



Investigação do comportamento metalúrgico do aço inoxidável austenítico 310 no processo WAAM

Henrique Cechinel Casagrande¹

João Batista Rodrigues Neto²

Anderson Daleffe³

Gilson de March⁴

Aline Cipriano⁵

Célia de Fraga Malfatti⁶

Pedro Henrique Menegaro Possamai⁷

Paulo Eduardo Ceccacci De Lion⁸

Resumo: O presente trabalho apresenta a caracterização microestrutural e mecânica de uma amostra de aço inoxidável austenítico 310 fabricada pelo processo Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). As análises por microscopia óptica e eletrônica revelaram uma matriz predominantemente austenítica, com presença de partículas finamente distribuídas, identificadas como possíveis carbonetos ricos em cromo. O mapeamento EDS confirmou a distribuição homogênea dos principais elementos da liga (Fe, Cr, Si e Mn), sem indícios de segregações severas. No entanto, não foi detectado níquel no mapeamento EDS, porém, foi realizado um ensaio de espectrometria de emissão óptica, que revelou a presença do elemento níquel conforme norma AWS 5.9. O ensaio de microdureza Vickers evidenciou valores médios entre 193 e 201 HV, com variações suaves ao longo das indentações, indicando uma estrutura sólida e mecanicamente estável. Esses resultados sugerem que o processo WAAM, quando adequadamente controlado, é capaz de produzir componentes em aço inoxidável 310 com boa uniformidade química, estabilidade microestrutural e propriedades mecânicas consistentes. A aplicação dessa tecnologia é promissora para a fabricação de peças de médio e grande porte destinadas a ambientes de alta temperatura, onde resistência à oxidação e estabilidade térmica são requisitos críticos.

Palavras-chave: WAAM. Aço inoxidável 310. Propriedades mecânicas.

¹ Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais, UFSC. E-mail: henrique.casagrande@nione.tec.br

² Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, UFSC. E-mail: joao.neto@ufsc.edu.br

³ Doutor em Eng. de Minas, Metalurgia e Materiais, UNISATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Doutorando em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais, UFRGS. E-mail: gilson.march@satc.edu.br

⁵ Doutorando em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais, UFRGS. E-mail: aline.cipriano@satc.edu.br

⁶ Doutora em Eng. Minas, Metalurgia e Materiais, UFRGS. E-mail: materiaisxenergia@gmail.com

⁷ Mestrando Profissional em Eng. Metalúrgica, UNISATC. E-mail: Pedro.possamai@satc.edu.br

⁸ Engenheiro Mecânico, UNISATC. E-mail: paulo_eduardo_lion@hotmail.com



1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a Manufatura Aditiva por Arco de Arame (WAAM) vem ganhando destaque entre as várias tecnologias de manufatura aditiva que estão emergindo no setor industrial. Inserida na categoria do processo de deposição camada por camada, conhecido como Deposição de Energia Direta (DED), a WAAM destaca-se por sua capacidade de produzir grandes componentes metálicos de forma eficiente, graças à sua elevada velocidade de deposição [1][2], versatilidade na produção, flexibilidade no tamanho da peça [3][4].

Essa tecnologia tem sido amplamente aplicada na produção de peças em aços de baixo carbono [5][6], baixa liga [7] e aços inoxidáveis, como o 310 [8], devido à sua boa soldabilidade e resistência à corrosão em altas temperaturas. Além das aplicações convencionais, avanços recentes têm explorado o uso do WAAM combinado com forjamento subsequente, visando melhorar as propriedades mecânicas e reduzir defeitos típicos da deposição em camadas [9][10]. Outra inovação relevante é a técnica de WAAM com duplo arame (twin-wire) [11], que permite aumentar a taxa de deposição e controlar melhor a composição química durante a fabricação. Ainda, destaca-se a aplicação do WAAM na produção de estruturas bimetálicas [12], onde dois materiais diferentes são combinados em um único componente, oferecendo soluções customizadas para requisitos funcionais distintos em diferentes regiões da peça. Essas variações do processo ampliam significativamente o potencial do WAAM como ferramenta estratégica na Indústria 4.0.

De acordo com a avaliação da qualidade da peça, ela pode ser definida com base em suas especificações, como dimensões, acabamento superficial, resistência mecânica, além de sua forma e integridade do material. Além disso, a tensão residual também pode ser considerada na caracterização da qualidade, juntamente com o preenchimento, que envolve fatores como o tamanho dos macro vazios, a influência do padrão de pontos e o formato do cordão de solda [13][14].

Tensão residual e deformações representam alguns dos defeitos mais frequentes no processo WAAM. No que se refere especificamente à tensão residual, estudos recentes têm se dedicado à simulação numérica das peças produzidas por WAAM, buscando compreender melhor esses fenômenos e suas implicações na qualidade final da peça [15][16].



O que diz respeito à integridade do material da peça, as propriedades do material e suas características físicas permanecem como desafios importantes a serem enfrentados no processo WAAM. A qualidade do material pode ser avaliada por aspectos como a microestrutura, incluindo a composição química, o tamanho dos grãos e a porosidade. Os principais defeitos observados incluem porosidade e delaminação entre as camadas. Além disso, o acúmulo de calor, causado pela elevada entrada de energia térmica, é considerado o fator físico de maior impacto nesse processo [17][18][19][20][21].

Apesar do crescente interesse pelo processo WAAM na fabricação aditiva de ligas metálicas, observa-se uma escassez significativa de publicações voltadas especificamente para sua aplicação em aços inoxidáveis austeníticos da classe 310 [22]. A maioria dos estudos concentra-se em ligas mais amplamente utilizadas, como o aço inoxidável 316L [23][24][25][26] ou ligas de titânio [27][28], devido à sua popularidade na indústria aeroespacial e biomédica. No entanto, o aço 310 apresenta características superiores de resistência à oxidação e ao calor, o que o torna altamente relevante para aplicações em ambientes agressivos, como fornos industriais e sistemas de exaustão [29][30][31]. A ausência de dados mais aprofundados sobre a interação entre os parâmetros do WAAM e o comportamento térmico e metalúrgico específico do aço 310 representa uma lacuna importante na literatura, limitando o avanço do seu uso em aplicações de alto desempenho. Portanto, investigações nesse campo são essenciais para expandir o conhecimento técnico e explorar plenamente o potencial desse material no contexto da manufatura aditiva.

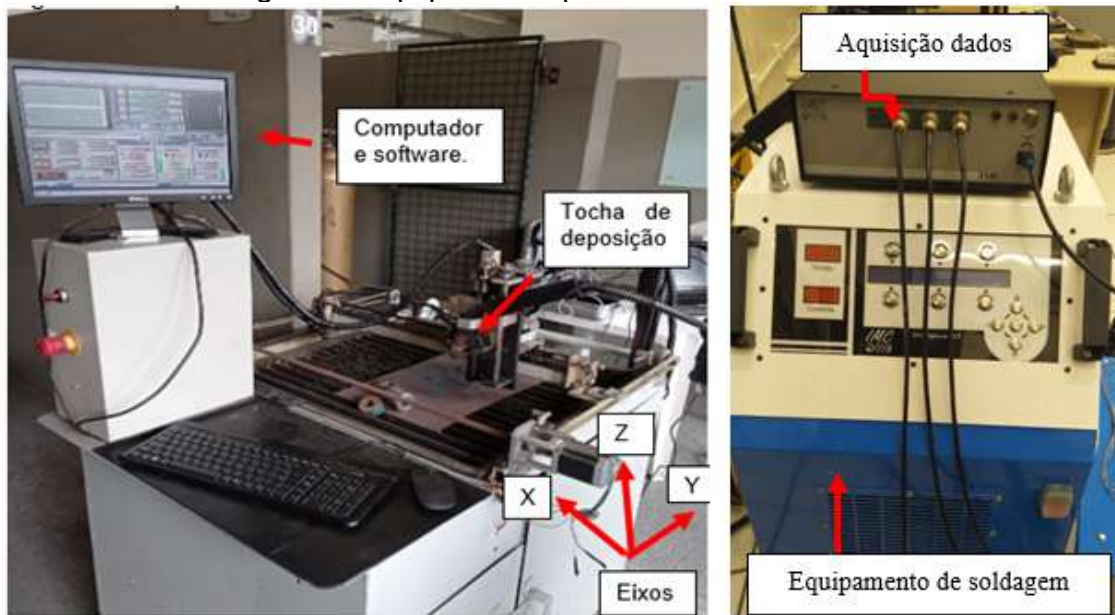
2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho utiliza o processo WAAM para impressão 3D para o aço inoxidável austenítico 310. O equipamento utilizado é uma junção de máquina de soldagem com multiprocessos e um equipamento com coordenadas CNC (Centro Numérico Computadorizado).

Uma das vantagens do processo com Manufatura Aditiva, é a homogeneidade entre as camadas depositadas [32][33]. Por ser de forma automática, o movimento de avanço é uniforme, o que contribui para estética do cordão. Na Figura 1, estão dispostas as coordenadas X, Y e Z, responsáveis pelo movimento do equipamento

através de programação em linguagem G com o uso do software MACH 3. Destaca-se, o uso do equipamento de soldadura IMC DIGplus A7 para deposição de matéria-prima. Este dispositivo possui uma ferramenta acoplada para aquisição de dados durante o processo de soldagem denominada de SAP 3SR. Essa ferramenta por sua vez recebe os dados de tensão, corrente, vazão de gás, velocidade de arame entre outros parâmetros utilizados ao decorrer da fabricação das amostras.

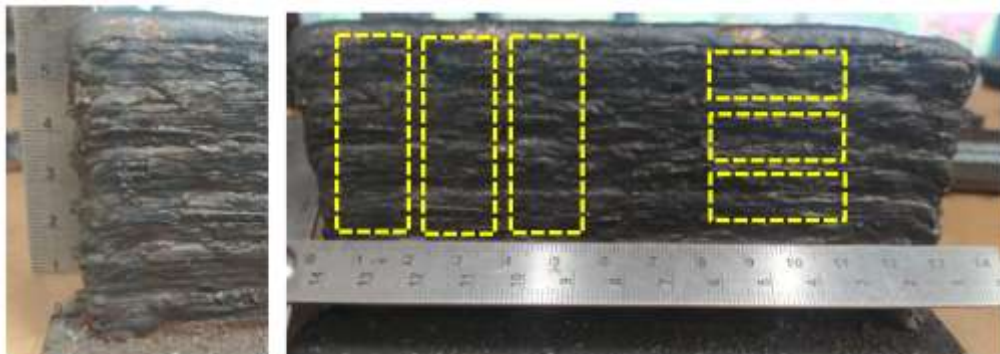
Figura 1: Equipamento para manufatura aditiva.



2.1 PAREDE IMPRESSA PELA TÉCNICA WAAM

A Figura 2 traz a parede impressa por MA com a estratégia de deposição em zig-zag. Salienta-se na imagem os corpos de prova para ensaio de mecânico de microdureza, bem como amostras para ensaio metalográfico com microscópio óptico e eletrônico.

Figura 2: Parede impressa com o processo WAAM com aço inoxidável 316.





2.2 PARÂMETROS DE MANUFATURA ADITIVA

A Tabela 1 traz os parâmetros utilizados para fusão do material. Ressalta-se o uso da ferramenta SAP 3SR para aquisição de dados.

Tabela 1: Parâmetros utilizados para Manufatura Aditiva.

Variáveis:	Parâmetros:
Tensão (V)	19,8
Corrente (A)	170
Vazão de gás (L/min.)	16
Velocidade de arame (m/min.)	5,8
Potência (kW)	3,36

A Tabela 2 traz os resultados para as camadas depositadas. A parede ficou com aproximadamente 130 mm (milímetros) de largura e, 60 mm de largura. A espessura média ficou com 11,5 mm.

Tabela 2: Resultados para Manufatura Aditiva.

Variáveis:	Valores:
Espessura média (mm)	11,5
Altura média (mm)	2,5
Quantidade de deposições.	24
Tempo de deposição por cordão (s)	26
Velocidade do CNC (mm/min.)	300

O arame utilizado para manufatura aditiva foi da fabricante Superfine com espessura de 1,2 mm. O gás utilizado foi inerte com 100% de argônio.

2.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS PEÇAS MANUFATURADAS

Para caracterização química das amostras utilizou-se o espectrômetro da fabricante BRUKER modelo Q2 ION. No ensaio em questão, foi utilizado potência de 400 Watts por um período de 30 segundos.

Um microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA-10 foi utilizado para realizar testes de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia



dispersiva. A operação foi feita com uma tensão de 10 kV e um filamento de tungstênio.

Para identificar as fases presentes nas amostras, foi aplicada uma solução de Vilella por 180 segundos. A análise metalográfica óptica foi realizada com um microscópio Olympus modelo SC30.

Para os testes de microdureza, foi utilizado um microdurômetro Shimadzu HMV-2TADW, o tempo de indentação foi de 10 segundos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio das análises metalográficas realizadas com microscopia óptica e eletrônica, além dos ensaios de microdureza e espectrometria. Esses métodos permitiram avaliação da microestrutura, propriedades mecânicas e composição química do material.

3.1 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA

A Tabela 3 detalha o ensaio de composição química utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica. De acordo com os resultados demonstrados na Tabela 3, conforme norma AWS A5.9, há um elevado valor para os componentes cromo e níquel, o que após ensaio de espectrometria apresentou resultados similares a norma.

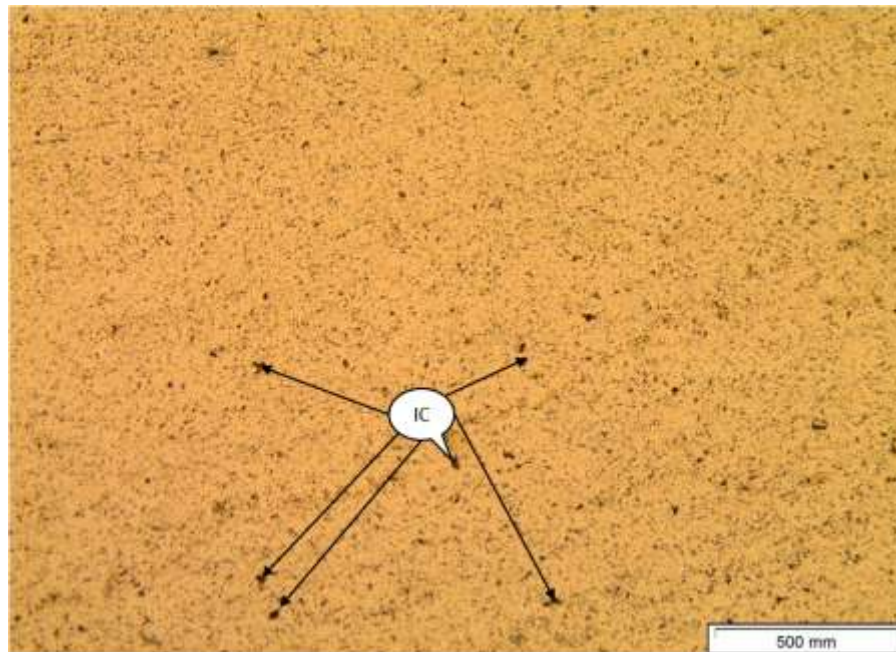
Tabela 3: Composição química do material impresso.

Elemento:	Valores 310 (%):	[34]
Carbono (C)	0,12	0,08 - 0,15
Silício (Si)	0,51	0,30 – 0,65
Manganês (Mn)	1,27	1 – 2,5
Cromo (Cr)	27	25 – 28
Níquel (Ni)	19,3	20 – 22,5
Molibdênio (Mo)	0,21	0,75
Fósforo (P)	0,022	0,03
Enxofre (S)	0,013	0,03
Ferro (Fe)	Balanço	Balanço

3.2 ANÁLISE METALGRÁFICA DA PAREDE IMPRESSA COM AÇO AUSTENÍTICO ER310

A Figura 3 traz a metalografia com microscópio óptico com aumento de 100 vezes após a MA. De acordo com a Figura 3, há algumas inclusões presentes, destacadas em IC.

Figura 3: Análise metalográfica com arame ER310 com aumento de 100 vezes.

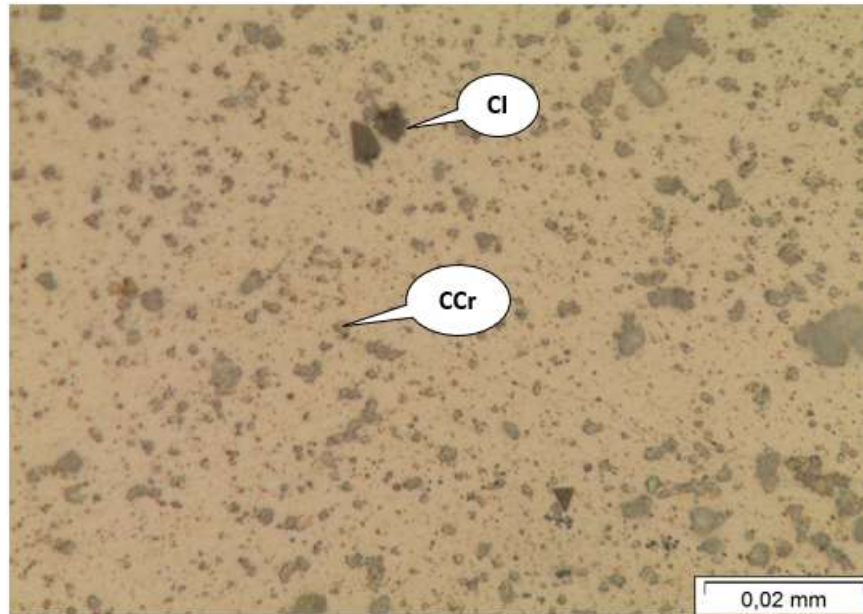


A microestrutura da Figura 3 é homogênea, com grãos finos e uniformemente distribuídos. O processo WAAM pode gerar zonas térmicas distintas [35][36], mas a imagem sugere uma estrutura relativamente uniforme, possivelmente de uma região fundida bem controlada.

A Figura 4, com aumento de 1000 vezes, detalha uma estrutura com pontos escuros, o que podem ser carbonetos de cromo, conforme [8][38]. Onde está destacado em “CI” (Carbonetos Intergranulares ou intermetálicos contendo cromo e/ou Níquel). As partículas destacadas como “CI” são prováveis carbonetos complexos precipitados nas regiões intergranulares ou intragranulares. No aço inox 310, que possui alto teor de cromo (27%) e níquel (19,3%), é comum a formação de carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ [39] (onde M = Cr, Fe, Ni) durante resfriamento lento ou

exposição prolongada a temperaturas elevadas. Isso é intensificado no WAAM devido ao ciclo térmico repetitivo por camadas.

Figura 4: Análise metalográfica com arame ER310 com aumento de 1000 vezes.



3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA COM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Na Figura 5, nota-se pequenos pontos mais brilhantes visíveis em toda a matriz indicam possíveis precipitados ricos em cromo, possivelmente os mesmos identificados como "CI" e "CCr" na imagem óptica.

As manchas escuras ou porosidades aparentes podem ser microvazios ou inclusões de óxidos/sulfetos, típicos de processos com ciclos térmicos repetitivos como o WAAM. A superfície uniforme, porém, com áreas de contraste granular, indica uma estrutura austenítica refinada, provavelmente afetada por ciclos de resfriamento térmico distintos entre camadas depositadas.

Figura 5: Análise metalográfica com MEV no aço austenítico 310

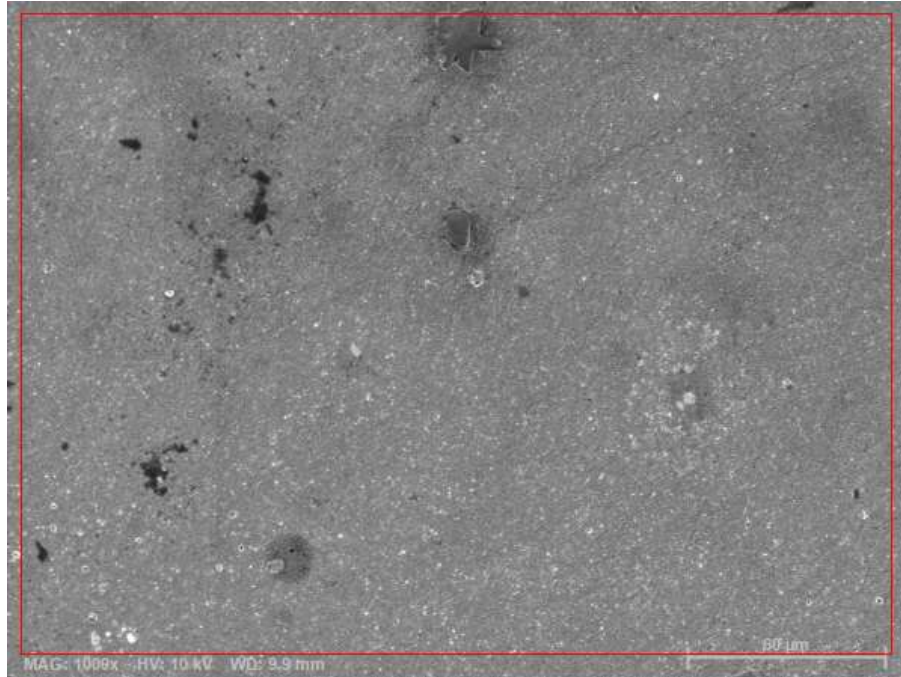
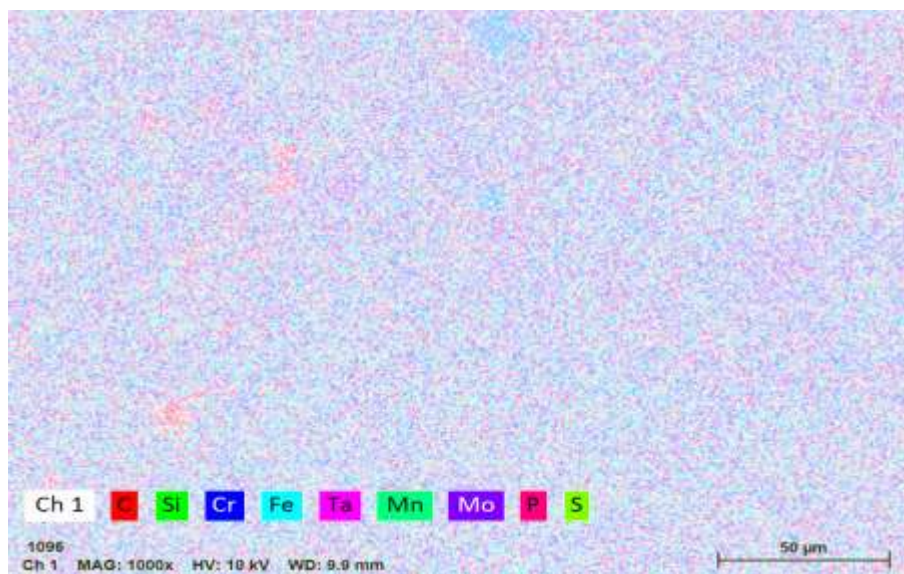


Figura 6: Mapa elementar do aço austenítico 310.



Na Figura 6, apresenta-se o mapa elementar da amostra de aço austenítico 310. O mapa espectral indica a presença dos seguintes elementos, todos característicos da composição do aço inox 310:

- Fe (Ferro): Base da matriz do aço inoxidável.



- Cr (Cromo): Presente em alta quantidade (27%) no 310, responsável pela resistência à oxidação e formação de fase passiva.
- Mn (Manganês): Usado para estabilizar a fase austenítica e melhorar a resistência à oxidação.
- Si (Silício): Ajuda na desoxidação durante o processo de fusão.
- C (Carbono): Presente em baixa quantidade, mas crítico para a formação de carbonetos.
- Mo (Molibdênio), P (Fósforo), S (Enxofre): presentes em menor concentração.

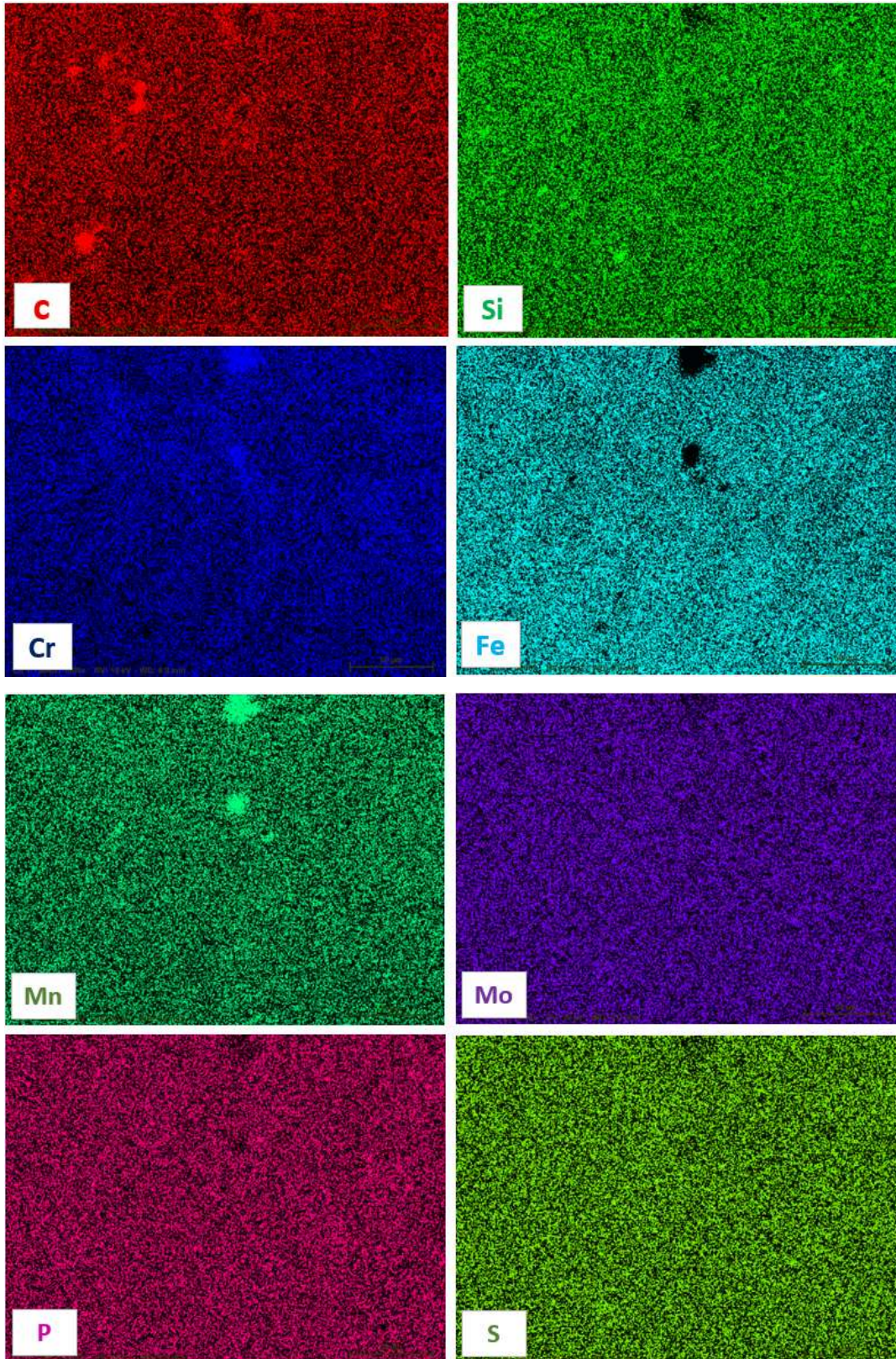
O Níquel não foi identificada no EDS, no entanto, no ensaio de espectrometria de emissão óptica foi identificado 19,3% em massa. Já para tântalo, o EDS tem limitações na separação de picos de energia, e o pico do tântalo (Ta) pode às vezes se sobrepor com outros elementos, como silício [37].

Para a Figura 7, a matriz é predominantemente austenítica, com distribuição homogênea de Fe, Cr e Si — indicando boa qualidade metalúrgica da amostra impressa por WAAM. Acúmulos localizados de C e Mn sugerem precipitação de fases secundárias (exemplo: carbonetos de cromo e/ou sulfetos de manganês).

A presença de Mo, P e S em níveis baixos está de acordo com o esperado para elementos residuais ou secundários.

Não há evidência de segregação macroscópica, o que demonstra um bom controle térmico e deposição uniforme durante a manufatura aditiva.

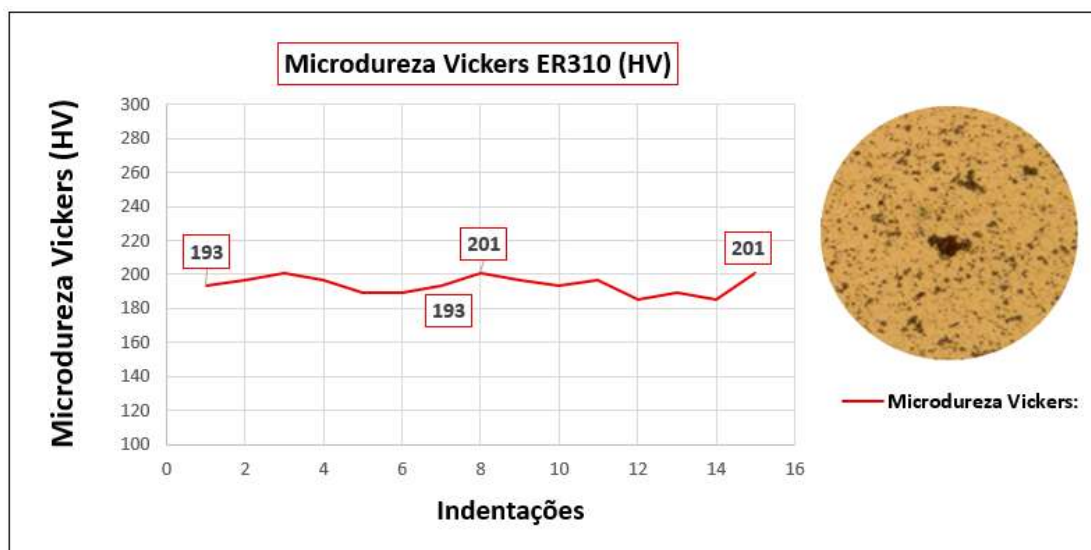
Figura 7: Mapeamento EDS no aço austenítico 310 para: C, Si, Cr, Fe, Mn, P e S.



3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

A Figura 8 mostra o resultado do ensaio de microdureza Vickers aplicado ao aço inoxidável 310 fabricado via WAAM.

Figura 8: Ensaio de microdureza Vickers para aço austenítico ER310



A microdureza para este material ficou com uma média de 194 ± 5 HV. De acordo com a Figura 8, foram realizadas 15 indentações, com espaçamento de 1 mm a cada ensaio. A imagem à direita da Figura 8, mostra a micrografia óptica associada ao local das indentações, confirmando uma matriz austenítica com precipitados finos, como discutido anteriormente (prováveis carbonetos de Cr). Em materiais similares (WAAM de 308L), a microdureza Vickers varia de 155 a 200 HV [40].

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização microestrutural e mecânica do aço inoxidável 310 fabricado por WAAM revelou um material com microestrutura predominantemente austenítica, com dispersão homogênea de elementos principais como Fe, Cr, Si e Mn, conforme evidenciado nos mapeamentos EDS. A presença de carbonetos ricos em cromo foi identificada tanto por microscopia óptica quanto por MEV, especialmente em regiões pontuais com acúmulo de carbono, indicando que os ciclos térmicos repetitivos do WAAM favorecem a precipitação de fases secundárias. Apesar disso,



não foram observadas zonas significativas de segregação ou descontinuidade química, o que sugere bom controle térmico e deposição uniforme durante o processo.

O ensaio de microdureza Vickers demonstrou valores consistentes, entre 193 e 201 HV, com distribuição estável ao longo das indentações, confirmando uma estrutura mecanicamente homogênea e isenta de regiões frágeis ou endurecidas excessivamente. A leve oscilação nos valores pode estar associada à presença de precipitados finos ou microinclusões, que não comprometem o desempenho da liga.

Portanto, os resultados obtidos indicam que o aço inoxidável 310 produzido via WAAM apresenta boa estabilidade estrutural e química, com propriedades mecânicas adequadas para aplicações em altas temperaturas, sendo um candidato promissor para uso em setores que exigem resistência à oxidação e à fluência térmica. A continuidade de estudos, com foco na otimização dos parâmetros de deposição e no controle da formação de precipitados, pode contribuir para ainda mais confiabilidade e desempenho do material em aplicações industriais avançadas.

REFERÊNCIAS

- [1] GRANDVALLET, C., LEDOUX, Y., BÉRAUD, N., VIGNAT, F., POURROY, F., MECHEKOUR, E., LIMOUSIN, M., ROBERT, P., PAILHÉS, J. **A knowledge mapping of the state-of-the-art on DED-WAAM deposition trajectory evaluation**. Journal of Manufacturing Processes. Volume 146, p. 380-398. 2025.
- [2] LI, Y., SU, C., ZHU, J. **Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects**. Results in Engineering. Volume 13. 2022.
- [3] RAUCH, M., HASCOET, J. **Opening new opportunities for aeronautic, naval and train large components realization with hybrid and twin manufacturing**. M. Rauch and J.-Y. Hascoet/Journal of Machine Engineering, Volume. 22, p. 5–20. 2022.
- [4] JAFARI, D., TOM, H.J., GIBSON, V.I. **Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts**. Materials and Design. Volume 202. 2021.
- [5] CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., FERREIRA, C.A., FRITZEN, D., MARCH, G., CASTELAN, J. **Processo de fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva com fusão localizada de aços baixa liga**. Open Science Research XI. Volume 11. 2023.



- [6] CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., MARCH, G., FERREIRA, C.A., SILVA, J.V., MARTINS, H., SCHAEFFER, L., CASTELAN, J., FRITZEN, D. **Carbon precipitation on the bonding line between deposited material and base material using an additive manufacturing process.** Uniting Knowledge Integrated Scientific Research For Global Development. Volume 2. 2024.
- [7] FERREIRA, C.A., CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., FRITZEN, D., MARCH, G., SCHAEFFER, L. **Fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva com diferentes características mecânicas superficiais.** Revista de gestão e secretariado. Volume 15. 2024.
- [8] MARCH, G., DALEFFE, A., CASAGRANDE, H.C., FERREIRA, C., SCHAEFFER, L., MILANEZ, A. **Additive Manufacturing by Arc Deposition: Study of Mechanical and Chemical Properties with Stainless Electrode ER 310.** RGSA – Journal of Social and Environmental Management. Volume 19. p. 1 – 15. 2025.
- [9] FERREIRA, C., SCHAEFFER, L., DALEFFE, A., CASTELAN, J., CASAGRANDE, H.C., MARCH, G. **Hybrid m.a. and hot forging manufacturing process: making preforms by localized fusion deposition of materials using utp af dur 600 wire.** RGSA – Journal of Social and Environmental Management. Volume 19. p. 1 – 12. 2025.
- [10] CASAGRANDE, H.C., DALEFFE, A., FERREIRA, C.A., MILANEZ, A., MARCH, A., SCHAEFFER, L. **Additive Manufacturing in the Forging Process: Preform Manufacturing Through Localized Melting Material Deposition Using Low Carbon Wire.** RGSA – Journal of Social and Environmental Management. Volume 19. p. 1 – 14. 2025.
- [11] DAGOSTIM, D.K., DALEFFE, A., CASAGRANDE, H.C., MARCH, G., FERREIRA, C.A., SCHAEFFER, L., CASTELAN, J., SILVA, J.V. **Desenvolvimento do processo de manufatura aditiva com deposição localizada através da tecnologia GMAW duplo arame.** Revista Observatório de La Economia Latino Americana. Volume 22. 2024.
- [12] SILVA, J.V., DALEFFE, A., SCHAEFFER, L., CASTELAN, J., CASAGRANDE, H.C., FERREIRA, C.A. **Study of the Mechanical Joint of a Bimetallic Cross Obtained by Localized Additive Manufacturing of Fusion Applied to Automotive Transmissions.** RGSA – Journal of Social and Environmental Management. Volume 19. p. 1 – 11. 2025.
- [13] CUNNINGHAM, C.R., FLYNN, J.M., SHOKRANI, A., DHOKIA, V., NEWMAN, S.T. **Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing.** Additive Manufacturing. Volume 22, p. 672-686. 2018.
- [14] IZHAM, E.D.I.A., ALKAHARI, M.R., HUSSEIN, N.I.S., MAIDIN, S., RAMLI, F.R., HERAWAN, S.G. **Online monitoring of wire arc additive manufacturing process: a review.** Advances in Materials and Processing Technologies Volume 10, 2024.



- [15] GURMESA, F.D., LEMU, H.G., ADUGNA, Y.W., HARSIBO, M.D. **Residual Stresses in Wire Arc Additive Manufacturing Products and Their Measurement Techniques: A Systematic Review**. Appl. Mech. Volume 5. p. 420-449. 2024.
- [16] WU, Q., MUKHERJEE, T., DE, A., DEBROY, T. **Residual stresses in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of influential variables**. Additive Manufacturing. Volume 35. 2020.
- [17] ZHANG, D., et al. **Grain Refinement of Alloys in Fusion-Based Additive Manufacturing Processes**. Metallurgical and Materials Transactions 50th Anniversary Collection. Volume 51, p. 4341–4359, 2020.
- [18] KOU, S., **Welding Metallurgy**. 2° Edition. New Jersey. 2002.
- [19] ALIKHANI, A.A., GHASEMI, A., PIRJAMADI, A., PENG, Z., POURANVARI. **Understanding microstructural evolution and metallurgical challenges in wire-arc directed energy deposition of 430 ferritic stainless steel**. Materials Characterization. Volume 219, 2025.
- [20] CHARMÍ, A., FALKENBERG, R., ÁVILA, L., MOHR, G., SOMMER, K., ULBRICHT, A., SPRENGEL, M., NEUMANN, R.S., EVANS, S.A. **Mechanical anisotropy of additively manufactured stainless steel 316L: An experimental and numerical study**. Materials Science & Engineering A. Volume 799. 2021.
- [21] HUANG, X., KWOK, C.T., NIU, B., LUO, J., ZOU, X., CAO, Y., YI, J., PAN, L., QIU, W., ZHANG, X. **Anisotropic behavior of super duplex stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing**. Journal of Materials Research and Technology. Volume 27. p. 1651-1664. 2023.
- [22] RAHIMI, A., YAZDIZADEH, M., ARA, M. V., POURANVARI, M. **CMT wire-arc additive manufacturing of 310 austenitic stainless steel: Microstructure-properties relationships**. Journal of Materials Research and Technology. Volume 35, p. 881-891. 2025.
- [23] ANDRADE, D.G., TANKOVA, T., ZHU, C., SILVA, L.S., RODRIGUES, D.M. **Mechanical properties of 3D printed CMT-WAAM 316 LSi stainless steel walls**. Journal of Constructional Steel Research Volume 215, 2024.
- [24] ANDRADE, D.G., TANKOVA, T., ZHU, C., SILVA, L.S., RODRIGUES, D.M. **Mechanical properties of 3D printed CMT-WAAM 316LSi stainless steel walls**. Journal of Constructional Steel Research Volume 215, 2024.
- [25] VINOTH, V., SATHIYAMURTHY, S., NATARAJAN, U., VENKATKUMAR, D., PRABHAKARAN, J., PRAKASH, S.K. **Examination of microstructure properties of AISI 316L stainless steel fabricated by wire arc additive manufacturing**. Materialstoday: proceedings. Volume 66. P. 702-706. 2022.
- [26] TANWAR, R.S., JHAVAR, S. Microstructure and tribological characterization of thin wall of bimetallic austenitic steel fabricated through wire arc additive manufacturing (WAAM). Applications in Engineering Science. Volume 23, 2025.



[27] XU, G., WANG, Q., CHEN, R., LI, A., CHEN, D., FU, H. **Columnar to equiaxed transition in additively manufactured titanium alloys: A comprehensive review of mechanisms and grain control strategies.** Journal of Alloys and Compounds. Volume 1032, 2025.

[28] SHENG, H., WANG, Z., RAO, W., ZHAO, J., YANG, Q. **Coupled crystal-plasticity and phase-field modeling on failure mechanism of additive manufacturing titanium alloy.** Journal of Alloys and Compounds. Volume 1033, 2025.

[29] LI, J., YI, M., WU, H., FANG, Q., LIU, Y., LIU, B., ZHOU, K., LIAW, P.K. **Fine-grain-embedded dislocation-cell structures for high strength and ductility in additively manufactured steels.** Materials Science & Engineering A. Volume 790. 2020.

[30] GARDNER, L., TALJA, A., BADDOO, N.R. **Structural design of high-strength austenitic stainless steel.** Thin-Walled Structures. Volume 44, p. 517-528. 2006.

[31] ASM Specialty Handbook. **Stainless Steels.** ASM international. 1994.

[32] SON, H., KIM, C., KIM, H., HAN, S.H., KIM, M.K. **Trend Analysis of Research and Development on Automation and Robotics Technology in the Construction Industry.** KSCE Journal of Civil Engineering. Volume 14. p. 131-139. 2010.

[33] SALEH, Y., MOURAD, S.A., SALEM, H.G., IBRAHIM, A.M. **Residual stress and distortion analysis in WAAM steel blocks: A comparative study of build strategies.** Structures. Volume 75, 2025.

[34] STEEL MIG ER310. **SFAA5.9AWS ER310.** 2022.

[35] WU, B., DING, D., PAN, Z., CUIURI, D., LI, H., HAN, J., FEI, Z. **Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V.** Journal of Materials Processing Tech. Volume 250. 2017.

[36] MANSOR, M.S.M., RAJA, S., YUSOF, F., MUHAMAD, M.R., MANURUNG, Y.H.P., ADENAN, M.S., HUSSEIN, N.I.S., REN, J. **Integrated approach to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) optimization: Harnessing the synergy of process parameters and deposition strategies.** Journal of Materials Research and Technology. Volume 30. 2024.

[37] LIAO, Y. **Practical Electron Microscopy and Database.** 2006.

[38] VENKATA, K.A., LAKSHMINARAYANAN, A.K., VASANTHARAJA, P., VASUDEVAN, M. **Unravelling the microstructure-indentation creep resistance relationships for friction stir welded modified 9Cr-1Mo steel and LN-type 316**



stainless-steel dissimilar joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 202.3

[39] DUPONT, J., LIPPOLD, J. C., KISER, S. D. **Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys.** John Wiley & Sons, Inc., 2009.

[40] VAN, T.L., DINH, S. M., **Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by additive manufacturing based on gas electric arc welding.** Research and Development Institute. 2020.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário –UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para essa pesquisa.