

PAULO CÉSAR SANTOS GONÇALVES

**MANUFATURA ADITIVA DE PAREDE FINA DE AÇO
INOXIDÁVEL DUPLEX VIA DEPOSIÇÃO A ARCO
COM E SEM RESFRIAMENTO ATIVO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
UBERLÂNDIA - MG

2025

PAULO CÉSAR SANTOS GONÇALVES

**MANUFATURA ADITIVA DE PAREDE FINA DE AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX VIA DEPOSIÇÃO A ARCO COM E SEM RESFRIAMENTO
ATIVO**

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

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

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

G635m Gonçalves, Paulo César Santos, 1994-
2025 Manufatura aditiva de parede fina de aço inoxidável duplex via
deposição a arco com e sem resfriamento ativo [recurso eletrônico] / Paulo
César Santos Gonçalves. - 2025.

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.2026.10002>
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

Nelson Marcos Ferreira
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 667, PPGEM				
Data:	28/11/2025	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:00
Matrícula:	12312EMC012				
Nome do Discente:	Paulo César Santos Gonçalves				
Título do Trabalho:	Manufatura Aditiva de Parede Fina de Aço Inoxidável Duplex via Deposição a Arco com e sem Resfriamento Ativo				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Fabricação Digital via Manufatura Aditiva por Deposição a Arco para Componentes da Indústria de O&G				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - UFU; Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - UFMG 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 **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 10:05, 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 **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/11/2025, às 10:07, 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 **Alexandre Queiroz Bracarense, Usuário Externo**, em 28/11/2025, às 11:20, 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 **6843383** e o código CRC **3158BC23**.

Referência: Processo nº 23117.080292/2025-19

SEI nº 6843383

PAULO CÉSAR SANTOS GONÇALVES

**MANUFATURA ADITIVA DE PAREDE FINA DE AÇO INOXIDÁVEL
DUPLEX VIA DEPOSIÇÃO A ARCO COM E SEM RESFRIAMENTO
ATIVO**

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. Alexandre Queiroz Bracarense – UFMG

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – UFU

Uberlândia, 28 de novembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Aos meus **PAIS**, Sandra Izabel dos Santos Gonçalves e Ramiro José Gonçalves, por pelo amor e suporte.

Ao meu **IRMÃO**, Rodolfo Maya Santos Gonçalves pela amizade, conselhos e apoio em todas as circunstâncias.

À minha **NAMORADA** e companheira, Maria Luiza de Campos Souza, pela sua compreensão, amor e suporte em todas as decisões.

Ao meu **ORIENTADOR** Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, pela amizade, confiança, compreensão, ensinamentos e contribuição no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos **FUNCIONÁRIOS** da **FEMEC**, especialmente aos **TÉCNICOS** Leonardo Pereira e Douglas Mazer pelo suporte nas realizações práticas da pesquisa e pela amizade e acolhimento na universidade.

Aos **COLEGAS** do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de processos de Soldagem e Manufatura Aditiva (LAPROSOLDA), Dr. Vladimir, em especial aos engenheiros Diandro Bailoni Fernandes, Edmundo Benedetti e Daniel Dominices de Souza pela ajuda e contribuições nos desenvolvimentos das atividades práticas e troca de todo conhecimento científico.

Ao **CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO** pelo fomento à pesquisa através da bolsa de estudos concedida.

À **COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES)** através de fomento de recursos que prontificaram no desenvolvimento da pesquisa.

À **FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DE MINAS GERAIS (FAPEMIG)**. Ainda incluir algum agradecimento.

GONCALVES, P. C. S. **Manufatura Aditiva de Parede Fina de Aço Inoxidável Duplex via Deposição a Arco com e sem Resfriamento Ativo**. 2025. 134 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal e Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

A Manufatura Aditiva (MA) metálica tem se consolidado como uma tecnologia estratégica para a produção de componentes complexos, promovendo eficiência produtiva e redução de custos frente aos processos convencionais. Entre suas técnicas, o processo Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) destaca-se pela elevada taxa de deposição e aplicabilidade em peças de grande porte. O controle térmico durante a MA metálica é ainda mais relevante em componentes de paredes finas, nos quais gradientes térmicos acentuados e altas temperaturas localizadas podem gerar defeitos como distorções, tensões residuais elevadas e anisotropia mecânica. Nesse contexto, as técnicas de resfriamento desempenham papel crucial. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar estudo comparativo entre a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco do aço inoxidável duplex 2209 depositado por corrente pulsada usando resfriamento ativo em água com resfriamento natural ao ar. O aço inoxidável duplex foi selecionado devido à sua microestrutura bifásica ferrita/austenita, que proporciona excelente combinação de resistência mecânica e à corrosão, amplamente requisitada em aplicações industriais críticas. A metodologia envolveu a deposição de paredes finas de aço inoxidável duplex por manufatura aditiva via processo MADA com corrente pulsada, utilizando arame maciço e gás de proteção argônio com uma pequena porcentagem de gás carbônico. Foram comparadas duas condições de resfriamento: natural ao ar, semelhante ao processo de soldagem convencional e resfriamento ativo por quase imersão (RAQI), que consiste em manter camadas inferiores parcialmente submersas em água ou mistura aquosa para menor aporte de calor. As amostras produzidas passaram por análises microestruturais, ensaios mecânicos (tração, dobramento, impacto Charpy-V e dureza) e caracterizações químicas por EDS e GDS. Os resultados indicaram que ambas as condições de resfriamento permitiram a fabricação de paredes finas com boa integridade estrutural e coesão intercamadas. O processo RAQI apresentou melhor homogeneidade microestrutural, menor dispersão dos resultados mecânicos e redução da anisotropia, enquanto o resfriamento natural exibiu dureza ligeiramente superior devido à heterogeneidade térmica. A análise química confirmou a estabilidade da liga e a preservação do índice PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*), assegurando resistência à corrosão localizada. Conclui-se que o MADA com corrente pulsada é uma alternativa viável para manufatura de componentes em aço inoxidável duplex, e que o resfriamento ativo por quase imersão representa uma estratégia eficiente para aprimorar o controle térmico, reduzir tensões residuais e aumentar a confiabilidade do processo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva por Deposição a Arco; Aço Inoxidável Duplex; Resfriamento Ativo por Quase Imersão; Corrente Pulsada.

GONCALVES, P. C. S. **Duplex Stainless-Steel Thin-Wall Additive Manufacturing via Arc Deposition with and without Active Cooling**. 2025. 134 f. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Metal Additive Manufacturing (AM) has been consolidated as a strategic technology for the production of complex components, promoting production efficiency and cost reduction compared to conventional processes. Among its techniques, the Arc Deposition Additive Manufacturing (WAAM) process stands out for its high deposition rate and applicability in large parts. Thermal control during metal AM is even more relevant in thin-walled components, where steep thermal gradients and high localized temperatures can generate defects such as distortions, high residual stresses, and mechanical anisotropy. In this context, cooling techniques play a crucial role. In this context, the present study aimed to perform a comparative study between the Arc Deposition Additive Manufacturing of 2209 duplex stainless steel deposited by pulsed current using active cooling in water with natural air cooling. Duplex stainless steel was selected due to its two-phase ferrite/austenite microstructure, which provides an excellent combination of mechanical and corrosion resistance, which is widely required in critical industrial applications. The methodology involved the deposition of thin walls of duplex stainless steel by additive manufacturing via MADA process with pulsed current, using solid wire and commercially pure argon shielding gas. Two cooling conditions were compared: natural air cooling, similar to conventional welding processes, and near-immersion active cooling (NIAC), which consists of keeping the lower layers partially submerged in water or an aqueous mixture in order to reduce heat input. The samples produced underwent microstructural analyses, mechanical tests (tensile, bending, Charpy-V impact and hardness) and chemical characterizations by EDS and GDS. The results indicated that both cooling conditions allowed the fabrication of thin walls with good structural integrity and interlayer cohesion. The NIAC process showed better microstructural homogeneity, lower dispersion of mechanical results and reduced anisotropy, while natural cooling exhibited slightly higher hardness due to thermal heterogeneity. The chemical analysis confirmed the stability of the alloy and the preservation of the PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) index, ensuring resistance to localized corrosion. It is concluded that MADA with pulsed current is a viable alternative for the manufacture of duplex stainless-steel components, and that active cooling by near-immersion represents an efficient strategy to improve thermal control, reduce residual stresses and increase process reliability.

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing; Duplex stainless steel; Active Cooling by Near-Immersion; Pulsed Current.

ABREVIATURAS

- AM** – Additive Manufacturing / Manufatura Aditiva
- CFC** – Cubic Face-Centered / Estrutura Cúbica de Faces Centradas
- CAM** – Computer-Aided Manufacturing / Fabricação Auxiliada por Computador
- CC** – Corrente Contínua / Constant Current
- CCC** – Cubic Body-Centered / Estrutura Cúbica de Corpo Centrado (Ferrita)
- CP** – Corrente Pulsada / Pulsed Current
- DED** – Directed Energy Deposition / Deposição por Energia Direcionada
- DED/WAAM** – Técnicas de deposição por energia direcionada
- EBM** – Electron Beam Melting / Fusão por Feixe de Elétrons
- EDS** – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
- GDS** – Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy
- 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
- LPBF/EBM** – Técnicas de fusão em leito de pó (laser e elétron)
- MADA** – Manufatura Aditiva por Deposição / Wire Arc Additive Manufacturing
- MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura
- PAW** – Plasma Arc Welding / Soldagem a Arco por Plasma
- PREN** – Pitting Resistance Equivalent Number / Número Equivalente de Resistência ao Pitting
- Resfriamento Ativo** – Remoção controlada de calor por sistemas artificiais para otimizar microestrutura e propriedades
- Resfriamento Natural** – Dissipação de calor por convecção e radiação sem intervenção externa
- SCC** – Stress Corrosion Cracking / Corrosão sob Tensão
- SLA** – Stereolithography / Estereolitografia
- UVP** – Ultra Violet Products (empresa ou referência histórica de SLA)
- WAAM** – Wire Arc Additive Manufacturing / Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
- CAD** – Computer-Aided Design / Projeto Auxiliado por Computador
- ZTA** – Zona Termicamente Afetada / Heat-Affected Zone (HAZ)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	11
1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO II	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 MANUFATURA ADITIVA (MA)	16
2.1.1 Conceito e Histórico da Manufatura Aditiva.....	17
2.1.2 Principais tecnologias de MA	18
2.1.3 Aplicações industriais com metais.....	24
2.2 PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO POR ARCO ELÉTRICO	26
2.2.1 Fundamentos do processo MADA.....	26
2.2.2 Tipos de corrente: contínua e pulsada	29
2.2.3 Circuito controlado e sistema híbrido pulsado	30
2.2.4 Vantagens e limitações do MADA.....	32
2.3 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES	35
2.3.1 Aço inoxidável duplex: microestrutura bifásica (ferrita/austenita)	35
2.3.2 Propriedades mecânicas e resistência à corrosão	38
2.3.3 Comportamento térmico e soldabilidade	41
2.3.4 Aplicações industriais.....	43
2.4 INFLUÊNCIA DA CORRENTE PULSADA NA QUALIDADE DA DEPOSIÇÃO	45
2.4.1 Comparação entre corrente contínua e pulsada no processo de deposição	45
2.4.2 Efeitos sobre penetração, diluição, formação de poros e estabilidade do arco.....	47
2.5 TÉCNICAS DE RESFRIAMENTO NO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA	48
2.5.1 Conceito de resfriamento ativo vs. resfriamento natural.....	48
2.5.2 Tipos de resfriamento ativo	50
2.5.3 Influência do resfriamento na microestrutura, tensões residuais e integridade dimensional	51
2.6 FORMAÇÃO DE PAREDE FINA EM MANUFATURA ADITIVA METÁLICA	52
2.6.1 Desafios na construção de geometrias finas e altas	52
2.6.2 Controle dimensional e defeitos comuns.....	54
2.6.3 Parâmetros críticos para estabilidade do cordão.....	55

2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS EM PEÇAS PRODUZIDAS VIA MADA.....	57
2.7.1 Propriedades mecânicas (dureza, resistência e tenacidade).....	57
2.7.2 Evolução da microestrutura em função do número de camadas e do resfriamento.....	58
CAPÍTULO III	61
3. MATERIAL E MÉTODOS	61
3.1 METODOLOGIA GERAL	61
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, INSUMOS E ANÁLISE DOS DADOS	63
3.2.1 Aparato e estratégia da deposição de pré-formas.....	63
3.2.2 Metal de adição.....	64
3.2.3 Gás de proteção	64
3.2.4 Aquisição de sinais	65
3.2.5 Avaliação geométrica.....	65
3.2.6 Planejamento experimental.....	67
3.2.7 Ensaio destrutivo.....	74
3.2.8 Ensaio não-destrutivo.....	77
3.2.9 Tratamento, avaliação e análise dos dados	81
CAPÍTULO IV	83
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
4.1 ANÁLISE DE TRAÇÃO	79
4.2 ANÁLISE DE DOBRAMENTO	81
4.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA.....	88
4.4 ANÁLISE DE IMPACTO CHARPY-V	90
4.4.1 Análise das superfícies de fratura	86
4.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	94
4.6 EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO	90
4.7 Análises metalográficas	92
4.9 SÍNTESE DOS RESULTADOS	101
CAPÍTULO V	104
5. CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva (MA), também conhecida como Impressão 3D, tem se consolidado como uma tecnologia inovadora e estratégica na fabricação de componentes metálicos, permitindo maior liberdade geométrica, otimização do uso de matéria-prima e redução de custos e tempos de produção em comparação aos métodos tradicionais de usinagem e conformação (GIBSON *et al.*, 2021; ISO/ASTM 52900:2021). Entre as diversas técnicas de MA metálica, destacam-se processos como a fusão em leito de pó a laser (*Laser Powder Bed Fusion – LPBF*), fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting – EBM*) e deposição por energia direcionada (*Directed Energy Deposition – DED*). Dentro dessa última categoria, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA ou *Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM*) tem atraído atenção crescente devido à sua elevada taxa de deposição, menor custo operacional e capacidade de produzir componentes metálicos de grande porte e alta complexidade geométrica (TENG *et al.*, 2004; FRAZIER, 2014; JIN *et al.*, 2020).

A MADA combina princípios de soldagem a arco, utilizando arames metálicos fundidos por arco elétrico, com a lógica construtiva da manufatura aditiva, permitindo a fabricação camada sobre camada de peças volumosas com redução do desperdício de material. Dependendo da tecnologia empregada, o processo pode utilizar diferentes variantes, como os processos *Gas Metal Arc (GMA)*, *Gas Tungsten Arc (GTA)* ou *Plasma Arc (PA)*, cada uma com características próprias de estabilidade do arco, taxa de deposição e qualidade superficial (DING *et al.*, 2015; JIN *et al.*, 2020). A escolha do tipo de corrente elétrica, seja contínua ou pulsada, também exerce papel fundamental no controle térmico do cordão depositado, estabilidade do arco, extensão da zona termicamente afetada e, conseqüentemente, na microestrutura e nas propriedades mecânicas da peça final (DUARTE *et al.*, 2021; KUMAR, 2024).

Entre os materiais metálicos empregados em MA, o aço inoxidável duplex se destaca por sua microestrutura bifásica, composta aproximadamente por 50 % de ferrita (estrutura

cúbica de corpo centrado – CCC) e 50 % de austenita (estrutura cúbica de faces centradas – CFC), conferindo uma combinação equilibrada de resistência mecânica, tenacidade e elevada resistência à corrosão (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024; UNIFIED ALLOYS, 2025). Essa configuração estrutural permite que o material suporte ambientes severos, incluindo soluções contendo cloretos, ácidos e atmosferas marinhas, tornando-o amplamente aplicável em setores críticos como petróleo e gás, naval, petroquímico e dessalinização (AZO MATERIALS, 2005; FRITZ; MOE, 2020).

A manufatura aditiva metálica tem se mostrado igualmente promissora na indústria aeroespacial, onde a otimização estrutural e a redução de peso são fatores determinantes de desempenho e economia de combustível. Um exemplo emblemático é o bico injetor de combustível da GE Aviation (Figura 1.1), produzido por manufatura aditiva e amplamente reconhecido como um marco no uso industrial da tecnologia. O componente, antes formado por 20 peças usinadas e soldadas, passou a ser fabricado como uma única peça, apresentando redução de 25 % no peso e cinco vezes mais durabilidade, o que resultou em significativa economia financeira e aumento de eficiência operacional (SAUNDERS, 2021).



Figura 1.1 - Bico injetor de combustível da GE Aviation. Fonte: Saunders (2021)

O comportamento térmico do aço duplex é sensível à exposição a temperaturas intermediárias, como 650–950 °C, que podem induzir a precipitação da fase sigma (σ), prejudicando a tenacidade e a resistência à corrosão, e à fragilização a 475 °C, conhecida como *spinodal decomposition*, que reduz a ductilidade da ferrita (TWI, 2021; KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024). Para manter o equilíbrio microestrutural desejado, recomenda-se o controle rigoroso do aporte térmico durante processos de soldagem e tratamentos térmicos, incluindo estratégias como soldagem pulsada ou resfriamento controlado entre passes. O resfriamento rápido após a deposição contribui para preservar a proporção ferrita/austenita,

evitando fragilização, deformações e perda de resistência à corrosão localizada (RAMESH *et al.*, 2021).

O controle térmico durante a MA metálica é ainda mais relevante em componentes de paredes finas, nos quais gradientes térmicos acentuados e altas temperaturas localizadas podem gerar defeitos como distorções, tensões residuais elevadas e anisotropia mecânica (DEBROY *et al.*, 2018; TONELLI *et al.*, 2021). Nesse contexto, as técnicas de resfriamento desempenham papel crucial. O resfriamento natural, baseado na dissipação de calor por convecção e radiação, é simples e de baixo custo, mas apresenta limitação no controle da taxa de resfriamento, podendo favorecer a formação de grãos colunares, maior extensão da zona termicamente afetada e instabilidades geométricas (MONTEVECCHI *et al.*, 2018). Por outro lado, o resfriamento ativo envolve a utilização de sistemas artificiais para controlar a taxa de perda de calor, reduzindo distorções, tensões residuais e promovendo microestruturas mais homogêneas e refinadas, com melhor desempenho mecânico (PHULL; KUMAR; WALIA, 2018; SHRESTHA; SIMSIRIWONG; SHAMSAEI, 2019).

A ampliação de mercado constitui uma via estratégica de crescimento financeiro para as organizações, ampliando receita e fortalecendo a posição competitiva. Conforme aponta a Atluri, Rao e Sahni (2025), uma transformação bem-sucedida no setor industrial poderia gerar entre US\$ 0,8 e 2 trilhões de valor total para os acionistas, sendo cerca de US\$ 0,3 a 0,9 trilhões provenientes de crescimento de receitas (3 a 10 %) e mais US\$ 0,3 a 0,7 trilhões originados da expansão de margem por eficiência (4 a 9 %) (ATLURI; RAO; SAHNI, 2025). Neste sentido, a alocação de recursos financeiros para suporte da expansão, seja entrada em novos canais, diversificação de produtos ou internacionalização, torna-se imperativa para a concretização de retornos expressivos e sustentáveis.

No que diz respeito ao investimento em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), as cifras demonstram que o setor de manufatura desempenha papel central na geração de inovação e, conseqüentemente, na criação de valor econômico-financeiro. De acordo com relatório do *McKinsey Global Institute*, as indústrias de manufatura eram responsáveis entre 67 % e 89 % dos gastos empresariais em P&D em determinados países em 2008, o que evidencia o elevado grau de investimento requerido para manter vantagem competitiva (MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE, 2012). Além disso, dados da *International Energy Agency* apontam que o investimento corporativo em P&D no setor de energia tecnológica aumentou cerca de 40 % desde 2010, alcançando aproximadamente US\$ 90 bilhões em 2019 (IEA, 2020). Logo, o dinheiro aplicado em PD&I não é mera despesa, mas componente essencial da estratégia que sustenta crescimento e diferenciação.

Por fim, em termos de redução de custos e disponibilidade de peças sobressalentes, a gestão eficaz desses recursos financeiros também se revela crítica. A análise de dados e

tecnologias digitais podem reduzir custos significativos, por exemplo, ao automatizar processos de soldagem, reduzir defeitos e aumentar margens, e ao mesmo tempo abrir novas oportunidades de mercado (ATLURI; RAO; SAHNI, 2025). Já para o mercado de peças sobressalentes, relatórios do setor estimam que a otimização de inventário global para essas peças atingiu US\$ 2,1 bilhões em 2024, com projeção para dobrar até 2033, em grande parte impulsionada pela necessidade de reduzir tempos de inatividade e custos operacionais nas cadeias produtivas (DATA INTELO, 2025). Assim, o dinheiro investido em uma gestão inteligente de peças sobressalentes, combinado com processos eficientes, pode traduzir-se em menor custo operacional, maior disponibilidade de produto e, por fim, melhor desempenho financeiro.

A relevância da presente investigação está na interseção entre a tecnologia MADA, a aplicação de corrente pulsada e a gestão térmica durante a deposição de aço inoxidável duplex. Apesar de avanços recentes, ainda existem lacunas quanto à influência comparativa de resfriamento ativo e natural na microestrutura, propriedades mecânicas e integridade dimensional de paredes finas produzidas por MADA. Compreender esses efeitos é essencial para otimizar processos, aumentar a qualidade das peças produzidas e ampliar a aplicabilidade industrial da manufatura aditiva, garantindo maior confiabilidade, desempenho funcional e eficiência produtiva.

Neste contexto, o presente estudo é relevante por investigar comparativamente o impacto das estratégias de resfriamento na deposição por corrente pulsada de aço inoxidável duplex, possibilitando avaliar o impacto do aporte de calor em camadas inferiores subsequentes, visto que o processo de resfriamento mantém as camadas na temperatura do fluido, geralmente temperatura ambiente. A análise das diferenças microestruturais, geométricas e mecânicas entre as condições de resfriamento pode contribuir para o aprimoramento do processo MADA, oferecendo subsídios técnicos para a produção de peças com maior controle dimensional, integridade estrutural e desempenho funcional. Assim, o trabalho se insere no esforço de ampliar o conhecimento técnico-científico na área de manufatura aditiva, promovendo avanços tanto no campo acadêmico quanto na aplicação industrial da tecnologia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar estudo comparativo entre a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco do aço inoxidável duplex 2209 depositado por corrente pulsada usando resfriamento ativo por quase imersão (RAQI) em água com resfriamento natural ao ar.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estabelecer os parâmetros operacionais do processo MADA de forma a garantir pré-formas (paredes) com integridade e geometria adequadas;
- Analisar a influência do resfriamento ativo e natural sobre a microestrutura e a proporção ferrita/austenita nas paredes finas de aço inoxidável duplex produzidas via MADA com corrente pulsada; e
- Comparar as propriedades mecânicas e a integridade dimensional das peças obtidas sob ambas as condições de resfriamento, identificando vantagens e limitações de cada método.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura, contextualizada à pesquisa no que tange os principais aspectos relacionados à Manufatura Aditiva (MA) de aços inoxidáveis duplex via MADA, com ênfase nas diferenças entre o uso de corrente pulsada e o impacto de estratégias de resfriamento, natural e ativo, sobre a qualidade do material depositado. Foram abordados temas como os fundamentos do processo MADA, características do aço inoxidável duplex, influência dos parâmetros térmicos e elétricos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas, além dos desafios e avanços recentes na construção de paredes finas. Dessa forma, pretende-se oferecer um panorama técnico que fundamente a análise comparativa entre as diferentes condições de processamento avaliadas no presente estudo.

2.1 Manufatura Aditiva (MA)

A Manufatura Aditiva, também conhecida como Impressão 3D, representa um conjunto de processos de fabricação baseados na adição sucessiva de material até a obtenção da geometria final, diferindo dos métodos convencionais por proporcionar maior liberdade de design e eficiência no uso de matéria-prima (GIBSON *et al.*, 2021; ISO/ASTM 52900:2021). Seu desenvolvimento tecnológico remonta à década de 1980, com a estereolitografia, evoluindo para tecnologias avançadas como a fusão em leito de pó e a deposição por energia direcionada, que viabilizam a produção de peças metálicas com alto desempenho (FRAZIER, 2014; PARANDOUSH; LIN, 2017).

Neste contexto, o aborda-se os fundamentos e a evolução histórica da MA, apresentando as principais tecnologias empregadas na fabricação de componentes metálicos, com destaque para a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Também se apresenta aplicações industriais em diferentes setores, como o aeroespacial, automotivo,

biomédico e de energia, evidenciando o papel estratégico da MA na inovação, customização e melhoria do desempenho de peças e sistemas.

2.1.1 Conceito e Histórico da Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (MA, ou *Additive Manufacturing* - AM) constitui um conjunto avançado de tecnologias de fabricação que operam pela adição controlada de material em camadas sucessivas, conforme instruções provenientes de um modelo tridimensional digital (CAD). O processo segue a lógica inversa da manufatura subtrativa tradicional — como usinagem, fresagem ou torneamento —, nas quais o material é removido de um bloco sólido para obtenção da geometria final. Na MA, a peça é construída camada por camada, utilizando apenas o volume de material necessário, o que resulta em menor desperdício, maior eficiência energética e otimização do uso de recursos (ISO/ASTM 52900:2021; GIBSON *et al.*, 2021).

Além da eficiência material, a MA destaca-se pela liberdade geométrica sem precedentes, permitindo a fabricação de estruturas complexas, componentes com topologias otimizadas, gradientes de propriedades, canais internos de refrigeração e configurações impossíveis de serem obtidas por processos convencionais. Essa capacidade tem impulsionado inovações em engenharia leve (*lightweight design*), biomateriais personalizados e sistemas com múltiplos materiais (EYERS; POTTER, 2017).

O conceito moderno da manufatura aditiva surgiu na década de 1980, com o desenvolvimento da estereolitografia (SLA) por Chuck Hull (1984), considerada a primeira tecnologia comercial de impressão 3D (HULL; UVP, 1986). Inicialmente restrita à prototipagem rápida, a técnica visava acelerar o ciclo de desenvolvimento de produtos e reduzir custos de validação. Com a evolução dos materiais de alta performance e sistemas de deposição de energia controlada, a MA expandiu-se para a produção funcional, abrangendo metais, polímeros, cerâmicas e compósitos de matriz híbrida, em diferentes categorias de processos com níveis variados de resolução, velocidade e custo (EYERS; POTTER, 2017).

O avanço expressivo da MA foi impulsionado pela convergência entre engenharia digital e manufatura de precisão. O desenvolvimento de softwares de modelagem paramétrica, simulação e otimização topológica (CAD/CAE), aliado à integração com sistemas CNC e ao uso de fontes de energia de alta densidade, como lasers de fibra, feixes de elétrons e arcos de plasma de corrente controlada, possibilitou controle térmico e geométrico refinado durante a deposição, garantindo alta precisão dimensional, repetibilidade e integridade metalúrgica (GEBHARDT, 2012).

A partir dos anos 2000, processos como a fusão a laser em leito de pó (*LPBF – Laser*

Powder Bed Fusion) e a deposição por energia direcionada (*DED – Directed Energy Deposition*) transformaram a produção metálica, permitindo a obtenção de microestruturas homogêneas, zonas de fusão controladas e propriedades mecânicas comparáveis ou superiores às da metalurgia convencional (FRAZIER, 2014; PARANDOUSH; LIN, 2017). Essas tecnologias consolidaram a MA como ferramenta estratégica para indústrias de alta exigência tecnológica, como a aeroespacial, automotiva, biomédica e de energia, nas quais redução de peso, eficiência estrutural e customização em massa são requisitos críticos de desempenho e sustentabilidade.

Nos últimos anos, observa-se uma tendência de integração da manufatura aditiva com processos convencionais, originando o conceito de fabricação híbrida. Essa abordagem combina a flexibilidade geométrica da MA com a precisão da usinagem, tratamentos térmicos localizados e acabamentos superficiais de alta qualidade, resultando em componentes multifuncionais e estruturas de desempenho superior. Tal convergência tecnológica representa um marco na transição para a Indústria 4.0, promovendo uma produção inteligente, conectada e sustentável, onde o controle digital de cada etapa possibilita personalização em larga escala e melhor aproveitamento de materiais e energia (GEBHARDT, 2012; FRAZIER, 2014).

2.1.2 Principais tecnologias de MA

De acordo com a classificação da ISO/ASTM 52900:2021, a manufatura aditiva (MA) compreende sete categorias principais: fotopolimerização em cuba, jateamento de material, jateamento de aglutinante, extrusão de material, fusão em leito de pó, deposição por energia direcionada e laminação de folhas. No caso específico dos metais, destacam-se sobretudo as técnicas de fusão em leito de pó e deposição por energia direcionada, amplamente aplicadas em componentes de alta complexidade e desempenho.

A Figura 2.1 apresenta uma visão geral das principais técnicas de manufatura aditiva metálica, destacando diferenças fundamentais entre fusão em leito de pó (LPBF e EBM), deposição por energia direcionada (DED) e *Binder Jetting*.

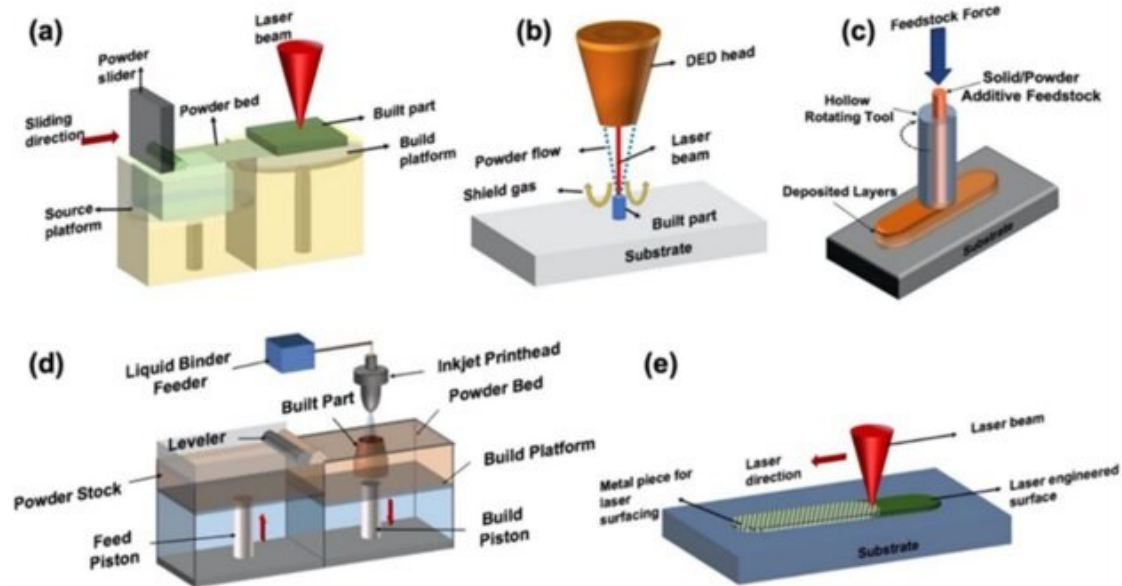


Figura 2.1 - Diagrama esquemático para (a) LPBF, (b) processamento de AM em leito de fusão DED, (c) processamento de estado sólido por MA com fricção e agitação, (d) processamento de MA em fase mista com impressão a jato de ligante e (e) engenharia de superfície a laser via MA. Fonte: Yang *et al.* (2021)

A fusão em leito de pó a laser (*LPBF – Laser Powder Bed Fusion*) é uma das técnicas mais consolidadas da manufatura aditiva metálica. Nesse processo, um feixe de laser de alta potência varre seletivamente uma fina camada de pó metálico depositada sobre uma plataforma de construção, fundindo as partículas de acordo com as seções transversais do modelo digital CAD (TENG *et al.*, 2004). Após a fusão de cada camada, a plataforma é rebaixada, e uma nova camada de pó é espalhada, repetindo-se o ciclo até a formação completa da peça tridimensional.

Essa técnica destaca-se pela elevada precisão dimensional, excelente acabamento superficial e capacidade de fabricar geometrias complexas com paredes finas e canais internos. Por essa razão, a LPBF é amplamente empregada na fabricação de componentes aeronáuticos, implantes ortopédicos personalizados, moldes industriais e turbinas de alta performance. Além disso, possibilita o controle refinado da microestrutura e das propriedades mecânicas, uma vez que o perfil térmico pode ser ajustado por parâmetros como potência do laser, velocidade de varredura e espessura da camada.

Uma variação dessa tecnologia é a fusão em leito de pó por feixe de elétrons (*EBM – Electron Beam Melting*), que utiliza feixes de elétrons como fonte de energia, operando em ambiente de vácuo (GARDAN, 2016). O EBM permite maiores taxas de deposição e reduz significativamente o risco de oxidação, sendo especialmente indicado para ligas reativas,

como titânio e suas ligas. Entretanto, a rugosidade superficial é geralmente superior à obtida na LPBF, exigindo etapas posteriores de acabamento.

Outra categoria amplamente utilizada é a deposição por energia direcionada (*DED – Directed Energy Deposition*), que difere da LPBF por alimentar continuamente o material, em forma de pó ou arame, diretamente na zona de fusão, onde é fundido por uma fonte de energia, geralmente laser, feixe de elétrons ou arco elétrico (DEBROY *et al.*, 2018). Essa técnica é particularmente versátil, permitindo a reparação de componentes danificados, o revestimento funcional de superfícies metálicas e até mesmo a construção de peças de grande porte.

Entre as variações da DED, destaca-se o Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), que se baseia em processos de soldagem convencionais, como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), para fundir o arame metálico camada por camada (MANSOR *et al.*, 2024). O MADA apresenta altas taxas de deposição, baixo custo de matéria-prima e maior escalabilidade, sendo ideal para a fabricação de estruturas metálicas de grande volume, como seções de embarcações, componentes aeronáuticos e partes estruturais de veículos pesados. No entanto, apresenta menor precisão geométrica e requer usinagem posterior para atingir tolerâncias dimensionais rigorosas.

Além dessas técnicas, outras abordagens têm sido empregadas conforme o tipo de material e aplicação final: 1. *Binder Jetting*: utiliza um aglutinante líquido para unir seletivamente as partículas de pó metálico, camada por camada, formando uma peça denominada “verde”, que posteriormente é sinterizada para adquirir densidade e resistência (ASSADI *et al.*, 2016). É uma técnica rápida e econômica, embora requeira etapas subsequentes de sinterização e infiltração. 2. *Cold Spray Additive Manufacturing*: baseia-se na aceleração de partículas metálicas a altas velocidades (acima de 500 m/s), promovendo sua deformação plástica e aderência à superfície de substrato, sem fusão térmica significativa. Isso evita tensões residuais e distorções térmicas, sendo ideal para revestimentos ou reparos estruturais de alta integridade (ASSADI *et al.*, 2016).

Durante os processos de fusão e solidificação rápida característicos da MA metálica, especialmente em ligas ferrosas e austeníticas, diferentes morfologias de austenita podem ser formadas:

- Austenita primária: formada diretamente do líquido durante a solidificação;
- Austenita de transformação secundária: originada a partir da transformação da ferrita δ durante o resfriamento;
- Austenita retida: remanescente nos microconstituintes finais devido às elevadas taxas de resfriamento típicas da MA.

A presença e a proporção dessas formas de austenita variam conforme a composição da liga, o gradiente térmico, a taxa de solidificação e as condições de processo (como potência do laser, velocidade de varredura e espessura da camada), influenciando diretamente a microestrutura, a dureza e a resistência mecânica dos componentes produzidos (DEBROY *et al.*, 2018).

Assim, cada tecnologia de manufatura aditiva metálica apresenta vantagens e limitações específicas, relacionadas ao custo, velocidade, precisão geométrica e propriedades microestruturais e mecânicas resultantes do processo.

A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre resumindo as diferenças entre as principais técnicas da MA.

Tabela 2.1 - Diferenças entre Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) e Plasma Arc Welding (PAW). Fonte: elaborado pelo autor (2025), com base em Adaptado de 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 Powder Bed Fusion)	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 (Electron Beam Melting)	Feixe de elétrons	Pó metálico	Vácuo	Alta precisão, porém rugosidade superior à LPBF	Alta	Turbinas, implantes, ligas de titânio.
DED (Directed Energy Deposition)	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.
WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)	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.

A análise comparativa apresentada na Tabela 2.1 evidencia que a seleção do processo de manufatura aditiva metálica (MAM) deve ser fundamentada em um equilíbrio criterioso entre precisão geométrica, taxa de deposição, propriedades microestruturais obtidas e custo operacional. Cada tecnologia apresenta um conjunto específico de vantagens e limitações que determinam sua adequação a diferentes contextos industriais.

Os processos baseados na fusão em leito de pó, como o *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) e o *Electron Beam Melting* (EBM), são particularmente indicados para a produção de componentes de pequeno a médio porte que demandam elevada resolução dimensional, acabamento superficial refinado e controle microestrutural rigoroso (TENG *et al.*, 2004; GARDAN, 2016). Devido à natureza controlada da solidificação e às altas taxas de resfriamento, essas técnicas produzem peças densas e com propriedades mecânicas equivalentes ou superiores às de materiais obtidos por rotas convencionais de fundição ou forjamento. Por essas razões, têm ampla aplicação em ligas de titânio, aços inoxidáveis austeníticos e superligas à base de níquel, com destaque para os setores aeroespacial, biomédico e energético.

Em contrapartida, as tecnologias de deposição por energia direcionada (DED) e Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) se destacam por suas altas taxas de deposição e flexibilidade operacional, permitindo a reparação de componentes metálicos, o revestimento funcional de superfícies e a fabricação de estruturas de grande porte (DEBROY *et al.*, 2018; MANSOR *et al.*, 2024). Apesar de apresentarem acabamento superficial inferior e maior rugosidade, esses métodos são vantajosos quando a produtividade e o volume da peça são fatores prioritários. A combinação com processos convencionais de usinagem de precisão e tratamentos térmicos subsequentes tem permitido melhorar o desempenho final, consolidando a DED e o MADA como alternativas competitivas para a indústria naval, automotiva e de energia.

O processo de *Binder Jetting*, por sua vez, configura-se como uma alternativa econômica e de alta produtividade, sendo amplamente empregado em prototipagem rápida, fabricação de moldes metálicos e peças de baixa exigência estrutural (ASSADI *et al.*, 2016). Seu principal diferencial é o baixo custo por peça e a elevada velocidade de fabricação, embora as etapas de sinterização e infiltração pós-processo ainda representem limitações em termos de densidade final e resistência mecânica.

Portanto, a escolha do processo ideal depende de uma análise integrada que considere o comportamento térmico e metalúrgico da liga empregada, os requisitos dimensionais e funcionais do componente, bem como os custos de produção e acabamento. Essa visão sistêmica é essencial para a aplicação eficiente da manufatura aditiva metálica em ambientes industriais de alto desempenho, nos quais a confiabilidade estrutural, a repetibilidade e a

otimização topológica são fatores determinantes para a viabilidade tecnológica e econômica do processo.

2.1.3 Aplicações industriais com metais

A manufatura aditiva de metais deixou de ser uma ferramenta restrita à prototipagem rápida e passou a se consolidar como uma tecnologia industrial de ponta, capaz de produzir componentes finais de alto desempenho, ferramentas especializadas e estruturas complexas com geometrias impossíveis de serem obtidas por processos convencionais de usinagem, fundição ou conformação plástica. Essa transição de paradigma é impulsionada por significativos avanços em precisão dimensional, repetibilidade, controle microestrutural e eficiência energética das tecnologias baseadas em fusão seletiva a laser (*LPBF – Laser Powder Bed Fusion*) e deposição por energia direcionada (*DED – Directed Energy Deposition*) (LEARY, 2020).

Do ponto de vista econômico, embora o custo unitário da manufatura aditiva metálica ainda seja, em muitos casos, superior ao de processos convencionais para produção em larga escala, sua competitividade aumenta significativamente em cenários de baixo volume, alta complexidade geométrica e elevado grau de customização. Estudos indicam que o custo por peça na MA metálica é fortemente influenciado pelo custo do pó metálico (que pode ser de 5 a 20 vezes superior ao material em barra ou lingote), pelo tempo de construção e pelos custos de pós-processamento. Em contrapartida, há redução expressiva de desperdício de material, ferramental, etapas de montagem e lead time de produção, o que pode resultar em redução global de custos ao longo do ciclo de vida do produto (WOHLERS *et al.*, 2023; THOMPSON *et al.*, 2016).

A liberdade geométrica da MA possibilita reduzir massa e consolidar múltiplas partes em um único componente, minimizando pontos de solda e interfaces críticas. Essa estratégia resulta em menor consumo de combustível, melhor distribuição de tensões e maior eficiência estrutural, sem comprometer a integridade mecânica. Um exemplo emblemático é o bico injetor de combustível da GE Aviation, produzido via LPBF, que substituiu cerca de 20 peças usinadas por uma única estrutura impressa, reduzindo, aproximadamente, 25% do peso e aumentando a durabilidade do componente. Embora o custo de fabricação unitário seja superior ao da peça convencional, a redução no número de etapas produtivas, no tempo de montagem e nos custos de manutenção ao longo da vida útil torna a solução economicamente vantajosa (GE, 2016; LEARY, 2020).

Na indústria automotiva, a manufatura aditiva tem ampliado seu papel tanto no desenvolvimento de protótipos funcionais quanto na produção direta de peças de alto

desempenho. Equipes de engenharia e competição utilizam a MA para fabricar gabaritos, moldes, ferramentas personalizadas e componentes sob demanda, reduzindo significativamente o tempo de ciclo de produção e os custos logísticos. Do ponto de vista de custos, a MA mostra-se particularmente competitiva para produção sob demanda e séries pequenas, nas quais os custos fixos de ferramental e setup da manufatura tradicional tornam-se proibitivos (BOURELL *et al.*, 2010; THOMPSON *et al.*, 2016). Em veículos de competição e superesportivos, peças como coletores de admissão, suportes estruturais e sistemas de escape otimizados são fabricados com canais internos complexos, que favorecem o resfriamento eficiente e a lubrificação direcionada, aprimorando a eficiência energética e a confiabilidade mecânica (BOURELL *et al.*, 2010).

O setor biomédico representa uma das áreas mais promissoras da MA metálica, especialmente pela capacidade de personalização anatômica e controle da microestrutura e porosidade. Ligas como Ti-6Al-4V e Co-Cr-Mo são amplamente utilizadas em processos LPBF e EBM para a produção de implantes ortopédicos personalizados, próteses craniofaciais e instrumentos cirúrgicos de precisão. A fabricação de estruturas porosas tridimensionais, com módulos elásticos e densidades semelhantes aos do osso humano, favorece a osteointegração e reduz o risco de rejeição e o tempo de recuperação (MELCHELS; DOMINGO; BARTOLO, 2012). Essa convergência entre engenharia biomédica e MA tem impulsionado a medicina personalizada e a regeneração tecidual. Embora o custo de fabricação por unidade seja superior ao de implantes padronizados produzidos por fundição ou forjamento, a eliminação de etapas de adaptação cirúrgica, a redução do tempo operatório e a melhora da osteointegração resultam em diminuição dos custos hospitalares totais e melhores desfechos clínicos, tornando a MA economicamente viável nesse contexto (MELCHELS; DOMINGO; BARTOLO, 2012; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2021).

No setor energético e petroquímico, a MA tem sido adotada para a fabricação e reparo de pás de turbinas, válvulas e ferramentas de perfuração, onde há demanda por alta resistência a corrosão, abrasão e temperaturas extremas (SUN *et al.*, 2021; UKOBA *et al.*, 2025). A capacidade de projetar canais internos de resfriamento, geometrias otimizadas e revestimentos funcionais integrados proporciona ganhos expressivos em eficiência térmica e durabilidade. A aplicação de DED e MADA permite reduzir custos de manutenção em até 40–60% quando comparado à substituição completa de componentes críticos, além de reduzir significativamente o tempo de parada de plantas industriais, um fator econômico estratégico em operações contínuas (SUN *et al.*, 2021; BLACKKEY-MILNER *et al.*, 2021).

Outra aplicação de destaque é a reparação e recondicionamento de componentes metálicos, principalmente por DED, que possibilita adicionar material apenas nas regiões danificadas, restaurando a geometria e as propriedades mecânicas originais sem necessidade

de substituição completa. Essa abordagem é amplamente empregada em moldes, matrizes e turbinas, gerando redução de custos, menor desperdício de material e extensão da vida útil dos equipamentos (BLACKKEY-MILNER *et al.*, 2021; WANG; MOSHER; DUETT, 2024).

De forma geral, embora a manufatura aditiva metálica ainda apresente custos iniciais elevados de equipamentos e insumos, sua aplicação estratégica em componentes de alto valor agregado, geometrias complexas e produção customizada demonstra viabilidade econômica crescente. Ao integrar eficiência estrutural, redução de desperdícios, flexibilidade produtiva e ganhos ao longo do ciclo de vida do produto, a MA consolida-se como um dos pilares tecnológicos da Indústria 4.0, promovendo uma manufatura mais inteligente, sustentável e orientada ao desempenho.

2.2 Processos de deposição por arco elétrico

Nesta seção apresenta-se os fundamentos do processo MADA, incluindo suas principais variantes tecnológicas (*Gas Metal Arc Welding - GMAW*, *Gas Tungsten Arc Welding - GTAW* e *Plasma Arc Welding - PAW*) e os fatores que influenciam a qualidade das peças produzidas. Em seguida, discute-se a influência dos tipos de corrente elétrica, comparando corrente contínua e pulsada quanto ao controle térmico, estabilidade do arco e produtividade. Também, abordam-se as vantagens e limitações do MADA em relação a outros métodos de manufatura aditiva metálica, destacando seu potencial para fabricação de componentes de médio e grande porte, bem como os desafios relacionados à precisão dimensional, rugosidade superficial e controle microestrutural.

2.2.1 Fundamentos do processo MADA

O Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é uma técnica de manufatura aditiva metálica (MA) pertencente à categoria *Directed Energy Deposition* (DED), na qual a energia de fusão do material é fornecida por um arco elétrico controlado. O processo utiliza arame metálico como insumo, alimentado de forma contínua na zona de deposição, onde ocorre a fusão camada a camada, conforme as instruções extraídas de um modelo tridimensional *Computer-Aided Design* (CAD) convertido em um plano de fabricação *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) (GIBSON *et al.*, 2021; FRAZIER, 2014) (Figura 2.2).

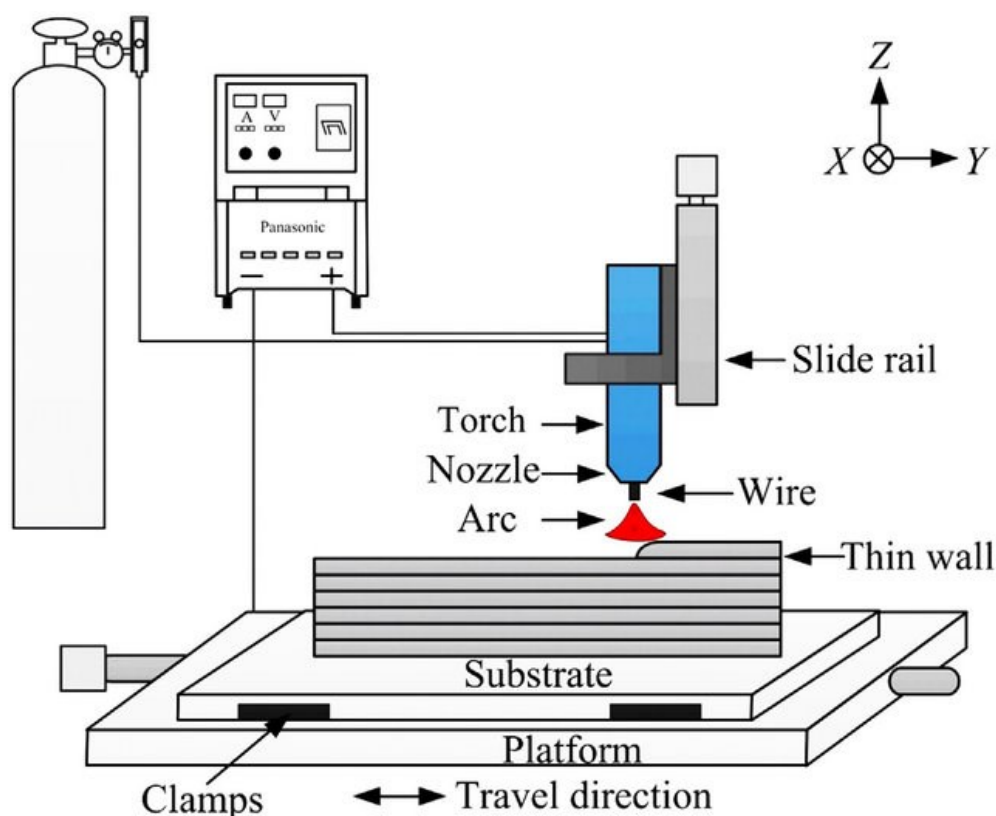


Figura 2.2 - Representação esquemática do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA). Fonte: Xiong *et al.*, (2018)

Essa abordagem combina os fundamentos dos processos de soldagem a arco com a filosofia construtiva da manufatura aditiva, permitindo a produção de peças metálicas de médio e grande porte com elevada taxa de deposição, excelente aproveitamento de material e baixo custo operacional em comparação com métodos baseados em pó, como o *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) (TENG *et al.*, 2004; FRAZIER, 2014). Além disso, o MADA se destaca pela flexibilidade geométrica, pela facilidade de integração com sistemas CNC e pela capacidade de reparo ou recondicionamento de componentes metálicos desgastados (DING *et al.*, 2015).

O método tem sido amplamente empregado em setores estratégicos como o aeroespacial, naval, de energia e petróleo e gás, que demandam a fabricação de componentes de grande escala em ligas de titânio, alumínio, níquel e aços inoxidáveis de alta resistência (LIU *et al.*, 2020).

Existem diferentes variações tecnológicas do MADA, associadas ao tipo de processo de soldagem empregado, entre as quais se destacam:

- *Gas Metal Arc Welding* (GMAW): utiliza um eletrodo consumível, apresentando altas taxas de deposição (até 10 kg/h) e excelente produtividade. Contudo, tende a gerar maior aporte térmico, instabilidade de arco e formação de respingos metálicos, o que

pode comprometer a qualidade superficial e exigir etapas de usinagem subsequentes (DING *et al.*, 2015).

- *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*: utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e alimentação de arame independente, proporcionando maior estabilidade de arco, melhor controle da poça de fusão e cordões de solda de elevada qualidade, porém com menor taxa de deposição (geralmente abaixo de 2 kg/h) (JIN *et al.*, 2020).
- *Plasma Arc Welding (PAW)*: representa uma evolução do GTAW, empregando um arco plasma concentrado que oferece maior densidade de energia, penetração controlada e redução da zona afetada pelo calor, favorecendo a obtenção de microestruturas mais refinadas. No entanto, os custos de equipamento, manutenção e controle de processo são mais elevados (DING *et al.*, 2015).

A Tabela 2.2 apresenta um quadro comparativo sintetizando as principais diferenças entre GMAW, GTAW e PAW.

Tabela 2.1 - Vantagens Diferenças entre Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) e Plasma Arc Welding (PAW). Fonte: elaborado pelo autor (2025), com base em Ding *et al.* (2015); Jin *et al.* (2020) e Gibson *et al.* (2021)

ASPECTO	GMAW	GTAW	PAW
Eletrodo	Consumível (fio metálico)	Não consumível (tungstênio)	Não consumível (tungstênio)
Taxa de deposição (kg/h)	3 a 8 kg/h a depender de parâmetros e diâmetro do arame.	0,5 a 2 kg/h a depender do material e da estratégia de deposição	1,5 a 5 kg/h a depender da estabilidade do processo, do material etc.
Estabilidade do arco	Moderada, podendo ocorrer respingos e falta de fusão	Alta, podendo ocorrer inclusões.	Muito alta, processo se mantém estável mesmo com pequena variação nos parâmetros.
Qualidade do cordão	Moderada, maior risco de respingos	Excelente, cordão limpo	Excelente, controle térmico preciso
Controle térmico	Menor, calor concentrado no metal de adição.	Melhor, calor atuando diretamente na poça de fusão	Muito bom, alta concentração de energia
Penetração	Média	Média	Alta
Custo do equipamento	Relativamente baixo, a depender do tipo de fonte utilizado e do aparado para deposição	Custo médio, necessitando de um aparato maior e fonte com fator de trabalho elevado	Alto, necessário tocha especial, fonte com alto fator de trabalho, maior volume de gás, etc
Aplicações típicas	Peças volumosas e rápidas, paredes grossas	Componentes que exigem alta qualidade superficial	Componentes que requerem alta penetração e precisão térmica

Vantagens	Alta produtividade, insumos acessíveis	Alta qualidade, estabilidade do arco	Alta penetração, controle térmico superior
Desvantagens	Mais respingos, menor estabilidade	Baixa produtividade	Custo elevado de equipamento e manutenção

Em termos gerais, a escolha da variante MADA depende do equilíbrio desejado entre produtividade, precisão e custo, sendo o GMAW preferido para a construção de grandes volumes, o GTAW para componentes de alta qualidade superficial e o PAW para aplicações que exigem controle térmico rigoroso e propriedades metalúrgicas superiores.

A qualidade final das peças fabricadas por MADA depende diretamente do controle rigoroso de variáveis de processo, incluindo a composição química e o diâmetro do fio metálico, a escolha adequada do gás de proteção (como argônio ou misturas argônio-hélio), a velocidade de alimentação do arame, a corrente e tensão de soldagem, além da estratégia de deposição e da automação do movimento da tocha (GIBSON *et al.*, 2021). O ajuste adequado desses parâmetros é essencial para evitar defeitos como porosidade, distorções geométricas e tensões residuais, garantindo integridade estrutural e repetibilidade dimensional das peças produzidas.

2.2.2 Tipos de corrente: contínua e pulsada

No contexto do MADA, a escolha do tipo de corrente elétrica utilizada no processo de deposição desempenha papel crucial na qualidade final da peça e no controle térmico do cordão depositado. De maneira geral, podem ser empregados dois modos principais de corrente: corrente contínua (CC) e corrente pulsada (CP).

A corrente contínua caracteriza-se por fornecer um aporte térmico constante durante todo o processo de soldagem, o que favorece taxas elevadas de deposição e simplicidade operacional. Contudo, essa configuração tende a gerar uma Zona Termicamente Afetada (ZTA) mais extensa, o que pode acarretar maiores distorções térmicas, aumento da tensão residual e, em alguns casos, coalescimento excessivo de grãos na microestrutura (DUARTE *et al.*, 2021; GIBSON *et al.*, 2021). Além disso, a dissipação de calor menos controlada pode provocar instabilidades geométricas, especialmente em peças de paredes finas ou em substratos com baixa capacidade de dissipação térmica (FRAZIER, 2014).

Já a corrente pulsada consiste na alternância cíclica entre picos de alta corrente, responsáveis pela fusão e transferência do material, e períodos de baixa corrente, que permitem o resfriamento parcial da poça de fusão. Esse método promove melhor controle do aporte térmico, reduzindo a extensão da ZTA e minimizando distorções, além de proporcionar

maior estabilidade do arco e menor formação de respingos (KUMAR, 2024). Em aplicações de *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) no modo *pulsed spray*, a técnica permite deposições em múltiplas posições ("*all positions*"), o que é particularmente vantajoso para a fabricação de geometrias complexas e a deposição em componentes de difícil acesso (MOHAMMADI *et al.*, 2024).

No MADA, a utilização de corrente pulsada tem se destacado como uma estratégia eficaz para otimizar a qualidade do depósito metálico. Esse tipo de corrente favorece o refinamento microestrutural, melhora o acabamento superficial e aumenta a precisão dimensional das peças fabricadas. Sua aplicação é particularmente vantajosa na produção de paredes finas e no processamento de metais com alta sensibilidade térmica, como ligas de alumínio, titânio e aços inoxidáveis duplex, onde o controle do aporte térmico é crítico (DINOVITZER *et al.*, 2019; VÁZQUEZ *et al.*, 2020).

Quando combinada com estratégias de resfriamento ativo entre camadas, a corrente pulsada contribui significativamente para a redução do acúmulo térmico, prevenindo a ocorrência de defeitos típicos do MADA, como empenamento, retração e trincas a quente, que comprometem a integridade dimensional e a qualidade final da peça (ZHAI; WU; ZHOU, 2022).

Entretanto, apesar dessas vantagens, a corrente pulsada normalmente apresenta taxa de deposição menor em comparação à corrente contínua, o que pode impactar diretamente a produtividade do processo (REN *et al.*, 2019). Dessa forma, a seleção entre corrente contínua e pulsada no MADA deve ser criteriosa, levando em consideração aspectos como:

- Tipo de material a ser depositado;
- Geometria e dimensões do componente;
- Tolerâncias dimensionais exigidas;
- Viabilidade produtiva, equilibrando qualidade e tempo de fabricação.

Essa abordagem permite que o MADA seja aplicado de maneira mais eficiente, conciliando desempenho mecânico e dimensional com a otimização do ciclo de fabricação.

2.2.3 Circuito controlado e sistema híbrido pulsado

O avanço das tecnologias de soldagem baseadas em fontes de energia digitalmente controladas possibilitou o desenvolvimento de processos com elevada precisão e redução significativa do aporte térmico nas juntas soldadas. Dentre esses processos, destaca-se o modo de curto-circuito controlado, conhecido como *Cold Metal Transfer* (CMT), desenvolvido pela empresa austríaca Fronius. Este processo é uma evolução do *Gas Metal Arc Welding*

(GMAW), mantendo a essência da soldagem a arco com arame consumível, porém introduzindo um controle eletrônico e mecânico sofisticado da transferência metálica (FRONIUS, 2020).

O CMT caracteriza-se pela transferência de pequenas gotas metálicas de forma altamente controlada, com baixa energia, por meio de um mecanismo que combina precisão eletrônica e atuação mecânica. O princípio central do processo envolve um movimento sincronizado do arame-eletrodo, que é automaticamente retraído no instante exato em que se forma o curto-circuito entre o arame e a peça. Essa retração é comandada por um sistema servoacionado da tocha, que reduz instantaneamente a corrente elétrica e permite que a gota de metal se desprenda suavemente da extremidade do arame.

Essa ação coordenada apresenta diversas vantagens:

- Minimização do aporte térmico, reduzindo distorções e tensões residuais na peça;
- Redução de respingos, aumentando a qualidade superficial da solda e diminuindo a necessidade de retrabalho;
- Transferência metálica suave e controlada, proporcionando uma corrente média baixa e um arco altamente estável, mesmo em materiais finos ou sensíveis ao calor;
- Versatilidade na soldagem de ligas dissimilares, como alumínio sobre aço, devido ao controle preciso da fusão do metal de aporte.

De acordo com Pickin e Young (2006), o CMT permite a realização de soldas de alta qualidade em posições variadas, mantendo a integridade do material base e aumentando a produtividade, principalmente em aplicações automotivas, aeroespaciais e de tubulações críticas.

De acordo com Fronius (2020), o controle dinâmico entre a alimentação do arame e o ciclo de corrente elétrica permite uma separação limpa da gota metálica, com frequência de transferência de até 70 ciclos por segundo, resultando em menor calor introduzido no material base. Esse comportamento térmico diferenciado faz com que o CMT apresente um aporte térmico de 40 a 60% inferior em relação à soldagem MIG/MAG convencional, proporcionando redução significativa da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e menor distorção dimensional das peças (DINOVITZER *et al.*, 2019).

O processo também apresenta vantagens em termos de qualidade metalúrgica, pois a menor energia envolvida promove refinamento de grãos, melhor controle da penetração e redução de tensões residuais (CATALANO *et al.*, 2025). Por essa razão, o CMT é amplamente empregado na união de materiais de alta sensibilidade térmica, como aços inoxidáveis duplex, ligas de alumínio, ligas de titânio e componentes de paredes finas, onde o controle térmico é essencial para evitar trincas ou deformações (KUMAR, 2024).

Em aplicações de manufatura aditiva por arco (MADA), o CMT tem se destacado como uma alternativa eficaz para deposição controlada de camadas, uma vez que o baixo aporte térmico possibilita melhor acabamento superficial, maior precisão dimensional e microestrutura mais homogênea (DINOVITZER *et al.*, 2019). Estudos indicam que o uso do CMT em processos aditivos reduz a diluição entre as camadas e melhora a aderência, além de favorecer o controle da morfologia da poça de fusão (CATALANO *et al.*, 2025).

Em complemento a essa tecnologia, surgem os sistemas híbridos de corrente pulsada, que combinam o modo CMT com pulsos de corrente de alta frequência. O princípio do modo pulsado consiste na alternância cíclica entre corrente de base (baixa intensidade) e pulsos de corrente de pico, responsáveis por controlar a transferência de gotas metálicas de forma individualizada (LIU *et al.*, 2024). Essa modulação da corrente gera maior estabilidade do arco, redução de respingos e melhor controle da penetração e da forma do cordão de solda (MOHAMMADI *et al.*, 2024).

Nos sistemas híbridos, o controle simultâneo da alimentação do arame e do pulso de corrente permite ajustar de maneira precisa o aporte térmico por unidade de comprimento, o que é fundamental em aplicações que demandam elevada repetibilidade dimensional, como na manufatura aditiva metálica e na soldagem robotizada de componentes automotivos e aeronáuticos (KUMAR, 2024). Essa combinação de estratégias resulta em maior eficiência energética, melhor controle térmico e menor distorção geométrica das juntas soldadas.

Além dos ganhos metalúrgicos, o uso combinado do modo CMT e do sistema híbrido pulsado possibilita maior produtividade, uma vez que o processo pode operar com velocidades de deposição superiores, mantendo a qualidade superficial e integridade estrutural do cordão (FRONIUS, 2020). O comportamento térmico controlado também favorece o resfriamento mais uniforme, reduzindo o surgimento de porosidades e trincas de solidificação, aspectos críticos em materiais de alta liga (MOHAMMADI *et al.*, 2024).

Assim, tanto o CMT quanto o modo pulsado híbrido representam avanços tecnológicos de grande relevância para os processos de soldagem modernos. Suas características de baixo aporte térmico, estabilidade do arco, redução de respingos e alta precisão tornam esses modos essenciais para setores que exigem qualidade, repetibilidade e controle microestrutural, como a indústria automotiva, aeroespacial e de manufatura aditiva metálica.

2.2.4 Vantagens e limitações do MADA

O processo MADA, tem se consolidado como uma alternativa promissora para a fabricação de peças metálicas de médio e grande porte, apresentando vantagens significativas quando comparado a outros métodos de manufatura aditiva metálica, como a

fusão a laser ou por feixe de elétrons. Uma das principais vantagens está no baixo custo dos insumos, uma vez que o MADA utiliza arames metálicos como matéria-prima, que apresentam preço mais acessível e maior disponibilidade comercial em relação aos pós metálicos empregados em técnicas de fusão seletiva (DING *et al.*, 2015; SAMEER *et al.*, 2022). Essa característica reduz o custo total de produção e facilita a adoção industrial da tecnologia.

Outra vantagem relevante do MADA é a elevada taxa de deposição, que pode superar 10 kg/h, dependendo do material e dos parâmetros de soldagem utilizados, o que o torna especialmente adequado para a produção de peças estruturais de grande volume (JIN *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020). Essa alta produtividade resulta em tempos de fabricação significativamente menores quando comparados a processos a laser, que normalmente apresentam taxas de deposição inferiores a 1 kg/h (DING *et al.*, 2015).

Além disso, o MADA oferece elevada flexibilidade de materiais, possibilitando a fabricação de componentes em aços carbono, aços inoxidáveis, ligas de titânio, alumínio e níquel, entre outros (SALEH *et al.*, 2023). Essa diversidade amplia as possibilidades de aplicação em setores como aeroespacial, naval, petróleo e gás, e geração de energia.

O processo também permite a fabricação de peças personalizadas ou sob demanda, com liberdade geométrica suficiente para atender a requisitos específicos de projeto, especialmente em geometrias simples ou semi-complexas. Além disso, a tecnologia MADA pode ser integrada a sistemas robóticos e CNC, permitindo maior precisão no posicionamento do arco e maior repetibilidade do processo (SAMEER *et al.*, 2022).

Outro ponto positivo é a possibilidade de reparo ou reconstrução de componentes desgastados, prolongando a vida útil de peças de alto valor agregado e reduzindo custos com substituições completas (JIN *et al.*, 2020).

Por outro lado, o MADA apresenta algumas limitações técnicas que precisam ser consideradas. Um dos principais desafios está no controle dimensional das peças, já que a elevada entrada de calor e o formato dos cordões depositados resultam em tolerâncias menos precisas quando comparadas a processos como a fusão a laser (RAUT; TAIWADE, 2021). Esse fator, aliado à maior rugosidade superficial, frequentemente exige etapas adicionais de usinagem para que a peça atenda aos padrões dimensionais e de acabamento exigidos.

Outro aspecto limitante é o controle microestrutural e das propriedades mecânicas do material depositado. Devido à alta energia térmica envolvida, podem ocorrer tensões residuais, distorções e variações indesejadas na microestrutura, afetando a performance do componente final (LIU *et al.*, 2020). Essas variações podem impactar diretamente propriedades como resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão, especialmente em ligas sensíveis à taxa de resfriamento, como os aços inoxidáveis duplex.

Além disso, a complexidade do controle térmico ao longo da construção representa um desafio adicional, já que flutuações de temperatura podem gerar deformações e comprometer a qualidade do produto final. A programação de trajetórias para o arco e a estratégia de deposição também requerem um alto nível de conhecimento técnico para minimizar defeitos como porosidade, falta de fusão ou formação de trincas (DING *et al.*, 2015).

Portanto, embora o MADA apresente vantagens significativas em termos de custo, produtividade e versatilidade de materiais, suas limitações relacionadas à precisão, acabamento superficial e controle microestrutural exigem que o processo seja cuidadosamente planejado e, muitas vezes, combinado com técnicas complementares, como usinagem de acabamento e tratamentos térmicos, para que atenda aos padrões de qualidade exigidos pela indústria.

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese das vantagens e limitações do MADA em relação a outros métodos de MA metálica.

Tabela 2.3 - Vantagens e limitações do MADA em relação a outros métodos de MA metálica.

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

ASPECTO	VANTAGENS DO MADA	LIMITAÇÕES DO MADA
Custo de insumos	Utiliza arames metálicos comerciais, geralmente mais baratos e amplamente disponíveis que pós metálicos (SAMEER <i>et al.</i> , 2022).	—
Taxa de deposição	Possui altas taxas de deposição (>10 kg/h), reduzindo o tempo de produção (JIN <i>et al.</i> , 2020).	—
Dimensões das peças	Adequado para fabricação de componentes de grandes dimensões (DING <i>et al.</i> , 2015).	Menor precisão em peças de pequeno porte quando comparado à fusão a laser (RAUT; TAIWADE, 2021).
Flexibilidade de materiais	Compatível com diversas ligas metálicas (aços, alumínio, titânio, níquel) (DING <i>et al.</i> , 2015).	—
Custo operacional	Equipamentos e operação mais econômicos em comparação a sistemas a laser (LIU <i>et al.</i> , 2020).	—
Acabamento superficial	—	Superfície mais rugosa, necessitando usinagem posterior para tolerâncias rigorosas (RAUT; TAIWADE, 2021).

Controle dimensional	—	Controle menos preciso que processos baseados em laser, exigindo retrabalhos (RAUT; TAIWADE, 2021).
Controle microestrutural	—	Maior entrada de calor pode causar distorções, tensões residuais e alterações indesejadas de fases (LIU <i>et al.</i> , 2020).
Complexidade do processo	—	Requer programação de trajetórias e controle térmico precisos para manter a qualidade (DING <i>et al.</i> , 2015).

2.3 Aço inoxidável duplex: características e aplicações

O aço inoxidável duplex é uma liga metálica que se destaca por sua microestrutura bifásica, o que confere ao material uma combinação singular de resistência mecânica, tenacidade e elevada resistência à corrosão. Nesta seção, aborda-se os principais aspectos relacionados a esse material, iniciando pela análise de sua microestrutura e composição química, que influenciam diretamente o equilíbrio entre as fases e a formação de propriedades desejáveis.

Em seguida, discute-se as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, com destaque para o papel de elementos de liga como cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio, além da utilização do índice PREN na avaliação da resistência à corrosão localizada. Também será apresentado o comportamento térmico e a soldabilidade, considerando os riscos de formação de fases indesejadas durante tratamentos térmicos e soldagem, bem como as estratégias para preservar a integridade do material.

Por fim, são descritas as principais aplicações industriais do aço inoxidável duplex, com ênfase em setores estratégicos como petróleo e gás, naval, petroquímico e dessalinização, nos quais a robustez e a confiabilidade frente a ambientes agressivos são fundamentais.

2.3.1 Aço inoxidável duplex: microestrutura bifásica (ferrita/austenita)

O aço inoxidável duplex é uma liga metálica que se distingue por apresentar uma microestrutura bifásica, composta aproximadamente por 50 % de ferrita e 50 % de austenita. A ferrita possui estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), típica dos aços inoxidáveis ferríticos, e é predominantemente rica em cromo (Cr) e molibdênio (Mo), elementos que conferem alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão sob

tensão (SCC). Já a austenita, com estrutura cúbica de faces centradas (CFC), é estabilizada por elementos como níquel (Ni) e nitrogênio (N), sendo responsável por proporcionar maior tenacidade, ductilidade e conformabilidade ao material (Figura 2.3) (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024; UNIFIED ALLOYS, 2025).

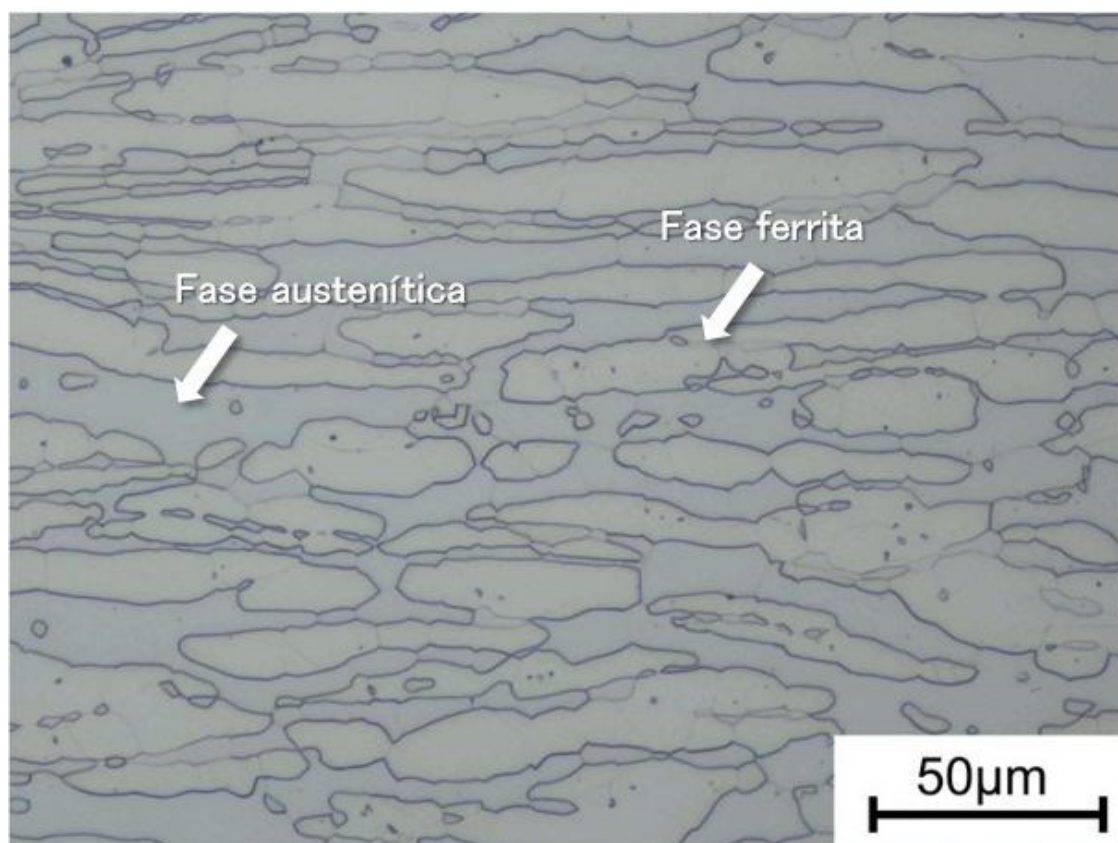


Figura 2.3 - Microestrutura típica do aço inoxidável duplex. Fonte: Kobe Steel, LTD. (2025)

A obtenção desse equilíbrio entre ferrita e austenita é resultado do controle rigoroso da composição química e das condições de solidificação e resfriamento, que determinam a fração volumétrica e a morfologia de cada fase. O balanço ideal, geralmente em torno de 50/50, é essencial para garantir as propriedades desejadas do aço inoxidável duplex. Desvios significativos podem favorecer a formação de fases indesejadas, como a fase sigma (σ), que surge a partir da decomposição da ferrita e causa redução da tenacidade e da resistência à corrosão (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

Assim, a ferrita (α) atua como a fase responsável pela resistência mecânica e estabilidade em ambientes corrosivos, enquanto a austenita (γ) assegura boa deformabilidade e resistência ao impacto, resultando em um material com desempenho superior aos aços inoxidáveis puramente ferríticos ou austeníticos. Essa combinação faz dos aços inoxidáveis duplex uma alternativa amplamente utilizada em ambientes agressivos, como na indústria

química, petroquímica, marítima e de papel e celulose, onde são exigidas elevada resistência e durabilidade (AZO MATERIALS, 2005; FRITZ; MOE, 2020).

Durante o processo de solidificação e resfriamento, especialmente em condições associadas à manufatura aditiva (MA) ou soldagem, a ferrita tende a se formar primeiramente, crescendo em grãos colunares ao longo da direção de deposição. Posteriormente, a austenita precipita-se a partir dessa matriz ferrítica, de acordo com o gradiente térmico e a difusão de elementos estabilizadores como níquel (Ni), nitrogênio (N) e manganês (Mn) (UNIFIED ALLOYS, 2025; LIPPOLD; KOTECKI, 2011).

Destaca-se que existe uma diversidade de morfologias austeníticas, resultado de diferentes mecanismos de nucleação e crescimento, influenciados pela taxa de resfriamento e pela segregação de elementos de liga. Entre as formas mais comuns e relevantes, destacam-se:

- **Austenita de contorno de grão (GBA - Grain Boundary Austenite):** A GBA é a primeira forma de austenita a se formar durante o resfriamento, nucleando-se ao longo dos contornos de grão ferríticos onde ocorre maior difusão de Ni e N. Atua como uma barreira à corrosão intergranular e contribui para a redução das tensões internas entre os grãos, além de favorecer a resistência à fratura dúctil (PADILHA; GUEDES, 2021; SENGOTTAIYAN *et al.*, 2025).
- **Austenita intragranular (IGA - Intragranular Austenite):** A IGA se desenvolve no interior dos grãos ferríticos, a partir de núcleos heterogêneos como inclusões ou discordâncias. Essa morfologia está associada ao aumento da tenacidade e à melhor resistência à fadiga, uma vez que reduz a propagação de trincas por promover uma distribuição mais homogênea das tensões (LIU *et al.*, 2024; LIPPOLD; KOTECKI, 2011).
- **Austenita de Widmanstätten (WA - Widmanstätten Austenite):** A WA é observada sob a forma de placas ou agulhas finas que crescem a partir dos contornos de grão ferríticos para o interior da matriz. Esse tipo de austenita se forma durante o resfriamento intermediário, quando há difusão limitada de elementos estabilizadores. A WA contribui para o aumento da resistência mecânica e melhora a estabilidade térmica, embora um excesso dessa morfologia possa reduzir ligeiramente a tenacidade (NILSSON, 1992; FRITZ; MOE, 2020).
- **Austenita secundária (γ_2 - Secondary Austenite):** A austenita secundária se forma durante o resfriamento final ou em etapas de tratamento térmico de alívio de tensões, pela difusão tardia de Ni e N em regiões ferríticas supersaturadas. Sua presença é importante para reestabelecer o equilíbrio ferrita/austenita e aumentar a resistência à corrosão localizada, principalmente após exposições prolongadas em altas temperaturas (PADILHA; GUEDES, 2021).

- **Austenita acicular (AA - *Acicular Austenite*):** A AA é caracterizada por agulhas extremamente finas e entrelaçadas que se formam dentro da ferrita, geralmente associadas a altas taxas de resfriamento e gradientes térmicos intensos. Essa forma confere elevada resistência à fadiga térmica e boa tenacidade, sendo comumente observada em zonas termicamente afetadas por soldagem (LIPPOLD; KOTECKI, 2011; SENGOTTAIYAN *et al.*, 2025).
- **Austenita de contorno de subgrão (SGA - *Subgrain Boundary Austenite*):** A SGA se forma ao longo dos subcontornos ferríticos durante o resfriamento moderado, quando pequenas regiões de ferrita se tornam sítios preferenciais de nucleação para a austenita. Essa morfologia contribui para uma transição gradual entre as fases e melhora a coesão intergranular, resultando em um material mais homogêneo e resistente à deformação localizada (NILSSON, 1992; LIU *et al.*, 2024).
- **Austenita espinodal (SA - *Spinodal Austenite*):** A SA surge em condições específicas de envelhecimento térmico, devido à descomposição espinodal da ferrita supersaturada em regiões ricas e pobres em Ni e Cr. Essa austenita é geralmente nanométrica e dispersa, contribuindo para o endurecimento por dispersão e melhorando a estabilidade térmica de longo prazo (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

A coexistência dessas morfologias reflete o complexo equilíbrio termodinâmico e cinético que governa a microestrutura dos aços inoxidáveis duplex. A proporção e distribuição adequadas das formas de austenita determinam o comportamento final do material, permitindo combinar elevada resistência à tração, boa ductilidade e excelente resistência à corrosão, características essenciais para aplicações em ambientes agressivos, como na indústria petroquímica, naval e de papel e celulose (FRITZ; MOE, 2020; UNIFIED ALLOYS, 2025).

2.3.2 Propriedades mecânicas e resistência à corrosão

Os aços inoxidáveis duplex são reconhecidos por suas propriedades mecânicas superiores em comparação aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, apresentando um equilíbrio notável entre alta resistência mecânica, boa tenacidade e excelente resistência à corrosão. Essa performance diferenciada resulta de sua microestrutura bifásica, formada por proporções aproximadamente iguais de ferrita, com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), e austenita, com estrutura cúbica de faces centradas (CFC). Na microestrutura duplex, a ferrita confere elevado limite de escoamento, resistência à fadiga e à corrosão sob tensão (*Stress Corrosion Cracking* – SCC), enquanto a austenita proporciona maior ductilidade,

tenacidade e conformabilidade, garantindo um desempenho equilibrado entre resistência e formabilidade (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024; UNIFIED ALLOYS, 2025).

Em termos quantitativos, os aços duplex apresentam limite de escoamento aproximadamente duas vezes maior que o dos aços austeníticos 304L e 316L, atingindo valores típicos entre 450 e 550 MPa. Já os aços super duplex, como o SAF 2507, podem ultrapassar 640 MPa, permitindo a redução da espessura de componentes estruturais, a diminuição do peso total de equipamentos e tubulações e a otimização de custos de fabricação e transporte.

Além da resistência mecânica elevada, os aços duplex apresentam alta tenacidade e resistência à fadiga térmica, características que os tornam ideais para aplicações exigentes, como vasos de pressão, trocadores de calor, plataformas offshore e dutos de exploração de petróleo e gás, onde a confiabilidade e a durabilidade são essenciais (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024; SÁENZ *et al.*, 2020).

A Tabela 2.4 apresenta uma comparação detalhada das propriedades mecânicas entre o aço duplex SAF 2205 e o super duplex SAF 2507, evidenciando as vantagens de cada liga em termos de limite de escoamento, resistência a tração, alongamento e dureza, informações cruciais para a seleção do material em projetos de engenharia de alto desempenho.

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas comparativas dos aços duplex SAF 2205 e super duplex SAF 2507. Fonte: Adaptado de Sáenz *et al.* (2020)

Liga	Limite de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (HB)
SAF 2205	450–550	620–880	25	260
SAF 2507	550–640	750–1000	25	290

A resistência à corrosão é um dos aspectos mais significativos que diferenciam os aços duplex das ligas inoxidáveis convencionais. Esses materiais apresentam elevada resistência à corrosão localizada, incluindo piteamento, corrosão por fresta e *Stress Corrosion Cracking* (SCC), especialmente em meios contendo cloretos, ambientes marinhos e processos químicos agressivos.

Essa performance é resultado de uma composição química cuidadosamente balanceada, com teores de cromo entre 20 e 28%, molibdênio de até 5% e nitrogênio até 0,3%, que desempenham funções complementares: o cromo e o molibdênio fortalecem o filme passivo protetor na superfície, enquanto o nitrogênio estabiliza a fase austenítica e aumenta a resistência mecânica do material. O filme passivo, formado principalmente por óxidos de cromo e molibdênio, é altamente aderente e autorreparável, garantindo proteção contínua

contra oxidação e corrosão localizada, mesmo em soluções salinas ou ácidas (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024; UNIFIED ALLOYS, 2025; AZO MATERIALS, 2005).

A avaliação quantitativa da resistência ao piteamento é realizada por meio do índice PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*), definido pela Equação 2.1:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo) + 16 \times (\%N) \quad (2.1)$$

Esse índice fornece uma estimativa empírica da resistência à corrosão localizada em meios cloretados, permitindo a comparação entre diferentes ligas inoxidáveis.

Em termos de PREN, os aços super duplex apresentam valores **acima de 40** (foi colocado um resultado em ensaio de GDS desse índice calculado), refletindo excelente resistência à corrosão localizada, enquanto os aços duplex padrão situam-se entre 32 e 38, e os aços austeníticos 316L, cerca de 25. Dessa forma, ligas como o SAF 2507, com teores otimizados de Cr, Mo e N, apresentam superioridade em ambientes severos, incluindo águas profundas, alta salinidade e processos petroquímicos rigorosos (FRITZ; MOE, 2020).

A Tabela 2.5 apresenta a composição química, PREN e propriedades típicas de aços inoxidáveis duplex.

Tabela 2.5 - Composição química, PREN e propriedades típicas de aços inoxidáveis duplex.

Fonte: Hosseini (2018).

EN/ UNS No.	Common designation	Chemical composition (wt.%)					UTS (MPa)	PREN*
		Cr	Ni	Mo	N	Cu		
Early grade								
1.4460/ S32900	329	25	5.5	1.7	0.09		750	32.0
Lean duplex								
1.4162/ S32101	LDX 2101 ®	21.5	1.5	0.3	0.22	0.3	700	26.0
Standard 22 % Cr duplex								
1.4462/ S31803	2205	22	5.3	2.8	0.16		750	34.0
25 % Cr duplex								
1.4507/ S32550	255	26	5.5	3	0.17	1.7	760	38.6
Super duplex								
1.4410/ S32750	2507	25	7	4	0.27		830	42.5
Hyper duplex								
/ S32707	SAF 2707 ™	27	6.5	4.8	0.4		1010	49.2

* PREN = % Cr + 3,3% Mo + 16%N

Além da resistência à corrosão e da elevada resistência mecânica, os aços inoxidáveis duplex também se destacam pela boa soldabilidade e estabilidade microestrutural quando submetidos a processos térmicos controlados, como MADA ou GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). No entanto, o controle térmico durante a soldagem é fundamental para evitar o desequilíbrio entre ferrita e austenita, o que pode favorecer a precipitação de fases indesejadas, como sigma (σ) ou chi (χ), prejudicando a tenacidade e a resistência à corrosão.

Assim, o desempenho superior dos aços duplex e super duplex está intimamente relacionado à sinergia entre microestrutura bifásica equilibrada e composição química otimizada, resultando em ligas capazes de atender às exigências extremas de resistência mecânica, durabilidade e confiabilidade frente à corrosão. Essas características consolidam os aços duplex como materiais estratégicos para aplicações críticas na indústria petroquímica, naval, offshore, nuclear e de energia renovável.

2.3.3 Comportamento térmico e soldabilidade

O comportamento térmico dos aços inoxidáveis duplex é um fator determinante para o desempenho final do material, especialmente devido à sua microestrutura bifásica sensível a variações de temperatura, gradientes térmicos e tempos de exposição. Durante processos térmicos, como soldagem, tratamentos térmicos ou aquecimentos prolongados em serviço, esses aços podem sofrer transformações de fase indesejadas, que comprometem suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão localizada e sob tensão (TWI, 2021; KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o controle térmico rigoroso, entendido como a gestão do ciclo térmico, da taxa de resfriamento e do tempo de permanência em faixas críticas de temperatura, é essencial para preservar o equilíbrio microestrutural e evitar a precipitação de fases secundárias indesejadas (Figura 2.4). Estudos demonstram que a ausência de controle adequado do histórico térmico resulta em degradação acelerada das propriedades dos aços duplex, especialmente em aplicações sujeitas a ciclos térmicos repetitivos ou gradientes térmicos elevados (RAMESH *et al.*, 2021; KRAWCZYK *et al.*, 2023).

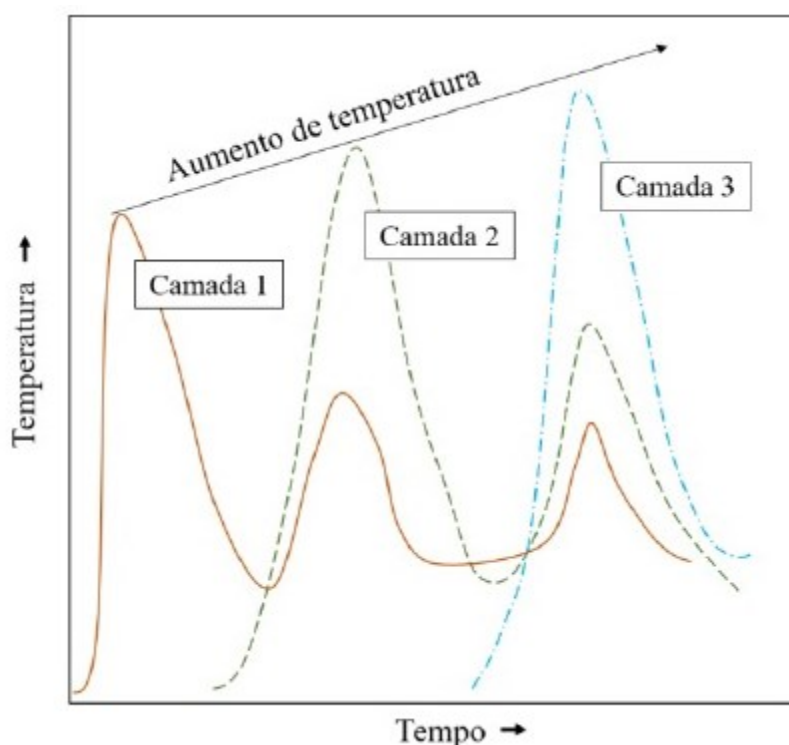


Figura 2.4 - Ciclo térmico em camadas subsequentes. Fonte: adaptado de Dass & Moridi (2019)

A faixa crítica de 650 °C a 950 °C é particularmente problemática, pois favorece a precipitação da fase sigma (σ), um composto intermetálico rico em cromo e molibdênio, que se forma preferencialmente nos contornos de grão da ferrita. Essa fase é dura e frágil, reduzindo drasticamente a tenacidade e a ductilidade do material, além de empobrecer a matriz em cromo e molibdênio, o que leva à redução da resistência à corrosão localizada e intergranular (TWI, 2021; KRAWCZYK *et al.*, 2023). A formação de fases secundárias, como chi (χ) e nitretos de cromo (Cr_2N), também pode ocorrer nessas faixas de temperatura, agravando os efeitos deletérios sobre as propriedades do material (LIU *et al.*, 2024).

Outro fenômeno relevante é a fragilização a 475 °C, associada à decomposição espinodal da ferrita. Nesse processo, a fase ferrítica sofre uma separação de fases em regiões ricas em ferro e em cromo, gerando precipitação de fase α' (alfa linha), que causa endurecimento e perda de ductilidade (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024). Essa transformação, embora difusionalmente lenta, pode ocorrer durante exposições prolongadas em serviço, especialmente em equipamentos sujeitos a aquecimentos intermitentes ou ambientes de alta temperatura por longos períodos, levando à fragilização progressiva do material.

No que se refere à soldabilidade, os aços inoxidáveis duplex requerem controle rigoroso do aporte térmico para evitar o superaquecimento e, conseqüentemente, a precipitação de

fases indesejadas. Recomenda-se o uso de técnicas de soldagem pulsada, controle do tempo entre passes e resfriamento controlado, garantindo a manutenção do equilíbrio entre ferrita e austenita na zona fundida e na zona termicamente afetada (ZTA) (TWI, 2021; RAMESH *et al.*, 2021).

O resfriamento rápido após a soldagem é particularmente importante, pois promove a reformação adequada da fase austenítica a partir da ferrita e minimiza a precipitação de fase sigma e nitretos. Além disso, práticas como a seleção adequada de metais de adição e o pré-aquecimento moderado podem contribuir para preservar a microestrutura bifásica ideal (≈50 % ferrita e 50 % austenita), essencial para garantir tenacidade, resistência mecânica e proteção anticorrosiva em ambientes agressivos.

Dessa forma, o controle de temperatura e a gestão térmica precisa durante a fabricação e a operação é indispensável para preservar a integridade estrutural e o desempenho de longo prazo dos aços inoxidáveis duplex, sobretudo em aplicações críticas nos setores petroquímico, naval, energético e *offshore*, onde esses materiais são amplamente empregados devido à sua combinação única de resistência e durabilidade.

2.3.4 Aplicações industriais

Os aços inoxidáveis duplex constituem uma classe de materiais metálicos de elevado desempenho, caracterizados por uma microestrutura bifásica composta aproximadamente por 50% de ferrita e 50% de austenita, o que confere uma combinação singular de alta resistência mecânica, excelente tenacidade e superior resistência à corrosão. Essa configuração microestrutural equilibrada é obtida por meio de rigoroso controle termomecânico e da composição química, especialmente dos teores de cromo (22–26%), níquel (4,5–7%), molibdênio (2–3,5%) e nitrogênio (0,1–0,3%) (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

A presença simultânea das fases ferrítica e austenítica permite que esses aços apresentem resistência mecânica até o dobro da observada em aços inoxidáveis austeníticos convencionais (como o AISI 304 e 316), ao mesmo tempo em que mantêm boa ductilidade e excelente resistência à corrosão localizada, como a corrosão por pite, por fresta e sob tensão (SCC – *Stress Corrosion Cracking*). Essa combinação de propriedades faz dos aços duplex materiais de escolha para aplicações críticas em ambientes agressivos, notadamente nas indústrias de óleo e gás, naval, petroquímica e de dessalinização, onde há exposição contínua a altas pressões, temperaturas elevadas e meios ricos em cloretos (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

Na indústria *offshore*, o emprego dos aços duplex é amplamente difundido em tubulações submarinas, *risers*, *manifolds*, válvulas, trocadores de calor e conectores

estruturais, componentes que exigem elevada confiabilidade operacional e longa vida útil. A elevada resistência à corrosão sob tensão (SCC) e a resistência à fadiga em ambientes marinhos são determinantes para a sua adoção nesses sistemas, uma vez que reduzem significativamente os riscos de falhas catastróficas e os custos de manutenção (UNIFIED ALLOYS, 2025).

Além disso, a possibilidade de fabricação de componentes complexos em aço duplex por meio de processos avançados de manufatura, como o *Wire Arc Additive Manufacturing* (MADA), tem ampliado o interesse industrial, pois permite a produção de peças sob medida, com excelente integridade metalúrgica e desempenho superior.

Além da classe duplex convencional, destacam-se os aços inoxidáveis super duplex, como o SAF 2507, que apresentam teores mais elevados de cromo ($\approx 25\%$), molibdênio ($\approx 4\%$) e nitrogênio ($\approx 0,3\%$), resultando em índices PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) superiores a 40, valor que indica excelente resistência à corrosão por pite e fresta em meios contendo cloretos (SÁENZ *et al.*, 2020; FRITZ; MOE, 2020).

Essa composição confere ao material elevada estabilidade estrutural e desempenho superior em ambientes hipersalinos ou sob pressão extrema, sendo amplamente utilizado em sistemas submarinos e equipamentos de exploração offshore, onde há necessidade de alta confiabilidade operacional e longa durabilidade. Além de aumentar a vida útil dos sistemas, o uso de aços super duplex contribui para a redução de custos de manutenção e substituição de componentes, especialmente em estruturas expostas à corrosão sob tensão e à fadiga térmica (SÁENZ *et al.*, 2020; FRITZ; MOE, 2020).

Na indústria petroquímica, os aços duplex e super duplex são aplicados em trocadores de calor, colunas de destilação, reatores, evaporadores e tanques de armazenamento, onde a combinação entre resistência mecânica e resistência à corrosão intergranular é essencial para a operação em meios fortemente oxidantes ou contendo ácidos e sais agressivos (AZO MATERIALS, 2005; KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024). A presença dos elementos de liga cromo (Cr), molibdênio (Mo) e nitrogênio (N) aumenta significativamente o PREN, elevando a resistência a processos de corrosão localizada e garantindo a estabilidade metalúrgica mesmo em temperaturas elevadas.

No setor naval e em sistemas de dessalinização, esses materiais têm substituído gradualmente ligas convencionais, como aços carbono revestidos e aços inoxidáveis austeníticos, devido à sua maior durabilidade, menor necessidade de manutenção e leveza estrutural. São amplamente empregados na fabricação de cascos, trocadores de calor, sistemas de refrigeração, tubulações e estruturas de bombeamento, que operam sob altas pressões, ciclos térmicos intensos e exposição constante à água do mar (FRITZ; MOE, 2020; UNIFIED ALLOYS, 2025).

Em síntese, o aço inoxidável duplex representa uma solução avançada e sustentável para aplicações industriais severas, combinando alto desempenho estrutural e resistência superior à corrosão. Contudo, devido à sua sensibilidade térmica, especialmente à formação de fases indesejadas durante soldagem e tratamentos térmicos, requer controle rigoroso de parâmetros de processo, como o aporte térmico, o resfriamento rápido e a composição química equilibrada, para garantir integridade, confiabilidade e longevidade em serviço (TWI, 2021; RAMESH *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2024).

2.4 Influência da corrente pulsada na qualidade da deposição

A soldagem é um processo fundamental na fabricação e reparo de estruturas metálicas, e a qualidade da deposição desempenha um papel crucial na integridade das juntas soldadas. A corrente elétrica utilizada durante o processo de soldagem tem um impacto significativo nas características do cordão de solda, como penetração, diluição, formação de poros e estabilidade do arco. A corrente pulsada, uma técnica que alterna entre períodos de alta e baixa corrente, tem sido amplamente estudada por seus efeitos na qualidade da deposição (TABRIZI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2024). Nesta direção, esta seção explora a influência da corrente pulsada na qualidade da deposição, comparando-a com a corrente contínua e analisando seus efeitos sobre diversos aspectos do processo de soldagem.

2.4.1 Comparação entre corrente contínua e pulsada no processo de deposição

Nos processos de deposição metálica por arco elétrico, como na manufatura aditiva MADA, a escolha do modo de alimentação elétrica, seja corrente contínua (CC) ou corrente pulsada, exerce influência direta na qualidade do cordão, precisão dimensional e controle térmico das peças fabricadas.

A corrente contínua (CC) tem sido amplamente utilizada em processos de soldagem metálica devido à sua simplicidade operacional, estabilidade do arco elétrico e facilidade de controle da penetração, especialmente em ligas ferrosas. Entretanto, com o avanço das tecnologias de soldagem e da manufatura aditiva metálica, a corrente pulsada vem se destacando como uma alternativa superior, oferecendo maior controle térmico, estabilidade do arco e precisão na deposição do metal (TWI, 2025).

Em contraste, a soldagem com corrente pulsada é caracterizada pela alternância periódica entre picos de alta corrente (I_p) e níveis de corrente base (I_b). Durante o pulso de alta corrente, ocorre a transferência efetiva de gotículas metálicas do eletrodo para a poça de

fusão, promovendo boa penetração; já na fase de corrente base, há resfriamento parcial da poça, o que reduz o aporte térmico total e minimiza a formação de zonas termicamente afetadas (ZTA) amplas (CUNHA; BOHÓRQUEZ, 2020). Esse ciclo controlado melhora o equilíbrio entre fusão e solidificação, resultando em cordões de solda mais estreitos, com menor diluição e melhor acabamento superficial.

De acordo com Parvez *et al.* (2025), a corrente pulsada também contribui para reduzir respingos, evitar oxidação excessiva e aprimorar a regularidade do cordão, fatores que influenciam diretamente a integridade estrutural e estética da junta soldada. Essa característica é especialmente útil na soldagem de materiais de espessura reduzida e em componentes que requerem alta qualidade superficial, como os utilizados nas indústrias aeroespacial e biomédica.

Segundo Tabrizi *et al.* (2021), outro benefício da corrente pulsada é a melhoria na estabilidade da transferência metálica, o que possibilita soldagem em diferentes posições (vertical, sobrecabeça ou plana) sem comprometer a continuidade do cordão. Esse controle refinado favorece a uniformidade da microestrutura, reduzindo o risco de defeitos como porosidade, trincas e descontinuidades internas.

Nos processos de manufatura aditiva metálica, especialmente no MADA, a corrente pulsada desempenha papel essencial no controle da geometria e do perfil do cordão depositado, permitindo a construção de camadas mais homogêneas e previsíveis. Isso resulta em maior precisão dimensional, redução de distorções térmicas e melhor qualidade metalúrgica da peça final (LIU *et al.*, 2024).

Embora a corrente pulsada ofereça controle térmico e deposição de alta qualidade, ela apresenta taxa de deposição menor em comparação à CC, o que pode impactar a produtividade em peças de grande volume ou materiais de maior espessura (REN *et al.*, 2019). Por outro lado, a CC mantém produtividade elevada, sendo adequada quando o controle térmico refinado não é crítico.

Dessa forma, a seleção entre corrente contínua e pulsada deve ser baseada em critérios como:

- Tipo de material (sensibilidade térmica e composição química);
- Geometria e dimensões do componente;
- Tolerâncias dimensionais exigidas;
- Viabilidade produtiva, equilibrando qualidade e produtividade.

Em síntese, o uso da corrente pulsada representa um avanço significativo em relação à corrente contínua, ao combinar controle térmico aprimorado, estabilidade do arco, redução de respingos e qualidade superior de deposição. Essa abordagem torna-se, portanto,

fundamental para aplicações que exigem alta precisão e desempenho, como soldagem de aços inoxidáveis duplex e manufatura aditiva de ligas metálicas de alto valor tecnológico.

2.4.2 Efeitos sobre penetração, diluição, formação de poros e estabilidade do arco

- **Penetração:** A penetração adequada é fundamental para a resistência mecânica da junta. A corrente pulsada contribui para maior penetração devido à energia concentrada durante os picos de corrente, promovendo fusão mais profunda do material base e resultando em cordões mais consistentes (PARVEZ *et al.*, 2025). Esse efeito é particularmente relevante em geometrias complexas ou em materiais com baixa condutividade térmica, onde a corrente contínua poderia gerar fusão insuficiente ou descontinuidade do cordão.
- **Diluição:** A diluição, definida como a incorporação do material base ao metal de adição, é reduzida quando se utiliza corrente pulsada. Isso ocorre porque a transferência de calor mais controlada limita a fusão excessiva do substrato, permitindo que o metal de adição mantenha suas propriedades químicas e mecânicas originais (PAL; PAL, 2011). Tal característica é essencial em ligas sensíveis, como o aço inoxidável duplex, onde alterações na proporção ferrita/austenita podem comprometer a resistência à corrosão.
- **Formação de poros:** A presença de poros em soldas compromete a integridade estrutural e aumenta o risco de falhas. A corrente pulsada reduz a ocorrência de poros, pois melhora a fluidez do metal fundido e permite melhor eliminação de gases dissolvidos (OCHOA *et al.*, 2025). Além disso, a menor entrada de calor reduz tensões térmicas, evitando a formação de microtrincas associadas a defeitos gasosos.
- **Estabilidade do arco:** A estabilidade do arco é essencial para deposições consistentes. A corrente pulsada promove maior estabilidade ao permitir que o arco se mantenha ativo de forma controlada, evitando oscilações que geram respingos, irregularidades no cordão e inclusões de óxidos (PAL; PAL, 2011). Essa estabilidade facilita o controle do processo e a padronização de camadas em aplicações de manufatura aditiva, resultando em peças com melhor acabamento e propriedades mecânicas previsíveis.

De maneira geral, a corrente pulsada apresenta vantagens significativas em relação à corrente contínua, incluindo maior penetração, menor diluição, redução da formação de poros e maior estabilidade do arco. Esses benefícios tornam a técnica adequada para processos de alta precisão, como a manufatura aditiva metálica e soldagem de materiais sensíveis ao calor. A escolha adequada dos parâmetros da corrente pulsada, como amplitude, frequência e

tempo de pico, é fundamental para otimizar os resultados e garantir a integridade estrutural das peças soldadas (TABRIZI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2024; TWI, 2025).

2.5 Técnicas de resfriamento no processo de manufatura aditiva

A manufatura aditiva (MA) metálica, especialmente em processos como MADA, *Laser Powder Bed Fusion* (LPBF) e *Directed Energy Deposition* (DED), envolve a deposição sucessiva de camadas de material fundido, o que gera elevadas temperaturas localizadas e gradientes térmicos acentuados. O controle do resfriamento durante a deposição é fundamental para evitar defeitos como distorções, tensões residuais elevadas e alterações indesejadas na microestrutura (DEBROY *et al.*, 2018; DING *et al.*, 2015). Nesse contexto, as técnicas de resfriamento, sejam naturais ou ativas, têm papel determinante na qualidade final da peça produzida.

2.5.1 Conceito de resfriamento ativo vs. resfriamento natural

O resfriamento natural e o resfriamento ativo desempenham papéis fundamentais no controle térmico de processos de deposição metálica, especialmente na manufatura aditiva por arco elétrico (MADA), onde a gestão do calor acumulado influencia diretamente a microestrutura, as tensões residuais e a precisão dimensional das peças produzidas.

O resfriamento natural baseia-se na dissipação espontânea de calor por convecção e radiação térmica para o ambiente, sem o uso de dispositivos auxiliares. Trata-se do método mais simples e economicamente viável, amplamente empregado em aplicações laboratoriais e experimentais (MONTEVECCHI *et al.*, 2018). Contudo, sua principal limitação está na falta de controle sobre a taxa de resfriamento, que depende de variáveis externas, como temperatura ambiente, fluxo de ar e geometria da peça. Essa limitação pode levar ao acúmulo de calor entre camadas sucessivas, resultando em uma zona termicamente afetada (ZTA) mais ampla, crescimento de grãos, e maior distorção dimensional.

Em processos de manufatura aditiva como o MADA, o resfriamento natural tende a promover a formação de grãos colunares alongados, orientados segundo o gradiente térmico, favorecendo anisotropia microestrutural e mecânica, ou seja, variações nas propriedades conforme a direção da deposição (TONELLI *et al.*, 2021). Esse comportamento é decorrente da solidificação lenta e dos ciclos térmicos repetitivos, que permitem a re-precipitação de fases secundárias e podem comprometer a uniformidade e resistência da peça final.

Por outro lado, o resfriamento ativo emprega sistemas artificiais de remoção de calor, como refrigeração líquida, ar forçado, trocadores de calor, substratos refrigerados ou intercâmbio térmico controlado com o suporte de deposição (PHULL; KUMAR; WALIA, 2018). Essa abordagem possibilita ajustar a taxa de resfriamento conforme a necessidade do processo, oferecendo maior controle sobre o ciclo térmico e, consequentemente, sobre a formação da microestrutura final.

Entre as principais vantagens do resfriamento ativo, destacam-se:

- Redução significativa da ZTA, o que minimiza o risco de deformações e trincas;
- Diminuição das tensões residuais internas, melhorando a estabilidade dimensional;
- Obtenção de microestruturas mais finas e homogêneas, resultando em melhores propriedades mecânicas, como resistência à fadiga e tenacidade (SHRESTHA; SIMSIRIWONG; SHAMSAEI, 2019).

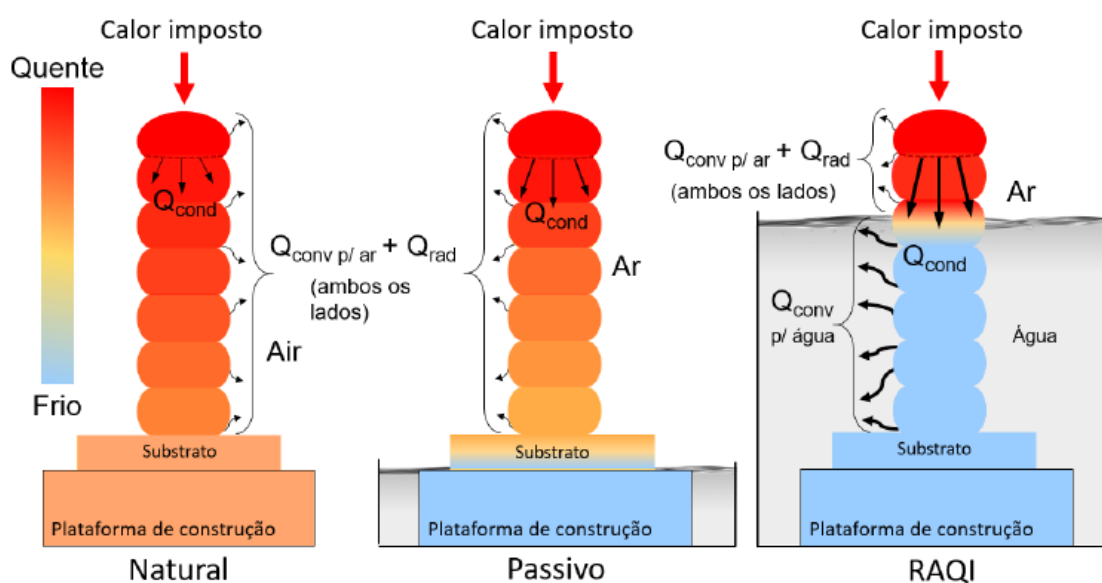


Figura 2.5 - Ilustração de modelo físico simplificado do regime térmico imposto no processo em deposições com resfriamento natural, passivo e ativo (RAQI), onde Q_{cond} = calor por condução, Q_{conv} = calor por convecção, Q_{rad} = calor irradiado (DA SILVA, 2019)

Além disso, a implementação de sistemas de resfriamento ativo controlado permite a repetibilidade e previsibilidade do processo, aspectos essenciais para a produção em escala industrial. A combinação entre monitoramento térmico em tempo real e ajuste dinâmico de parâmetros (como velocidade de deposição, corrente e tempo entre camadas) tem se mostrado eficaz para reduzir gradientes térmicos, melhorar a qualidade superficial e otimizar a integridade metalúrgica das peças fabricadas.

Assim, o controle térmico eficiente é decisivo para o sucesso de processos de manufatura aditiva metálica, garantindo microestruturas estáveis, geometrias precisas e desempenho mecânico confiável das peças produzidas.

2.5.2 Tipos de resfriamento ativo

O resfriamento ativo é uma estratégia fundamental nos processos de deposição metálica, especialmente em manufatura aditiva por arco elétrico (MADA), onde o controle do aporte térmico é crucial para evitar distorções, trincas e defeitos microestruturais. Essa técnica pode ser classificada de acordo com o meio de dissipação de calor e o ponto de aplicação no processo. Entre os principais tipos, destacam-se: resfriamento por água, por ar forçado, por placas térmicas (*heat sinks*) e sistemas híbridos, que combinam dois ou mais métodos (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 - Principais tipos de resfriamento ativo. Fonte: elaborado pelo autor (2025)

TIPO	DEFINIÇÃO
Resfriamento por água	Utiliza canais ou serpentinas de circulação de água para remoção rápida de calor. É eficiente devido à alta capacidade térmica da água, mas requer cuidado para evitar choque térmico, principalmente em ligas sensíveis à têmpera brusca, como certos aços de alta liga (PANIN <i>et al.</i> , 2021).
Resfriamento por ar forçado	Emprega ventiladores ou jatos de ar comprimido direcionados à peça ou à zona de deposição. É menos agressivo que a água e reduz o risco de fissuração térmica, mas apresenta menor capacidade de dissipação, sendo mais indicado para geometrias de parede fina e componentes com baixa massa térmica (HACKENHAAR <i>et al.</i> , 2019).
Resfriamento por placas térmicas (<i>heat sinks</i>)	Baseia-se no uso de placas de cobre, alumínio ou outros metais de alta condutividade térmica, posicionadas na base ou nas laterais da peça, para absorver calor e distribuí-lo de forma mais uniforme. Essa técnica é amplamente empregada em MADA para evitar empenamento e reduzir gradientes térmicos (NAFIS <i>et al.</i> , 2020; YAN <i>et al.</i> , 2025).
Sistemas híbridos	Combinam dois ou mais métodos, como placas térmicas associadas a jatos de ar, permitindo maior controle e flexibilidade na taxa de resfriamento. Esse tipo de sistema é especialmente útil em peças de grande porte e geometrias complexas (HACKENHAAR <i>et al.</i> , 2020).

Além dessas abordagens convencionais, pesquisas recentes têm explorado resfriamento criogênico, utilizando nitrogênio líquido ou dióxido de carbono sólido, com o objetivo de alcançar taxas de resfriamento extremamente altas e, assim, produzir microestruturas ultrafinas. Apesar do potencial, essa tecnologia ainda se restringe ao

ambiente laboratorial, devido ao elevado custo e à complexidade operacional (KORKMAZ; GUPTA, 2024).

O uso adequado do resfriamento ativo permite não apenas reduzir defeitos térmicos, mas também otimizar a microestrutura, melhorar a precisão dimensional e aumentar a repetibilidade no MADA, sendo um componente essencial na fabricação de peças de alto desempenho.

2.5.3 Influência do resfriamento na microestrutura, tensões residuais e integridade dimensional

A taxa de resfriamento exerce influência direta sobre o processo de solidificação e, consequentemente, sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais depositados. Em sistemas metálicos, resfriamentos rápidos promovem intensa nucleação e crescimento limitado dos grãos, originando microestruturas mais finas e homogêneas, o que aumenta a resistência mecânica conforme o mecanismo de Hall-Petch, no qual o limite de escoamento é inversamente proporcional ao tamanho de grão (RASOULI *et al.*, 2008). Em contrapartida, taxas de resfriamento mais lentas favorecem o crescimento de grãos colunares orientados pelo gradiente térmico, resultando em anisotropia microestrutural, redução da tenacidade e menor resistência à fadiga.

No caso de ligas especiais, como os aços inoxidáveis duplex, o controle rigoroso da taxa de resfriamento é essencial para manter o equilíbrio entre as fases ferrítica e austenítica, responsável pela combinação característica de resistência mecânica e resistência à corrosão (GADGIL *et al.*, 1991). Em condições de resfriamento muito rápido, pode ocorrer supersaturação de nitrogênio e formação de austenita de Widmanstätten ou austenita intragranular ($A\gamma_2$), enquanto taxas mais lentas favorecem a austenita de contorno de grão ($A\gamma_1$), resultando em heterogeneidade microestrutural. Dessa forma, a fração volumétrica ideal entre austenita e ferrita depende diretamente da gestão térmica durante o resfriamento.

As tensões residuais também estão intimamente ligadas à taxa de resfriamento, surgindo da expansão e contração térmica não uniformes durante os ciclos térmicos típicos da manufatura aditiva. Resfriamentos excessivamente rápidos podem gerar gradientes térmicos acentuados, acumulando tensões internas que podem evoluir para trincas a frio ou deformações permanentes (BERA; MOHANTY, 2024). Por outro lado, resfriamentos muito lentos permitem certo alívio das tensões, porém podem comprometer a qualidade microestrutural, provocando coalescência de grãos e crescimento excessivo da zona termicamente afetada (ZTA). Portanto, a definição da estratégia de resfriamento deve buscar

um equilíbrio entre minimização de tensões residuais e obtenção de microestrutura refinada e estável.

No que se refere à integridade dimensional, o controle térmico é determinante para evitar deformações geométricas, como empenamento, ovalização e arqueamento das camadas. Em processos de MADA, a ausência de resfriamento ativo pode levar ao acúmulo de calor nas regiões superiores, reduzindo a aderência entre camadas e provocando desvios dimensionais significativos (DING *et al.*, 2015).

Estudos demonstram que a implementação de resfriamento ativo pode reduzir distorções geométricas em até 40%, além de aumentar a repetibilidade e previsibilidade do processo (SHRESTHA; SIMSIRIWONG; SHAMSAEI, 2019). Entretanto, a eficácia dessa técnica depende fortemente da configuração adequada dos parâmetros de resfriamento, incluindo velocidade e direção do fluxo de ar ou líquido, condutividade térmica do substrato e distância entre o sistema de refrigeração e o ponto de deposição (NAFIS *et al.*, 2020).

Portanto, o controle otimizado da taxa de resfriamento é um fator crítico para o desempenho metalúrgico, estrutural e dimensional de componentes fabricados por processos de manufatura aditiva metálica, garantindo um equilíbrio entre integridade mecânica, estabilidade microestrutural e precisão geométrica.

2.6 Formação de parede fina em manufatura aditiva metálica

A manufatura aditiva metálica tem se destacado por sua capacidade de produzir geometrias complexas diretamente a partir de modelos 3D. Contudo, a construção de estruturas muito finas ou muito altas, conhecidas como paredes finas, apresenta desafios técnicos significativos. Entre esses, destacam-se a instabilidade térmica e geométrica, o controle dimensional rigoroso e a necessidade de parâmetros precisos para garantir a qualidade do cordão depositado. Nesta seção, aborda-se tais desafios, os defeitos mais comuns e os parâmetros críticos para a estabilidade do cordão em paredes finas na AM metálica.

2.6.1 Desafios na construção de geometrias finas e altas

Na fabricação de paredes finas utilizando manufatura aditiva com arco elétrico (MADA), um dos desafios mais críticos está relacionado ao acúmulo localizado de calor durante as deposições sucessivas de material. Cada camada depositada adiciona energia térmica ao componente, e a dissipação insuficiente dessa energia provoca instabilidade térmica,

resultando em deformações permanentes, empenamento e, em casos extremos, colapso estrutural antes da conclusão da peça. Esse efeito é especialmente acentuado em componentes com geometrias esbeltas ou ausência de suportes estruturais adequados, que não oferecem rigidez suficiente para absorver tensões geradas pelo calor (CHAKRABORTY *et al.*, 2022).

Estudos conduzidos com superligas à base de níquel demonstraram que a redução da espessura da parede limita a altura máxima de construção. Essa limitação não ocorre por falhas metalúrgicas intrínsecas, mas sim devido à maior distorção térmica e instabilidade dimensional decorrentes do acúmulo de calor. Fenômeno similar é observado em ligas de alumínio, titânio e aços inoxidáveis duplex, onde a baixa condutividade térmica local e a acumulação gradual de energia térmica favorecem o crescimento de grãos colunares alongados e a formação de tensões residuais significativas, comprometendo tanto a precisão geométrica quanto a integridade estrutural da peça.

Além do acúmulo de calor, o controle de geometrias complexas representa outro desafio relevante. Regiões com cantos agudos, mudanças bruscas de direção ou superfícies finas tendem a acumular material fundido em excesso, aumentando localmente a temperatura e provocando fusão irregular entre camadas. Como consequência, surgem defeitos de contorno, variações de altura e acúmulo de volume, prejudicando a qualidade superficial e a repetibilidade dimensional (CASUSO *et al.*, 2021; DING *et al.*, 2021). Em paredes finas de alumínio, a ausência de compensação térmica nessas regiões intensifica a perda de exatidão geométrica, tornando a superfície irregular e aumentando a necessidade de retrabalho ou pós-processamento.

Para minimizar esses efeitos, diversas estratégias adaptativas de controle térmico e de trajetória têm sido desenvolvidas. Entre as mais eficazes está o ajuste dinâmico da velocidade de deposição e da taxa de alimentação do arame, que permite redistribuir o calor ao longo da peça, mantendo a temperatura da poça de fusão dentro da faixa ideal para solidificação. Estudos demonstram que a variação local da velocidade de deposição em regiões críticas, como cantos agudos, pode reduzir os desvios de altura em mais de 50%, mantendo a continuidade do cordão de solda e evitando sobre espessamento (CASUSO *et al.*, 2021; DING *et al.*, 2021).

Dessa forma, o controle térmico e geométrico refinado se torna essencial para a fabricação de paredes finas via MADA, garantindo:

- Estabilidade dimensional, prevenindo empenamento, arqueamento e distorções;
- Uniformidade microestrutural, evitando crescimento excessivo de grãos ou heterogeneidade;

- Reprodutibilidade do processo, fundamental para componentes de alta precisão e aplicações críticas;
- Qualidade superficial e integridade estrutural, especialmente em ligas metálicas sensíveis à variação térmica, como alumínio, titânio e aços duplex.

Em resumo, a gestão adequada do aporte térmico, combinada com estratégias adaptativas de deposição, é determinante para o sucesso do processo MADA em paredes finas e geometrias complexas, permitindo a construção de peças confiáveis, precisas e de alto desempenho.

2.6.2 Controle dimensional e defeitos comuns

A construção de paredes finas em manufatura aditiva metálica, especialmente por meio do processo MADA, apresenta desafios significativos relacionados ao controle dimensional e à integridade estrutural. Em geometrias estreitas e com elevada razão altura/largura, pequenas variações na altura ou no formato do cordão de solda tendem a se acumular camada após camada, resultando em superfícies irregulares, falhas de continuidade e perda de precisão geométrica (FOORGINEJAD *et al.*, 2024). Essas inconsistências podem estar associadas a oscilações térmicas, instabilidade do arco ou parâmetros inadequados de alimentação e deslocamento do arame.

A inconsistência na altura do cordão é um dos fatores críticos que comprometem a deposição contínua. Quando a altura real difere da prevista, ocorre desalinhamento da trajetória nas camadas subsequentes, prejudicando a estabilidade da parede e podendo gerar defeitos acumulativos. Esse efeito é particularmente crítico em paredes finas e altas, onde a menor robustez estrutural aumenta a propensão a deformações e falhas prematuras (DING *et al.*, 2015).

Entre os defeitos mais recorrentes relatados na literatura estão deformações laterais, curvaturas indesejadas, ondulações superficiais e até colapsos parciais (CHAKRABORTY *et al.*, 2022). A origem desses problemas está fortemente ligada ao acúmulo de calor, que provoca tensões residuais não balanceadas e deformações plásticas localizadas. Em ausência de dissipação térmica adequada ou de suporte físico, a parede perde rigidez, levando à instabilidade dimensional e, em casos extremos, à falha estrutural antes de atingir a altura planejada (GU *et al.*, 2016).

Outro problema crítico é o warping, ou empenamento térmico, caracterizado por deformações fora do plano da parede causadas pela retração desigual do material durante o resfriamento. Essas tensões são particularmente significativas em seções de espessura

reduzida, uma vez que a menor massa de material apresenta menor resistência às distorções induzidas por gradientes térmicos (ROSLI *et al.*, 2021).

Além das deformações, defeitos internos, como porosidade, falta de fusão e inclusões, podem surgir quando a deposição não é suficientemente estável ou quando há variações no aporte térmico. Em paredes finas, esses defeitos têm impacto elevado, pois a reduzida área de seção transversal amplifica a influência de descontinuidades sobre a capacidade de carga e a resistência mecânica (SPINASA *et al.*, 2025).

Estudos comparativos indicam que seções finas fabricadas por MADA apresentam maior variabilidade geométrica e menor capacidade de carga em relação a processos convencionais, como usinagem a partir de blocos sólidos ou fundição de precisão (KYVELOU *et al.*, 2021). Essa diferença é explicada, em parte, pelas ondulações inevitáveis geradas pela sobreposição dos cordões de solda e pela ausência de acabamento superficial pós-processo.

- Para mitigar esses desafios, a literatura recomenda diversas estratégias de controle e otimização, incluindo:
- Ajuste fino dos parâmetros de deposição, como corrente, velocidade de deslocamento e taxa de alimentação do arame;
- Adoção de trajetórias otimizadas para distribuição térmica uniforme;
- Uso de resfriamento ativo entre camadas, reduzindo acúmulo de calor;
- Implementação de suportes temporários para estabilização mecânica durante o crescimento da parede (DING *et al.*, 2021);
- Aplicação de técnicas híbridas, combinando MADA com usinagem *in situ*, permitindo corrigir variações geométricas antes que se propaguem para as camadas superiores (MENG; GARDNER, 2021).

Portanto, o controle preciso das variáveis de processo e a compreensão dos mecanismos de formação de defeitos são essenciais para garantir qualidade, estabilidade dimensional e desempenho mecânico compatíveis com exigências industriais. Estabelecer parâmetros que assegurem a estabilidade do cordão depositado e a integridade da parede fina é, portanto, fundamental para o sucesso da manufatura aditiva em componentes metálicos de alta precisão.

2.6.3 Parâmetros críticos para estabilidade do cordão

O controle preciso dos parâmetros de deposição é essencial para garantir a estabilidade do cordão e a integridade estrutural de paredes finas em processos de manufatura aditiva metálica, especialmente pelo MADA. Pequenas variações na alimentação do arame,

velocidade de avanço ou trajetória podem resultar em irregularidades geométricas, deformações acumulativas e perda de repetibilidade do processo.

A Tabela 2.7 sintetiza os principais parâmetros críticos que influenciam a estabilidade do cordão e a qualidade do depósito.

Tabela 2.7 - Parâmetros críticos para estabilidade do cordão. Fonte: elaborado pelo autor (2025)

PARÂMETROS	CONSIDERAÇÕES
Velocidade de avanço vs. taxa de alimentação do arame (WFS/TS)	A escolha adequada da razão entre velocidade do arame e velocidade de avanço afeta diretamente a forma e estabilidade do cordão. Um estudo clássico mostrou que velocidades muito altas de avanço comprometem a qualidade do depósito, enquanto velocidades muito baixas redundam em cordões instáveis (WILLIAMS <i>et al.</i> , 2016).
Controle de sobreposição e cantos agudos	O modelo CCM (Corner Cross-section Model) proposto por Ding <i>et al.</i> (2021) permitiu ajustar localmente parâmetros como a velocidade de avanço nos cantos. Esse ajuste reduziu significativamente o erro acumulado de altura em paredes finas com ângulos entre 15° e 60° (DING <i>et al.</i> , 2021).
Uniformidade de camada e técnicas visuais	Em estruturas metálicas construídas por GMAW, estratégias baseadas em transformada <i>wavelet</i> foram empregadas para monitorar irregularidades de camada, ajustando automaticamente tensão de arco, velocidade e ângulo do bico em tempo real. Essas estratégias melhoraram a uniformidade e reduziram erros de espessura (FOORGINEJAD <i>et al.</i> , 2024).
Modelagem e previsão de deformações	Modelos numéricos com análise térmico-mecânica (como FEM acoplado) são cruciais para prever distorções e tensões residuais em paredes finas. Ding <i>et al.</i> (2021) implementaram modelos transientes usando a técnica de “ <i>element birth</i> ” no software ABAQUS, possibilitando previsão de campos térmicos e deformações em tempo de projeto, reduzindo retrabalhos (DING <i>et al.</i> , 2021).

No geral, a formação de paredes finas em MADA enfrenta desafios complexos relacionados à instabilidade térmica, controle dimensional e à necessidade de precisão nos parâmetros de deposição. Defeitos como deformações laterais, variações de geometria e até colapsos parciais são comuns, exigindo estratégias adaptativas que combinam:

- Ajuste local de parâmetros de deposição, incluindo velocidade de avanço, taxa de alimentação de arame e cadência;
- Monitoramento em tempo real das camadas depositadas para correção imediata de irregularidades;
- Modelagem computacional preditiva para antecipar distorções e tensões residuais;
- Controle de sobreposição e deposição em cantos para reduzir acúmulo de calor e deformações.

O entendimento detalhado e a calibração sistemática desses parâmetros são fundamentais para alcançar alta qualidade, precisão dimensional e viabilidade industrial na produção de paredes finas. Pesquisas contínuas nessa área prometem viabilizar a fabricação confiável de componentes delicados, com eficiência, repetibilidade e integridade estrutural, ampliando o potencial do MADA em aplicações industriais de alta tecnologia.

2.7 Propriedades mecânicas e microestruturais em peças produzidas via MADA

A MADA se destaca pelo seu potencial em fabricar componentes metálicos de grande porte, com custos reduzidos e significativa flexibilidade geométrica. Contudo, as propriedades mecânicas e microestruturais das peças produzidas por MADA diferem das obtidas por processos convencionais, sendo diretamente influenciadas por fatores como parâmetros de soldagem, condições de resfriamento e número de camadas depositadas (DING *et al.*, 2015; WILLIAMS *et al.*, 2016).

2.7.1 Propriedades mecânicas (dureza, resistência e tenacidade)

As propriedades mecânicas de peças produzidas por manufatura aditiva com arco elétrico (MADA) estão intimamente relacionadas ao histórico térmico do processo, uma vez que o aquecimento e resfriamento sucessivos durante a deposição determinam a microestrutura, as tensões residuais e, conseqüentemente, o desempenho final do componente. Entre os principais parâmetros mecânicos, destacam-se dureza, resistência à tração e tenacidade, fundamentais para a caracterização de materiais metálicos.

A dureza define-se como a resistência de um material à deformação plástica localizada, geralmente avaliada pela penetração de um corpo padronizado na superfície (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). Em processos MADA, a dureza é fortemente influenciada por fatores como velocidade de deposição, intensidade de corrente elétrica e energia de entrada no material. Estudos de Rajkumar *et al.* (2024) indicam que maiores aportes térmicos favorecem o crescimento de grãos, resultando em redução da dureza média, enquanto menores energias de entrada promovem microestruturas mais finas e homogêneas, aumentando a dureza do material.

A resistência mecânica, especialmente a resistência à tração, corresponde à capacidade de um material suportar tensões sem falha, sendo medida pela tensão máxima antes da ruptura (DIETER, 1981). Quando os parâmetros de deposição são adequadamente

controlados, peças fabricadas por MADA podem atingir valores comparáveis aos de processos tradicionais, como laminação ou forjamento. Por exemplo, em ligas de titânio, a resistência à tração pode alcançar aproximadamente 900 MPa, enquanto em aços de alta resistência os valores podem superar 700 MPa, dependendo do ciclo térmico aplicado durante a deposição (DING *et al.*, 2015; WILLIAMS *et al.*, 2016).

A tenacidade, definida como a capacidade de um material absorver energia até a fratura, combina resistência e ductilidade em um único parâmetro (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). Essa propriedade é particularmente sensível ao histórico térmico em MADA. O acúmulo de calor entre camadas sucessivas pode gerar regiões de fragilidade devido à transformação de fases ou à precipitação de fases secundárias indesejadas. Gurmesa *et al.* (2024) observaram que a tenacidade de peças de aço inoxidável produzidas por MADA tende a ser inferior à de processos convencionais, devido à porosidade, heterogeneidade microestrutural e tensões residuais acumuladas durante a deposição.

A microestrutura evolui de maneira diferenciada ao longo da altura da peça. Próximo à base, o resfriamento mais rápido favorece a formação de grãos finos e equiaxiais, aumentando dureza e resistência local. Já nas camadas superiores, o acúmulo de calor entre deposições consecutivas promove o crescimento de grãos colunares, introduzindo heterogeneidade microestrutural e variações locais nas propriedades mecânicas (RAFIEAZAD *et al.*, 2019). Essa diferença é particularmente relevante em estruturas de grande porte, onde as regiões superiores podem apresentar menor resistência e tenacidade, impactando a performance estrutural global.

Em síntese, o histórico térmico e o controle preciso dos parâmetros de deposição são determinantes para a qualidade mecânica das peças produzidas por MADA. A compreensão da relação entre energia de entrada, taxa de resfriamento, número de camadas e microestrutura é essencial para otimizar dureza, resistência e tenacidade, garantindo componentes com integridade estrutural, uniformidade de propriedades e desempenho confiável em aplicações industriais.

2.7.2 Evolução da microestrutura em função do número de camadas e do resfriamento

A microestrutura resultante no processo MADA é fortemente determinada por três fatores interligados: o número de camadas depositadas, a energia de aporte térmico e as condições de resfriamento entre camadas. Cada cordão depositado gera um ciclo térmico que aquece e resfria a região previamente solidificada, provocando fenômenos como revenimento parcial, crescimento de grãos e transformações de fase. Esses ciclos térmicos sucessivos podem alterar significativamente a morfológica microestrutural e a distribuição de fases,

influenciando diretamente as propriedades mecânicas, resistência à corrosão e estabilidade dimensional do componente final.

Em ligas de alumínio, pesquisas indicam que a região próxima ao substrato geralmente apresenta grãos colunares alongados, orientados na direção do fluxo de calor devido à forte condução térmica para a base. À medida que se deposita material nas camadas superiores, o gradiente térmico diminui e o reaquecimento interpass promove microestruturas mais equiaxiais e refinadas, resultado da redução da taxa de solidificação e do balanceamento entre nucleação e crescimento de grãos (LIU *et al.*, 2022). Esse fenômeno evidencia que a história térmica local, ou seja, o padrão de aquecimento e resfriamento experimentado em cada ponto da peça, é determinante para a morfologia final dos grãos.

Em ligas ferrosas, a complexidade microestrutural aumenta significativamente devido à presença de múltiplas fases que dependem da taxa de resfriamento. Sob resfriamento rápido, podem se formar martensita ou bainita, enquanto a ferrita acicular e a austenita retida surgem em condições intermediárias. O reaquecimento interpass, por sua vez, pode causar revenimento parcial da martensita e precipitação de carbonetos finos, modificando dureza e tenacidade (SOS *et al.*, 2023). Assim, mesmo pequenas variações no aporte térmico ou na cadência de deposição podem gerar heterogeneidades microestruturais significativas, impactando propriedades locais.

O controle térmico entre camadas é essencial para minimizar problemas como crescimento excessivo de grãos, zonas termicamente afetadas amplas e heterogeneidades microestruturais. Processos sem resfriamento ativo tendem a gerar regiões com microestrutura grosseira, menores propriedades mecânicas e maior suscetibilidade a deformações. Em contrapartida, técnicas de resfriamento ativo, como jatos de ar comprimido, água nebulizada ou substratos refrigerados, promovem microestruturas mais finas e homogêneas, melhorando resistência, dureza e estabilidade dimensional (WILLIAMS *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2013).

Para os aços inoxidáveis duplex, o desafio é ainda mais crítico. O equilíbrio entre ferrita (δ) e austenita (γ) é altamente sensível à taxa de resfriamento e ao acúmulo de calor intercamadas. Excesso de calor favorece a formação excessiva de ferrita e inibe a nucleação de austenita secundária, comprometendo a resistência mecânica, ductilidade e resistência à corrosão (HU *et al.*, 2024). Além disso, a austenita pode apresentar diferentes morfologias, de contorno de grão, intragranular ou de Widmanstätten, cada uma influenciando de maneira distinta as propriedades finais, como tenacidade, dureza e resistência à corrosão localizada.

Dessa forma, estratégias de gerenciamento térmico adaptativo são fundamentais para manter uma microestrutura equilibrada e funcionalmente estável, garantindo aproximadamente 50% de ferrita e 50% de austenita em aços duplex. O controle rigoroso da

temperatura entre camadas, da velocidade de deposição e da cadência de alimentação de arame é, portanto, determinante para a qualidade metalúrgica e desempenho em serviço de peças fabricadas por MADA.

Em resumo, a microestrutura em MADA não é apenas função do material, mas um reflexo direto do histórico térmico da peça. O correto planejamento de parâmetros térmicos e estratégias de resfriamento possibilita otimizar a dureza, resistência mecânica, tenacidade e estabilidade dimensional, garantindo que peças complexas e de paredes finas atendam aos rigorosos requisitos industriais.

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas detalhadamente as etapas do procedimento experimental adotado para a fabricação por MADA de aço inoxidável duplex, incluindo a configuração do processo, os parâmetros operacionais e as condições de deposição. Também são descritos os ensaios destrutivos e não destrutivos realizados para avaliação das propriedades mecânicas e da integridade do material, bem como as análises microestruturais conduzidas para caracterização das fases formadas e verificação dos efeitos térmicos decorrentes do processo.

3.1 Metodologia geral

Neste trabalho foi utilizado um substrato de aço carbono baixa liga para a execução de paredes formada por cordões de solda sobreposto ao inferior, utilizando-se arame de AID, sendo avaliados a velocidade de alimentação, velocidade de deposição, vazão do gás de proteção e linhas sinérgicas em modo pulsado com a fonte *Fronius CMT TPS 600i* a fim de obter os corpos de prova (CP) conforme planejado.

Assim, foi estabelecido uma condição nos parâmetros de entrada a fim de estabelecer uma forma mais estável de transferência metálica, resultando em um menor índice de respingos e uma transferência mais estável no processo. Portanto, a avaliação dos melhores parâmetros seguiu as avaliações estabelecidas a fim de garantir um baixo nível de energia imposta ao processo, com uma velocidade de alimentação e de deposição sendo fixadas.

Foi proposto a deposição de duas paredes com estratégias diferentes. A técnica RAQI (resfriamento ativo por imersão controlada em água) foi utilizada na primeira deposição para garantir que menores temperaturas fossem atingidas e o tempo entre camadas fosse menor, resultando assim em temperaturas menores entre camadas de deposição, sendo um processo passivo que em primeiro momento está em contato com o substrato e logo após ativo, com o

nível de água e proteção térmica subindo conforme a parede vai subindo também, evitando com que o calor possa ser difundido entre camadas inferiores.

A segunda parede depositada seguiu o modo de convecção natural, sendo resfriada ao ar à temperatura ambiente, resultando em um maior tempo de deposição entre camadas o que influenciaria na média de temperatura maior em camadas inferiores conforme novas camadas serão depositadas, podendo sofrer um maior aporte térmico que impactaria em suas propriedades mecânicas e estruturais. A escolha do segundo método se dá pelo fato de que existem limitações no uso do RAQI perante variadas geometrias de peças fabricadas via manufatura aditiva.

As principais diferenças existentes nos processos são demonstradas na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1 - Principais diferenças existentes nos processos RAQI e Convecção natural. Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Aspectos	RAQI	Convecção natural
Geometria	Permite uma ampla possibilidade de construção de geometrias de acordo com o modo de transferência escolhido, mas com restrições.	Permite uma ampla possibilidade de construção de geometrias de acordo com o modo de transferência escolhido
Tempo	Menor tempo devido a maior troca térmica do sistema.	Maior tempo, devido a troca térmica ser por convecção com o ar.
Posição	Limita-se à posição plana, podendo haver pouca variação da posição da tocha de acordo com a camada superior do cordão.	Permite uma ampla posição de deposição de acordo com a necessidade da geometria, sem risco de “afogamento” da tocha.
Custo	Possui um maior custo por exigir um número maior de componentes e sistemas ligados entre si, como chiller, bomba e trocadores de calor.	Menor custo pois não depende de nenhum sistema de troca de calor e consequentemente, menos equipamentos.
Infraestrutura	Necessidade de uma maior infraestrutura elétrica e hidráulica, além de maior espaço útil.	Menor espaço dedicado ao sistema resultando em menor espaço utilizado.
Aporte térmico	Garante um menor aporte térmico, diminuindo drasticamente a transferência de calor de camadas superiores até as camadas inferiores da deposição.	Maior aporte térmico, com camadas inferiores sofrendo com uma maior temperatura proveniente de camadas superiores.

Durante os testes, foram adquiridos sinais de tensão e corrente. As paredes foram pós processadas por usinagem convencional e feito uma análise de dimensões afim de garantir

as dimensões estipuladas através de escalas e paquímetro universal de resolução de 0,05 mm. Foram tiradas seções transversais para obtenção de corpos de prova (CP).

3.2 Procedimentos experimentais, insumos e análise dos dados

3.2.1 Aparato e estratégia da deposição de pré-formas

Para a realização dos experimentos foi utilizado uma fonte *Fronius CMT TPS 600i* junto à um alimentador *Fronius SB 500i R* e uma tocha *Fronius WF 60i Robacta Drive*. Essa fonte permite a seleção de parâmetros de soldagem sinérgicos com a escolha de modos de transferência metálica em Curto-Circuito Convencional, CMT e pulsado junto à bitola do arame e gás de proteção. Os parâmetros utilizados foi o sinérgico pulsado para o aço 2209, grupo nº 13 BBA-MA, ciclo S2 e correção impulso de 3,5, com a correção do arco voltaico sendo corrigido após cordões preliminares serem depositados. Após isso, foi depositado uma pequena parede de parametrização para validar a estabilidade do processo.

Nesse estudo, foi utilizado a linha sinérgica adequado para o aço inoxidável, usando um substrato de aço carbono SAE 1020 de 1" de espessura preso com grampos tipo C afim de garantir o mínimo de desvio de planeza (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Cordões preliminares e Parede de parametrização. Fonte: autor (2025)

3.2.2 Metal de adição

O arame de soldagem selecionado para a deposição foi o Böhler Thermanit AWS ER 2209 (correspondente ao código 14343-A na norma ISO), amplamente empregado na soldagem de aços inoxidáveis duplex (AID) devido à sua composição química balanceada e à capacidade de manter a proporção ideal entre ferrita e austenita no cordão de solda.

A composição química do arame, fornecida pelo fabricante Böhler, está detalhada na Tabela 3.2, destacando os principais elementos de liga, como cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo) e nitrogênio (N), que conferem ao material alta resistência mecânica, excelente resistência à corrosão localizada e estabilidade microestrutural.

Tabela 3.2 - Composição química em porcentagem de massa dos elementos do arame AWS ER2209 segundo a fabricante (Böhler). Fonte: autor (2025)

Elemento	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	N
% em peso	0,02	22,8	8,5	3,1	0,5	1,6	0,17

O uso desse arame permite assegurar cordões estáveis, baixa geração de respingos e deposição uniforme, sendo adequado para processos de manufatura aditiva por arco metálico (MADA), especialmente na construção de paredes finas de aços duplex.

3.2.3 Gás de proteção

O gás de proteção utilizado no processo de soldagem foi uma mistura de 98% Argônio com 2,0% de Dióxido de Carbono (CO₂) – Ar+2%CO₂, comercialmente conhecida como Arcal Chrome do fabricante Linde (White Martins). Essa composição gasosa atua como um gás com menor condutividade térmica, promovendo a formação e a estabilidade do arco elétrico durante a deposição, ao mesmo tempo em que gera uma camada de óxido superficial, essencial para manter a continuidade e regularidade do arco.

Embora a adição de CO₂ seja vantajosa para a estabilidade do arco e penetração controlada, é importante destacar que gases reativos podem induzir fragilização localizada e aumento da porosidade, caso não sejam cuidadosamente controlados (Silva, 2019). Portanto, a escolha dessa mistura busca equilibrar a estabilidade do processo e a qualidade microestrutural do cordão de solda, especialmente em aços inoxidáveis duplex, onde a integridade da microestrutura ferrita-austenita é crítica para o desempenho mecânico e resistência à corrosão.

3.2.4 Aquisição de sinais

Os sinais de corrente, tensão, velocidade de alimentação e temperatura foram adquiridos através de sistemas de aquisição que consistem em:

- Computador com o programa *LabView*;
- Transdutor de corrente por efeito Hall (HTA 600-S), para medição de corrente;
- Condicionador de sinais (desenvolvido no Laprosolda – UFU)
- Placa de aquisição *National Instruments* (NI USB-6009)
- Câmera térmica da marca FLIR A-Series e termopar tipo K instalado no substrato juntamente ao programa *Team View*, para uma emissividade de ($\sim 0,35$).

Os sinais de tensão e corrente foram adquiridos durante a deposição de camadas, juntamente com a filmagem. Os dados foram salvos em .xlsx e posteriormente analisados em termos gráficos e estatísticos.

A parede depositada sem resfriamento foi adquirida apenas dados em RMS da própria fonte Fronius, com parâmetros ajustados em média por camada, já a parede com resfriamento ativo com valores adquiridos através da placa e condicionador de sinais a uma frequência de 5 kHz. A temperatura de interpasse foram aferidas com um pirômetro juntamente com a câmera térmica afim de controlar a temperatura de interpasse, com o tempo de interpasse sendo programado a partir de leituras realizadas nas primeiras camadas de deposição.

3.2.5 Avaliação geométrica

A avaliação da geometria das pré-formas foi realizada por meio de escalas mecânicas de precisão, conforme ilustrado nas Figuras 3.2 e 3.3. Esse procedimento permitiu medir avaliar as dimensões lineares, como comprimento, altura e espessura das paredes depositadas, possibilitando a identificação de irregularidades superficiais, variações de espessura e desvios dimensionais.



Figura 3.2 - Parede RAQI com 94 camadas depositadas. Fonte: autor (2025)



Figura 3.3 - Parede sem resfriamento com 95 camadas depositadas. Fonte: autor (2025)

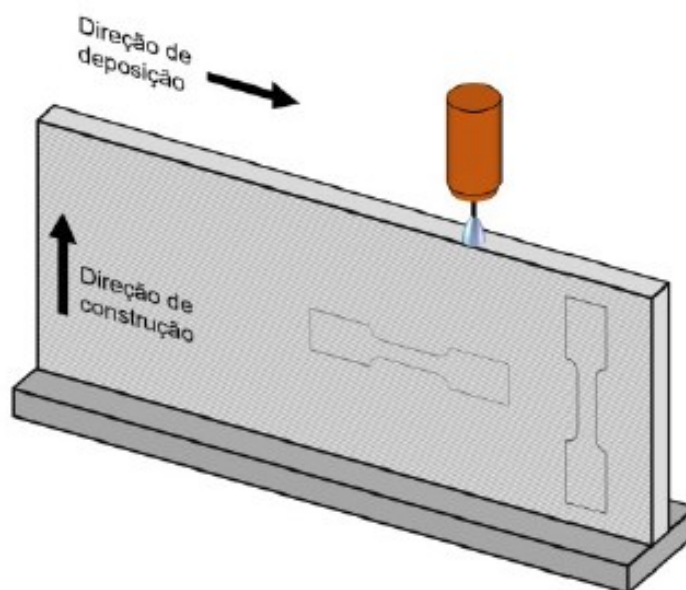


Figura 3.4 – Ilustração das direções de deposição e construção e posicionamento de corpos de prova de tração horizontais e verticais, comuns na literatura MADA. Fonte: Scotti (2021)

Os corpos de prova verticais são aqueles cuja direção principal de carregamento mecânico é paralela à direção de crescimento das camadas, isto é, alinhada ao eixo de construção (normalmente o eixo Z da máquina). Nesse caso, o carregamento é aplicado perpendicularmente às interfaces entre camadas, tornando o ensaio particularmente sensível à qualidade da ligação intercamadas, à presença de falta de fusão e à heterogeneidade microestrutural ao longo da altura da peça (DEBROY *et al.*, 2018).

Os corpos de prova horizontais são fabricados com a direção principal de carregamento perpendicular à direção de crescimento das camadas, ou seja, o esforço mecânico atua paralelamente às interfaces entre camadas. Nessa configuração, a solicitação mecânica ocorre predominantemente dentro de uma mesma camada ou ao longo do plano de deposição, reduzindo a influência direta de defeitos intercamadas no desempenho mecânico (ISO/ASTM 52921:2013).

3.2.6 Planejamento experimental

Por meio da parametrização sistemática dos cordões depositados sobre a chapa, foi identificado que a combinação de corrente pulsada no aço inoxidável duplex 2209 com configuração CC+ proporcionou os melhores resultados em termos de estabilidade do arco, redução de respingos e uniformidade na taxa de deposição. Essa configuração sinérgica

permitiu manter um arco consistente durante toda a deposição, favorecendo a formação de cordões regulares e reduzindo imperfeições superficiais.

A construção das paredes foi realizada utilizando robôs industriais, garantindo precisão e repetibilidade na deposição. Para paredes construídas sem resfriamento ativo, utilizou-se o robô Yaskawa Motoman AR 2010, enquanto para a parede RAQI (Resfriamento Ativo de Quase Imersão), com dimensões de 300 mm de comprimento, 200 mm de altura e 14 mm de espessura, empregou-se o robô Motoman HP20. A escolha do robô adequado para cada condição considerou os acessórios da cuba necessários para a deposição com resfriamento.

Os parâmetros de trajetória da tocha executados pelos robôs foram cuidadosamente definidos com base em estudos prévios e ajustes experimentais, considerando fatores como velocidade de avanço, taxa de alimentação do arame, ângulo de deposição e cadência de pulsos elétricos, conforme apresentados na Tabela 3.4. Essa parametrização foi fundamental para garantir uniformidade dimensional, controle térmico local e estabilidade microestrutural durante a construção das paredes.

Tabela 3.4 - Parâmetros da trajetória da tocha executada. Fonte: autor (2025)

Parâmetro	Valor
Passo	4,875 mm
Amplitude	8 mm
Velocidade do deslocamento	396 mm /min
Velocidade efetiva	150 mm/min
Tempo de parada	0 s

O substrato foi fixado com 10 parafusos M10 com o aperto de 5 Nm para garantir uma fixação uniforme para evitar desvios de planeza (Figura 3.4 e 3.5).



Figura 3.4 - Bancada deposição RAQI. Fonte: autor (2025)

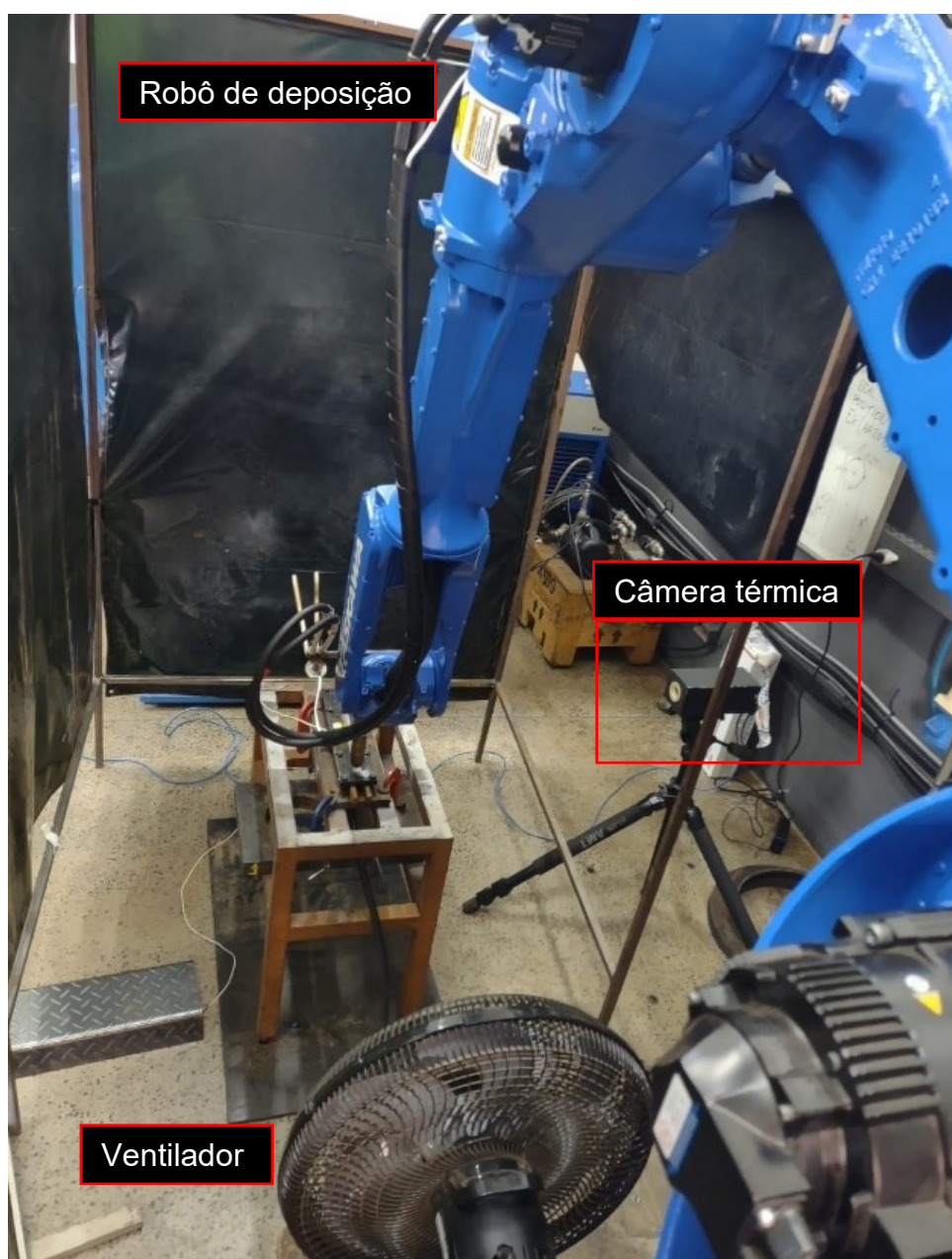


Figura 3.5 - Bancada de deposição SR. Fonte: autor (2025)

As primeiras camadas da deposição exigiram ajuste manual da DBCP (Distância Bico-Contato-Peça), a fim de garantir o início estável do cordão de solda e evitar interferências ou falhas de adesão ao substrato. A DBCP é definida como a distância entre a extremidade do bico de contato da tocha de soldagem e a superfície da peça ou poça de fusão durante o processo. Em sistemas robotizados de soldagem e em processos de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA/WAAM), essa distância está diretamente relacionada à posição vertical da tocha, sendo frequentemente ajustada por meio da chamada subida do robô, que corresponde ao deslocamento incremental do eixo Z após a deposição de cada cordão ou camada (LIN; CHOU, 2015; DING et al., 2015).

O controle adequado da DBCP é um dos parâmetros mais críticos para a estabilidade do arco elétrico, controle do aporte térmico, geometria do cordão e qualidade metalúrgica do material depositado. Em processos baseados em arco elétrico, como GMAW e GTAW, variações na DBCP alteram significativamente a resistência elétrica do arame, a corrente efetiva, a tensão do arco e, conseqüentemente, a energia fornecida ao material (MODENESI; MARQUES, 2012).

Após a estabilização do processo, o valor da DBCP foi registrado e incorporado na programação do robô, permitindo que as camadas subsequentes fossem depositadas de forma automatizada e consistente.

Durante a deposição, sempre que necessário, a DBCP foi corrigida de maneira pontual, assegurando uniformidade da altura do cordão, estabilidade do arco elétrico e integridade da parede. Os ajustes e os parâmetros finais adotados para cada condição de teste encontram-se detalhados na Tabela 3.5, fornecendo referência para a replicação e controle do processo em experimentos subsequentes.

Tabela 3.5 - Ajuste dos parâmetros. Fonte: autor (2025)

Parâmetro	Valor
Distância bico contato-peça	20 mm
Velocidade de alimentação do arame	5,5 m/min
Vazão do gás de proteção	16 l/min
Tempo entre camadas com resfriamento	90 s
Tempo entre camadas sem resfriamento	9 min / 540 s

A deposição da parede com resfriamento ativo foi realizada em 94 camadas, utilizando resfriamento por água à temperatura entre 30 e 60°C. Para garantir eficácia na remoção de calor e evitar deformações excessivas, foi mantida uma distância controlada entre a lâmina d'água e a peça (DLAP) de 15 mm, conforme ilustrado na Figura 3.6. Essa configuração permitiu reduzir o acúmulo térmico entre camadas, limitando o crescimento excessivo de grãos e a formação de tensões residuais elevadas.

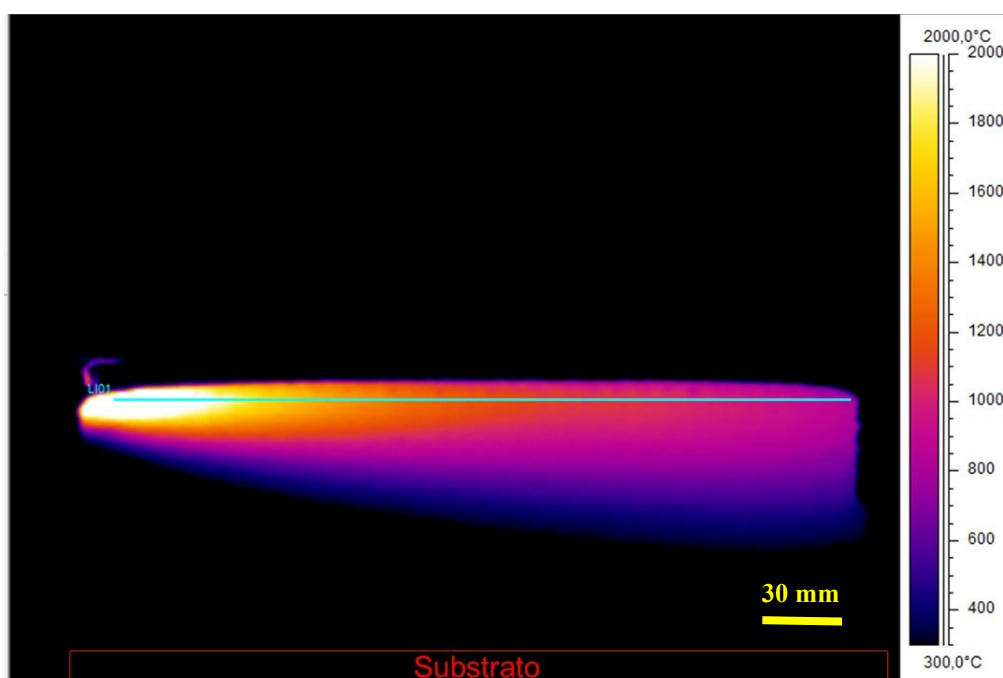


Figura 3.6 - Imagem da deposição da parede por câmera térmica sem resfriamento, com temperaturas acima dos 800°C em camadas inferiores, deposição da 46ª camada. Fonte: autor (2025)

A parede depositada sem resfriamento ativo foi construída em 95 camadas até atingir a altura final de 200 mm. Durante o processo, foi mantida uma temperatura de interpasse inferior a 150 °C, a fim de controlar o aporte térmico entre camadas e evitar superaquecimento local.

Para auxiliar na dissipação de calor e acelerar o resfriamento convectivo natural, foi utilizado um ventilador doméstico de 40 cm, acionado por meio de relé durante as pausas entre a deposição das camadas. Essa estratégia permitiu reduzir parcialmente o acúmulo térmico, mantendo a estabilidade do cordão e contribuindo para a integridade dimensional da parede, embora sem atingir a eficiência do resfriamento ativo por água (Figura 3.7).

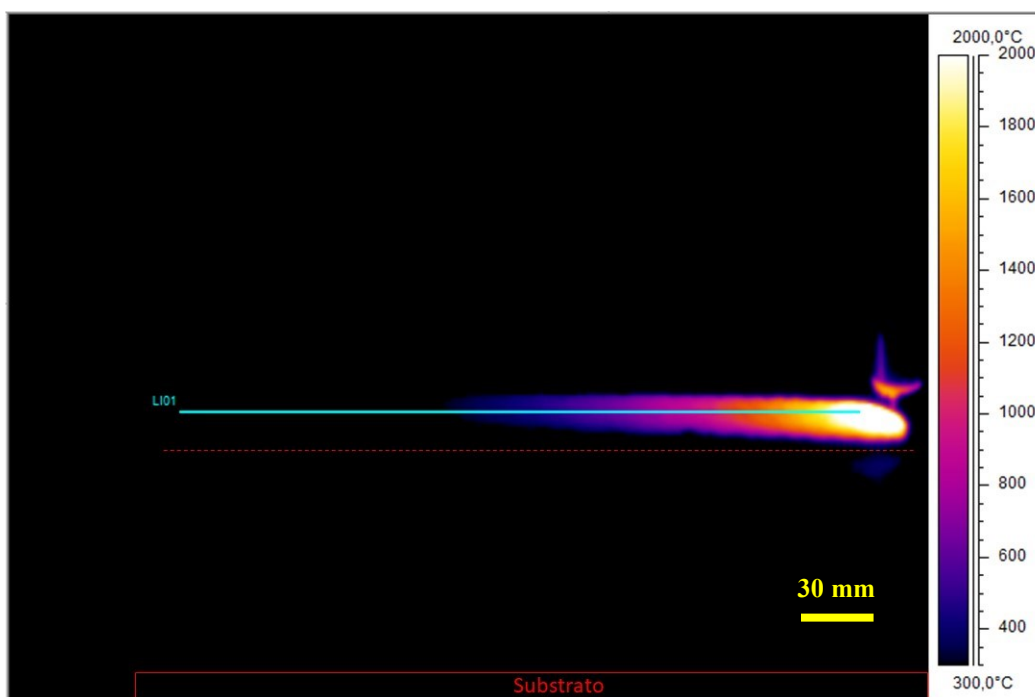


Figura 3.7 – Imagem da fusão do material com resfriamento ativo na 45ª camada, sem influência significativa da temperatura em camadas inferiores, sendo a linha tracejada sendo o nível de água. Fonte: autor (2025)

Ao analisar os resultados mostrados na Figura 3.6, observa-se que a deposição provocou uma transferência significativa de calor ao longo de toda a parede, evidenciando a influência térmica acumulada em todas as camadas. Em contraste, na Figura 3.7, nota-se que o aporte térmico nas camadas inferiores é relativamente reduzido, indicando que o calor se dissipa principalmente nas regiões superiores da parede, preservando parcialmente a microestrutura das camadas próximas ao substrato.

Após a conclusão do processo de deposição, as paredes foram desprendidas do substrato utilizando uma serra fita, garantindo cortes precisos e minimizando distorções. Em seguida, as peças passaram por usinagem em fresadora convencional para adequar dimensões e obter superfícies planas, preparando-as para a confecção dos corpos de prova.

A diagramação dos corpos de prova foi cuidadosamente planejada, e os cortes finais foram realizados em máquina de eletroerosão à fio (WEDM), permitindo obtenção de peças com tolerâncias rigorosas para posterior tratamento térmico e ensaios mecânicos individuais, conforme recomendado pela norma ASTM A370:2023 (Figura 3.8). Esse procedimento garantiu que cada corpo de prova mantivesse integridade dimensional e microestrutural, assegurando a confiabilidade dos resultados experimentais.

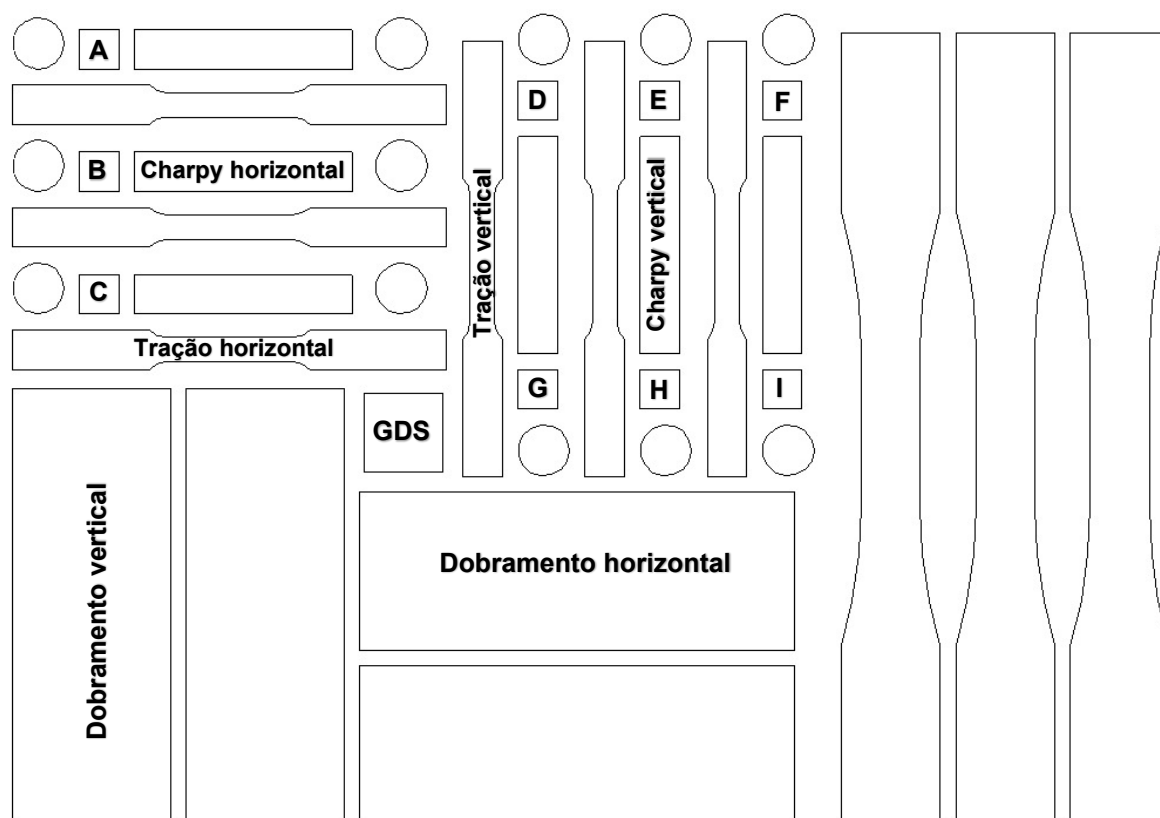


Figura 3.8 - Diagramação dos corpos de prova. Fonte: autor (2025)

3.2.7 Ensaios destrutivos

- **Ensaio de tração**

Para a obtenção dos ensaios de tração, foi utilizada uma máquina de tração computadorizada Shimadzu®, com capacidade máxima de 300 kN. A velocidade de deformação aplicada foi de 0,2 mm/min, permitindo a construção precisa do gráfico tensão × deformação e garantindo a confiabilidade dos dados mecânicos obtidos. Foram selecionados 6 corpos de prova de tração em cada parede, sendo 3 na horizontal e 3 na vertical de dimensões 100 x 10 x 6, correspondendo respectivamente ao comprimento, altura e espessura em mm.

Essa configuração permitiu correlacionar as propriedades mecânicas, como resistência à tração, limite de escoamento e deformação total, com a história térmica e microestrutural de cada parede, considerando diferentes orientações de deposição e possíveis gradientes de propriedades.

- **Ensaio de Impacto**

De maneira semelhante, foram selecionados corpos de prova para ensaio Charpy-V, com dimensões de 55 × 10 × 10 mm (comprimento × altura × espessura), apresentando

entalhe em V de 2 mm de profundidade e ângulo de 45°. Os ensaios foram conduzidos à temperatura de -40°C, com o objetivo de avaliar o comportamento ao impacto em condições de baixa temperatura.

A preparação e execução dos corpos de prova seguiram rigorosamente os procedimentos da norma ASTM A923, que define diferentes métodos de avaliação, incluindo ensaios de corrosão, impacto e análise metalográfica, para identificar a presença de fases intermetálicas deletérias em aços inoxidáveis duplex. O ensaio Charpy foi realizado utilizando martelo de 8 mm, conforme especificado para as condições experimentais adotadas.

Após a fratura, a região rompida do corpo de prova foi cuidadosamente separada e submetida à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), permitindo a caracterização detalhada do aspecto da fratura e a análise do comportamento dúctil do material, incluindo a identificação de possíveis microtrincas, porosidades ou heterogeneidades microestruturais que pudessem comprometer a integridade do aço duplex (Figura 3.9).

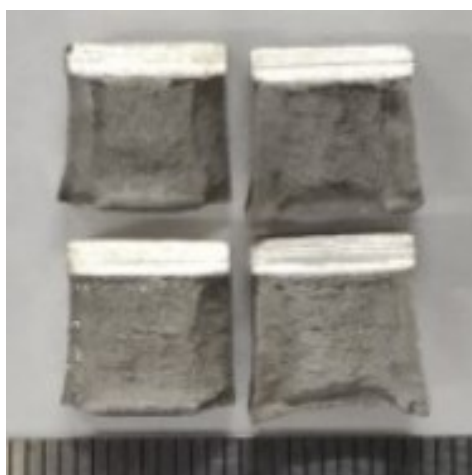


Figura 3.9 - Corpos de prova charpy horizontais, à esquerda da parede sem resfriamento e à direita da parede com resfriamento, evidenciando região da fratura para análise em microscópio. Fonte: autor (2025)

- **Ensaio de dobramento**

O ensaio de dobramento foi realizado seguindo os procedimentos da norma AWS D1.1:2021, sendo um ensaio qualitativo, destinado a fornecer critérios de aprovação para juntas soldadas, em vez de fornecer medidas quantitativas de resistência ou ductilidade. No contexto deste trabalho, que envolve deposição em processo de MADA, o ensaio teve como objetivo principal avaliar a qualidade do processo de deposição, verificando se as paredes fabricadas suportam deformações sem apresentar trincas, fissuras ou rupturas.

Para aumentar a confiabilidade da avaliação, foram realizados dois dobramentos em cada corpo de prova, considerando tanto a direção horizontal quanto a vertical, de forma a detectar possíveis anisotropias ou defeitos direcionais. Os corpos de prova apresentaram dimensões de 150 mm de comprimento, 40 mm de largura e 10 mm de espessura, garantindo compatibilidade com as recomendações da norma.

O mandril utilizado possuía 40 mm de diâmetro, escolhido com base na norma, que permite o uso de um fator de multiplicação de 4 vezes a espessura para aços de alta resistência. Essa configuração assegurou que o ensaio de dobramento submetesse a parede a deformações suficientes para evidenciar qualquer fragilidade ou imperfeição no cordão depositado, permitindo uma avaliação prática e confiável da integridade da parede construída via MADA.

- **Ensaio de microdureza**

A análise de microdureza foi conduzida utilizando uma máquina computadorizada Shimadzu HMV-G, com o objetivo de avaliar a variação de dureza ao longo da face das paredes depositadas, considerando tanto as camadas interpassadas quanto as possíveis diferenças microestruturais decorrentes da formação de fases durante o processo de deposição.

Para garantir resultados confiáveis, os corpos de prova foram previamente embutidos em baquelite, seguindo-se um processo de lixamento em sequência de granulometrias adequadas e posterior polimento, de forma a reduzir ao mínimo qualquer interferência causada pela rugosidade superficial, conforme recomendações gerais da norma ASTM E384:2017b.

Os ensaios foram realizados em três corpos de prova por parede, posicionados em regiões distintas: próximo à borda, na região central e na região médio-central da seção transversal. Para cada corpo de prova, foram aplicadas 47 endentações, com espaçamento de 0,125 mm entre elas e a uma distância de 1 mm da borda, garantindo uma representatividade adequada da distribuição de dureza ao longo do perfil analisado.

Essa metodologia permitiu mapear com precisão as variações de dureza resultantes de gradientes térmicos, efeitos de reaquecimento *interpass* e heterogeneidades microestruturais, fornecendo dados essenciais para a correlação entre histórico térmico, microestrutura e desempenho mecânico das paredes fabricadas por MADA.

3.2.8 Ensaios não-destrutivos

- **Preparação metalográfica**

A parede depositada passou inicialmente por preparação mecânica de usinagem, utilizando uma fresa circular, com o objetivo de eliminar imperfeições superficiais entre camadas e garantir uma superfície limpa, plana e uniforme para subsequente caracterização. Em seguida, foram retiradas seções transversais das paredes, que foram embutidas em baquelite e submetidas ao processo de preparo metalográfico.

O lixamento das amostras seguiu uma sequência crescente de granulometria (80, 120, 400, 600 e 1200), seguido de polimento em feltro circular com suspensão líquida à base de alumina, visando obter uma superfície livre de riscos e irregularidades, adequada para observações microestruturais detalhadas.

Em seguida foi realizado o ataque químico, fundamental para identificar microestruturas colunares; distinguir regiões fundidas e reaquecidas; avaliar homogeneidade entre camadas; e correlacionar microestrutura com parâmetros térmicos e mecânicos. A escolha adequada do reagente e das condições de ataque é, portanto, essencial para uma interpretação correta da microestrutura e para a validação de resultados experimentais em estudos de MA (DEBROY *et al.*, 2018).

O ataque Behara modificado e suas variações, como Beraha I e II, são amplamente utilizados na metalografia de aços inoxidáveis, especialmente duplex e superduplex, por permitirem a distinção eficiente entre ferrita, austenita e, em alguns casos, martensita, por meio de contraste de coloração, sendo particularmente adequados para a avaliação do equilíbrio de fases e de heterogeneidades microestruturais (VANDER VOORT, 1999; ASM HANDBOOK, 2004).

Reagentes como o Kalling e o Villela são empregados de forma complementar, destacando contornos de grão, regiões segregadas e produtos de transformação em aços carbono, aços ligados e materiais soldados, embora apresentem menor seletividade para a diferenciação de fases em aços duplex. O ataque oxálico, é utilizado principalmente para a avaliação da suscetibilidade à corrosão intergranular e à sensibilização, não tendo como foco a revelação de fases. Enquanto os ataques eletrolíticos oferecem maior controle e reprodutibilidade na revelação de microestruturas complexas, sendo especialmente vantajosos na caracterização de materiais produzidos por manufatura aditiva e ligas de elevada resistência à corrosão (ASTM A262; ASM HANDBOOK, 2004).

O ataque químico foi realizado utilizando o reagente Behara modificado, preparado com a seguinte composição: 1 g de metabissulfito de potássio, 2 g de bissulfito de amônio, 80 mL de água destilada e 20 mL de ácido clorídrico. As amostras foram imersas na solução por 30

segundos, procedimento que, segundo a norma ASTM E407:2015, permite um ataque seletivo à fase ferrítica, conferindo-lhe coloração azulada e facilitando a quantificação relativa de ferrita e austenita em aços inoxidáveis duplex.

As análises micrográficas foram conduzidas utilizando um microscópio óptico Zeiss Axiocam 305 color (Figura 3.10) para observações de ampla escala e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachi TM4000Plus para caracterização em maior detalhe, assegurando uma avaliação completa da morfologia, distribuição de fases e eventuais heterogeneidades microestruturais.

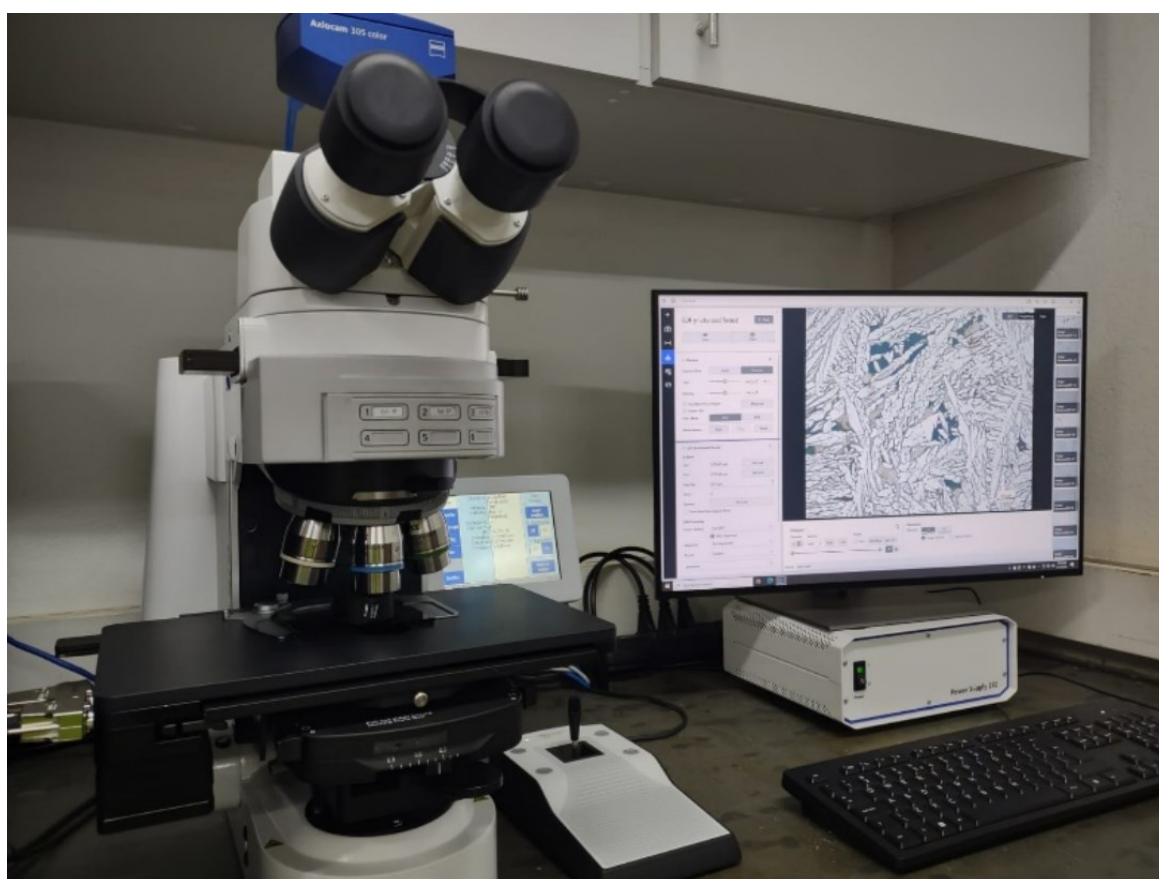


Figura 3.10 - Microscópio óptico Zeiss Axiocam 305 color. Fonte: autor (2025)

A Figura 3.11 apresenta a micrografia obtida por microscopia óptica da face da parede depositada, após o ataque químico com o reagente Behara modificado. A imagem evidencia a distinção entre as fases ferrítica e austenítica, sendo a ferrita destacada pela coloração azulada característica, enquanto a austenita mantém coloração mais clara.

Essa visualização permite analisar a distribuição, morfologia e proporção relativa das fases, fornecendo informações essenciais sobre o equilíbrio microestrutural, o efeito do

histórico térmico da deposição e a influência das condições de resfriamento intercamadas sobre a formação de ferrita e austenita na parede construída via MADA.

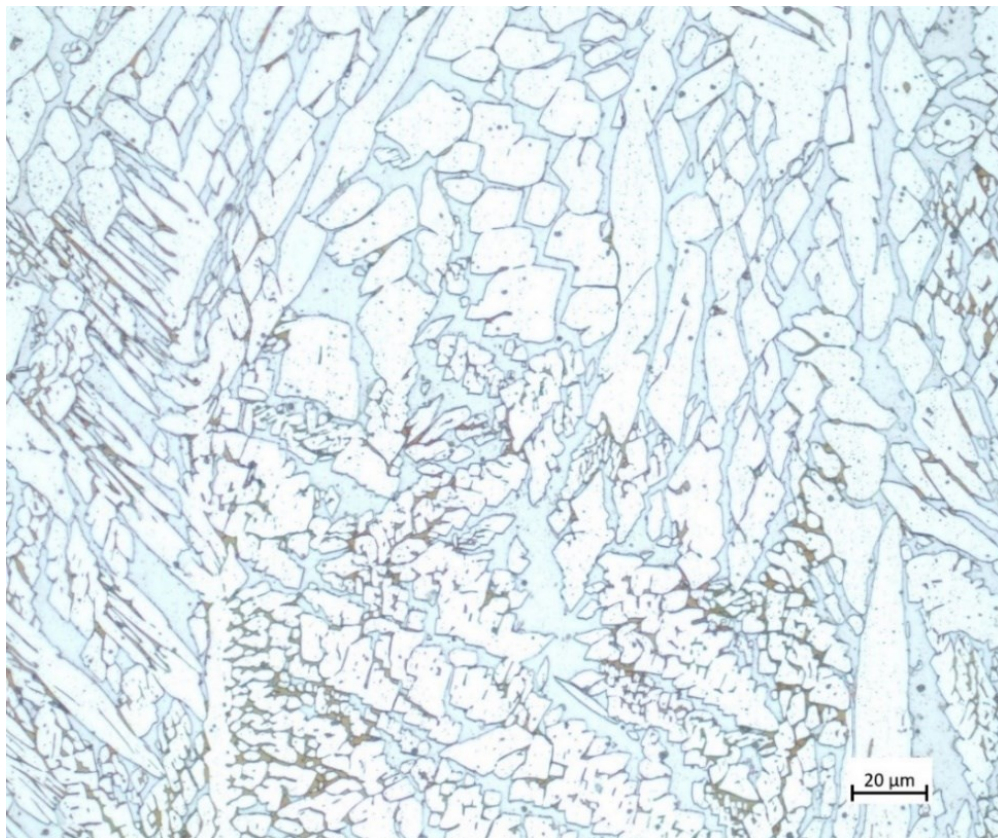


Figura 3.11 - Microscopia óptica da face da parede pós ataque por Behara modificado. Fonte: autor (2025)

O teor de ferrita e austenita nas amostras de aço inoxidável duplex foi quantificado utilizando o software ImageJ. Para isso, as micrografias obtidas com aumento de 500× foram inicialmente processadas no software, convertendo-se para imagens binárias, de modo a separar claramente as fases ferrítica e austenítica.

Esse procedimento permite a análise automatizada da área ocupada por cada fase, possibilitando a determinação precisa da fração volumétrica relativa de ferrita e austenita. A conversão para binário é essencial para minimizar interferências visuais, como variações de brilho ou contraste, garantindo resultados confiáveis e reproduzíveis.

A metodologia adotada permite correlacionar diretamente a microestrutura observada com as propriedades mecânicas e de corrosão do material, sendo especialmente útil para avaliar o efeito do histórico térmico e das condições de resfriamento intercamadas sobre a distribuição das fases na parede depositada (Figura 3.12).

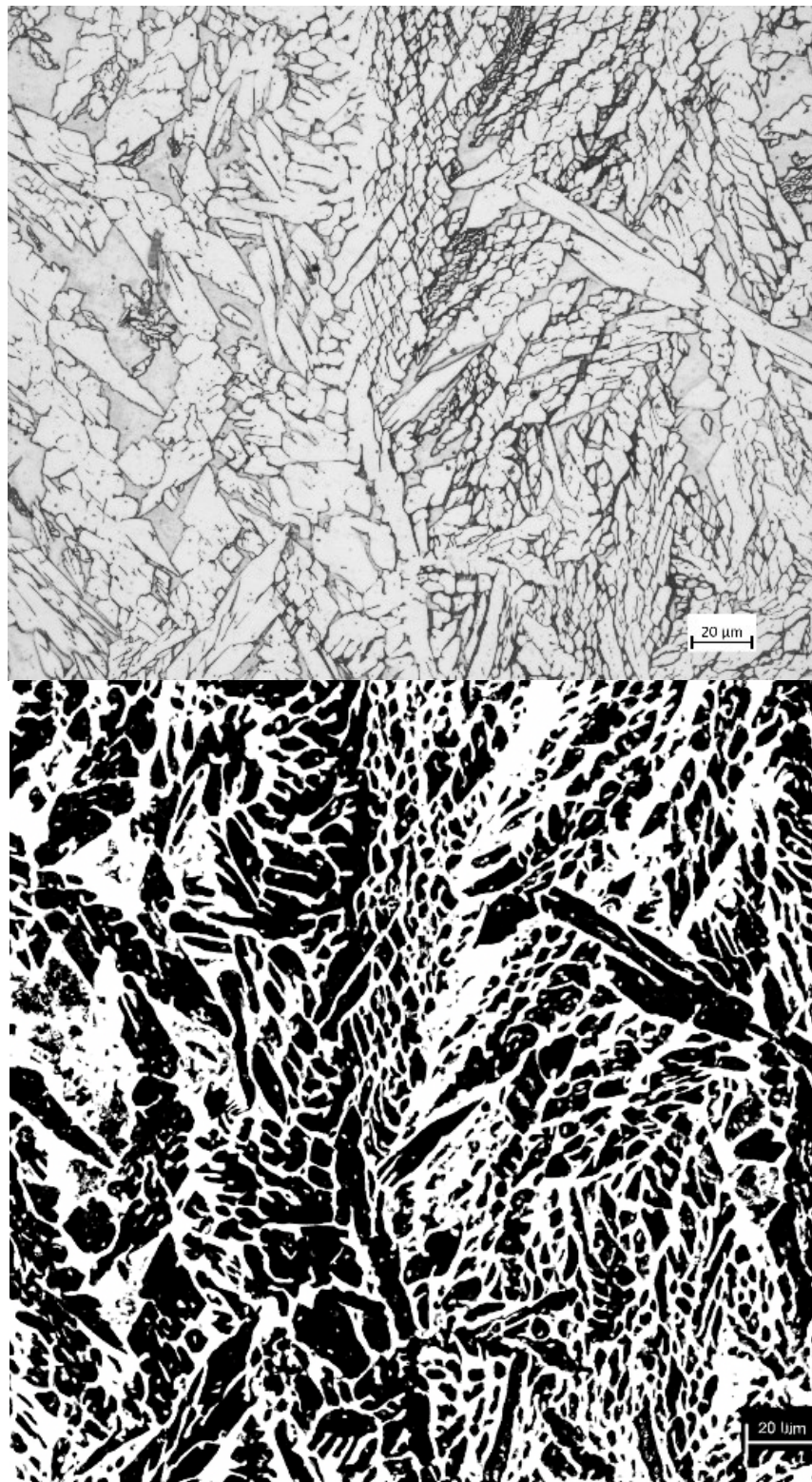


Figura 3.12 - Análise de fases metalúrgicas vistas em MEV, evidenciando a estrutura bifásica de austenita e ferrita, após transformação da imagem em 8 bits. Fonte: autor (2025)

Foram realizadas análises de composição química das paredes depositadas utilizando duas técnicas complementares: Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) e Espectroscopia de Emissão Óptica por Descarga Luminescente (GDS).

O EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) foi acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e baseia-se na emissão de um feixe de elétrons sobre a amostra, provocando a excitação dos átomos presentes. Como resultado, cada elemento emite raios X característicos, cuja detecção é realizada por sensores acoplados ao equipamento. O software do MEV processa esses sinais, permitindo identificação qualitativa e, em muitos casos, quantificação aproximada dos elementos constituintes da liga depositada.

Já o GDS (*Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy*) foi aplicado para análise quantitativa em profundidade, queimando sucessivamente as amostras em três etapas distintas, conforme recomendado pelas normas ASTM E1322:2017a e ASTM E1916:2020. Essa abordagem possibilita a geração de perfis composicionais ao longo da seção transversal, fornecendo informações detalhadas sobre a distribuição dos elementos químicos desde a superfície até a base da parede depositada.

Além disso, as massas do metal depositado e do substrato foram registradas, permitindo o cálculo da eficiência de deposição do processo, um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho produtivo e a qualidade do material obtido.

3.2.9 Tratamento, avaliação e análise dos dados

A aquisição de sinais de corrente e tensão durante o processo de deposição foi realizada utilizando o sistema de monitoramento integrado ao equipamento de soldagem. Ao todo, foram registrados 15.415 pontos de dados, obtidos com uma frequência de amostragem de 5 kHz, garantindo alta resolução temporal para capturar as rápidas flutuações do arco elétrico durante a deposição do material.

Para cada camada depositada, foram calculadas aproximadamente 164 médias, correspondentes a intervalos temporais específicos ao longo do ciclo de deposição. Esse procedimento permitiu reduzir ruídos e oscilações pontuais, proporcionando valores mais representativos do comportamento elétrico médio da camada.

Os resultados obtidos, incluindo as médias de corrente e tensão para cada camada, estão apresentados na Tabela 3.6, permitindo uma análise detalhada da estabilidade do arco e do aporte energético ao longo da construção da parede metálica.

Tabela 3.6 - Aquisições de sinais de corrente e tensão durante deposição. Fonte: autor (2025)

	Média	Desvio padrão
Tensão (U) em Volts	22,6	9,7
Corrente (I) em Ampère	163	72

A análise dos dados revelou que os desvios padrão das medições de corrente e tensão apresentaram variações significativas, especialmente devido à presença de valores baixos registrados durante os instantes de corrente mínima e máxima. Esses picos de variação correspondem aos momentos em que o arco apresenta uma menor e uma maior potência, provocando flutuações abruptas nos sinais que aumentam a dispersão dos dados. Apesar disso, o cálculo das médias por camada, realizado em aproximadamente 164 intervalos temporais, permitiu minimizar o impacto dessas oscilações transitórias, fornecendo uma representação mais fiel do comportamento elétrico do arco durante a deposição contínua.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de tração

Os ensaios de tração realizados nas paredes depositadas evidenciaram o comportamento anisotrópico típico de processos de manufatura aditiva, refletindo diferenças nas propriedades mecânicas entre as orientações horizontal e vertical. Na orientação vertical, observou-se uma deformação máxima de 38,8%, superior à 32,0% registrada na orientação horizontal, indicando maior ductilidade ao longo do eixo de deposição.

Quanto à tensão de escoamento média, os valores obtidos foram de 391,7 MPa na horizontal e 344,1 MPa na vertical, enquanto a resistência à tração máxima atingiu 708,4 MPa e 648,6 MPa, respectivamente (Tabela 4.1; Figura 4.1 e 4.2). Esses resultados demonstram que, embora a resistência máxima seja ligeiramente superior na direção horizontal, a capacidade de deformação plástica é maior na vertical, evidenciando o efeito do histórico térmico e da sobreposição de camadas sobre as propriedades mecânicas finais do material.

Tal comportamento é coerente com a literatura sobre MADA, na qual a anisotropia decorre de gradientes térmicos e microestruturas diferenciadas entre camadas consecutivas, influenciando a distribuição de fases, o crescimento de grãos e a presença de tensões residuais.

Tabela 4.1 - Ensaio de tração. Fonte: autor (2025)

	Tensão 0,2 % (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação (%)
Médias dos ensaio horizontais SR	392	708	509	32
Médias dos ensaio horizontais com RAQI	578	724	580	36
Desvio Padrão dos ensaios horizontais (SR/RAQI)	89/78	9/5	76/79	0,3/0,7
Médias dos ensaio verticais SR	344	649	502	39
Médias ds ensaio verticais RAQI	522	674	512	36
Desvio Padrão dos ensaios verticais (SR/RAQI)	26/46	7/5	8/4	2,9/3,1
Média Total SR	368	679	505	35
Média Total RAQI	550	702	544	36
Desvio Padrão Total.	64	34	48	4,1

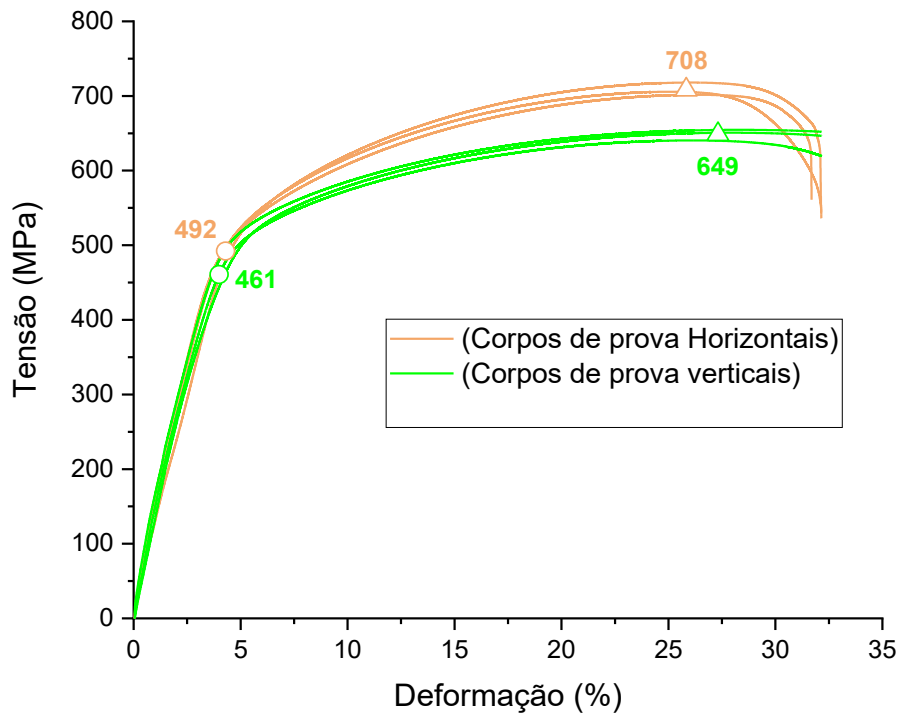


Figura 4.1 - Ensaio de tração SR. Fonte: autor (2025)

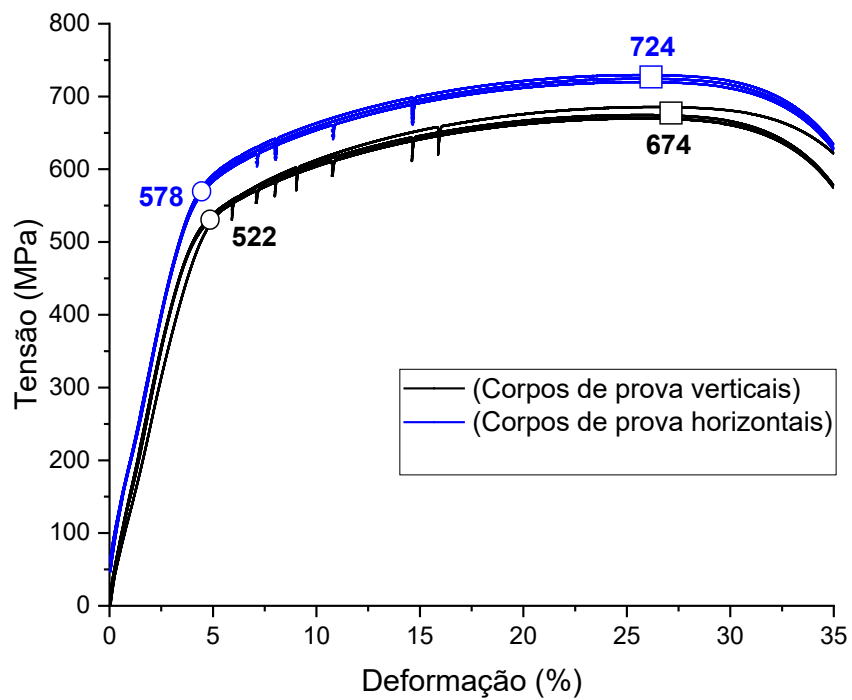


Figura 4.2 - Ensaio de tração RAQI. Fonte: autor (2025)

Esses resultados corroboram as observações da literatura sobre anisotropia mecânica em peças fabricadas por MADA (DEBROY *et al.*, 2018; TONELLI *et al.*, 2021), que é atribuída ao crescimento preferencial de grãos colunares e aos gradientes térmicos desenvolvidos durante a solidificação. Apesar dessas variações direcionais, os valores obtidos de resistência e deformação permanecem dentro da faixa esperada para o aço inoxidável duplex ER2209, conforme reportado por Liu *et al.* (2024), demonstrando que o processo empregado foi capaz de preservar propriedades mecânicas satisfatórias.

Além disso, a elevada ductilidade observada evidencia a eficácia da corrente pulsada no controle do aporte térmico, permitindo a deposição de camadas contínuas com mínima formação de defeitos. Estudos de Costa *et al.* (2024) e Mohammadi *et al.* (2024) reforçam que a aplicação da corrente pulsada contribui para a estabilidade do arco, redução de respingos e minimização de porosidade, assegurando que as propriedades mecânicas finais se aproximem daquelas obtidas em processos convencionais de soldagem.

Dessa forma, os dados experimentais confirmam que, quando combinada com estratégias de controle térmico, a corrente pulsada é uma ferramenta eficaz para otimizar a integridade estrutural, uniformidade microestrutural e desempenho mecânico em componentes MADA de aço duplex.

4.2 Análise de dobramento

Os ensaios de dobramento, conduzidos de acordo com a norma AWS D1.1:2021, evidenciaram que nenhuma das amostras apresentou trincas ou rupturas visíveis, independentemente da condição de resfriamento utilizada (Figura 4.3 e 4.4). Esses resultados validam a qualidade do processo de deposição, confirmando a boa fusão entre camadas e a ausência de descontinuidades críticas. A integridade obtida reflete o efeito positivo do controle preciso dos parâmetros de deposição, da corrente pulsada e das estratégias de resfriamento intercamadas, garantindo que as paredes finas fabricadas via MADA apresentem comportamento dúctil, estabilidade estrutural e confiabilidade mecânica adequadas para aplicações industriais.



Figura 4.3 - Corpos de prova do ensaio de dobramento da parede com RAQI, segundo norma AWS D1.1, à esquerda os corpos horizontais e à direita, os corpos horizontais. Fonte: autor (2025).



Figura 4.4 - Corpos de prova do ensaio de dobramento da parede sem resfriamento, segundo norma AWS D1.1, à esquerda os corpos horizontais e à direita, os corpos horizontais. Fonte: autor (2025)

Na literatura técnica, resultados semelhantes foram reportados por Queguineur *et al.* (2023), que destacaram a eficiência do MADA em garantir boa coesão intercamadas, desde que seja aplicado controle térmico adequado. O desempenho observado nas paredes estudadas reforça a eficácia da corrente pulsada, corroborando achados de Kumar (2024), que indicam que a redução do aporte térmico favorece a estabilidade do arco e a melhor adesão entre camadas. Nesse contexto, os ensaios de dobramento, realizados segundo a norma AWS D1.1:2021, demonstraram que nenhuma das amostras apresentou trincas ou rupturas visíveis, independentemente da condição de resfriamento (Figura 4.3 e 4.4), qualificando o processo e confirmando a ausência de descontinuidades críticas.

Esses resultados complementam as observações de fraturas dúcteis, nas quais se evidenciou deformação plástica antes da ruptura, típica da microestrutura bifásica do aço

duplex, com a ferrita contribuindo para resistência e a austenita para tenacidade (DINOVITZER *et al.*, 2019; KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024). A ausência de fratura frágil em ambas as orientações (horizontal e vertical) indica que, mesmo sob gradientes térmicos distintos, o processo assegurou boa integridade metalúrgica, confirmando que a combinação de corrente pulsada com resfriamento ativo ou natural é capaz de mitigar problemas de fragilização, como trincas intergranulares observadas em processos com aporte térmico excessivo (DEBROY *et al.*, 2018; TONELLI *et al.*, 2021).

4.3 Análise de microdureza

O perfil de microdureza das paredes depositadas apresentou diferenças perceptíveis em função da estratégia de resfriamento empregada.

Nas amostras submetidas ao resfriamento natural ao ar, os valores médios de dureza foram ligeiramente superiores em relação às amostras com resfriamento ativo, como evidenciado no Figura 4.5.

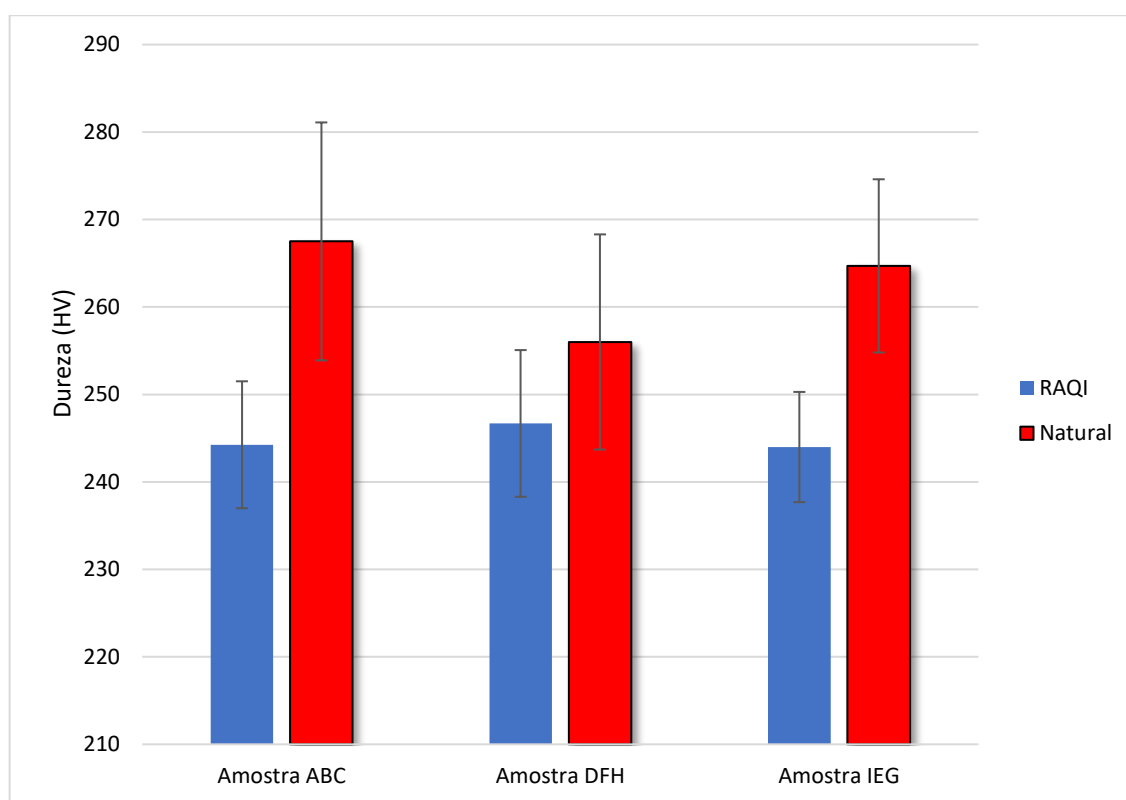


Figura 4.4 - O ensaio de microdureza mostrando apresentaram um aumento pequenos nos corpos de prova com resfriamento ao ar. Fonte: autor (2025)

A elevação na dureza pode ser atribuída ao maior tempo de exposição térmica, que favorece a formação de precipitações localizadas e a geração de microestruturas mais heterogêneas, resultando em endurecimento pontual e variações discretas ao longo da altura da parede (RAMESH *et al.*, 2021).

Em contraste, o resfriamento ativo por quase imersão (RAQI) promoveu uma distribuição de dureza mais uniforme, refletindo o efeito de refinamento microestrutural e redução das heterogeneidades induzidas pelo aquecimento interpass. Esse comportamento está em concordância com os resultados de Shrestha, Simsiriwong e Shamsaei (2019), que observaram menor dispersão de dureza e maior reprodutibilidade microestrutural em amostras submetidas a resfriamento controlado.

A Figura 4.5 apresenta uma imagem com precipitados de cromo, o que corrobora ao aumento da microdureza na deposição sem RAQI, visto que o rápido resfriamento não permite a precipitação de fases deletérias, como a fase sigma por exemplo.

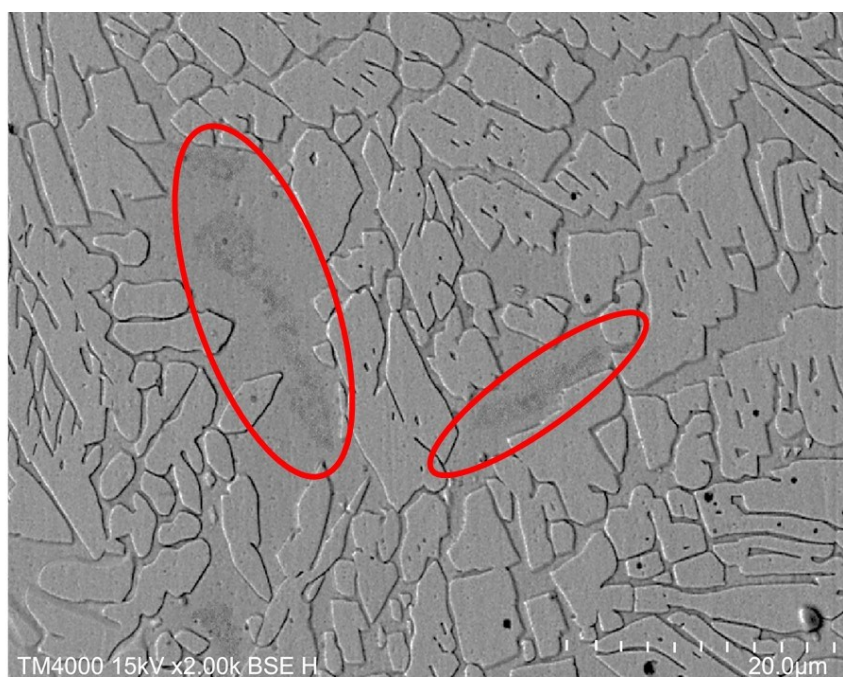


Figura 4.5 - Imagem com precipitados de nitreto de cromo, o que corrobora ao aumento da microdureza na deposição sem RAQI. Fonte: autor (2025)

Dessa forma, a aplicação do RAQI não apenas melhora a uniformidade mecânica, mas também contribui para a estabilidade dimensional e qualidade previsível das peças, características fundamentais para componentes produzidos via MADA em aplicações industriais de alto desempenho.

4.4 Análise de impacto Charpy-V

O ensaio de impacto Charpy-V, apresentado na Figura 4.6, evidenciou que a energia absorvida pelas amostras foi semelhante entre as condições de resfriamento natural e resfriamento ativo por quase imersão (RAQI), indicando que ambas as paredes depositadas apresentaram boa tenacidade. Essa constância nos valores de impacto é coerente com a observação das fraturas dúcteis, confirmando que o equilíbrio entre ferrita e austenita foi adequadamente mantido, conforme recomendado por TWI (2021) e Ramesh *et al.* (2021).

Além disso, observou-se menor dispersão dos resultados nas amostras submetidas ao RAQI, sugerindo maior consistência microestrutural ao longo da parede. Esse comportamento está alinhado aos achados de Montevecchi *et al.* (2018), que relataram que estratégias de resfriamento ativo reduzem heterogeneidades de propriedades em componentes produzidos por MADA. O controle térmico promovido pelo RAQI favorece o refinamento microestrutural e a distribuição uniforme de fases, contribuindo para propriedades mecânicas mais repetitivas e previsíveis.

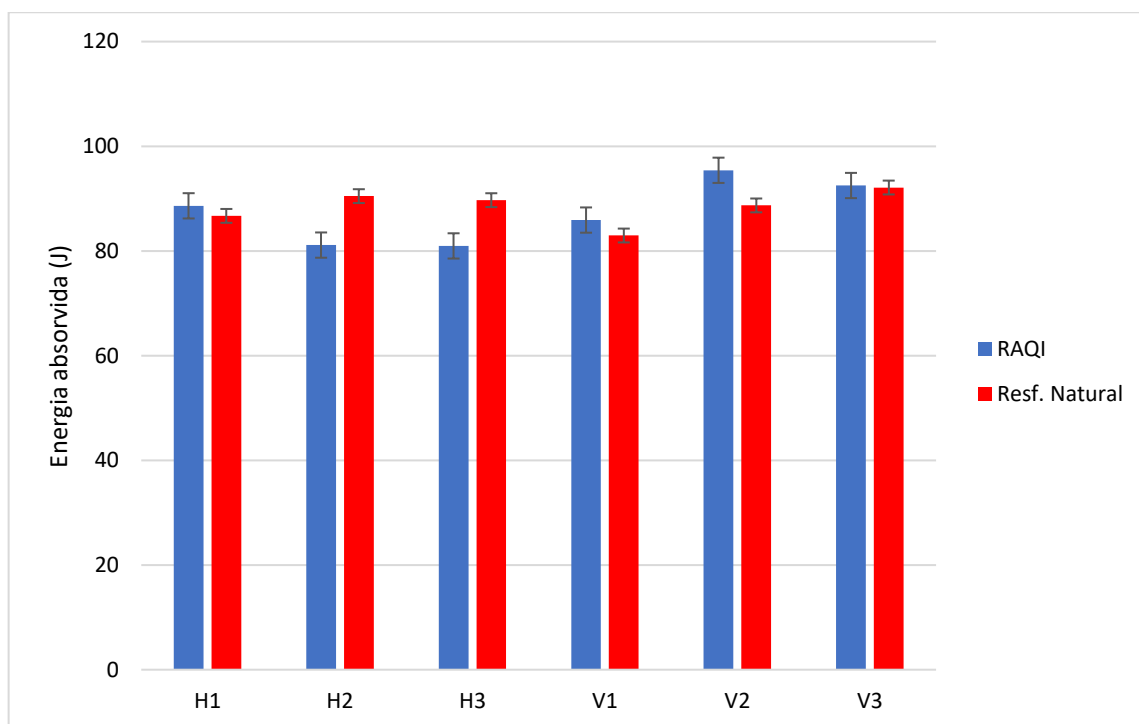


Figura 4.6 - Ensaio de charpy-v. Fonte: autor (2025)

4.4.1 Análise das superfícies de fratura

As imagens obtidas nas fraturas dos corpos de prova revelaram predominantemente morfologia dúctil, evidenciada por extensas regiões de deformação plástica antes da ruptura (Figuras 4.7 e 4.8). Esse comportamento mecânico está intimamente relacionado à microestrutura bifásica dos aços inoxidáveis duplex, na qual a ferrita contribui para a resistência mecânica, enquanto a austenita confere tenacidade e capacidade de deformação (KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

Além disso, resultados comparáveis foram reportados por Dinovitzer *et al.* (2019), que observaram fraturas dúcteis em paredes finas de aços duplex produzidas via MADA, desde que houvesse controle térmico adequado durante o processo. A manutenção da proporção equilibrada entre ferrita e austenita e a gestão eficiente do ciclo térmico foram fatores determinantes para evitar fragilização e assegurar que a energia absorvida até a fratura fosse máxima, evidenciando a importância do controle do histórico térmico intercamadas na manufatura aditiva metálica.

É importante destacar que a distribuição das tensões residuais induzidas pelo ciclo térmico intercamadas também influencia o tipo de fratura observado. Em paredes submetidas a resfriamento ativo, o gradiente térmico controlado reduz concentrações locais de tensões, promovendo fraturas mais homogêneas e maior ductilidade. Por outro lado, em peças fabricadas sem resfriamento ativo, o acúmulo de calor pode gerar gradientes térmicos acentuados, favorecendo regiões de fragilidade e aumentando o risco de fraturas frágeis ou iniciadas em pontos de concentração de tensões (BERA; MOHANTY, 2024).

Dessa forma, o controle térmico durante a deposição mostra-se essencial não apenas para a microestrutura, mas também para a integridade mecânica e a confiabilidade do componente final.

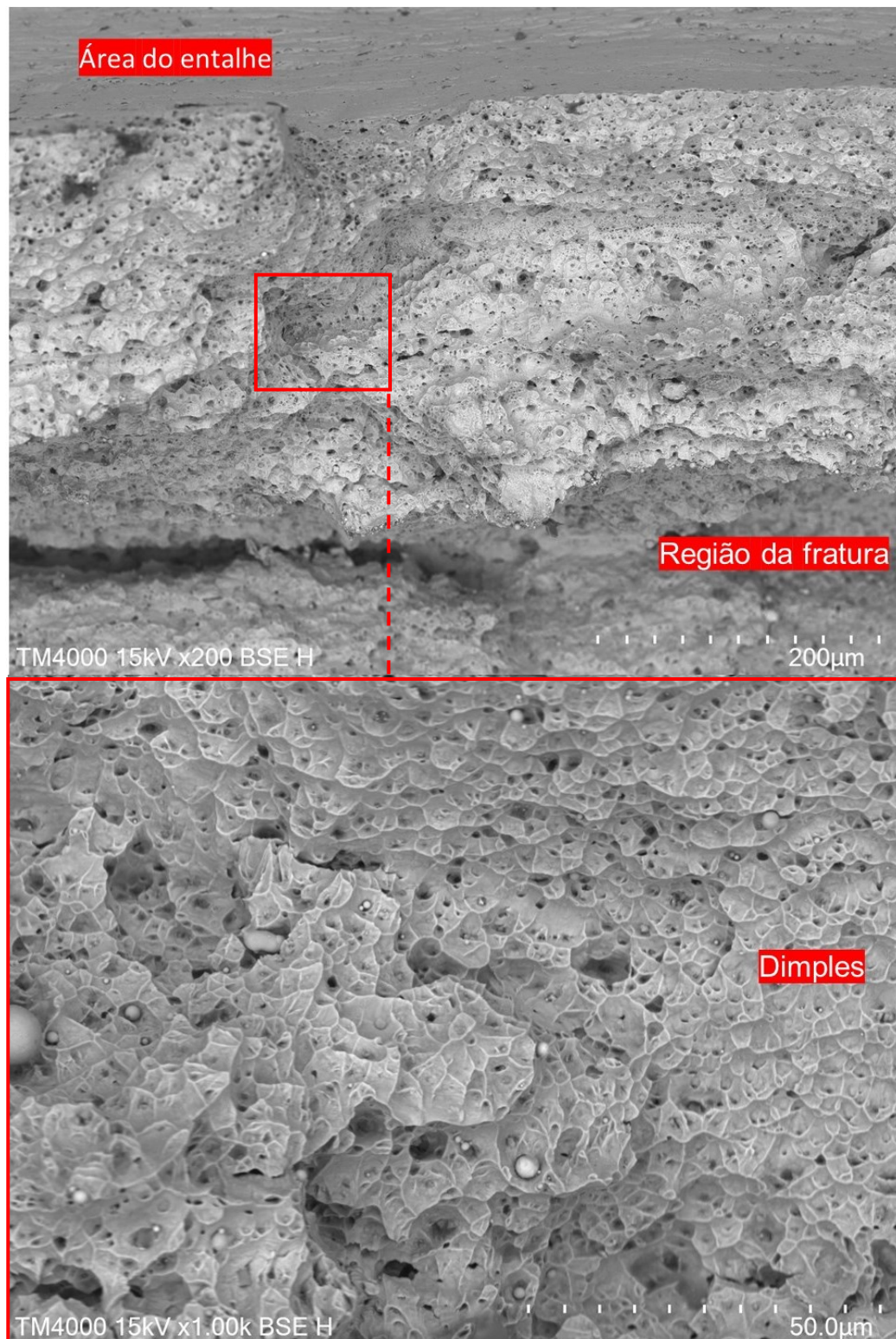


Figura 4.7 - Imagens da fratura em corpos de prova horizontais com RAQI. Fonte: autor (2025)

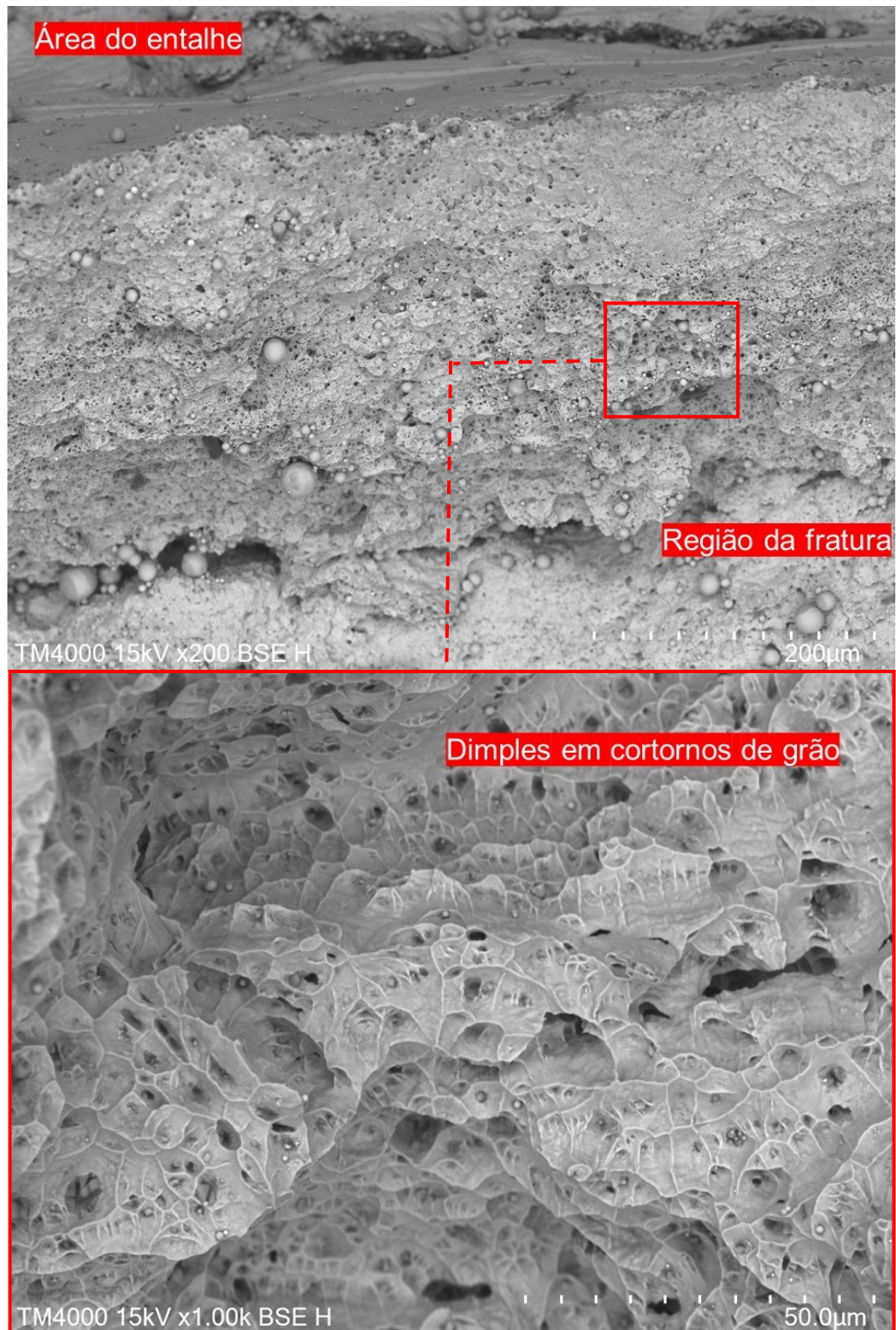


Figura 4.8 - Imagens da fratura em copos de prova verticais SR. Fonte: autor (2025)

A ausência de fratura frágil em ambas as orientações, horizontal e vertical, indica que, mesmo diante de gradientes térmicos distintos durante a deposição, o processo manteve boa integridade metalúrgica. A presença de microcavidades (Dimples) corroboram a fratura

dúctil. Esses resultados reforçam que a aplicação da corrente pulsada, quando combinada com estratégias de resfriamento ativo ou natural, foi eficaz na redução de problemas típicos de fragilização, como trincas intergranulares frequentemente observadas em processos com aporte térmico excessivo (DEBROY *et al.*, 2018; TONELLI *et al.*, 2021). Dessa forma, evidencia-se que o controle do ciclo térmico e da transferência de calor durante o MADA é decisivo para garantir microestrutura equilibrada, propriedades mecânicas consistentes e comportamento dúctil, mesmo em regiões sujeitas a maiores tensões residuais.

4.5 Composição química

As análises químicas realizadas por GDS (Tabela 4.2) e EDS (Figura 4.9) confirmaram a estabilidade composicional da liga após o processo de deposição MADA. Os teores de cromo (Cr ~22,7%), níquel (Ni ~9,4–9,6%) e molibdênio (Mo ~3,2%) permaneceram próximos aos valores especificados para o arame ER2209, garantindo a manutenção do índice PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) e, consequentemente, preservando a resistência à corrosão localizada característica do aço inoxidável duplex. Índice Pren calculada parede RAQI: 35,79 e SR:36,02.

Esses resultados indicam que o processo de deposição, seja com resfriamento ativo ou natural, não promoveu segregação significativa de elementos de liga nem alteração química relevante, assegurando que as propriedades metalúrgicas e de desempenho químico do material permanecessem dentro das especificações de projeto. A preservação da composição química é especialmente importante para aplicações críticas em ambientes corrosivos, reforçando a confiabilidade do MADA na fabricação de componentes de aço inoxidável duplex ER2209.

Tabela 4.2 - Resultados do GDS realizado em 3 queimas por amostra, com a amostra 1 se tratando da parede com resfriamento e amostra 2 sem resfriamento. Fonte: autor (2025).

Análise de composição química															
		Elemento (% em peso)													
		C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	P	S	Al	Cu	Nb	Ti	W	V
Amostra 1	Média	0,03	1,35	22,65	9,589	3,205	0,067	0,018	0,001	0,015	0,058	0,01	0,008	0,068	0,084
Amostra 2	Média	0,029	1,335	22,79	9,244	3,233	0,38	0,017	0,001	0,015	0,057	0,008	0,007	0,069	0,08

O ensaio de EDS também evidenciou paridade na distribuição de elementos entre as duas amostras analisadas (Figura 4.9), demonstrando uniformidade composicional ao longo da parede depositada. Essa constatação é relevante, uma vez que estudos como os de Gadgil *et al.* (1991) e Fritz e Moe (2020) indicam que pequenas variações na composição química podem comprometer o equilíbrio entre ferrita e austenita, prejudicando a resistência mecânica e à corrosão do aço inoxidável duplex.

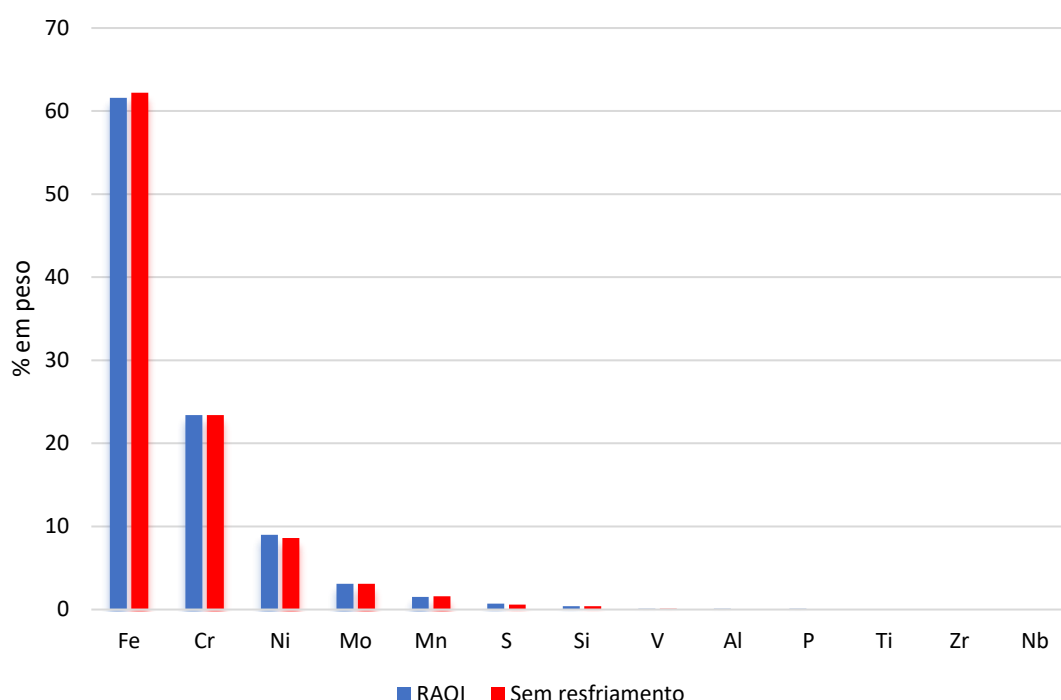


Figura 4.9 - Gráfico de EDS. Fonte: autor (2025)

Portanto, a preservação da composição química durante o processo de deposição confirma a adequação dos parâmetros de soldagem e controle térmico empregados, garantindo que a microestrutura bifásica característica do ER2209 seja mantida e que o desempenho em serviço, incluindo resistência à corrosão localizada, seja assegurado.

4.6 Eficiência de deposição

A eficiência da deposição dada pela Equação 4.1:

$$N = \frac{(md - ms)}{(mi - mf)} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

Md = massa depositada

Ms = massa do substrato

Mi = massa inicial do arame

Mf = massa final do arame

A eficiência de deposição observada nas paredes foi realizada através da balança Marte AD50K com resolução de 1g, resultando em elevada para ambas as condições avaliadas, atingindo 97% para a parede submetida ao RAQI e 95% para a parede com resfriamento natural (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Valores obtidos na análise da eficiência da deposição. Fonte: autor (2025)

	RAQI	Sem resfriamento
Massa do substrato (kg)	2,510	2,692
Massa inicial do rolo de arame (kg)	14,727	15,664
Massa final da deposição (kg)	11,616	11,169
Massa final do rolo de arame (kg)	5,336	6,724
Eficiência	97%	95%

A diferença reflete o efeito positivo do resfriamento ativo sobre a estabilidade da transferência metálica, que reduz a formação de respingos e mantém o cordão de solda mais uniforme. Resultados similares foram reportados por Ding *et al.* (2015) e Zhai, Wu e Zhou (2022), os quais associaram a diminuição de respingos à melhoria da estabilidade do arco em situações de controle térmico adequado.

Sob a perspectiva produtiva, esses índices demonstram o potencial do MADA como processo eficiente e competitivo, especialmente na fabricação de componentes de grande porte, onde a redução de perdas e a uniformidade do cordão impactam diretamente a produtividade e a qualidade final da peça. Tais conclusões corroboram achados de Jin *et al.* (2020) e Saleh *et al.* (2023), reforçando que o controle térmico ativo pode ser determinante para otimizar a eficiência e repetibilidade do processo.

4.7 Análises metalográficas

A avaliação das micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidencia a típica microestrutura bifásica do aço inoxidável duplex, composta por ferrita (fase clara) e austenita (fase escura), com proporção equilibrada entre ambas, conforme mostra a Figura 4.10. Essa distribuição equilibrada é essencial para alcançar alto desempenho mecânico e resistência à corrosão, visto que a ferrita contribui significativamente para resistência mecânica e à corrosão sob tensão, enquanto a austenita confere tenacidade, ductilidade e capacidade de absorção de energia, garantindo um comportamento estrutural mais confiável em serviço (FRITZ; MOE, 2020; KRAWCZYK *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024).

Observa-se que os grãos colunares de ferrita nucleiam preferencialmente e crescem de maneira contínua ao longo da direção de deposição térmica, um fenômeno característico de materiais processados por manufatura aditiva metálica ou por processos de soldagem com aporte térmico localizado, nos quais o gradiente térmico direcional favorece o crescimento epitaxial da ferrita (LIU *et al.*, 2024; UNIFIED ALLOYS, 2025).

Posteriormente, a austenita se precipita a partir da matriz ferrítica durante o resfriamento, apresentando morfologias distintas, como austenita de contorno de grão, intragranular e de Widmanstätten, dependendo da taxa de resfriamento local e do histórico térmico de camadas adjacentes. Essa distribuição e morfologia são visíveis na Figura 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, e influenciam diretamente propriedades críticas, como dureza, tenacidade e resistência à corrosão localizada, demonstrando a importância do controle térmico intercamadas para garantir uma microestrutura funcionalmente equilibrada em componentes fabricados por MADA.

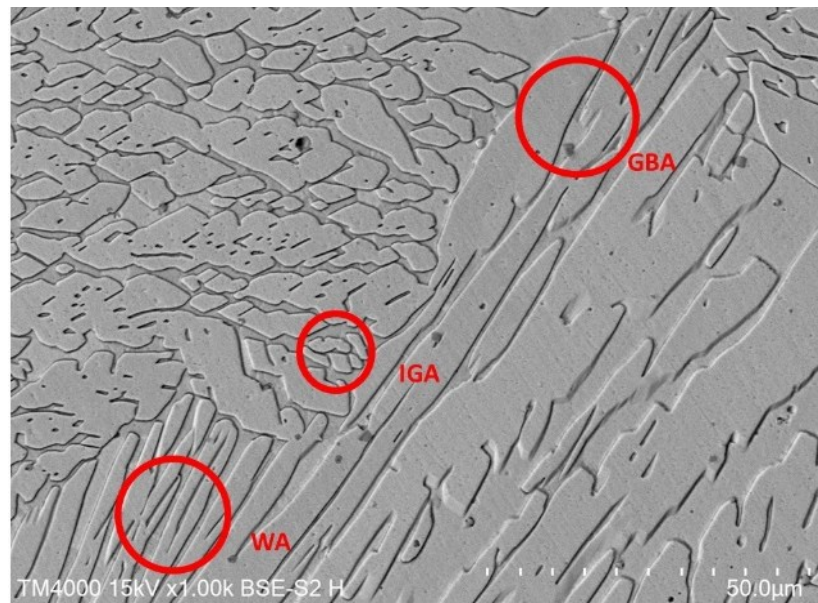


Figura 4.10 - Amostras da face da parede com RAQI. Fonte: autor (2025)

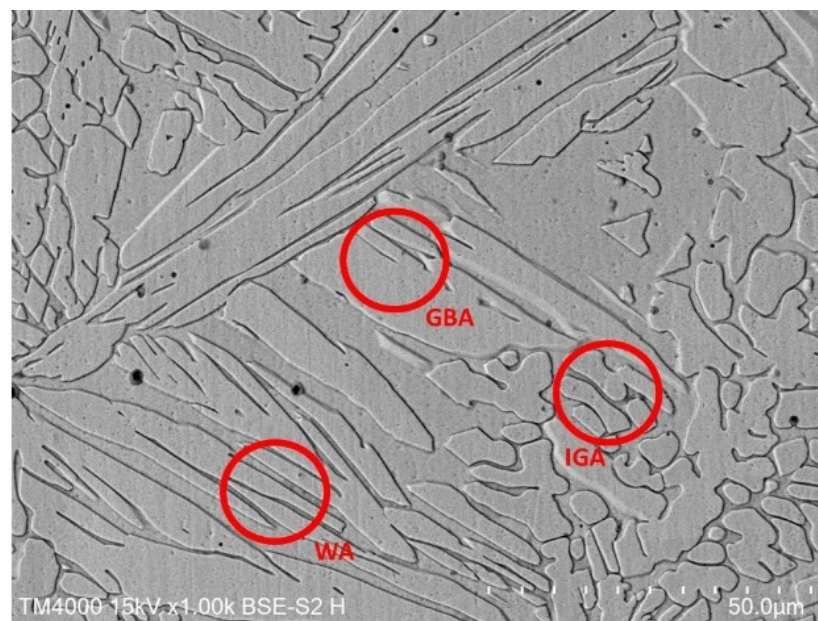


Figura 4.11 - Amostra da parede sem RAQI. Fonte: autor (2025)

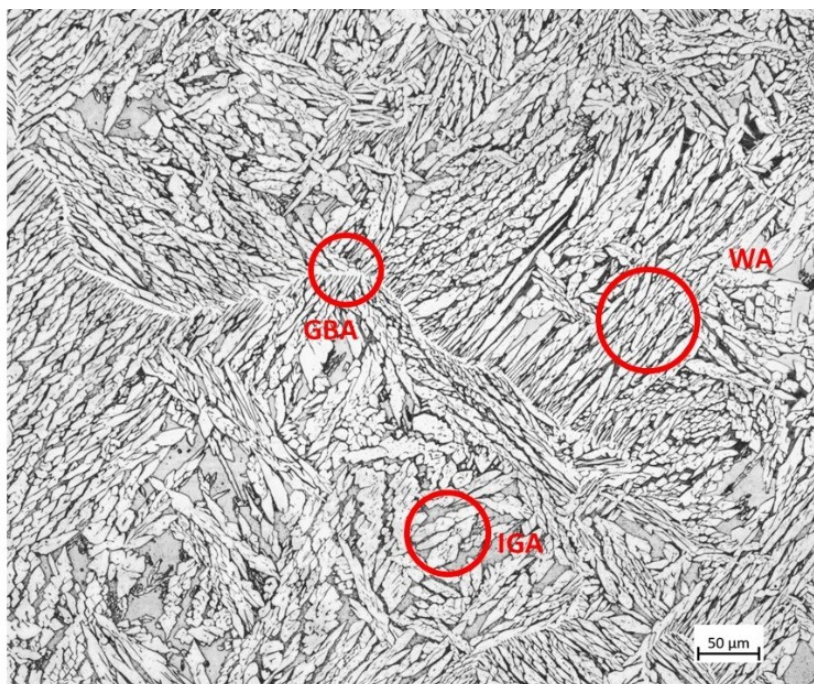


Figura 4.12 - Parede em RAQI. Fonte: autor (2025)

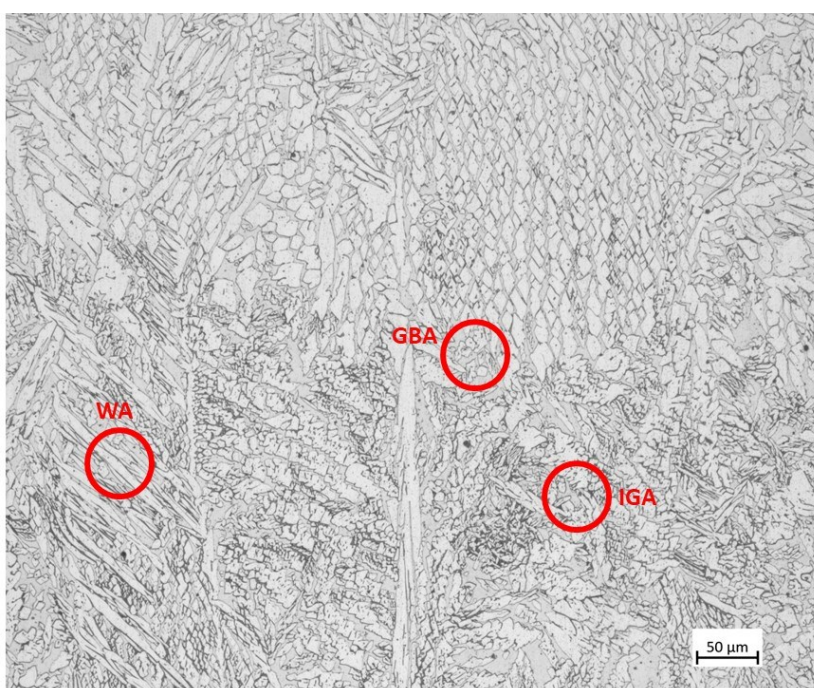


Figura 4.13 - Parede RAQI. Fonte: autor (2025)

A austenita presente no aço inoxidável duplex é visualizada como linhas escuras contornando os grãos de ferrita e apresenta diferentes morfologias: austenita intragranular (IGA), austenita de Widmanstätten (WA), austenita de contorno de grão (GBA) e austenita

secundária (γ_2). Cada uma dessas fases desempenha um papel específico nas propriedades mecânicas e na resistência à corrosão do material.

Austenita intragranular (IGA – *Intragranular Austenite*): desenvolve-se dentro dos grãos ferríticos a partir de núcleos heterogêneos, frequentemente associados a inclusões não metálicas ou discordâncias cristalinas. Esta fase é crucial para a tenacidade e ductilidade, pois atua reduzindo a susceptibilidade à fratura frágil e melhorando a resposta do material a carregamentos cíclicos (LIU *et al.*, 2024; LIPPOLD; KOTECKI, 2011).

Austenita de Widmanstätten (WA – *Widmanstätten Austenite*): caracteriza-se por placas finas e aciculares que se originam nos contornos de grão ferríticos e crescem em direção ao interior dos grãos durante o resfriamento subsequente à solidificação. Essa morfologia resulta de crescimento difusional controlado pela interface e contribui para o aumento da resistência mecânica, embora em excesso possa reduzir ligeiramente a tenacidade (LIPPOLD; KOTECKI, 2011; NILSSON, 1992).

Austenita de contorno de grão (GBA – *Grain Boundary Austenite*): forma-se inicialmente ao longo dos contornos de grão da ferrita devido à difusão preferencial de elementos estabilizadores da austenita, como níquel (Ni) e nitrogênio (N). Esta fase atua como uma barreira contra corrosão intergranular e contribui para o alívio de tensões internas na microestrutura (SENGOTTAIYAN *et al.*, 2025; PADILHA; GUEDES, 2021).

Austenita secundária (γ_2): desenvolve-se durante o resfriamento final ou por envelhecimento térmico, como resultado da difusão tardia de Ni e N em regiões ferríticas supersaturadas. Essa fase ajuda a restaurar parcialmente o equilíbrio ferrita/austenita e pode melhorar a resistência à corrosão localizada, especialmente em aços duplex submetidos a tratamentos de alívio de tensões (PADILHA; GUEDES, 2021; LIU *et al.*, 2024).

De forma geral, a presença equilibrada dessas diferentes morfologias de austenita dentro da matriz ferrítica assegura uma combinação otimizada de resistência mecânica, tenacidade e estabilidade microestrutural, atributos essenciais para o desempenho confiável do aço inoxidável duplex em ambientes agressivos e aplicações estruturais críticas.

4.9 Síntese dos resultados

De forma geral, os resultados obtidos indicam que tanto o resfriamento ativo por quase imersão (RAQI) quanto o resfriamento natural ao ar permitem a produção de paredes finas de aço inoxidável duplex com propriedades mecânicas adequadas e integridade microestrutural satisfatória. Ambos os métodos possibilitam a obtenção de fraturas dúcteis, manutenção do equilíbrio ferrita/austenita e resistência à corrosão compatível com os requisitos do material.

Entretanto, o resfriamento ativo demonstrou vantagens significativas em relação ao resfriamento natural, incluindo:

- Maior eficiência de deposição, associada à redução de respingos e maior estabilidade do arco durante a transferência metálica;
- Microestrutura mais homogênea, evidenciada pela distribuição uniforme de dureza e pela menor variação de proporção entre ferrita e austenita;
- Menor dispersão nos ensaios mecânicos, como tração e impacto Charpy-V, indicando maior repetibilidade do processo;
- Redução da anisotropia, com propriedades mecânicas mais próximas entre as orientações vertical e horizontal.

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação final entre o RAQI e SR.

Tabela 4.4 - Valores obtidos na análise da eficiência da deposição. Fonte: autor (2025)

Aspecto avaliado	RAQI	SR – Resfriamento natural
Estratégia de resfriamento	Dissipação de calor intensificada e controlada durante a deposição	Dissipação de calor passiva, dependente da convecção natural
Estabilidade do arco e transferência metálica	Maior estabilidade do arco e menor ocorrência de respingos	Maior suscetibilidade a instabilidades e respingos
Eficiência de deposição	Superior, com melhor aproveitamento do material adicionado	Inferior, com maior perda associada a respingos
Controle térmico entre camadas	Mais efetivo, com menor acúmulo de calor	Menor controle, favorecendo acúmulo térmico
Microestrutura	Mais homogênea, com distribuição uniforme de ferrita e austenita	Maior heterogeneidade microestrutural
Proporção ferrita/austenita	Mais estável e próxima do equilíbrio ideal	Maior variação local entre camadas
Distribuição de dureza	Mais uniforme ao longo da parede depositada	Maior dispersão de valores de dureza
Propriedades mecânicas globais	Adequadas e com maior consistência	Adequadas, porém com maior variabilidade
Dispersão em ensaios mecânicos (tração e impacto)	Menor dispersão, indicando maior repetibilidade	Maior dispersão dos resultados

Anisotropia mecânica (vertical × horizontal)	Reduzida, com propriedades mais próximas entre orientações	Mais pronunciada, com propriedades mais elevadas
Integridade microestrutural	Satisfatória, com menor risco de heterogeneidades térmicas	Satisfatória, porém mais dependente dos parâmetros de processo
Resistência à corrosão	Compatível com os requisitos do aço duplex	Compatível com os requisitos do aço duplex
Confiabilidade industrial	Elevada, com maior previsibilidade e repetibilidade	Adequada, porém com menor controle de processo
Aplicabilidade em componentes críticos	Mais indicada para aplicações estruturais críticas	Indicada para aplicações menos exigentes

Esses resultados reforçam a importância do controle térmico em processos MADA, como papel crucial do aporte e dissipação de calor na qualidade e desempenho de peças metálicas aditivas.

Portanto, a adoção de estratégias de resfriamento ativo não apenas melhora a estabilidade dimensional e microestrutural, mas também amplia a confiabilidade industrial do processo de manufatura aditiva, garantindo repetibilidade, desempenho funcional e integridade mecânica em aplicações estruturais críticas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo comparar a manufatura aditiva de paredes finas de aço inoxidável duplex via MADA, utilizando corrente pulsada, sob duas condições de resfriamento: ativo (RAQI) e natural ao ar.

A partir da análise experimental, microestrutural e mecânica, os principais resultados permitem estabelecer as seguintes conclusões:

1. Os ensaios de dobramento e as análises de fratura revelaram comportamento dúctil em ambas as condições, sem ocorrência de trincas ou falhas críticas. Isso comprova a viabilidade do processo para produção de paredes finas em aço duplex com boa coesão intercamadas.
2. Os ensaios de tração indicaram anisotropia entre as orientações horizontal e vertical, característica comum em processos aditivos em camadas. Apesar disso, os valores de resistência e deformação permaneceram dentro da faixa esperada para a liga duplex, confirmando a adequação do processo. O resfriamento ativo apresentou menor dispersão dos resultados, sugerindo maior consistência microestrutural.
3. Os ensaios de impacto Charpy-V mostraram elevada absorção de energia em ambas as condições de resfriamento, em consonância com as superfícies de fratura dúcteis observadas. A condição com RAQI destacou-se pela menor variabilidade entre amostras, reforçando a uniformidade microestrutural obtida.
4. O resfriamento natural apresentou valores médios ligeiramente superiores de dureza, atribuídos a maior heterogeneidade térmica. Já o RAQI promoveu distribuição mais homogênea e refinamento microestrutural, confirmando o potencial dessa técnica para reduzir tensões residuais e anisotropia.
5. As análises de EDS e GDS confirmaram a estabilidade composicional do material, sem perdas significativas de elementos de liga, preservando o índice PREN e, consequentemente, a resistência à corrosão localizada.

6. O processo apresentou índices elevados de aproveitamento do arame, com 97% no RAQI e 95% no resfriamento natural, confirmando a competitividade do MADA como tecnologia de fabricação para ligas duplex.

De forma geral, conclui-se que ambos os métodos de resfriamento permitem a produção de paredes finas de aço inoxidável duplex via MADA com propriedades adequadas, validando a aplicação da corrente pulsada para controle térmico e estabilidade do arco. Contudo, o resfriamento ativo por quase imersão (RAQI) demonstrou vantagens adicionais, como maior eficiência de deposição, microestrutura mais homogênea, menor dispersão de propriedades mecânicas e redução da anisotropia.

Esses achados reforçam a relevância do controle térmico em processos de manufatura aditiva metálica e indicam que o emprego de estratégias de resfriamento ativo pode ser um diferencial competitivo para ampliar a confiabilidade e a aplicabilidade industrial do MADA em componentes críticos de aço inoxidável duplex.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. v. 9. Materials Park: ASM International, 2004.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM A923-03: Standard Test Methods for Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Duplex Austenitic/Ferritic Stainless Steels**. West Conshohocken: ASTM International, 2003.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM E1322-17: Standard Practice for Rating Adhesion by Tape Test**. West Conshohocken: ASTM International, 2017a.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM E384-17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken: ASTM International, 2017b.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM E407-07(2015): Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM A262 – Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM E1916-20: Standard Terminology for Nondestructive Examinations**. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM A370-23: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

API. American Petroleum Institute. **API 20S: Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries**. 1. ed. Washington: API, 2020.

AWS. American Welding Society. **AWS D1.1/D1.1M:2021 – Structural Welding Code – Steel**. Miami: AWS, 2021.

ATLURI, V.; RAO, S.; SAHNI, S. **The trillion-dollar opportunity for the industrial sector: How to extract full value from technology**. McKinsey & Company, 2025. <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/The%20trillion%20dollar%20opportunity%20for%20the%20industrial%20sector/The-trillion-dollar-question-for-advanced-industries.pdf>

ASSADI, H. *et al.* Cold spraying – A materials perspective. **Acta Materialia**, v. 116, p. 382–407, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034>

AZO MATERIALS. **Duplex Stainless Steels**: Properties, Fabrication and Applications. 2005. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2870>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BERA, T.; MOHANTY, S. A Review on Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. **3D Printing and Additive Manufacturing**. v. 11, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2023.009>

BLAKEY-MILNER, B. *et al.* Metal additive manufacturing in aerospace: A review. **Materials & Design**, v. 209, e110008, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>

BOURELL, D. Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials. **Rapid Prototyping Journal**, v. 16, n. 3, p. 174–179, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552541011034834>

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CATALANO, A. R. *et al.* CMT deposition of stainless steel: effects of process parameters on energy demand and microstructure. **Prog Addit Manuf**, v. 10, p. 6993–7013, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01022-7>

CASUSO, M. *et al.* Model for the Prediction of Deformations in the Manufacture of Thin-Walled Parts by Wire Arc Additive Manufacturing Technology. **Metals**, v. 11, n. 5, p. 678, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11050678>

CHAKRABORTY, A. *et al.* In-process failure analysis of thin-wall structures made by laser powder bed fusion additive manufacturing. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 98, p. 233–243, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.017>.

COSTA, J. N. *et al.* Evaluation of near immersion active cooling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L stainless steel obtained with additive manufacturing by DED-Arc. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 134, n. 3, p. 1419–1432, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14207-1>.

CUNHA, T. V.; BOHÓRQUEZ, C. E. N. Effects of current pulsation at ultra-high frequency on physical aspects of the arc and its implications in the weld bead morphology in the GTAW process. **Welding in the World**, v. 65, n. (2), p. 251–261, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01016-9>.

DATA INTELO. **Spare Parts Inventory Optimization Market Outlook**. 2025. Disponível em: <https://marketintel.com/report/spare-parts-inventory-optimization-market/amp>. Acesso em: 11/11/2025.

DEBROY, T. *et al.* Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, v. 92, p. 112–224, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

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

DING, D. *et al.* A shape control strategy for wire arc additive manufacturing of thin-walled aluminium structures with sharp corners. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 64, p. 253–264, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.029>

DINOVITZER, M. *et al.* Effect of wire and arc additive manufacturing (MADA) process parameters on bead geometry and microstructure. **Additive Manufacturing**, v. 26, p. 138–146, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.013>.

DUARTE, V. R. *et al.* Wire and Arc Additive Manufacturing of High-Strength Low-Alloy Steel: Microstructure and Mechanical Properties. **Advanced Engineering Materials**. v. 23, n. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202001036>.

EYERS, D. R.; POTTER, A. T. Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. **Computers in Industry**, v. 92–93, p. 208–218, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.08.002>.

FOORGINEJAD, A. *et al.* Enhancement of Additive Manufacturing Processes for Thin-Walled Part Production Using Gas Metal Arc Welding (GMAW) with Wavelet Transform. **Applied Sciences**, v. 14, n. 21, p. 9909, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14219909>

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: A review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, p. 1917–1928, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.

FRITZ, D.; MOE, G. **Practical guide to using duplex stainless steels (10044)**: a guide to the use of nickel-containing alloys. Second Edition. Nickel Institute, 2020.

FRONIUS. **Cold Metal Transfer**: The intelligent welding process for challenging applications. Wels, Áustria: Fronius International GmbH, 2020. Disponível em: <https://www.fronius.com>. Acesso em: 5 out. 2025.

GADGIL, V. J. *et al.* Effect of cooling rate on the austenite-ferrite phase boundary composition of a duplex stainless steel. **J. Materials Engineering**. v. 13, p. 291–297, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02834031>.

GARDAN, J. Additive manufacturing technologies: State of the art and trends. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 10, p. 3118–3132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909>.

GE. **GE Aviation's 3D printed fuel nozzle**. 2016. Disponível em: <https://www.ge.com/reports/ge-aviations-3d-printed-fuel-nozzle/>. Acesso em: 9 ago. 2025.

GEBHARDT, A. **Understanding additive manufacturing**. Munich: Hanser Publishers, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9783446425521/understanding-additive-manufacturing>.

GIBSON, I. *et al.* **Additive manufacturing technologies**: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 3. ed. New York: Springer, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.

GU, J. *et al.* The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 230, p. 26-34, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006>

GURMESA, F. D. *et al.* Residual Stresses in Wire Arc Additive Manufacturing Products and Their Measurement Techniques: A Systematic Review. **Appl. Mech.** v. 5, p. 420–449, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/applmech5030025>

HACKENHAAR, W. *et al.* Air-Cooling Influence on Wire Arc Additive Manufactured Surfaces. **Key Engineering Materials**, v. 813, p. 241–247. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.813.241>.

HACKENHAAR, W. *et al.* An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 52, p. 58-65, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.051>

HOSSEINI, V. **Super duplex stainless steels**: Microstructure and properties of physically simulated base and weld metal. University West, 2018.

HU, M. *et al.* Effect of Interlayer Temperature on Microstructure and Properties of High-Strength Low-Alloy Steel Manufactured Using Submerged-Arc Additive

Manufacturing (SAAM). **Materials**, v. 7, n. 21, p. 5376, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17215376>

HULL, C. W.; UVP, Inc. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. U.S. Patent 4,575,330, 1986. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1859747>

IEA. International Energy Agency. **R&D and technology innovation – World Energy Investment 2020 – Analysis**. 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020/rd-and-technology-innovation>

ISO/ASTM INTERNATIONAL. ISO/ASTM 52900:2021(en). Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. **ASTM International**, vol. i, p. 1–9, 2015. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>.

JIN, W. *et al.* Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review. **Appl. Sci.** v. 10, n. 5, p. 1563, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10051563>.

KYVELOU, P. *et al.* Structural Testing and Design of Wire Arc Additively Manufactured Square Hollow Sections. **Journal of Structural Engineering**, v. 147, n. 12, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003188](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003188)

KRAWCZYK, R. *et al.* Mechanical Properties and Microstructure of Austenite-Ferrite Duplex Stainless Steel Hybrid (Laser + GMAW) and SAW Welded Joint. **Materials (Basel, Switzerland)**, v. 16, n. 7, p. 2909, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072909>

KOBE STEEL LTD. **Soldagem dos aços inoxidáveis Duplex**, 2025. Disponível em: <https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/technical-highlight/vol18.html>. Acesso em: 14/08/2025.

KORKMAZ, M. E.; GUPTA, M. K. A State of the Art on Cryogenic Cooling and Its Applications in the Machining of Difficult-to-Machine Alloys. **Materials**, v. 17, n. 2057, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17092057>.

KUMAR, A. *et al.* Study on the Effect of Current Pulsing During Gas Tungsten Arc Welding of Ti – 6Al – 4V Alloy. **Met Sci Heat Treat.** v. 66, p. 167–172, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-024-01034-0>.

LEARY, M. **Design for additive manufacturing**. Oxford: Elsevier, 2020.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. River Street, NJ: Wiley India Pvt. Limited, 2011.

LIU, J. *et al.* Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. **Int J Adv Manuf Technol.** v. 111, p. 149–198, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>.

LIU, Y. *et al.* Microstructures and Properties of Al-Mg Alloys Manufactured by WAAM-CMT. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 5460, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15155460>

LIU, Z. *et al.* Effect of hydrogen on the corrosion behavior of duplex stainless steel in oil and gas industry. **Chinese Journal of Engineering**, v. 46, n. 4, p. 684-694, 2024. DOI: <https://dx.doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.03.06.001>.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.170>

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Manufacturing the future**: The next era of global growth and innovation. 2012. https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Operations/Our%20Insights/The%20future%20of%20manufacturing/MGI_Manufacturing%20the%20future_Executive%20summary_Nov%202012.pdf

MELCHELS, F. P. W.; DOMINGO, S. M.; BARTOLO, P. J. Additive manufacturing of tissues and organs. **Progress in Polymer Science**, v. 37, p. 1079–1104, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007>.

MENG, X.; GARDNER, L. Hybrid construction featuring wire arc additive manufacturing: review, concepts, challenges and opportunities. **Engineering Structures**, v. 326, e119337, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119337>

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I**: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MOHAMMADI, J. *et al.* Pulsed gas metal arc additive manufacturing of low-carbon steel: Microstructure observations and mechanical properties. **Material Today Communications**, v. 38, e107637, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107637>.

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

NAFIS, B. M. *et al.* Additive Manufacturing for Enhancing Thermal Dissipation in Heat Sink Implementation: A Review. **Heat Transfer Engineering**, v. 42, n. 12, p. 967–984, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1766246>

NILSSON, J. O. Super duplex stainless steels. **Mater. Sci. Technol.**, v. 8, n. 8, pp. 685–700, 1992.

OCHOA, C. A. G. *et al.* Advanced Porosity Control of CP780 Galvanized Steel During Gas Metal Arc Welding with Pulsed Arc. **Metals**, v. 15, n. 5, p. 513, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15050513>

QUEGUINEUR, A. *et al.* Wire arc additive manufacturing of thin and thick walls made of duplex stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 127, p. 381–400, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11560-5>.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços inoxidáveis austeníticos: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Blucher, 2021.

PAL, K.; PAL, S. K. Effect of Pulse Parameters on Weld Quality in Pulsed Gas Metal Arc Welding: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 20, n. 6, p. 918–931, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9717-y>.

PANIN, A. *et al.* Effects of Water Cooling on the Microstructure of Electron Beam Additive-Manufactured Ti-6Al-4V. **Metals**, v. 11, n. 11, p. 1742, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111742>.

PARANDOUSH, P.; LIN, D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. **Composite Structures**, v. 182, p. 36–53, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.

PARVEZ, S. *et al.* Numerical investigation of the influence of pulse frequency on the weld pool size in pulsed current TIG welding. **AIP Advances**, v. 15, e015115, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0242681>.

PHULL, G. S.; KUMAR, S. WALIA, R. S. Conformal Cooling for Molds Produced by Additive Manufacturing: A Review. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)**, v. 9, n. 1, p. 1162–1172, 2018. DOI: <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=1>

PICKIN, C. G.; YOUNG, K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for the welding of thin aluminium alloy. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 5, p. 29–37, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329306X120886>

RAFIEAZAD, M. *et al.* Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing. **Int J Adv Manuf Technol**, v. 105, p. 2121–2134, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04393-8>

RAJKUMAR, V. *et al.* Microstructure, mechanical properties, and corrosion behaviour of wire arc additive manufactured martensitic stainless steel 410 for pressure vessel applications. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 209, e105171, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105171>

RAMESH, A. *et al.* **Weldability of duplex stainless steels – A review**. In: ICMED 2021. E3S Web of Conferences, 2021.

RASOULI, D. *et al.* Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of microalloyed forging steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 206, n 1-3, p. 92-98, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.006>

RAUT, L.P., TAIWADE, R.V. Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions. **J. of Materi Eng and Perform** v. 30, p. 4768–4791, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05871-5>

REN, L. *et al.* Effect of Mg content on microstructure and properties of Al–Mg alloy produced by the wire arc additive manufacturing method. **Materials (Basel)**, v. 12, n. 4160, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12244160>

ROSLI, N. A. *et al.* Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 11, p. 2127-2145, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.002>

SÁENZ, L., *et al.* Duplex Stainless Steel Subjected to Normalized Thermal Treatment. **Key Engineering Materials**, v. 834, p. 103–109, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.834.103>

SALEH, B. *et al.* Fundamentals and advances of wire arc additive manufacturing: materials, process parameters, potential applications, and future trends. **Archiv. Civ. Mech. Eng.** v. 23, n. 96, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00633-7>.

SAMEER, S. *et al.* Investigation of critical barriers for achieving agility in the manufacturing systems – AHP. **Materials Today: Proceedings**, v. 63, p. 469-474, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.450>.

SAUNDERS, S. **GE Aviation anuncia 100.000º bico de combustível impresso em 3D enviado da fábrica de Auburn.** 2021. Disponível em: <https://3dprint.com/284243/ge-aviation-announces-100000th-3d-printed-fuel-nozzle-shipped-from-auburn-plant/>. Acesso em: 11/10/2025.

SENGOTTAIYAN, S. *et al.* Effect of duplex and austenite stainless steel fillers on mechanical, microstructural, and corrosion characteristics of dissimilar welds using Cold Metal Transfer welding. **Results in Engineering**, v. 26, 104818, 2025.

SHRESTHA, R.; SIMSIRIWONG, J. SHAMSAEI, N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel parts: Effects of layer orientation and surface roughness. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 23-38, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.011>

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.

SOS, M. *et al.* Microstructure and mechanical properties of additively manufactured AISi10Mg lattice structures from single contour exposure. **Materials & Design**, v. 227, e111796, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111796>

SPINASA, A. *et al.* Influence of process parameters on the physical and material properties of WAAM steels. **Construction and Building Materials**, v. 479, e141078, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141078>

SUN, C. *et al.* Additive manufacturing for energy: A review. **Applied Energy**, v. 282, e116041, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116041>

TENG, B. G. *et al.* Research on the precision bending of a workpiece with a complicated cross-section for manufacturing a large flange. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 151, n. 1–3, p. 228-231, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.049>

TABRIZI, T. R. *et al.* Comparing the effect of continuous and pulsed current in the GTAW process of AISI 316L stainless steel welded joint: microstructural evolution, phase equilibrium, mechanical properties and fracture mode. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 199-212, 2021.

THOMPSON, M. K. *et al.* **Design for additive manufacturing: trends, opportunities and constraints.** *CIRP Annals*, v. 65, n. 2, p. 737–760, 2016.

TONELLI, L. *et al.* Influence of Interlayer Forced Air Cooling on Microstructure and Mechanical Properties of Wire Arc Additively Manufactured 304L Austenitic Stainless Steel. **Steel Research International**, v. 92, n. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100175>

TWI. **Sigma Phase Embrittlement of Super Duplex Stainless Steels.** 2021. Disponível em: <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2021/sigma-phase-embrittlement-of-super-duplex-stainless-steels>. Acesso em: 14 ago. 2025.

TWI. **Advantages of pulsed MIG/MAG welds over conventional MIG/MAG.** 2025. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-pulsed-mig-mag-welding-and-what-are-its-advantages-over-conventional-mig-mag-processes>. Acesso em: 14 ago. 2025.

UKODA, K. *et al.* Additive manufacturing in the energy sector and the fourth industrial revolution. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 10, n. 8, p. 4625-4645, 2025. DOI: [DOIhttps://doi.org/10.1007/s40964-024-00931-3](https://doi.org/10.1007/s40964-024-00931-3)

UNIFIED ALLOYS. **Comparing Duplex Stainless Steels:** Grades, Properties, Selection. 2025. Disponível em: <https://www.unifiedalloys.com/blog/duplex-stainless-steels>. Acesso em: 14 ago. 2025.

YAN, H. *et al.* In situ distortion control in wire arc additive manufacturing using coordinated heat source on reverse side of the substrate. **Rapid Prototyping Journal**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2025-0058>

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

VÁZQUEZ, L. *et al.* Influence of interpass cooling conditions on microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V parts manufactured by WAAM. **Weld. Word**, v. 64, p. 1377–1388, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00921-3>

WANG, F. *et al.* Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. **Metall Mater Trans A**, v. 44, p. 968–977, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>

WANG, L.; MOSHER, R.; DUETT P. Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 17, n. 3, p. 116-125, 2024.

WILLIAMS, S. W. *et al.* Wire + Arc Additive Manufacturing. **Materials Science and Technology**, v. 32, n. 7, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.

WOHLERS, T. *et al.* **Wohlers Report 2023: 3D printing and additive manufacturing state of the industry**. Fort Collins: Wohlers Associates, 2023.

XIONG, J. *et al.* Emflinluências dos parâmetros do processo na rugosidade da superfície de peças de paredes finas de passagem única multicamadas na fabricação aditiva baseada em GMAW. **J. Mater. Process. Technol.** v. 252, P. 128-136, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>

ZHAI, W.; WU, N.; ZHOU, W. Effect of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing Using High-Strength Metal-Cored Wire. **Metals**, v. 12, n. 2, p. 212. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12020212>.