

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO METALOGRÁFICO DO ARAME ER 316L
DEPOSITADO POR MANUFATURA ADITIVA A ARCO (MADA)
STUDY OF THE METALLOGRAPHIC BEHAVIOR OF ER 316L WIRE DEPOSITED
BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)**

André Luiz Coelho¹
Romilda de Jesus Santos²
Walter Borges Rocha³
Edgar de Souza Dutra⁴
Pedro Luan Ferreira da Chagas⁵

RESUMO: A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), emerge como uma alternativa inovadora para a fabricação de componentes metálicos, contudo, os ciclos térmicos inerentes ao processo, impõem desafios ao controle microestrutural. Este artigo tem como objetivo, caracterizar metalurgicamente as amostras do aço inoxidável ER 316L fabricadas por MADA. A metodologia envolveu a deposição controlada por processo GMAW robotizado e a subsequente caracterização macro e microestrutural, onde foram analisadas de forma qualitativa e descritiva. Os resultados revelaram, na análise macroestrutural, uma conformidade satisfatória entre as camadas depositadas, livres de defeitos críticos como porosidades, trincas ou inclusões. As análises microestruturais, evidenciaram uma microestrutura ferrítica-austenítica com distintas morfologias de ferrita (vermicular e colunar), contrastando com a estrutura puramente austenítica do material convencional.

Palavras-chave: Aço Inoxidável; ER 316L; MADA; Manufatura aditiva.

ABSTRACT: Additive manufacturing by arc deposition (MADA) is emerging as an innovative alternative for the manufacture of metal components. However, the thermal cycles inherent to the process pose challenges for microstructural control. This article aims to metallurgically characterize samples of ER 316L stainless steel manufactured by MADA. The methodology involved controlled deposition by a robotic GMAW process and subsequent macro and microstructural characterization, which were analyzed qualitatively and descriptively. The results revealed, in the macrostructural analysis, satisfactory conformity between the deposited layers, free of critical defects such as porosity, cracks, or inclusions. The microstructural analyses showed a ferritic-austenitic microstructure with distinct ferrite morphologies (vermicular and columnar), contrasting with the purely austenitic structure of the conventional material.

Keywords: Additive Manufacturing; ER316L; Stainless Steel; WAAM.

1 INTRODUÇÃO

A Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA), ou *Wire and Arc Additive*

Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem – Fatec Itaquera - E-mail:
andrecoelhofatec2015@gmail.com¹

Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem – Fatec Itaquera - E-mail:
romildasantos.ps@gmail.com²

Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem – Fatec Itaquera - E-mail:
walterborgesrocha@outlook.com³

Mestre em Processos Industriais – Fatec SP e Fatec Itaquera - E-mail: edgar.dutra@fatec.sp.gov.br⁴
Cursando Tecnologia em Mecânica: Processos de Soldagem – Fatec Itaquera E-mail:
pedro_lchagas@icloud.com⁵

Manufacturing (WAAM), vem se consolidando como uma tecnologia promissora para a produção de componentes metálicos de médio e grande porte, oferecendo vantagens como a redução de desperdício de matéria-prima e a capacidade de produzir geometrias complexas. Contudo, a natureza do processo, que envolve aporte térmico cíclico e elevadas taxas de resfriamento, resulta em gradientes de temperatura acentuados que influenciam diretamente a formação microestrutural e, por conseguinte, o desempenho mecânico das peças.

No caso do arame em aço inoxidável austenítico classificado como ER 316L, tradicionalmente caracterizado por uma matriz monofásica austenítica, os ciclos térmicos do processo MADA podem induzir transformações de fase, como a precipitação de ferrita delta (δ) em diferentes morfologias. Essa heterogeneidade estrutural impacta diretamente propriedades como resistência mecânica, dureza e ductilidade, podendo introduzir anisotropia e variações locais de desempenho. A caracterização detalhada dessas microestruturas é, portanto, essencial para compreender o comportamento do material e otimizar os parâmetros de deposição. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a macroestrutura e microestrutura, provenientes do processo MADA utilizando o arame em aço inoxidável, apresentando classificação ER 316L, verificando a correspondência entre os resultados obtidos e os modos de solidificação previstos para esta liga sob condições de resfriamento rápido.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Substrato

O substrato utilizado para o presente estudo, foi o aço inoxidável austenítico AISI 304L, cuja composição química e propriedades mecânicas seguem a norma ASTM A240/A240M – 02a (2012) conforme demonstradas respectivamente nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 304 L

Designação	Tipo	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N
S30403	304 L	0,03 máx.	2 máx.	0,045 máx.	0,03 máx.	0,75 máx.	18 - 20	8 - 12,5	0,1 máx.

Fonte: Adaptado do ASTM A 240/A 240M – 02a (2012).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 304 L

Designação / Tipo	S30403 / 304 L
Resistência a Tração	70 Ksi min. / 485 MPa min.
Limite de Escoamento	25 Ksi min. / 170 MPa min.
Alongamento	40% min.
Dureza Brinell	201 máx.
Dureza Rockwell B	92 máx.

Fonte: Adaptado do A 240/A 240M – 02a (2012).

2.1.2 Consumível

Como material de adição, foi empregado o arame maciço conforme classificação ER 316L e especificação do código ASME BPVC II.C 5.9 (2023), apresentando composição química conforme Tabela 3 e propriedades mecânicas demonstradas na Tabela 4. O presente consumível faz parte da classe dos aços inoxidáveis austeníticos.

Tabela 3 - Composição química do ER 316 L

Designação	Classificação	Mo	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
S31683	ER 316 L	2 - 3	0,3 máx.	1 - 2,5	0,3 máx.	0,3 máx.	0,3 - 0,65	18 - 20	11 - 14	0,75 máx.

Fonte: Adaptado de ASME BPVC.II.C SFA 5.9 (2023).

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do ER 316 L

AWS / ISO	E316 L – XX, E19 12 3 LX
Resistência a Tração	70 Ksi min. / 490 MPa min.
Alongamento	30% min.

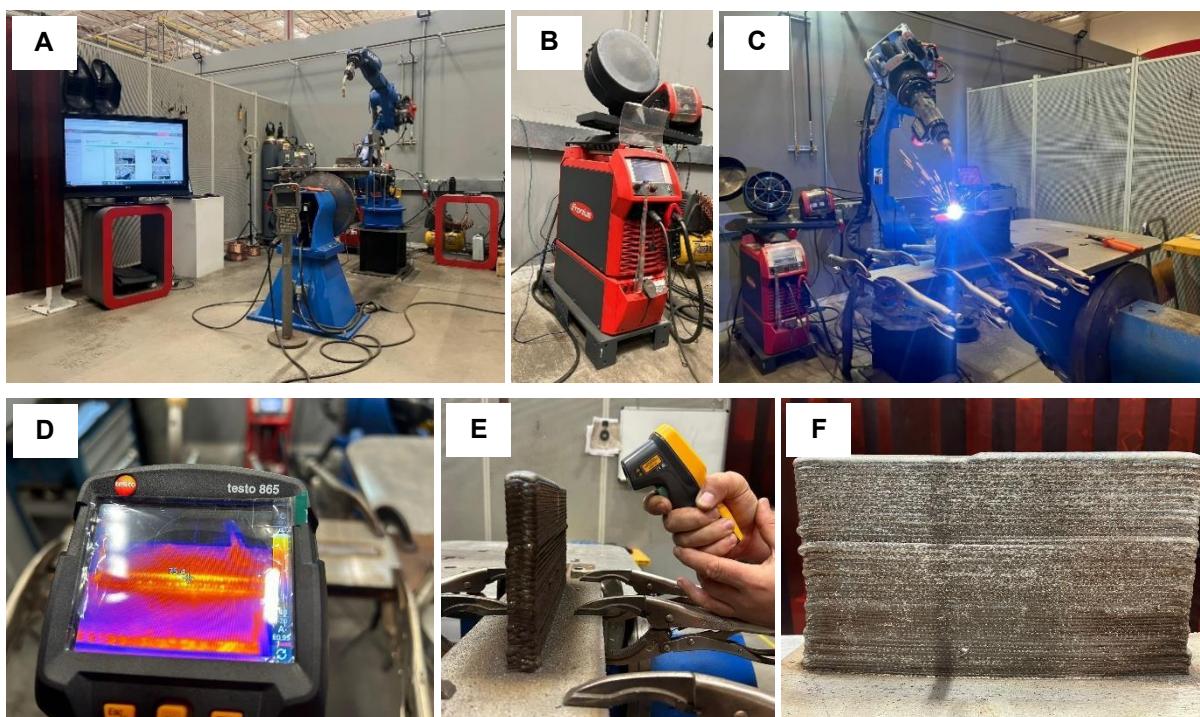
Fonte: Adaptado de ASME BPVC.II.C SFA 5.9 (2023).

2.2 EQUIPAMENTOS E PROCESSO

2.2.1 Sistema de soldagem

A deposição do consumível, foi realizada pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) com um robô industrial *Motoman Yaskawa AR2010* (Figura 1-A). A fonte de soldagem utilizada foi uma *Fronius Transpuls Sinergic 4000* (Figura 1-B). O gás de proteção consistiu em uma mistura de 98% Ar + 2% O₂, com vazão de 15 L/min. Os parâmetros médios de soldagem com a corrente de 215 A, tensão de 25 V e velocidade de soldagem de 30 cm/min, foram ajustados para o regime de transferência spray, e pausas programadas entre os passes foram adotadas para controlar o aporte térmico (Figura 1-C), mantendo a temperatura de interpasses abaixo de 300 °C, monitorada por uma câmera termográfica e termômetro ótico da Fluke (Figuras 1 D e E, respectivamente). Após a deposição na forma de bloco como material base (Figura 1-F), corpos de prova foram seccionados para análises metalográficas.

Figura 1 – Corpo de prova finalizado após deposição por MADA

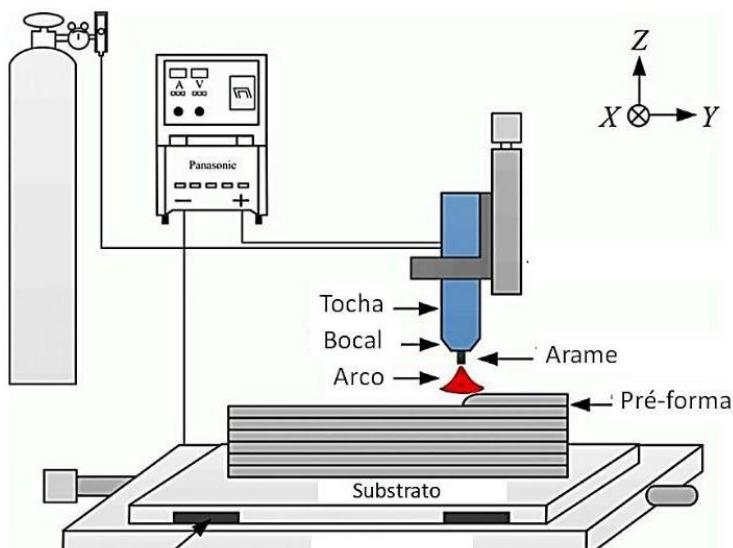


Fonte: Autores (2025).

A velocidade de alimentação do arame e a tensão de arco foram ajustadas

conforme especificação preliminar de procedimento de soldagem (EPS), garantindo deposição estável e repetível, prática que, conforme Wu *et al.* (2019), melhora a estabilidade do arco e reduz a incidência de porosidades em ligas inoxidáveis. A configuração do sistema utilizada no presente estudo, seguiu o esquema de montagem do sistema utilizado por Xiong J, Li Y, Li R, Yin Z. (2018) conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de soldagem GMAW/MADA



Fonte: Adaptado de Xiong J, Li Y, Li R, Yin Z. (2018).

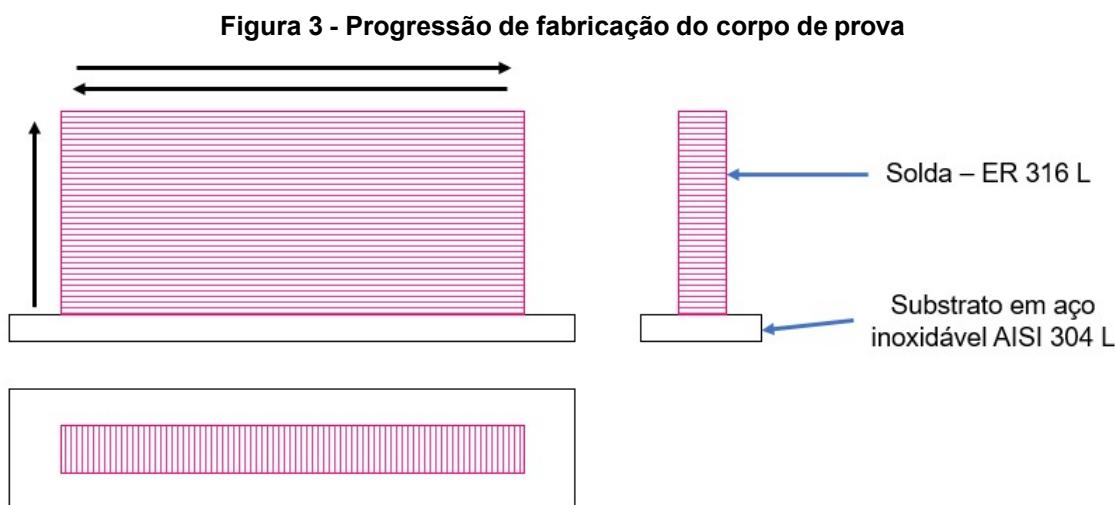
Os parâmetros de soldagem foram ajustados para o regime de transferência metálica spray, condição que proporciona cordões uniformes e com menor formação de respingos. De acordo com DebRoy *et al.* (2018), essa configuração é a mais adequada para aplicações que exigem qualidade superficial e controle metalúrgico rigoroso. Como modificação do procedimento tradicional de GMAW, foram inseridas pausas programadas entre passes sucessivos, com o objetivo de reduzir o aporte térmico acumulado. Esse tipo de adaptação, relatado por Li *et al.* (2022), é eficaz na mitigação de tensões residuais e no controle de microestruturas heterogêneas. O controle térmico foi monitorado por câmera termográfica digital Fluke, assegurando que a temperatura de interpasses descrita anteriormente.

Essa adaptação foi fundamental para assegurar microestruturas mais homogêneas e evitar a precipitação indesejada de fases secundárias, fenômeno descrito por Wang *et al.* (2020) como um dos principais desafios da soldagem de aços inoxidáveis pelo processo GMAW.

2.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

2.3.1 Preparação da soldagem robotizada

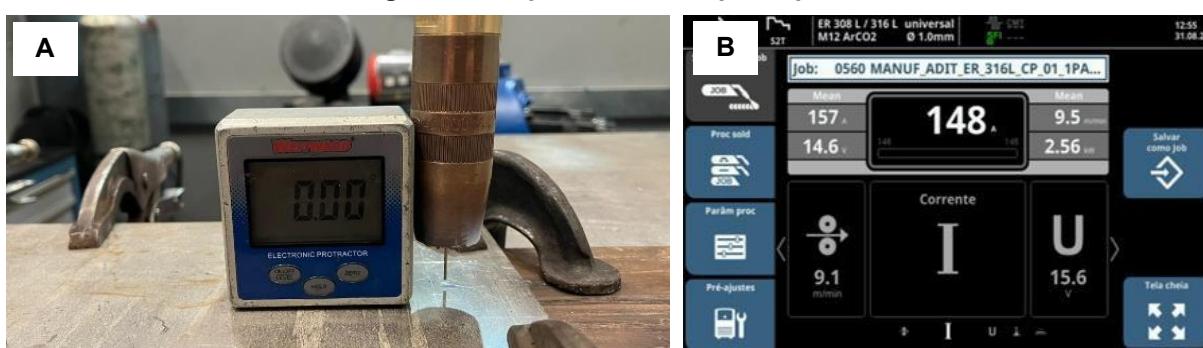
O plano de soldagem demonstrado abaixo na Figura 3, contém as informações necessárias sobre o corpo de prova proposto para a execução de soldas de produção neste estudo, a partir dos dados constantes da uma especificação de procedimento de soldagem.



Fonte: Autores (2025).

O processo de preparação do corpo de prova para soldagem foi iniciado utilizando o robô. Após a etapa de preparo, foi conferido o ângulo referente ao bico de contato da máquina de solda junto ao substrato, conforme ilustrado na Figura 4-A, a fim de garantir condições adequadas para a soldagem foi seguido a parametrização conforme Figura 4-B.

Figura 4 - Preparação do corpo de prova

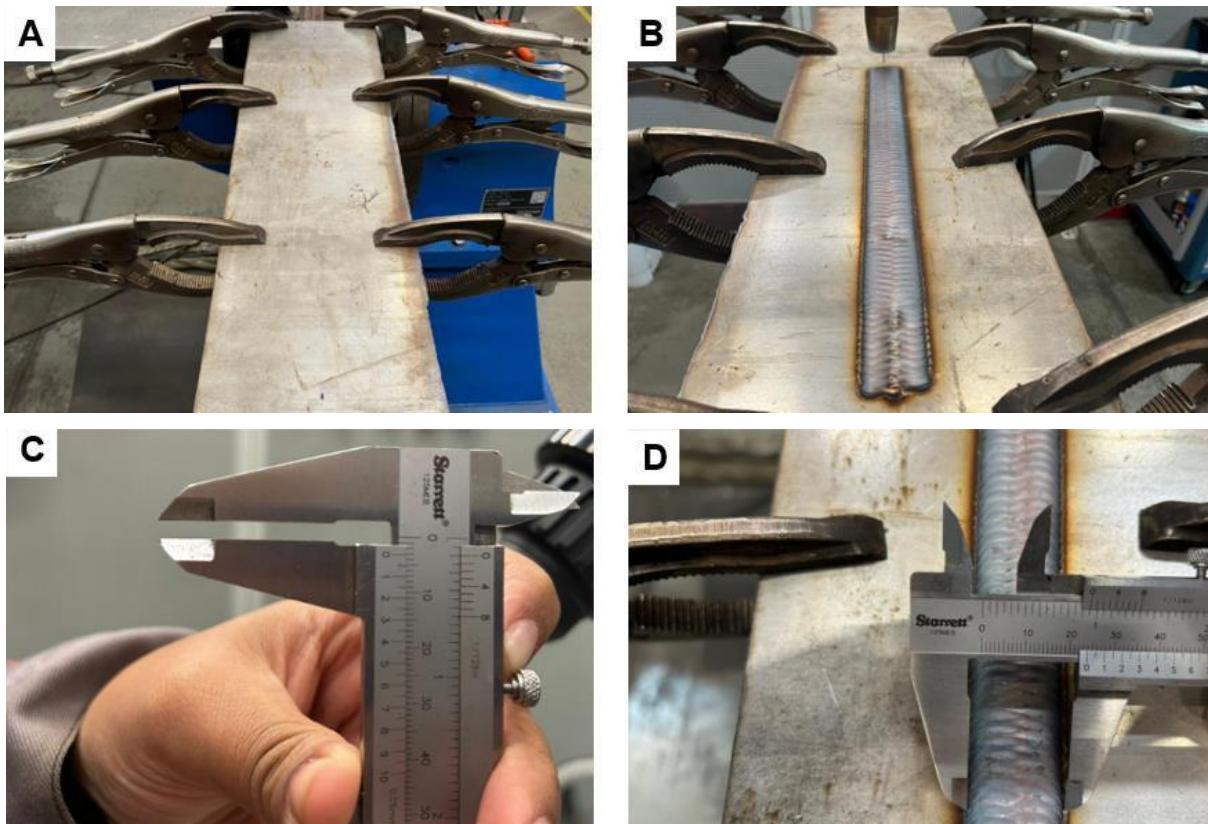


Fonte: Autores (2025).

Em seguida foi realizado o primeiro passe de soldagem, no qual foram conferidas as medições como altura do reforço, largura do cordão e demais variáveis

operacionais, conforme apresentado na Figura 5 e detalhe A (substrato pronto para ser soldado, detalhe B (primeiro passe de solda), detalhe C (medição da altura do reforço) e detalhe D (medição da largura do reforço).

Figura 5 - Sequência de soldagem do corpo de prova



Fonte: Autores (2024).

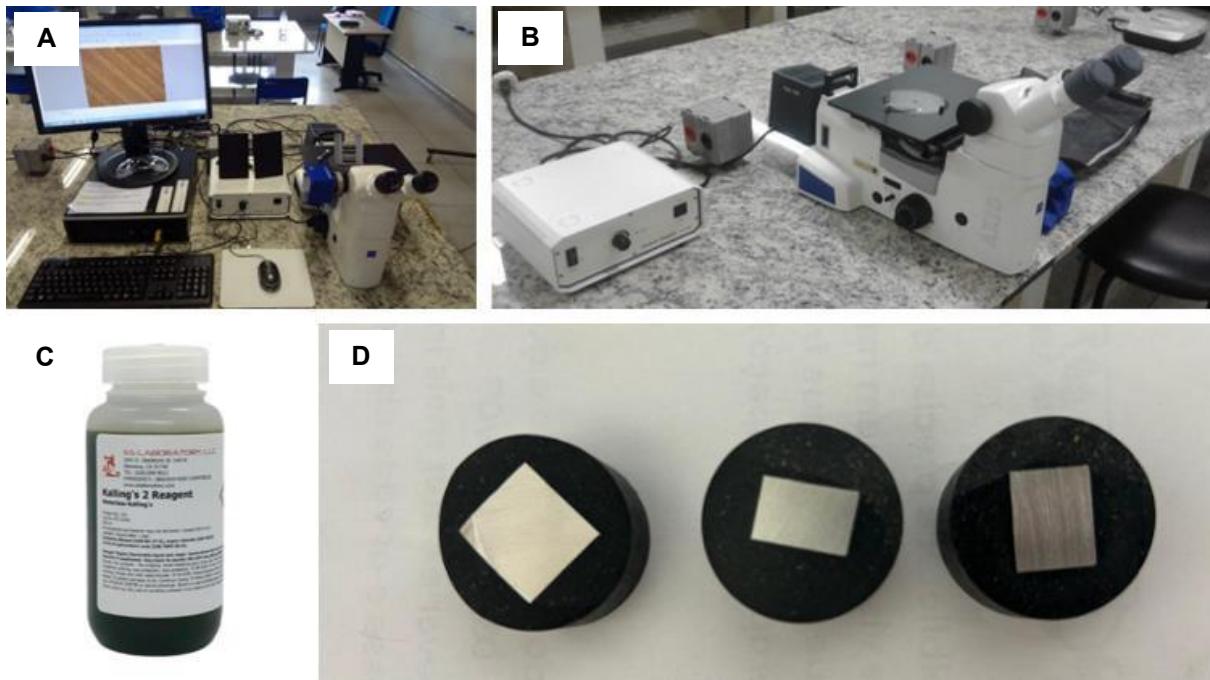
Após a parametrização que foi utilizada conforme catálogo do fabricante para esta aplicação, o processo de soldagem foi conduzido com a deposição do material ER 316 L camada a camada, no sentido longitudinal ao substrato, com pausas programadas para controle do aporte térmico entre os passes, garantindo a integridade metalúrgica do cordão de solda.

2.3.2 Preparação e caracterizações das amostras

Para a caracterização microestrutural, as amostras foram embutidas conforme (Figura 6 - D), lixadas e polidas, seguindo a norma NBR 13284. O ataque químico foi realizado com a solução Kalling (Figura 6 - C) para revelar a microestrutura, que foi analisada em um microscópio óptico ZEISS Axion 10. A macroestrutura foi avaliada em um estereoscópio ZEISS Axion conforme (Figura 6 – A e B). A

composição química foi verificada por espectrometria de energia dispersiva (EDS), com equipamento utilizando tubo de raio X com anodo de Rh que opera entre 5 – 50 kV e 1 – 1000 mA.

Figura 6 – Microscópio, amostras embutidas



Fonte: Autores (2025).

2.3.3 Caracterizações macroestruturais e microestruturais

As caracterizações dos corpos de prova para as análises metalográficas, foram realizadas de acordo com os seguintes tópicos:

- Preparo das amostras: realizado conforme NBR 13284 (1995), incluindo embutimento em resina, lixamento e polimento em pasta de alumina;
- Ataque químico: solução Kalling, aplicada para revelação da microestrutura;
- Macroestrutura: avaliada em estereoscópio ZEISS modelo Axion, para análise de continuidade e possíveis descontinuidades de deposição;
- Microestrutura: observada em microscópio óptico ZEISS Axion 10.

2.3.4 Critérios de análise

As análises foram comparadas com referenciais normativos e literaturas especializadas dos autores Callister e Rethwisch (2018); Jeong *et al.* (2021) e Wang

et al. (2020), avaliando a influência dos parâmetros do processo GMAW/MADA na formação de microestruturas heterogêneas e na homogeneidade da macroestrutura.

2.3.5 Tratamento e análise dos dados

As análises macro e microestruturais, foram realizadas de forma qualitativa, observacional e comparativa às referências normativas e literaturas técnicas, não sendo aplicados métodos estatísticos devido à natureza descritiva do estudo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 METALOGRAFIA

3.1.1 Micrografias

A análise micrográfica consiste no estudo detalhado da microestrutura de metais e ligas, geralmente obtida por microscopia óptica ou eletrônica, após preparação metalográfica adequada. Esse procedimento inclui etapas de lixamento, polimento e ataque químico, que revelam as fases presentes, o tamanho de grão e os efeitos térmicos da soldagem sobre o material de base e a zona afetada pelo calor (ZAC).

Segundo Callister e Rethwisch (2019), a micrografia é fundamental para compreender a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas dos metais, visto que o tamanho de grão, a morfologia das fases e a presença de precipitados influenciam diretamente a resistência e a ductilidade.

De acordo com Chiaverini (2017), em soldagem, a micrografia permite identificar transformações metalúrgicas ocorridas no cordão e na ZAC, como a formação de martensita, ferrita, perlita ou bainita, a depender da composição química e da taxa de resfriamento. Além disso, possibilita a avaliação de descontinuidades microscópicas, como inclusões não metálicas e microtrincas.

Pesquisas recentes destacam o uso de micrografias para análise de revestimentos duros aplicados em aços de baixo carbono, nos quais o amanteigamento atua como camada intermediária para minimizar tensões residuais e refinar a microestrutura da interface soldada (Silva *et al.*, 2020).

3.1.2 Macrografias

A análise macrográfica, por sua vez, é aplicada para avaliar a estrutura em escala maior, normalmente visível a olho nu ou com baixo aumento microscópico. O exame macrográfico é realizado por meio de cortes transversais da junta soldada, submetidos a ataque químico adequado, permitindo a visualização do perfil do cordão, da penetração, da fusão e de defeitos internos.

De acordo com Totten (2018), a macrografia é um método essencial para inspecionar a homogeneidade do cordão, verificar a ocorrência de falta de fusão, porosidade, trincas e identificar a profundidade de penetração, parâmetros críticos na qualificação de procedimentos de soldagem.

No contexto da soldagem, a análise macrográfica fornece informações sobre a geometria do cordão e a adequação dos parâmetros utilizados, possibilitando o controle de variáveis como corrente, tensão, velocidade de avanço e aporte térmico (Marques; Modenesi; Bracarense; 2019).

Estudos recentes reforçam que a macrografia é amplamente utilizada na indústria para a qualificação de soldadores e procedimentos, sendo recomendada em normas como a AWS D1.1 (2025), que estabelece critérios de aceitação para descontinuidades observáveis em cortes macrográficos de juntas soldadas (American Welding Society (2025).

3.1.3 A importância das micrografias e macrografias na soldagem

A aplicação conjunta de micrografias e macrografias fornece uma visão completa da qualidade do processo de soldagem. Enquanto as macrografias permitem avaliar a geometria e integridade geral do cordão, as micrografias revelam os mecanismos metalúrgicos que controlam o desempenho mecânico do material.

Segundo Souza *et al.* (2021), a correlação entre análises macro e micrográficas possibilita identificar não apenas defeitos visíveis, mas também as causas

metalúrgicas subjacentes, como segregações, crescimentos de grão e transformações de fase. Esse conjunto de análises é, portanto, indispensável tanto para a pesquisa acadêmica quanto para a indústria, na garantia da confiabilidade estrutural de componentes soldados.

3.2 NORMAS TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS APLICÁVEIS

A realização das análises macro e micrográficas em soldagem é orientada por normas técnicas reconhecidas internacionalmente. A AWS D1.1 (2025) estabelece critérios para avaliação de juntas soldadas por inspeção macrográfica, enquanto a ASTM E3-11 (reaprovada em 2017) descreve os procedimentos de preparação metalográfica para exames micrográficos.

Além disso, a literatura especializada ressalta a importância da normalização no preparo das amostras, a fim de assegurar resultados comparáveis e reproduutíveis (Silva; Oliveira; Gomes, 2019).

A solidificação de aços inoxidáveis austeníticos é fortemente influenciada pela composição química e pela velocidade de resfriamento. Segundo Modenesi (2001), a solidificação pode ocorrer com a formação de austenita primária (Modo A ou AF) ou ferrita primária (Modo FA ou F).

Em processos de soldagem e MADA, as altas taxas de resfriamento favorecem a solidificação com ferrita primária, que se transforma parcialmente em austenita durante o resfriamento. Dependendo da taxa de resfriamento e do gradiente térmico, a ferrita remanescente pode apresentar diferentes morfologias, como vermicular ou lamelar (colunar), impactando diretamente as propriedades mecânicas do material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

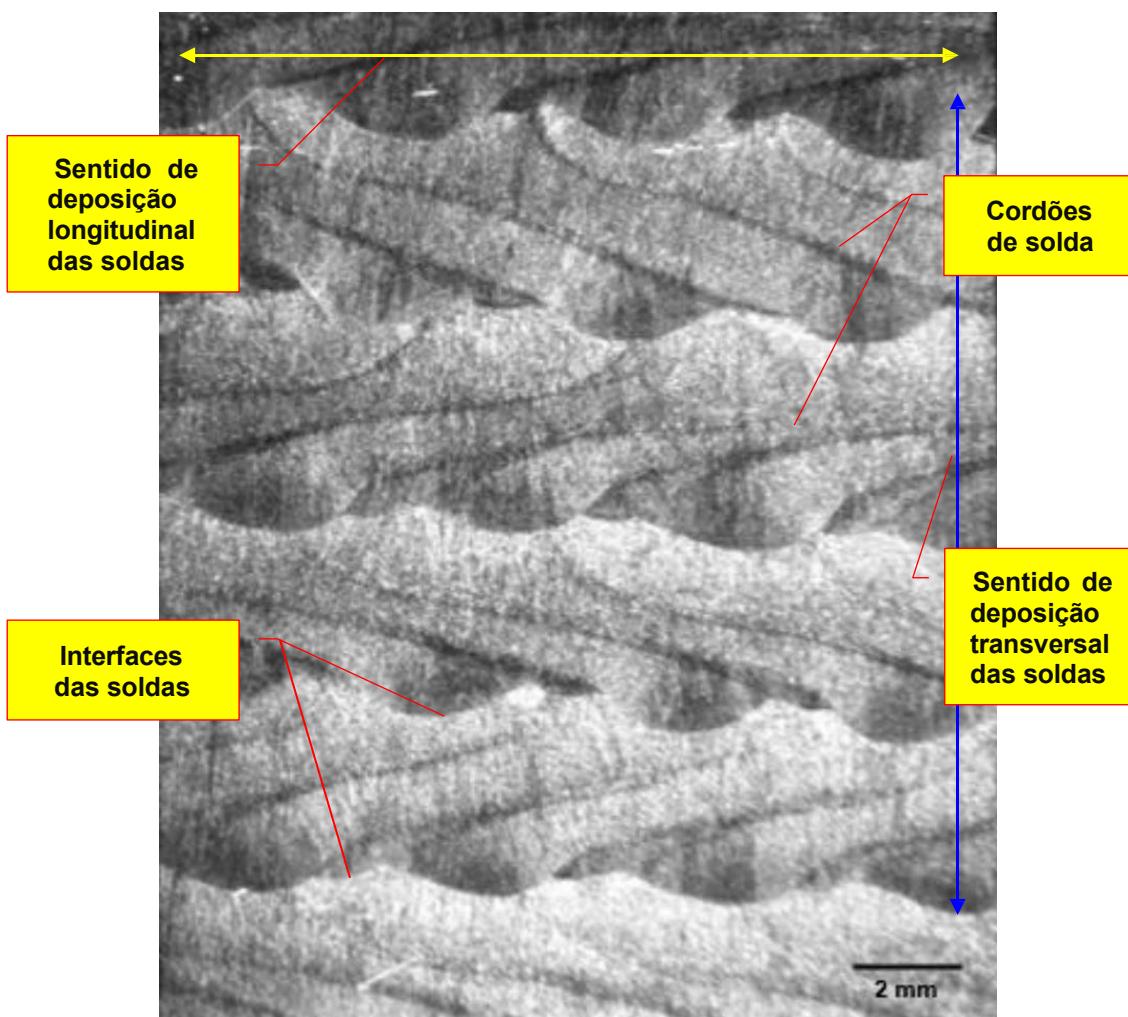
4.1 ANÁLISES METALÓGRAFICAS

4.1.1 Análise macroestrutural

A análise macroestrutural revelou uma deposição homogênea, com sobreposição adequada entre as camadas e ausência de defeitos críticos como trincas, porosidade ou falta de fusão, confirmado a integridade do corpo de prova. A

Figura 7 exibe a estrutura em camadas característica do processo MADA, demonstrando um perfil de solidificação no sentido longitudinal e transversal. A macrografia apresentou-se uniforme e sem a presença de descontinuidades como trincas, falta de fusão ou falta de penetração, o que conferiu qualidade na deposição conforme critérios estabelecidos pelo AWS D1.1 (2025).

Figura 7 – Análise macrográfica da amostra central



3 Fonte: Autores (2025).

4.1.2 Análise macroestrutural

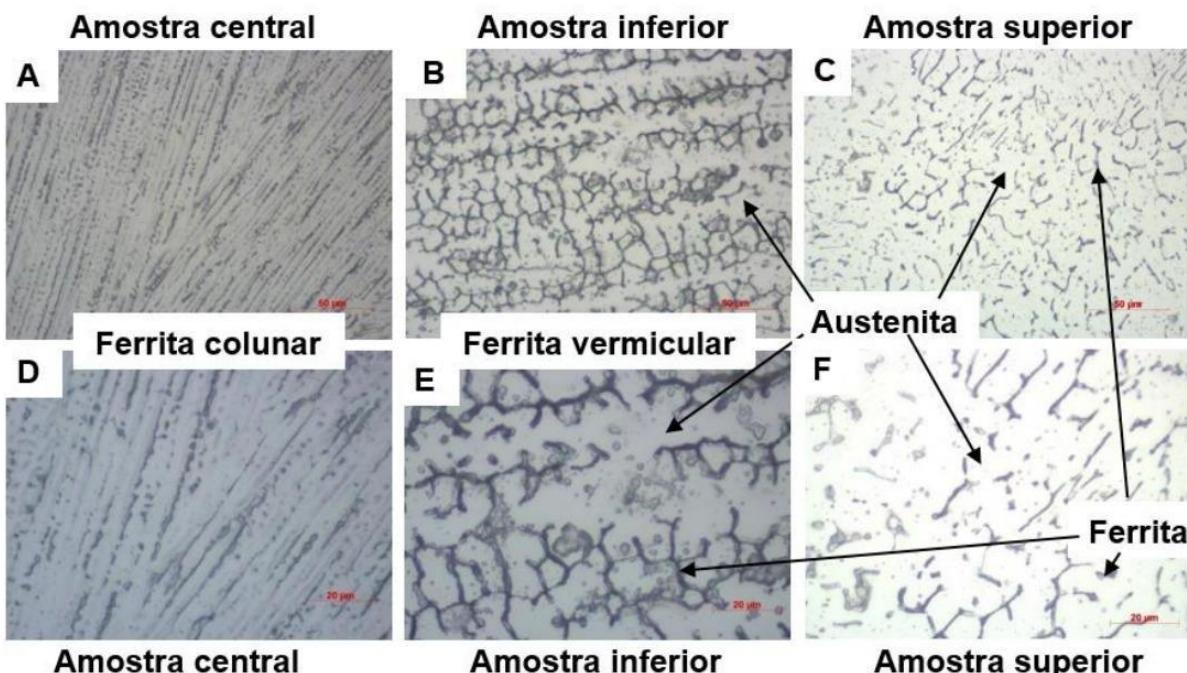
A caracterização microestrutural foi o ponto central da análise. As amostras revelaram uma microestrutura predominantemente ferrítica-austenítica, um resultado direto das elevadas taxas de resfriamento do processo MADA.

Foram identificadas morfologias de ferrita distintas ao longo da altura do corpo de prova, conforme visto na Figura 8. Na região inferior (próxima ao substrato), que sofreu resfriamento mais rápido, observou-se a presença de ferrita vermicular.

Na região central e superior, onde o calor acumulado reduziu a taxa de resfriamento, a microestrutura evoluiu para ferrita colunar (lamelar) e uma mistura de ferrita primária e austenita. Esta variação microestrutural é a principal causa da heterogeneidade das propriedades mecânicas.

Figura 8 – Estruturas de solidificação observadas nas amostras

Amostras com lente 50x



Amostras com lente 100x

Fonte: Autores (2025).

Os resultados deste estudo corroboram as observações de Li *et al.* (2022), onde o maior aporte térmico promove o crescimento de ferrita colunar no núcleo do cordão, favorecendo anisotropias e maior suscetibilidade a tensões residuais. Paralelamente, a ferrita vermicular encontrada na base das camadas indica transformação sob resfriamento acelerado, comportamento semelhante ao observado por Wang *et al.* (2020). Em conjunto, essas variações microestruturais evidenciadas no presente trabalho comprovam a forte influência dos ciclos térmicos da MADA sobre o comportamento metalúrgico do ER316L, podendo impactar diretamente suas propriedades mecânicas em condições de serviço.

A análise química via EDS, confirmou que a composição do material depositado estava de acordo com os padrões para o aço ER 316L, com teores de Cr, Ni e Mo dentro do esperado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), aplicada ao aço inoxidável ER316L, apresenta elevado potencial como

tecnologia sustentável e eficiente para a produção de componentes metálicos, proporcionando redução de desperdício, economia de material e flexibilidade na fabricação de geometrias complexas.

Entretanto, verificou-se que a microestrutura formada é heterogênea, marcada pela presença de ferrita em diferentes morfologias. Enquanto a ferrita colunar, observada no centro do cordão, indica maior suscetibilidade a anisotropia e trincas, a ferrita vermicular na base revela o efeito positivo do resfriamento acelerado, resultando em microestrutura mais refinada. Já a coexistência de ferrita e austenita no topo confirma o impacto do acúmulo de calor intercamadas na redução da homogeneidade estrutural. Essa variabilidade poderá ser refletida diretamente no desempenho mecânico, possibilitando maior dureza e resistência ao escoamento em corpos de prova longitudinais. Tais evidências reforçam que o controle dos ciclos térmicos e a otimização dos parâmetros de processo são aspectos determinantes para mitigar anisotropias e garantir a confiabilidade estrutural do material.

Conclui-se, portanto, que a MADA com ER316L é uma tecnologia promissora para aplicações industriais exigentes, desde que acompanhada de melhorias contínuas no monitoramento do aporte térmico e de maior compreensão da relação entre microestrutura e propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2017.

COLPAERT, H. Metalografia dos productos siderúrgicos comuns. 2 ed. São Paulo. 2008

DEBROY, T. et al. **Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties**. Progress in Materials Science, v. 92, p. 112-224, 2018.

JEONG, J. et al. **Metastable δ-ferrite and twinning-induced plasticity on the strain hardening behavior of directed energy deposition-processed 304L austenitic stainless steel**. Additive Manufacturing, v. 47, p. 102363, 2021.

LI, J. et al. **Influence of heat input on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing**. Journal of Materials Processing Technology, v. 297, p. 117-123, 2022.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. **Soldagem: fundamentos**

e tecnologia. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

MODENESI, P. J. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

SABOORI, A. et al. ***Microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by directed energy deposition-based additive manufacturing: a review***. Applied Sciences, v. 10, 2020.

SELVI, V.; RAJASEKAR, E.; VISHVAKSENAN, S. **Gas metal arc welding process – a review**. Materials Today: Proceedings, v. 5, p. 2563-2570, 2018.

SILVA, J. A. et al. **Aplicação de micrografia na análise de revestimentos duros em aços carbono**. Revista Matéria, v. 25, n. 4, 2020.

SILVA, R. S.; OLIVEIRA, L. M.; GOMES, F. C. **Normalização de procedimentos metalográficos para ensaios em soldagem**. Revista Soldagem e Materiais, v. 11, n. 2, p. 45-52, 2019.

SOUZA, R. M. et al. **Correlação entre macro e micrografia na análise de juntas soldadas**. Revista Brasileira de Soldagem, v. 10, n. 1, p. 21-31, 2021.

TOTTEN, G. E. Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Park: ASM International, 2018.

WANG, C. et al. **Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing**. Materials Science and Engineering A, v. 796, 2020.

WU, B. et al. **A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement**. Journal of Manufacturing Processes, v. 35, p. 127-146, 2018.