
Applications and Properties of Ferritic Stainless Steels with Laser Welding

Aplicações e Propriedades de Aços Inoxidáveis Ferríticos com Soldagem a Laser

Received: 01-08-2024 | Accepted: 01-09-2024 | Published: 04-09-2024

Ricardo Luiz Perez Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2641-4036>
Universidade Federal de Itajubá, Itabira –MG, Brasil
E-mail: ricardo.luiz@unifei.edu.br

Alexia Izabella Pinheiro Damasceno

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6781-7766>
Universidade Federal de Itajubá, Itabira –MG, Brasil
E-mail: alexia.damasceno@unifei.edu.br

José Carlos de Lacerda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7753-1713>
Universidade Federal de Itajubá, Itabira –MG, Brasil
E-mail: jlaerda@unifei.edu.br

ABSTRACT

This study evaluates the effects of laser welding on UNS S41003 stainless steel plates, which were pre-treated with a nickel-watts bath enriched with niobium. The plates, with an area of 0.36 dm², were subjected to this treatment for 10 minutes at 60°C, with a direct current of 3.2 A and pH 4, resulting in a thin coating. Subsequently, the plates were laser welded in a butt joint configuration, using a power of 1800 W, a welding speed of 2 cm/s, a focal distance of 3.8 cm, and argon as the shielding gas. The samples were categorized into three regions of interest: the fusion zone (FZ), the heat-affected zone (HAZ), and the base metal (BM). Twenty specimens were prepared by wire electrical discharge machining and were allocated for tensile testing, ferritoscopy, and Vickers microhardness testing. The aim is to determine whether the nickel-watts treatment combined with laser welding enhances the mechanical properties of the FZ and HAZ compared to the BM. Vickers microhardness testing will be used to assess hardness variations among the regions, while ferritoscopy will identify the presence of magnetic phases. Scanning electron microscopy (SEM) will provide three-dimensional images to characterize the microstructure and surface morphology. It is anticipated that the FZ and HAZ will exhibit improved tensile and impact resistance compared to the BM, due to the grain refinement induced by the nickel and niobium treatment.

Keywords: Laser welding; Nickel-watts; Niobium; Stainless steel; UNS S41003

RESUMO

Esta pesquisa avalia os efeitos da soldagem a laser em chapas de aço inoxidável UNS S41003, previamente tratadas com um banho de níquel-watts enriquecido com nióbio. As chapas, com área de 0,36 dm², foram submetidas a um tratamento por 10 minutos a 60°C, com corrente contínua de 3,2 A e pH 4, resultando na formação de um revestimento fino. Posteriormente, as chapas foram soldadas a laser em junta tipo topo, utilizando uma potência de 1800 W, velocidade de 2 cm/s, distância focal de 3,8 cm e argônio como gás de proteção. As amostras foram divididas em três regiões de interesse: zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal base (MB). Vinte corpos de prova foram preparados por eletroerosão a fio e destinados a ensaios de tração, ferritoscopia e microdureza Vickers. O objetivo é determinar se o tratamento com níquel-watts e a soldagem a laser resultam em melhorias nas propriedades mecânicas da ZF e ZTA em comparação com o MB. A microdureza Vickers será empregada para analisar variações na dureza entre as regiões, enquanto a ferritoscopia buscará identificar a presença de fases magnéticas. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) fornecerá imagens tridimensionais para caracterizar a microestrutura e a morfologia das superfícies. Espera-se que a ZF e a ZTA exibam maior resistência à tração e ao impacto em comparação com o MB, devido ao refinamento dos grãos promovido pelo tratamento com níquel e nióbio.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Nióbio; Níquel-watts; Soldagem a laser; UNS S41003

INTRODUÇÃO

O aço é amplamente utilizado em diversos setores, como bens de capital, indústria automotiva, construção civil, utensílios domésticos e comerciais, embalagens, entre outros. Em 2022, o consumo total de produtos de aço no Brasil foi de 23.534.113 toneladas, sendo 92,5% referente a aços carbono e 7,5% a aços ligados e especiais, segundo o Instituto Aço Brasil (2023, p.15). Esse consumo representa o segundo melhor desempenho no período de 2018 a 2022, atrás apenas de 2021.

A versatilidade dos aços, especialmente dos aços de baixa liga, que possuem até 5% de elementos aditivos, contribui para sua ampla utilização. Recentemente, houve um aumento no consumo de aços de alta liga, que incluem categorias como aços ferramenta, superligas e inoxidáveis, conforme Liu et al. (2020) e Shackelford (2008). Esses aços possuem elementos ligantes que conferem maior dureza, resistência a altas temperaturas e elevada resistência à corrosão, sendo o cromo o principal elemento de liga nos aços inoxidáveis (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; SHACKELFORD, 2008).

Dentre os aços inoxidáveis, os ferríticos são amplamente empregados em aplicações diversas, como sistemas de escapamento automotivo e utensílios de cozinha (LUDWIG et al., 2013). Esses aços destacam-se pela alta resistência à corrosão, tração, boa soldabilidade e resistência à abrasão, além de apresentarem um custo inferior devido ao baixo teor de níquel (CAETANO, 2016; FARIA et al., 2020; TEIXEIRA; SILVA, 2024).

O processo de soldagem a laser é uma alternativa importante para aplicações especiais em aços inoxidáveis ferríticos. Desenvolvida na década de 70, a soldagem a laser permite a união de materiais por meio de um feixe de luz concentrada e de alta intensidade, resultando em soldas precisas e de alta qualidade (FEHER, 2014). Apesar dos altos custos iniciais, a técnica é competitiva devido à qualidade superior das soldas e à alta taxa de produção, sendo necessária uma análise de sua aplicabilidade conforme as condições específicas de trabalho (OLIVEIRA, 2019; LACERDA et al., 2022; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2023b).

Nesta pesquisa, o material utilizado é o aço inoxidável ferrítico UNS S41003, em chapas submetidas a um banho eletrolítico com nióbio e, posteriormente, à soldagem a laser. Corpos de prova foram preparados para ensaios de tração, microdureza Vickers e ferritoscopia, visando analisar as influências dos processos experimentais nas propriedades mecânicas do material.

METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais foram organizados conforme o fluxograma apresentado na Figura 1. Inicialmente, duas chapas de aço UNS S41003 foram cortadas com dimensões de 140 mm x 200 mm x 5 mm, seguidas de um processo de niquelamento enriquecido com nióbio. Após isso, as chapas passaram por soldagem a laser, ensaios e análises subsequentes.

Figura 1 – Fluxograma dos procedimentos experimentais



Fonte: Dados do autor (2024)

Após a recepção do material, as chapas foram cortadas em amostras de 140 mm x 100 mm x 5 mm no laboratório de usinagem do Senai de Ipatinga. Posteriormente, no laboratório de metalografia da Unifei – Itabira, as amostras foram preparadas para eletrodeposição utilizando lixas d'água de diferentes granulações (3M Wetordry). Uma área de 0,36 dm² foi delimitada para imersão na solução de Níquel-Watts.

Figura 2 – Chapas de aço UNS S41003 soldadas a laser



Fonte: Dados do autor (2024)

A eletrodeposição de níquel foi realizada utilizando uma fonte de corrente contínua, um agitador magnético com aquecimento e outros equipamentos específicos, além de uma solução eletrolítica enriquecida com 10g de Nb (DE OLIVEIRA et al., 2020). A composição do banho de níquel-Watts está detalhada na Tabela 1. O processo foi conduzido a 60°C, com corrente de 3,2A e pH 4, resultando em chapas revestidas conforme a Figura 2.

Após a eletrodeposição, as chapas foram enviadas à empresa Extiminas para soldagem a laser, utilizando uma máquina portátil Qilin modelo DWT20, com parâmetros listados na Tabela 2. As chapas soldadas estão ilustradas na Figura 3.

Após a operação de soldagem a laser, as chapas foram cortadas para ensaios diversos, como tração e impacto, conforme as dimensões previstas pelas normas ASTM E8/E8M e ASTM E23-12c. O corte foi realizado por eletroerosão a fio, utilizando a máquina EURO FW2, resultando em 20 corpos de prova, conforme mostrado na Figura 3.

Tabela 1 - Composição do banho Níquel-Watts

Reagentes	Pureza (%)	Concentração (mol/L)	Massa (g)
NiSO ₄	98,0	0,22	118,02
H ₂ BO ₃	99,5	0,13	33,00
ZnSO ₄	96,0	0,55	330,0
NiCl ₂	98,0	0,33	106,21
Sorbitol	70,0	0,39	134,0

Fonte: Nunes et al., (2016, p. 3).

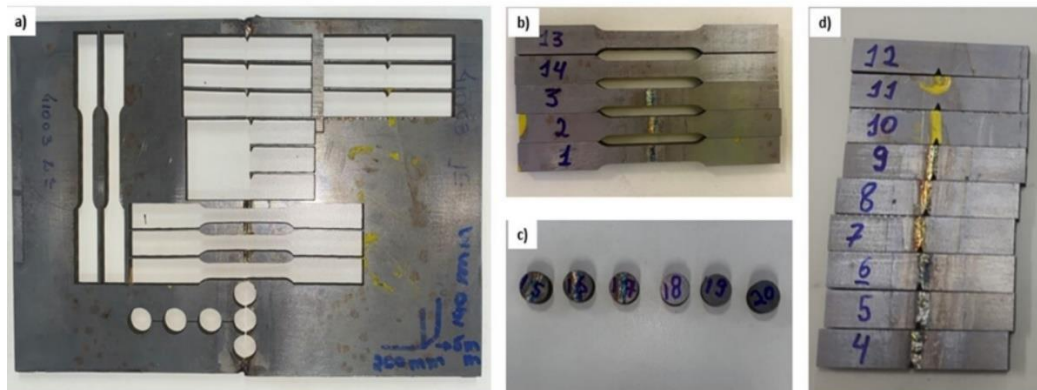
Tabela 2 - Parâmetros de Soldagem

Parâmetro	Seleção
Potência do laser	1800 W
Frequência do laser	2000 Hz
Diâmetro do raio incidente	2,5 mm
Distância focal	3,8 mm
Velocidade de soldagem	2 cm/s
Gás de proteção	Argônio
Acionamento do gás antes da incidência do laser	200 ms
Desligamento do gás após o fim da incidência do laser	200 ms

Fonte: Dados do autor (2024)

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos da UNIFEI com a máquina universal EMIC, conforme Figura 25, a uma velocidade de 2 mm/s. Os corpos de prova ensaiados estão apresentados na Figura 3(a) e Figura 3(b).

Figura 3 – Corpos de prova cortados por eletroerosão a fio: a) Chapa cortada; b) amostras para ensaio de tração; c) corpos de prova para análises metalográficas e polarização; d) amostras para ensaio de Charpy



Fonte: Dados do autor (2024)

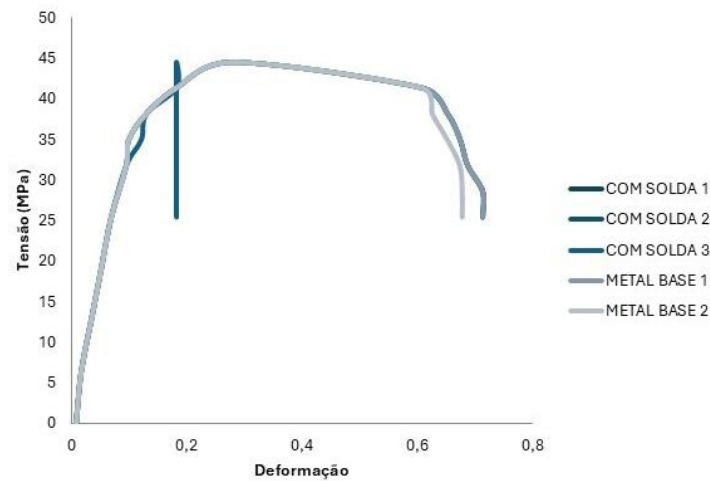
A microdureza Vickers foi avaliada de acordo com a norma ASTM E 92:17, utilizando o microdurômetro modelo 402 MVD da WILSON. Foram realizadas cerca de 60 medições para cada amostra, com uma carga aplicada de 200 gramas-força por 10 segundos, à temperatura ambiente.

O ensaio de ferritoscopia, conforme Marques et al. (2020) e Teixeira et al. (2023^a), foi realizado no laboratório de Metalografia da UNIFEI, utilizando o ferritoscópio FMP30, com 18 medições nas regiões de Metal Base (MB), de revestimento de Ni-Nb, de Zona Termicamente afetada pela soldagem a laser (ZTA) e de Zona Fundida (ZF).

RESULTADOS

Os ensaios de tração realizados em cinco corpos de prova (três com cordão de solda e dois do metal base) resultaram no gráfico Tensão x Deformação (Figura 4). Observou-se que as amostras do metal base apresentaram igual resistência à tração em comparação com as amostras soldadas. O rompimento prematuro das amostras com cordão de solda a cerca de 0,2 de deformação foi atribuído a defeitos no cordão de solda, causados por alta velocidade de soldagem, resultando em falta de fusão e baixa penetração. Embora o cordão de solda aparentasse ser contínuo e bem-penetrado a olho nu, a análise detalhada revelou a presença de vazios internos, o que levou ao colapso prematuro das amostras.

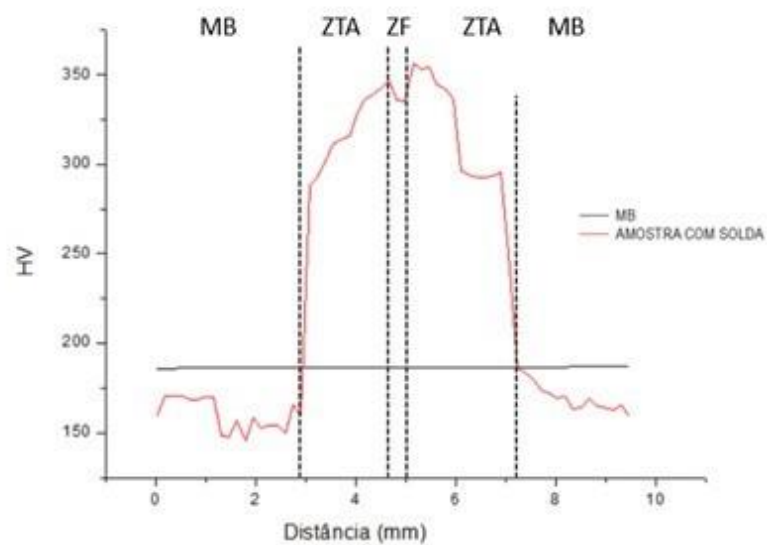
Figura 4 – Curva de tensão (MPa) versus deformação de corpos de prova de aço UNS S41003: como cordão de solda (COM SOLDA n° 1, 2 e 3) e do metal base (METAL BASE n° 1 e 2)



Fonte: Dados do autor (2024)

A Figura 5, apresenta os perfis de microdureza Vickers das amostras com e sem cordão de solda. Houve variações significativas de microdureza na ZTA e na ZF em comparação ao metal base. A média de microdureza no metal base foi de 187,05 HV, enquanto na amostra soldada foi de 231,76 HV, com destaque para a elevação de dureza na ZTA (Tabela 8). A ZF apresentou microdureza ligeiramente inferior à ZTA, mas ainda superior ao MB.

Figura 5 – Microdureza Vickers de amostras com e sem cordão de solda



Fonte: Dados do autor (2024)

Os ensaios de ferritoscopia nas regiões MB, ZTA, ZF e niquelamento revelaram variações nos teores de ferrita, conforme mostrado na Tabela 3. A região do metal base apresentou o maior teor médio de ferrita (85 ± 5 %), seguido pelo niquelamento (81 ± 5 %), ZTA (71 ± 16 %), e ZF (46 ± 21 %).

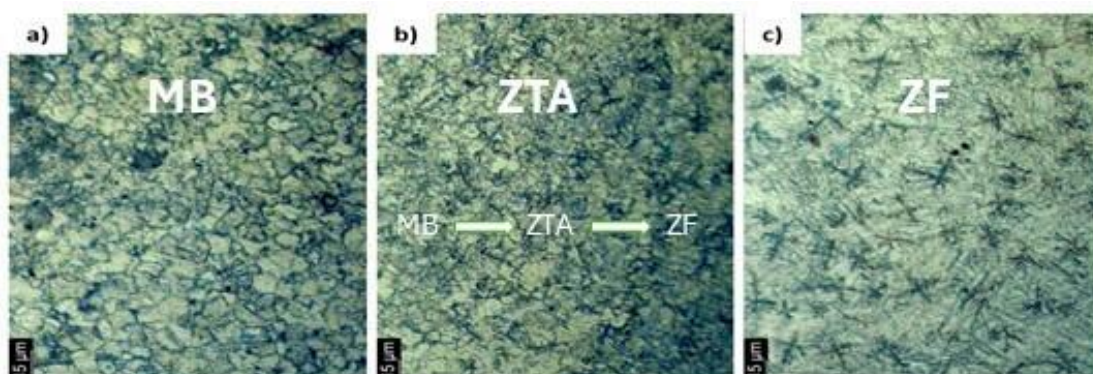
Tabela 3 - Média das microdureza Vickers nas amostras do aço UNS S41003

Região	MB	ZTA	ZF	ZTA	MB
Amostra do Metal base	187,04	-	-	-	-
Amostra com solda	160,6	330,84	294,4	277,6	170,42

Fonte: Dados do autor (2024)

A análise microscópica realizada com o microscópio óptico da OPTONTM permitiu observar as fases induzidas e a morfologia microestrutural das amostras após soldagem a laser. A micrografia apresentada na Figura 6 (a) revela a microestrutura do metal base (MB) do aço UNS S41003 ferrítico. A partir desta Figura 6 (a), nota-se a presença de grãos ferríticos alfa (região mais clara) mais extensos em comparação com a Zona Termicamente Afetada (ZTA) da Figura 6(b) e da Zona Fundida (ZF) Figura 6 (c). Na ZTA, conforme apresentado na Figura 33(b), existem regiões de granulação mais escura, evidenciando a presença de ferrita delta. Na ZTA, também se observa um refinamento progressivo dos grãos de ferrita alfa (região mais clara) à medida que se aproxima da Zona Fundida (ZF). Na ZF, representada pela Figura 6(c), é possível observar o surgimento de ferrita delta (região de grãos mais escura) na matriz refinada de ferrita alfa (região mais clara).

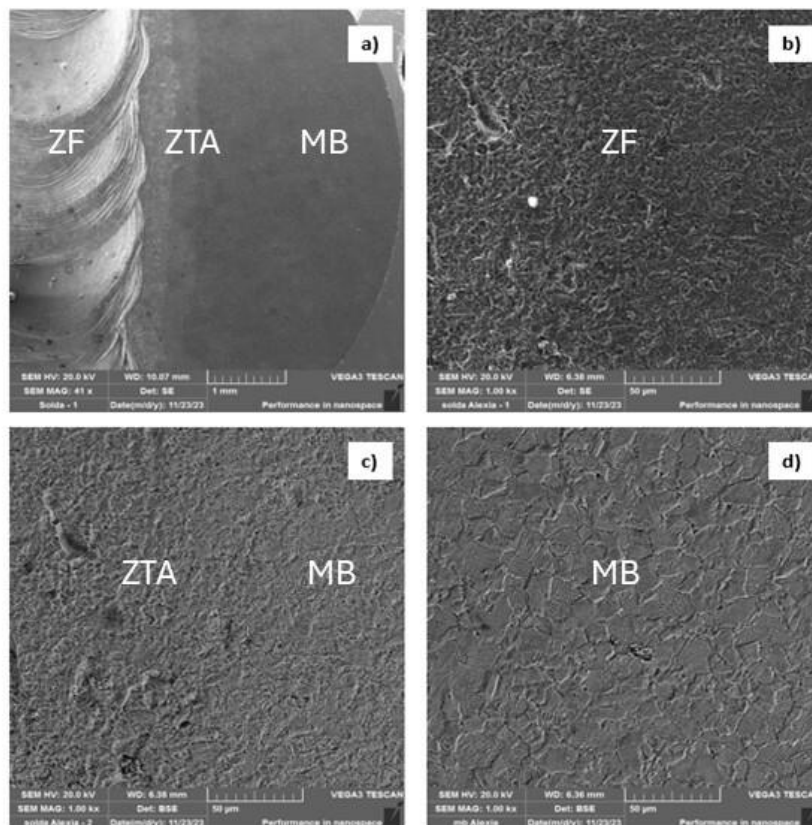
Figura 6 - Morfologia da microestrutura do aço UNS S41003: a) MB; b) ZTA; c) ZF



Fonte: Dados do autor (2024)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada no laboratório da Unifei – Campus Itabira, utilizando o microscópio Tescan VEGA 3, permitiu a obtenção de micrografias de alta resolução das superfícies polidas e rugosas das regiões ZF, ZTA e MB. As micrografias eletrônicas obtidas estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Micrografias do aço UNS S41003: a) região da solda; b) ZF; c) ZTA; d) MB



Fonte: Dados do autor (2024)

A micrografia apresentada na Figura 7(a) revela distintas regiões da amostra de aço UNS S41003. A diferença de tonalidade na micrografia da Figura 7(a) evidencia as regiões de solda (ZF), da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e do metal base ferrítico alfa (MB). Na Figura 7(b), observa-se o refinamento dos grãos ferríticos alfa (região mais clara) e a presença de grãos maiores de ferrita delta (regiões mais escuras). A Figura 7(c) mostra a microestrutura da Zona Termicamente Afetada (ZTA), onde se observa uma matriz de grãos predominante de ferrita alfa (região mais clara), com alguns grãos maiores de ferrita delta (mais escuros). No MB, representado pela micrografia da Figura 7(d), tem-se uma microestrutura plenamente ferrítica alfa. Observa-se que a ferrita alfa da ZTA

(região mais clara da micrografia), apresentada na Figura 7(c), é mais refinada do que a ferrita do MB, Figura 7(d).

CONCLUSÃO

No ensaio de tração, amostras com cordão de solda (ZF e ZTA) apresentaram menor resistência à tração em comparação com as amostras do metal base (MB). Essa diferença ocorreu devido à falha de soldagem gerada pela alta velocidade de soldagem e baixa penetração do laser. Contrariamente às expectativas, o enriquecimento de níquel e nióbio, que são elementos refinadores de grãos, não resultou em maior microdureza Vickers e resistência à tração nas regiões ZF e ZTA.

No perfil de microdureza Vickers, conforme esperado, constatou-se que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) exibiu uma microdureza média superior à Zona Fundida (ZF) e ao metal base. Esse comportamento era esperado devido ao refinamento de grãos na ZTA, resultado da presença de níquel e nióbio (TEIXEIRA et al., 2021). A Zona Fundida, embora tenha apresentado grãos ligeiramente maiores em comparação com a ZTA, ainda assim mostrou-se menor em relação ao metal base (MB).

Na ferritoscopia, identificou-se uma porcentagem maior de ferrita nas regiões do metal base (MB), com uma média de teor de $(85\pm 5)\%$, seguida das regiões niqueladas, com uma média de $(81\pm 5)\%$. Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), a média foi de $(71\pm 16)\%$, enquanto na Zona Fundida (ZF) foi de $(46\pm 21)\%$. Em ambas as regiões, nota-se uma diminuição no teor de ferrita. Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), esse fenômeno ocorre devido à presença de uma pequena quantidade de ferrita delta, que não é ferromagnética. Já na Zona Fundida (ZF), a redução mais pronunciada no teor de ferrita se deve a uma quantidade significativamente maior de ferrita delta presente nessa região.

Com auxílio do microscópio óptico e do microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi possível observar uma modificação da microestrutura da superfície da ZTA e ZF. Acredita-se que a microestrutura do MB seja predominantemente ferrítica, enquanto nas ZTA e ZF há presença de austenita e ferrita delta, conforme esperado pelo diagrama de Schaeffler.

Falha de Soldagem a Laser: Após a conclusão dos cortes e ensaios, identificou-se a necessidade de refazer todos os procedimentos práticos devido a uma falha de soldagem a laser detectada. Essa falha, que se manifestou no cordão de solda, resultou em falta de fusão devido à elevada velocidade de soldagem e à baixa penetração do laser.

No ensaio de tração, amostras com cordão de solda (ZF e ZTA) apresentaram menor resistência à tração em comparação com as amostras do metal base (MB). Essa diferença ocorreu devido à falha de soldagem gerada pela alta velocidade de soldagem e baixa penetração do laser. Contrariamente às expectativas, o enriquecimento de níquel e nióbio, que são elementos refinadores de grãos, não resultou em maior microdureza Vickers e resistência à tração nas regiões ZF e ZTA.

No perfil de microdureza Vickers, conforme esperado, constatou-se que a Zona Termicamente Afetada (ZTA) exibiu uma microdureza média superior à Zona Fundida (ZF) e ao metal base. Esse comportamento era esperado devido ao refinamento de grãos na ZTA, resultado da presença de níquel e nióbio. A Zona Fundida, embora tenha apresentado grãos ligeiramente maiores em comparação com a ZTA, ainda assim mostrou-se menor em relação ao metal base (MB).

Na ferritoscopia, identificou-se uma porcentagem maior de ferrita nas regiões do metal base (MB), com uma média de teor de $(85\pm 5)\%$, seguida das regiões niqueladas, com uma média de $(81\pm 5)\%$. Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), a média foi de $(71\pm 16)\%$, enquanto na Zona Fundida (ZF) foi de $(46\pm 21)\%$. Em ambas as regiões, nota-se uma diminuição no teor de ferrita. Na Zona Termicamente Afetada (ZTA), esse fenômeno ocorre devido à presença de uma pequena quantidade de ferrita delta, que não é ferromagnética. Já na Zona Fundida (ZF), a redução mais pronunciada no teor de ferrita se deve a uma quantidade significativamente maior de ferrita delta presente nessa região.

Para trabalhos futuros, propõe-se explorar a soldagem com velocidades e aportes térmicos mais adequados, a fim de evitar a falha de soldagem a laser detectada. Ajustes precisos nesses parâmetros podem melhorar a qualidade do cordão de solda e garantir uma fusão adequada. Além disso, investigações mais detalhadas da microestrutura, simulações numéricas, estudos de elementos de liga e análises de integridade estrutural são essenciais para aprimorar o processo e otimizar as juntas soldadas.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à pós-graduação em Engenharia de Materiais, Mestrado Profissional da Universidade Federal de Itajubá, ao grupo de pesquisa em metais “Metals Group” da mesma universidade e à APERAM South America pelo suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E23 – 12C: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2016. 25 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E8/E8M-13A: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 13a ed. West Conshohocken: ASTM, 2015. 28 p.

CAETANO, G. Q. Soldagem similar de aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos pelo processo “friction stir welding”. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/18265>. Acesso em: 10 set. 2023.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 910 p. Tradução de: Materials science and engineering: an introduction. ISBN 978-1-118-32457-8.

DE OLIVEIRA, S. J.; MOURA, Y. R. S.; LOPES, C. C.; TEIXEIRA, R. L. P. Efeito do recozimento por micro-ondas sobre eletrodeposição de níquel sobre aço e aço inoxidável. Revista Brasileira de Iniciação Científica, v. 7, n. 4, p. 65-86, 2020. Disponível em: <https://periodicos.itp.ifsp.edu.br/index.php/IC/article/view/1516>. Acesso em: 15 ago. 2024.

EHER, Anselmo. Estudo e desenvolvimento de um sistema de soldagem a laser ND: YAG para produção de sementes de iodo-125 utilizadas em braquiterapia. 2014. 169 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciências, Tecnologia Nuclear – Aplicações, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-04042019-141204/publico/2014FeherEstudo.pdf>. Acesso em: 25 set. 2023.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Mercado Brasileiro do Aço: análise setorial e regional. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2023. 42 p. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/08/MBA_Edicao-2023_AcoBrasil.pdf. Acesso em: 10 set. 2023.

LACERDA, J. C. de; TEIXEIRA, R. L. P.; ROCHA, A. G.; DA SILVA, D. F. R.; SOUSA, V. S. R. Effect of Mig Welding on the Microstructure and Mechanical Properties of a Stainless Steel UNS S41003. SSRN, 2022. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4256207>. Acesso em: 15 ago. 2024.

LIU, Chao; JIANG, Zaihao; ZHAO, Jinbin; CHENG, Xuequn; LIU, Zhiyong; ZHANG, Dawei; LI, Xiaogang. Influence of rare earth metals on mechanisms of localized corrosion induced by inclusions in Zr-Ti deoxidised low alloy steel. Corrosion Science, [S.L.], v. 166, p. 108463, abr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X1932400X>. Acesso em: 02 nov. 2023.

LUDWIG, Gustavo Alberto; KORB, Matias De Angelis; JÚNIOR, José Carlos de Oliveira; MALFATTI, Célia de Fraga. Obtenção de revestimentos sobre aço inoxidável

ferrítico para aplicação em altas temperaturas. In: 13º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 2013, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ENEMET, 2013. p. 183-189. DOI 10.5151/2594-4711-23089.

MARQUES, A. V. M.; CARMO, K. M. do; LAGE, W. C.; TEIXEIRA, R. L. P.; LACERDA, J. C. de; TEIXEIRA, C. H. S. B.; SHITSUKA, R. Avaliação do efeito de deformação plástica na dureza, microestrutura e propriedades magnéticas de um aço inoxidável AISI 316L. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, n. 2, e-12611, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200002.1011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/MHSRZKfVBd6XyqvMZFW3cJL/?lang=en>. Acesso em: 15 ago. 2024.

NUNES, Isadora Pereira; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; SIGNORETTI, Valdir Tesche; LACERDA, José Carlos de. Efeito da eletrodeposição de níquel-nióbio no comportamento em fadiga de um aço SAE 1020. In: 71th ABM Annual Congress, 2016, Rio de Janeiro. Anais [...]. São Paulo: ABM, 2016. p. 321-326. DOI 10.5151/1516-392X-27597. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/efeito-da-eletrodeposicao-de-niquel-niobio-no-comportamento-em-fadiga-de-um-aco-sae-1020>. Acesso em: 05 nov. 2023.

OLIVEIRA, Cledenir Costa de. Efeito da geometria de movimentação sobreposta à trajetória de deslocamento linear do feixe LASER sobre a superfície de uma amostra de aço inoxidável AISI 316L para aplicações em microssoldagem. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/215600/PEMC2069-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 set. 2023.

SHACKELFORD, James F. Introduction to materials science for engineers. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 575 p. Tradução de Daniel Vieira. ISBN 978-85-7605-160-2.

TEIXEIRA, R. L. P.; SILVA, P. C. D. Advancing Metallic Biomaterials for Biomedical Implants: A Comprehensive Integrative Review. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 5, e05255, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-036>. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/5255>. Acesso em: 15 ago. 2024.

TEIXEIRA, R. L. P.; DE LACERDA, J. C.; FLORENCIO, K. C.; et al. TRIP effect produced by cold rolling of austenitic stainless steel AISI 316L. *Journal of Materials Science*, v. 58, n. 2, p. 3334–3345, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08235-7>.

TEIXEIRA, R. L. P.; TEIXEIRA, C. H. S. B. Exploring sustainable human manufacturing: industry 4.0, manufacturing, and green marketing for a balanced future: Explorando a manufatura humana sustentável: indústria 4.0, manufatura e marketing verde para um futuro equilibrado. *Concilium*, v. 23, n. 15, p. 772–790, 2023. DOI: <https://doi.org/10.53660/CLM-1784-23M18>.

TEIXEIRA, R. L. P.; DE LACERDA, J. C.; CONCEIÇÃO, I. C.; DA SILVA, S. N.; SIQUEIRA, G. O.; MOURA FILHO, F. The Effects of Niobium on the Bioactivity of Ni-

Ti-Al-Nb Shape Memory Alloys. Archives of Metallurgy and Materials, v. 66, n. 2, p. 437-442, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2021.135876>. Disponível em: <http://www.imim.pl/archives/volume-66-issue-22021>. Acesso em: 15 ago. 2024.