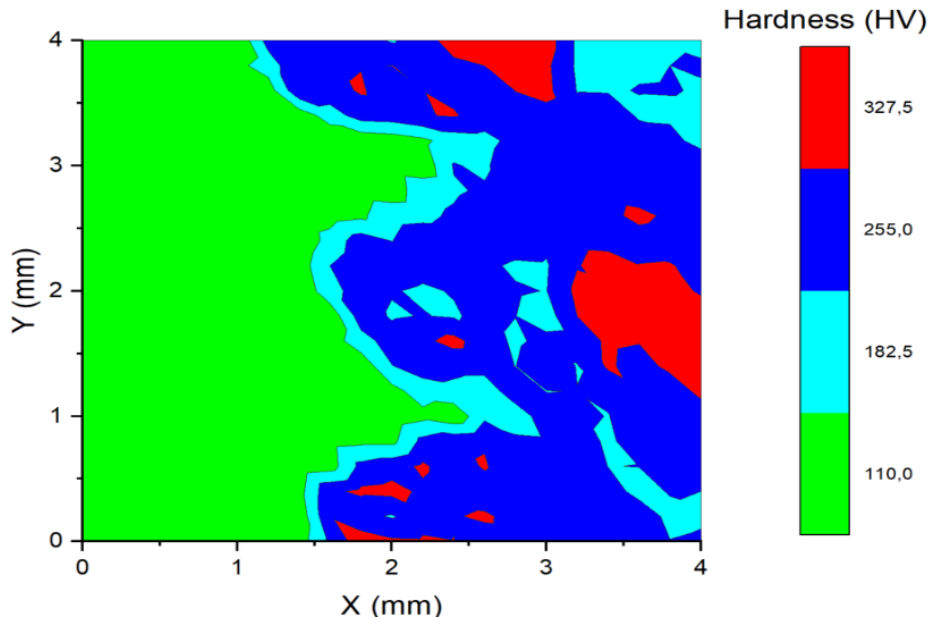


Figura 4.9 - Mapa de microdureza Vickers (HV) da seção transversal da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 100 mm entre as tochas, evidenciando a distribuição de dureza ao longo do metal de base, da interface e do revestimento. Fonte: autor (2026)

Os perfis de microdureza obtidos ao longo da seção transversal das pré-formas evidenciaram uma transição gradual de dureza, com presença de uma região intermediária entre o aço carbono, a zona de transição metalúrgica e o revestimento inoxidável. Esse comportamento é característico de sistemas dissimilares produzidos por processos baseados em fusão, nos quais a variação de composição química e microestrutura ao longo da interface resulta em transições mecânicas progressivas, em oposição à formação de descontinuidades abruptas de propriedades (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; TOMAR *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023).

Não foram observados picos abruptos de dureza na região interfacial, indicando a ausência de formação significativa de fases frágeis ou de regiões excessivamente endurecidas, fenômenos frequentemente associados a diluição descontrolada ou a ciclos térmicos severos em sistemas aço carbono/aço inoxidável. Estudos recentes em MADA/WAAM reportam que gradientes suaves de dureza estão diretamente relacionados a interfaces metalurgicamente estáveis, com maior capacidade de acomodação de deformações e menor propensão à iniciação de trincas (AHSAN *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023; GOGULRAJ; RAJAMURUGAN, 2025; JADHAV *et al.*, 2025; YADAV, A. *et al.*, 2025).

No aço carbono, os valores de dureza observados são compatíveis com microestruturas predominantemente ferrítico-perlíticas, com possível contribuição localizada de bainita em regiões submetidas a maiores taxas de resfriamento. A elevação gradual da dureza em direção à interface pode ser atribuída ao refino microestrutural e à interação metalúrgica localizada com elementos de liga provenientes do metal depositado, fenômenos amplamente descritos na literatura para processos de deposição camada a camada (WU, B. *et al.*, 2019; AHSAN *et al.*, 2020; GANESAN *et al.*, 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023).

Na zona de transição metalúrgica, o comportamento intermediário da dureza reforça a evidência de uma diluição química controlada, resultando em microestruturas híbridas que não apresentam endurecimento excessivo. Trabalhos recentes destacam que, em sistemas dissimilares produzidos por MADA, a presença de uma zona de transição com dureza intermediária é indicativa de uma ligação por fusão efetiva, capaz de distribuir gradientes de tensão de forma mais homogênea sob carregamento mecânico (AHSAN *et al.*, 2020; WACKER *et al.*, 2021; TOMAR *et al.*, 2022; SUÁREZ *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023).

No revestimento em aço inoxidável, os valores de dureza relativamente uniformes são consistentes com uma microestrutura predominantemente austenítica, possivelmente contendo frações limitadas de ferrita delta. A estabilidade da dureza nessa região sugere que os ciclos térmicos intercamadas não promoveram precipitação significativa de fases endurecedoras, como carbonetos ricos em cromo, o que é desejável para a preservação da ductilidade e da resistência à corrosão do revestimento (SUÁREZ *et al.*, 2022; KABALDIN *et al.*, 2023; JADHAV *et al.*, 2025; YADAV, A. *et al.*, 2025).

As variações observadas nos perfis de microdureza na região interfacial são coerentes com os resultados das análises microestruturais e químicas, refletindo diferenças locais na interação metalúrgica e no histórico térmico entre as condições avaliadas. Em particular, a condição com espaçamento de 50 mm tende a favorecer uma maior complexidade microestrutural e interação local entre os materiais, enquanto a condição de 100 mm promove uma transição mais gradual das propriedades mecânicas ao longo da interface. Comportamento semelhante foi reportado por Kabaldin *et al.* (2023) em compósitos bimetalicos ER70S-6/ER309LSi produzidos por WAAM.

De modo geral, os perfis de microdureza obtidos corroboram os resultados das análises macroestruturais, microestruturais e dos ensaios de dobramento, indicando que a estratégia de deposição adotada foi eficaz na mitigação de gradientes mecânicos abruptos. A presença de transições suaves de dureza ao longo da interface é considerada um fator determinante para o bom desempenho estrutural de componentes cladeados produzidos por MADA, especialmente em aplicações sujeitas a solicitações mecânicas severas ou

carregamentos cíclicos (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; WACKER *et al.*, 2021; SUÁREZ *et al.*, 2022; OZANER *et al.*, 2023).

4.5 Ensaio de dobramento conforme ASTM A264

Os ensaios de dobramento foram realizados conforme a ASTM A264 (ASTM, 2019), com o objetivo de avaliar a integridade do material cladeado. Para cada pré-forma foram ensaiados três corpos de prova, com o revestimento mantido em compressão e o material de base em tração, conforme prescrito pela norma. Esse ensaio é amplamente reconhecido na literatura como um método sensível para avaliar a adesão em materiais cladeados, uma vez que submete a interface a elevados níveis de deformação plástica, especialmente quando o revestimento é mantido em compressão, condição considerada crítica para a detecção de descolamentos interfaciais (TOMAR *et al.*, 2022).

Na pré-forma produzida com distância entre tochas de 100 mm, os três corpos de prova atenderam aos critérios de aceitação da norma, indicando uma ligação por fusão contínua e mecanicamente estável, capaz de acomodar a deformação imposta sem ocorrência de separações interfaciais superiores aos limites estabelecidos pela norma (Figura 4.10 e 4.11). Esse comportamento está em consonância com estudos recentes em MADA multimaterial, que apontam que um maior espaçamento entre fontes de calor tende a reduzir a sobreposição excessiva de ciclos térmicos, favorecendo interfaces mais estáveis e com menores concentrações de tensões residuais WU, B. *et al.*, 2019; WACKER *et al.*, 2021).



Figura 4.10 - Corpos de prova da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 100 mm entre as tochas, após o ensaio de dobramento (como escala adotar largura de 38 mm). Fonte: autor (2026)



Figura 4.11 - Corpos de prova da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 100 mm entre as tochas, após o ensaio de dobramento (como escala adotar espessura de 10 mm). Fonte: autor (2026)

Na pré-forma produzida com distância entre tochas de 50 mm, dois dos três corpos de prova atenderam aos critérios da ASTM A264 (ASTM, 2019), enquanto um corpo de prova foi reprovado (Figura 4.12). A reprovação de um corpo de prova sugere uma maior variabilidade local da integridade interfacial. Esse resultado pode ser associado à maior interação térmica entre os dois arcos, que intensifica os gradientes térmicos e pode levar a flutuações na diluição, na microestrutura da zona parcialmente fundida e no nível de tensões residuais ao longo da interface. Trabalhos recentes relatam que, em estratégias de deposição lado a lado com pequeno espaçamento entre tochas, a proximidade das poças de fusão pode favorecer instabilidades térmicas locais, aumentando a suscetibilidade a descontinuidades pontuais na ligação metalúrgica (GOGULRAJ; RAJAMURUGAN, 2025; JADHAV *et al.*, 2025; YADAV, A. *et al.*, 2025).



Figura 4.12 - Corpos de prova da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 50 mm entre as tochas, após o ensaio de dobramento (como escala adotar largura de 38 mm). Fonte: autor (2026)



Figura 4.13 - Corpos de prova da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 50 mm entre as tochas, após o ensaio de dobramento (como escala adotar espessura de 10mm). Fonte: autor (2026)

De acordo com os critérios normativos da ASTM A264 (ASTM, 2019), que consideram o conjunto aprovado quando pelo menos dois dos três corpos de prova atendem aos limites de separação interfacial, ambas as pré-formas foram classificadas como aprovadas no ensaio de dobramento. Esse resultado indica que, mesmo na condição mais crítica de 50 mm, a adesão metalúrgica obtida por MADA foi globalmente satisfatória, corroborando as observações microestruturais de interface contínua e os perfis de microdureza sem picos abruptos.

Do ponto de vista metalúrgico e estrutural, a diferença de desempenho entre as duas condições reforça a importância do controle da distância entre tochas como parâmetro crítico em deposições multimateriais por MADA. Estudos recentes destacam que estratégias de deposição que promovem uma transição térmica mais gradual tendem a resultar em interfaces mais tolerantes à deformação, com melhor desempenho em ensaios de dobramento e maior confiabilidade em serviço (DEBROY *et al.*, 2018; TOMAR *et al.*, 2022).

Portanto, os resultados dos ensaios de dobramento, analisados em conjunto com as caracterizações microestruturais e de microdureza, indicam que a condição com 100 mm de espaçamento entre tochas apresenta maior robustez interfacial, enquanto a condição de 50 mm, embora normativamente aceitável, mostra-se mais sensível a variações locais do processo. Essa constatação é coerente com a literatura e fornece subsídios importantes para a otimização de estratégias de deposição multimaterial por MADA em aplicações de elevada criticidade.

4.6 Ensaios de dobramento adicionais – avaliação da interface conforme AWS D1.1

Adicionalmente aos ensaios normativos, foram realizados ensaios de dobramento complementares com o objetivo específico de avaliar a integridade da interface entre o aço carbono ER70S-6 e o revestimento em aço inoxidável ER309L-Si. Nesses ensaios, os corpos de prova foram posicionados de modo que, em uma face, o revestimento e o material de base estivessem simultaneamente em tração e, na face oposta, ambos estivessem em compressão, condição não contemplada pela ASTM A264 (ASTM, 2019).

Em outras palavras, a configuração adotada, na qual material de base e revestimento foram simultaneamente solicitados em tração em uma face e em compressão na face oposta, impôs um estado de tensões mais complexo à interface, ampliando a sensibilidade do ensaio à detecção de descontinuidades interfaciais. Embora essa condição não seja contemplada explicitamente pela ASTM A264 (ASTM, 2019), sua aplicação é tecnicamente coerente com abordagens experimentais voltadas à avaliação crítica de interfaces em sistemas cladeados e multimateriais produzidos por MADA (TOMAR *et al.*, 2022; JADHAV *et al.*, 2025).



Figura 4.14 - Corpos de prova retirados da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 50 mm entre as tochas, destinados à realização de dobramentos adicionais para avaliação complementar da integridade interfacial. (como escala adotar largura de 28 mm). Fonte: autor (2026)



Figura 4.15 - Corpos de prova retirados da parede cladeada ER70S-6/ER309L-Si, produzida com espaçamento de 100 mm entre as tochas, destinados à realização de dobramentos adicionais para avaliação complementar da integridade interfacial. (como escala adotar largura de 28 mm). Fonte: autor (2026)

A avaliação das descontinuidades observadas nesses ensaios adicionais foi realizada com base nos critérios de aceitação estabelecidos na AWS D1.1, aplicada por analogia para análise de interfaces soldadas. A norma AWS D1.1 (AWS, 2020c) é reconhecida como uma referência consolidada para a classificação e aceitabilidade de descontinuidades lineares em juntas soldadas submetidas a solicitações mecânicas severas. Estudos recentes têm empregado a AWS D1.1 (AWS, 2020c) como base comparativa na análise de interfaces produzidas por manufatura aditiva a arco, especialmente em situações nas quais não há normas específicas para determinadas configurações de ensaio ou geometrias não convencionais (WU, B. *et al.*, 2019; WACKER *et al.*, 2021).

Nos corpos de prova adicionais da pré-forma produzida com distância entre tochas de 50 mm, foram observadas sete descontinuidades localizadas na região de ligação entre o aço carbono e o aço inoxidável, caracterizadas como trincas ou falta de fusão, todas com comprimento inferior a 3 mm (Figura 4.14). Embora individualmente pequenas, a maior frequência dessas descontinuidades indica uma maior instabilidade interfacial local, possivelmente associada à intensificação da interação térmica entre os dois arcos. A literatura recente aponta que espaçamentos reduzidos entre fontes de calor em estratégias *side-by-side*, *overlapping* podem resultar em sobreposição excessiva de ciclos térmicos, aumento dos gradientes térmicos e flutuações na geometria da poça de fusão, favorecendo a ocorrência de

falta de fusão pontual e trincas de solidificação ou de reaquecimento (AHSAN *et al.*, 2020; GOGULRAJ; RAJAMURUGAN, 2025; JADHAV *et al.*, 2025; YADAV, A. *et al.*, 2025).

Nos corpos de prova adicionais da pré-forma produzida com distância entre tochas de 100 mm, a região de ligação apresentou melhor aspecto, com menor número de descontinuidades (três ocorrências), todas de menor extensão quando comparadas à condição de 50 mm (Figura 4.15). Esse comportamento sugere que o maior espaçamento entre as tochas proporcionou um regime térmico mais estável, com melhor controle da diluição e da solidificação na região interfacial. Estudos recentes em MADA multimaterial indicam que a redução da interferência térmica direta entre passes adjacentes favorece a formação de interfaces mais contínuas e menos suscetíveis a defeitos localizados, especialmente em sistemas dissimilares como aço carbono/aço inoxidável (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; TOMAR *et al.*, 2022).

Considerando os critérios da AWS D1.1 1 (AWS, 2020c) para descontinuidades lineares curtas e não contínuas, os resultados indicam melhor qualidade da interface para a pré-forma produzida com maior distância entre tochas (100mm). Essa diferença reforça as observações dos ensaios normativos ASTM A264 (ASTM, 2019) e está em consonância com os resultados de microestrutura e microdureza, que indicaram gradientes mecânicos mais suaves e ausência de picos abruptos de dureza na interface para essa condição.

Em suma, os ensaios complementares de dobramento demonstram que a distância entre tochas é um parâmetro crítico no controle da integridade interfacial em deposições multimateriais por MADA. O maior espaçamento (100 mm) mostrou-se mais eficaz na mitigação de descontinuidades interfaciais, corroborando tendências apontadas na literatura recente e fornecendo subsídios técnicos relevantes para o projeto e a otimização de estratégias de deposição em aplicações estruturais de elevada criticidade.

4.7 Discussão integrada dos resultados

A análise integrada dos resultados mecânicos, microestruturais e macroestruturais confirma que ambas as pré-formas cladeadas produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) atenderam aos requisitos estabelecidos pela ASTM A264 (ASTM, 2019), evidenciando a formação de uma ligação metalúrgica efetiva entre o aço carbono ER70S-6 e o revestimento em aço inoxidável ER309L-Si. Esse resultado é consistente com estudos recentes que demonstram a viabilidade da MADA para a produção de estruturas multimateriais e cladeadas com integridade interfacial adequada, desde que o aporte térmico e a estratégia de deposição sejam cuidadosamente controlados (DEBROY *et al.*, 2018; AHSAN *et al.*, 2020; NAGALLAPATI *et al.*, 2023).

A aplicação complementar dos critérios da AWS D1.1 (AWS, 2020c) para avaliação de *claddings* produzidos por manufatura aditiva, mostrou-se particularmente útil para uma análise mais rigorosa da interface sob diferentes estados de solicitação mecânica. Essa abordagem ampliada permitiu identificar diferenças qualitativas entre as pré-formas, especialmente no que se refere à ocorrência de descontinuidades localizadas na região de ligação, aspecto frequentemente reportado como crítico em sistemas dissimilares produzidos por processos a arco elétrico com elevado aporte térmico (DEBROY *et al.*, 2018;).

Os resultados indicam de forma consistente que a redução da distância entre as tochas de deposição intensifica o aporte térmico entre os arcos, elevando o aporte térmico local e os gradientes térmicos na região interfacial. Essa condição favorece a formação de tensões residuais mais elevadas e amplia a suscetibilidade à ocorrência de descontinuidades, como trincas e regiões de falta de fusão localizada. Fenômenos semelhantes têm sido reportados em estudos recentes envolvendo deposição multi-tocha ou deposição sequencial próxima, nos quais a superposição térmica excessiva compromete a estabilidade metalúrgica da interface (DEBROY *et al.*, 2018; KOHLER *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2021).

A pré-forma produzida com distância entre tochas de 100 mm apresentou desempenho superior, caracterizado por menor número e menor extensão de descontinuidades interfaciais nos ensaios de dobramento complementares. Esse comportamento pode ser atribuído à maior dissipação térmica entre as deposições do material de base e do revestimento, resultando em ciclos térmicos mais moderados, menor extensão da zona parcialmente fundida e gradientes de dureza mais suaves na interface. Resultados análogos foram observados por autores que destacam a importância do espaçamento entre passes e do controle térmico intercamadas para a mitigação de defeitos e para a obtenção de interfaces mais estáveis em sistemas multimateriais produzidos por DED a arco (DEBROY *et al.*, 2018; JADHAV *et al.*, 2025).

Dessa forma, os resultados deste estudo demonstram que o espaçamento entre as tochas constitui um parâmetro de processo crítico no contexto da MADA multi-tocha, influenciando diretamente o aporte térmico efetivo, a integridade da ligação metalúrgica e a qualidade final da interface aço carbono–aço inoxidável. A combinação de critérios normativos clássicos, como a ASTM A264 (ASTM, 2019), com abordagens complementares baseadas em códigos de soldagem estrutural, como a AWS D1.1 (AWS, 2020c), mostrou-se uma estratégia robusta para a avaliação de *claddings* produzidos por manufatura aditiva, contribuindo para o avanço do entendimento técnico e para a qualificação industrial desse tipo de aplicação.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo geral avaliar, sob os pontos de vista metalúrgico e mecânico, a adesão e a integridade da interface entre aço carbono e aço inoxidável em paredes cladeadas e multimateriais produzidas por manufatura aditiva por deposição a arco (MADA).

A partir das análises microestruturais, composicionais e mecânicas, os principais resultados permitem estabelecer as conclusões:

1. A viabilidade da produção de pré-formas cladeadas e multimateriais por MADA com deposição coordenada por duas tochas sincronizadas, apresentando boa estabilidade geométrica, adequada sobreposição entre cordões e ausência de defeitos macroscópicos de falta de fusão entre camadas.
2. A formação de uma interface metalurgicamente contínua entre o aço carbono ER70S-6 e o aço inoxidável ER309L-Si, caracterizada por fusão adequada, diluição controlada e ausência de descontinuidades contínuas ao longo da região interfacial. Os ensaios de dobramento guiado confirmaram a integridade do cladding nas duas condições avaliadas.
3. A distância entre as tochas exerceu influência direta na qualidade interfacial, sendo a condição com espaçamento de 100 mm associada à menor incidência e menor extensão de descontinuidades quando comparada ao espaçamento de 50 mm.
4. Do ponto de vista microestrutural, identificou-se no aço carbono microestrutura bainítica com presença de martensita e crescimento de grão nas regiões próximas à interface. No revestimento inoxidável, constatou-se microestrutura predominantemente austenítica com presença de ferrita delta e morfologia dendrítica bem definida. A interface apresentou morfologia irregular e contínua, típica de processos com fusão parcial e diluição controlada.
5. As análises por EDS confirmaram a composição química do material de base e do revestimento, além de evidenciarem a diluição química e a redistribuição composicional na região interfacial.
6. Os mapas de microdureza revelaram gradientes contínuos entre metal de base, interface e revestimento, sem picos abruptos de dureza na região interfacial, indicando ausência significativa de fases frágeis. Também foi observada variação de dureza ao longo da direção de construção, associada aos ciclos térmicos do processo.

Em suma, os resultados demonstram que a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco é uma tecnologia adequada para a produção de estruturas cladeadas aço carbono/aço inoxidável, desde que haja controle rigoroso dos parâmetros de processo, em especial da distância entre as tochas e do aporte térmico associado. A condição com maior espaçamento entre tochas mostrou-se mais favorável à integridade interfacial, destacando esse parâmetro como variável-chave no projeto e na otimização de sistemas multimateriais produzidos por MADA.

Por fim, conclui-se que o estudo contribui para o entendimento dos mecanismos metalúrgicos envolvidos na formação da interface em estruturas multimateriais e cladeadas produzidas por MADA, fornecendo subsídios técnicos relevantes para a aplicação industrial do processo e para o desenvolvimento de estratégias de deposição mais robustas em sistemas de materiais dissimilares.

CAPÍTULO VI

TRABALHOS FUTUROS

Como forma de expandir os resultados obtidos no trabalho apresentado, é proposto como continuidade do desenvolvimento, realizar as seguintes ações como trabalhos futuros:

- A investigação do efeito de diferentes combinações de materiais dissimilares, incluindo aços inoxidáveis ferrítico-austeníticos e ligas de níquel;
- A avaliação da influência de estratégias de deposição alternativas, como variação de tecimento, sequenciamento de passes e controle adaptativo de parâmetros;
- A realização de ensaios mecânicos adicionais, incluindo fadiga, impacto e ensaios em alta temperatura, visando ampliar a avaliação do desempenho estrutural das interfaces cladeadas;
- Fabricação de peças via MADA em multimateriais;
- E o desenvolvimento de modelos numéricos termo-metalúrgicos para previsão do comportamento microestrutural e dos gradientes de propriedades em sistemas MADA multimateriais.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures**. Materials Park, 2018. [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(18\)30282-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(18)30282-4)

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, 2011.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A264/A264M**: Standard Specification for Stainless Chromium-Nickel Steel-Clad Plate. West Conshohocken, 2019.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A20/A20M**: Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels. West Conshohocken, 2020.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A6/A6M**: Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling. West Conshohocken, 2024a.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A6/A6M**: Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling. West Conshohocken, 2024b.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E165/E165M-23**. Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry, 2023, 19p.

ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section IX**: Welding, Brazing, and Fusing Qualifications. New York, 2002.

AWS. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.18/A5.18M**: Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. Miami, 2020a.

AWS. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.9/A5.9M**: Specification for Stainless Steel Bare Welding Electrodes and Rods. Miami, 2020b.

AWS. AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M**: Structural Welding Code – Steel. Miami: American Welding Society, 2020c.

AHSAN, M. R. *et al.* Fabrication of bimetallic additively manufactured structure (BAMS) of low carbon steel and 316L austenitic stainless steel with wire+ arc additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 26, n. 3, p. 519-530, 2020. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2018-0235>

BENEDETTI FILHO, E. *et al.* **Desempenho mecânico de ligas de aço-carbono fabricadas por Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA)**. 2024. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.384>

BOUSSINOT, G. *et al.* Laser powder bed fusion of eutectic Al–Ni alloys: Experimental and phase-field studies. **Materials & Design**, v. 198, p. 109299, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109299>

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

DASS, A.; MORIDI, A. State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. **Coatings**, v. 9, n. 418, 2019. <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>

DAVIS, J. R. **Stainless steels**. Materials Park: ASM International, 1994.

DEBROY, Tarasankar *et al.* Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in materials science**, v. 92, p. 112-224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

DOS SANTOS PAES, Luiz Eduardo *et al.* Modeling layer geometry in directed energy deposition with laser for additive manufacturing. **Surface and Coatings Technology**, v. 409, p. 126897, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126897>

GANESAN, S. *et al.* Thermal management and interface integrity in multi-material wire arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 47, 102286, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102286>

GANESAN, G.; *et al.* Exploring heterogeneous steel alloys through multi-wire arc additive manufacturing. **Procedia Structural Integrity**, Amsterdam, v. 71, p. 438–444, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.059>

GARG, J; SINGH, K0. Slag recycling in submerged arc welding and its effects on the quality of stainless steel claddings. **Materials & Design**, v. 108, p. 689-698, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.028>

GOGULRAJ, G.; RAJAMURUGAN, G. Overlapped weld bead analysis on dissimilar duplex stainless steel-2507 and inconel-625 using WAAM-CMT process. **Results in Engineering**, p. 107290, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107290>

- GOLDSTEIN, J. I. *et al.* **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
- HERZOG, D. *et al.* Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**, Oxford, v. 117, p. 371–392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- HUANG, Y. *et al.* Double-wire arc additive manufacturing of AlCoFeNi eutectic high entropy alloy with balanced strength and plasticity. **Materials Letters**, v. 363, p. 136312, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136312>
- ISO/ASTM. ISO/ASTM 52900:2021 – **Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary**. Geneva: ISO; West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- JADHAV, Sainand *et al.* Recent progress and scientific challenges in wire-arc additive manufacturing of metallic multi-material structures. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 9, n. 8, p. 284, 2025. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080284>
- KABALDIN, Y. *et al.* Microstructure, phase composition, and mechanical properties of a layered bimetallic composite ER70S-6-ER309LSI obtained by the WAAM method. **Metals**, v. 13, n. 5, p. 851, 2023. <https://doi.org/10.3390/met13050851>
- KÖHLER, Markus *et al.* Wire and arc additive manufacturing of aluminum components. **Metals**, v. 9, n. 5, p. 608, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9050608>
- LIU, Jienan *et al.* Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 1, p. 149-198, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>
- LEHMANN, F. *et al.* Large-scale metal additive manufacturing – A holistic review of the state of the art and challenges. **Additive Manufacturing**, v. 55, 102835, 2022. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1971427>
- LONG, Ping *et al.* Microstructure evolution and mechanical properties of a wire-arc additive manufactured austenitic stainless steel: Effect of processing parameter. **Materials**, v. 14, n. 7, p. 1681, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14071681>
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BACARESE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2013.
- MANSOR, M. S. M. *et al.* Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies. **Elsevier Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 2478-2499, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.170>

MONTEVECCHI, Filippo et al. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement. **Manufacturing Letters**, v. 17, p. 14-18, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.06.004>

NAGALLAPATI, Vishwanath et al. Active and passive thermal management in wire arc additive manufacturing. **Metals**, v. 13, n. 4, p. 682, 2023. <https://doi.org/10.3390/met13040682>

NATESAN, Nandan et al. Design and analysis of robot and fixture pedestal for OTC FD-V8 MAG welding robot. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2023. p. 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2601/1/012008>

OZANER, Ozan Can; KLOBČAR, Damjan; SHARMA, Abhay. Machining strategy determination for single-and multi-material wire and arc additive manufactured thin-walled parts. **Materials**, v. 16, n. 5, p. 2055, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16052055>

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**: melhor entendimento, melhor desempenho. Belo Horizonte: Artliber Editora, 2008.

SILVA, L. J. **Near-Immersion Active Cooling for Wire + Arc Additive Manufacturing**: From Concept To Application Near-Immersion Active Cooling for Wire + Arc Additive. p. 140, 2019. <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-1394>

SOUZA, Lídia BO et al. Characterization of an austenitic stainless steel preform deposited by wire arc additive manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 123, n. 9, p. 3673-3686, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10382-1>

SUÁREZ, A. *et al.* Microstructure and mechanical properties of mild steel–stainless steel bimetallic structures built using wire arc additive manufacturing. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 38, p. 560–573, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.06.018>

TOMAR, Bunty; SHIVA, S.; NATH, Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. **Materials Today Communications**, v. 31, p. 103739, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103739>

YADAV, Ashish; SRIVASTAVA, Manu; JAIN, Prashant K. Design and fabrication of wire arc additive manufacturing setup and enhanced tailored properties of dissimilar steel additively deposited by WAAM process. In: **Structures**. Elsevier, 2025. p. 108228. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108228>

YADAV, Lalit Kumar et al. Microstructure and mechanical performance of Monel 400 cladding on SS-304 using CMT-WAAM. **Surface and Coatings Technology**, p. 133140, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.133140>

YANG, F. *et al.* Wire arc additive manufacturing of dissimilar alloys: Processing strategies and interfacial phenomena. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 156, p. 463-496, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.10.079>

YANG, T. *et al.* A Review of Diagnostics Methodologies for Metal Additive Manufacturing Processes and Products. **Materials**, v. 14, n. 17, p. 4929, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14174929>

YUSUP, Eliza M. *et al.* A review on the effect of post-weld heat treatment (PWHT) on its thermal analysis and mechanical properties of welded metallic pipe. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 16, n. 2, p. 296-313, 2024. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.02.031>

XIONG, J. *et al.* Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 252, p. 128-136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>

WACKER, Christian *et al.* Geometry and distortion prediction of multiple layers for wire arc additive manufacturing with artificial neural networks. **Applied Sciences**, v. 11, n. 10, p. 4694, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11104694>

WEI, H. L. *et al.* Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components. **Progress in Materials Science**, v. 116, p. 100703, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100703>

WILLIAMS, S. W. *et al.* Wire + arc additive manufacturing. **Materials Science and Technology**, London, v. 32, n. 7, p. 641–647, 2016. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>

WU, Bintao *et al.* Thermal behavior in wire arc additive manufacturing: characteristics, effects and control. In: **Transactions on Intelligent Welding Manufacturing: Volume II No. 2 2018**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 3-18. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3651-5_1

WU, Bintao *et al.* Enhanced interface strength in steel-nickel bimetallic component fabricated using wire arc additive manufacturing with interweaving deposition strategy. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 52, p. 226-234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.019>

WU, Q. *et al.* Residual stresses in wire-arc additive manufacturing—Hierarchy of influential variables. **Additive Manufacturing**, v. 35, p. 101355, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101355>

ZHANG, Chi *et al.* Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. **Materials Science and Engineering: A**, v. 764, p. 138209, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>