

Efeito do recobrimento eletroquímico de níquel (Banho de Watts) na microestrutura de aços inoxidáveis super duplex soldados pelo processo de laser pulsado Nd:YAG

The effect of electrochemical nickel coating (Watts bath) on the microstructure of super duplex stainless steels welded by the Nd:YAG pulsed laser process

El efecto del recubrimiento electrolítico de níquel (Baño de Watts) en la microestructura de aceros inoxidables super duplex soldados por el proceso de láser pulsado Nd:YAG

Lucas Ferreira da Silva Borges Dias¹
Eli Jorge da Cruz Junior²
Francisco Mateus Faria de Almeida Varasquim³

Resumo: Os aços inoxidáveis super duplex possuem uma microestrutura bifásica, com austenita e ferrita em proporções semelhantes, garantindo alta resistência mecânica e à corrosão. Contudo, após soldagem, a microestrutura tende a ser desbalanceada, com predominância de ferrita, comprometendo suas propriedades. Este estudo investigou o uso do Banho de Watts para corrigir o balanço de fases em um aço inoxidável super duplex UNS S32750 soldado por laser pulsado Nd:YAG. Três condições foram analisadas, variando o tempo do banho. A pesquisa avaliou a morfologia das fases, frações volumétricas e composição por EDS, demonstrando que o Banho de Watts, ao formar uma camada de níquel, foi eficaz na correção do desequilíbrio de fases na soldagem.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis super duplex. Banho de Watts, Fração volumétrica. Soldagem laser. Níquel

Abstract: Super duplex stainless steels have a biphasic microstructure with similar proportions of austenite and ferrite, providing high mechanical strength and corrosion resistance. However, after welding, the microstructure tends to become imbalanced, with a predominance of ferrite, compromising its properties. This study investigated the use of a Watts bath to correct the phase balance in a UNS S32750 super duplex stainless steel welded by Nd:YAG pulsed laser. Three different conditions were analyzed, varying the bath time. The research assessed phase morphology, volumetric fractions, and composition via EDS, showing that the Watts bath, by forming a nickel electroplated layer, was effective in correcting the phase imbalance in the weld.

Keywords: Super duplex stainless steel. Watts bath. Volume fraction. Laser welding. Nickel

¹ Graduando. IFSP Itapetininga. <https://orcid.org/0009-0004-3183-7783>. E-mail: borges.dias@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor. IFSP Itapetininga. <https://orcid.org/0000-0002-1576-3532>. E-mail: dacruz.eli@ifsp.edu.br

³ Doutor. IFSP Itapetininga. <https://orcid.org/0000-0002-5130-3461>. E-mail: franciscomateus@ifsp.edu.br

Resumen: Los aceros inoxidables super duplex tienen una microestructura bifásica con proporciones similares de austenita y ferrita, lo que les confiere alta resistencia mecánica y a la corrosión. Sin embargo, después de la soldadura, la microestructura tiende a desequilibrarse, con predominancia de ferrita, lo que compromete sus propiedades. Este estudio investigó el uso de un baño de Watts para corregir el balance de fases en un acero inoxidable super duplex UNS S32750 soldado por láser pulsado Nd:YAG. Se analizaron tres condiciones diferentes, variando el tiempo del baño. La investigación evaluó la morfología de las fases, las fracciones volumétricas y la composición mediante EDS, demostrando que el baño de Watts, al formar una capa de níquel electrodepositado, fue eficaz para corregir el desequilibrio de fases en la soldadura.

Palabras-clave: Aceros inoxidables super duplex. Baño de Watts, Fracción volumétrica. Soldadura láser. Níquel.

Submetido 15/01/2025

Aceito 10/03/2025

Publicado 02/04/2025

Considerações iniciais

Os aços inoxidáveis super duplex (AISD) são caracterizados por uma microestrutura bifásica composta de austenita e ferrita (Hu, *et al.*, 2018). O equilíbrio das frações volumétricas das fases confere aos AISD uma excelente combinação de propriedades mecânicas e resistência a corrosão. Devido essa combinação de propriedades, esses aços possuem uma ampla gama de aplicações nas indústrias químicas, papel e celulose, óleo e gás e offshore (Saravanan, *et al.*, 2017).

Em geral, após soldados, os AISD apresentam uma microestrutura desbalanceada, predominantemente ferrítica (Tan *et al.*, 2012). Para maioria das aplicações industriais, uma fração volumétrica de austenita inferior a 25% é inaceitável (Kang, 2013). Um grande desafio na soldagem de AISD é obter uniões com microestruturas balanceadas (Arun, 2019). A manutenção, após soldagem, de frações volumétricas aproximadamente iguais de austenita e ferrita é indispensável para preservar as propriedades mecânicas e de corrosão dos AISD (Ouali *et al.*, 2019).

Outra dificuldade na soldagem dos aços inoxidáveis duplex é o fato de que, dependendo do processo de soldagem e dos parâmetros utilizados, na faixa de temperatura entre 700 e 950 °C, fases secundárias prejudiciais podem precipitar. Essas fases irão afetar as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão (Gennari, 2018).

Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos relacionados a adição de elementos estabilizadores de austenita, como níquel ou nitrogênio, na soldagem dos AISD como forma de corrigir o balanço de fases resultantes. Muthupandi *et al.* (2005) estudaram a influência da adição de níquel e nitrogênio na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis duplex soldados pelo processo de feixe laser (*laser beam welding* – LBW). Migiakis e Papadimitriou (2009) realizaram um estudo semelhante, mas aplicado à soldagem a plasma. Pilhagen e Sandström (2014) investigaram o papel do níquel na tenacidade dos aços inoxidáveis duplex soldados por arco submerso (*submerged arc welding* - SAW). Tahaei *et al.* (2016) estudaram o efeito do níquel e do tratamento térmico pós-soldagem aplicado à soldagem por eletrodo de tungstênio (*gás tungsten arc welding* - GTAW). Zhang *et al.* (2017) também trabalharam com GTAW, mas deram ênfase ao nitrogênio como gás de proteção. da Cruz Junior

et al. (2021) relataram o efeito no níquel na soldagem por laser pulsado Nd:YAG em aços inoxidáveis super duplex.

O processo de soldagem a laser pulsado Nd:YAG oferece algumas vantagens em relação aos processos convencionais, como precisão, soldagem de formas complexas, facilidade de automação, ciclos curtos e baixos aportes térmico (Ventrella *et al.*, 2010).

Na soldagem de aços inoxidáveis duplex, a austenita é formada a partir da ferrita no estado sólido. O baixo aporte térmico e as altas taxas de resfriamento, características típicas do processo de soldagem por laser pulsado Nd:YAG, promovem a formação de ferrita BCC, o que resulta em uma microestrutura indesejada para a maioria das aplicações (Hu *et al.*, 2018)

As características da soldagem a laser pulsado Nd:YAG tornam difícil a adição de elementos de liga, seja como fios de solda ou gás de proteção. Encontrar uma maneira de adicionar elementos que promovam a austenita é muito importante para tornar esse processo de soldagem a laser aplicável aos aços inoxidáveis duplex. Um método alternativo relatado na literatura é posicionar uma fina folha de níquel entre os elementos estruturais a serem soldados, a fim de promover o enriquecimento de níquel na zona de fusão da (Cruz Junior *et al.*, 2021). Essa técnica, porém, apresenta limitações quando aplicadas a geometrias complexas.

O banho de Watts é o processo de eletrodeposição de níquel mais utilizado, pois é considerado um processo econômico e eficiente. A eletrodeposição de níquel é geralmente utilizada para preparar revestimentos em muitos materiais metálicos, melhorando sua resistência à corrosão (Salcedo *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018). Sua aplicação para preparar superfícies de elementos mecânicos em aços inoxidáveis duplex a serem soldados e, conseqüentemente, promover o equilíbrio de fases na zona de fusão é uma área promissora a ser estudada.

Devido à importância de buscar o equilíbrio de fases para manter as propriedades dos aços inoxidáveis duplex, e, conseqüentemente, suas aplicações; considerando a adequação do banho de Watts para formar uma camada de níquel eletrodepositado, este trabalho estudou o uso do banho de Watts como uma forma de promover o enriquecimento de níquel na solda do UNS S32750, a ser soldada pela fonte de laser pulsado Nd:YAG e, conseqüentemente, prevenir o desequilíbrio de fases.

Metodologia

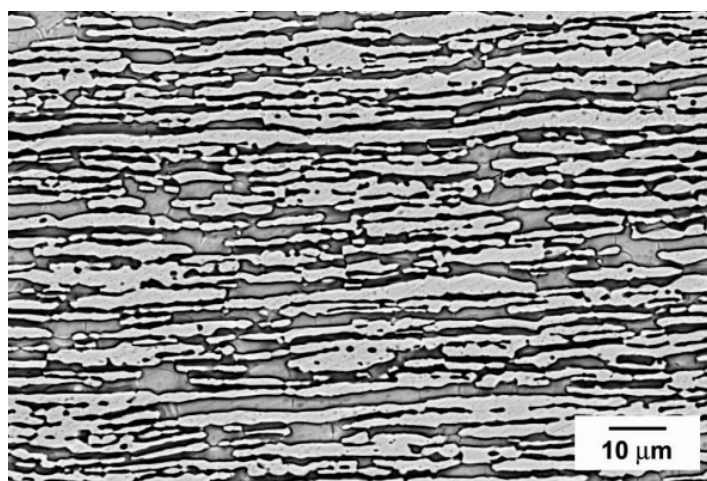
O metal base utilizado foi o AISD UNS S3270, em chapas de 1,5 mm de espessura. A composição química é apresentada na Tabela 1 e sua microestrutura é mostrada na Figura 1.

Tabela 1 - Composição química do UNS S32750

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
≤0,030	0,40	0,90	0,040	≤ 0,030	25,00	4,0	7,0	0,28

Fonte: MatWeb, Sandvik Osprey.

Figura 1 - Microestrutura do AISD UNS S32750

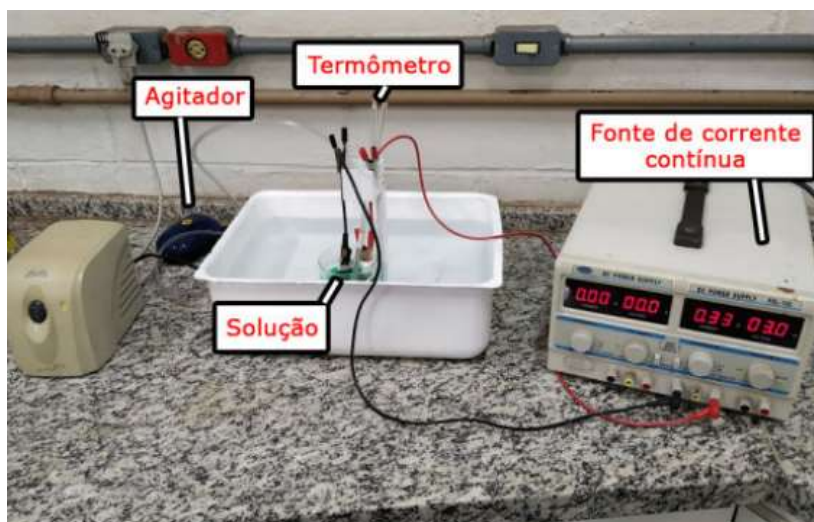


Fonte: Próprio autor.

Parte da superfície de três amostras diferentes, voltadas para a região da junta, foram submetidas ao Banho Watts por diferentes tempos de imersão: 5, 6 e 7 minutos. A eletrodeposição foi realizada se utilizando dos aparatos ilustrados pela Figura 2, compostos pela fonte de corrente contínua, termômetro, agitador por bolhas, e a solução utilizada no banho. Em todos os testes de deposição a condição químico-física dos Banhos de Watts (contendo: 9 g de $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 52,6 g de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 7,6 g de H_3BO_3 em 200ml de H_2O) foram monitorados

para valores constantes de pH 4 e 50 °C, respectivamente, enquanto a densidade de corrente foi de 5 A/dm² (Rose; Whittington, 2014)

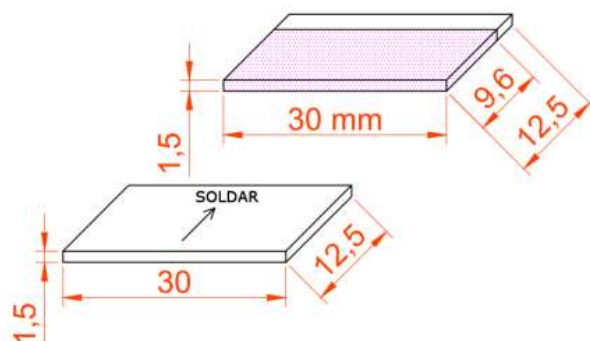
Figura 2 – Aparato utilizado para o Banho de Watts



Fonte: Próprio autor

Antes de se iniciar a deposição, as amostras foram lixadas em granulometria 1500, e colocadas em um banho de hidróxido de sódio 200 g/L com agitação ultrassônica por 5 minutos. Dessa maneira foi possível garantir um substrato com menos sujidades como partículas e gorduras, a fim de se promover maior aderência da camada de metal depositado. A área recoberta corresponde à 650 mm² conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática das amostras



Fonte: Próprio autor

Mantendo os mesmos parâmetros de soldagem, três condições de exposição ao banho de Watts foram testadas para avaliar a espessuras de revestimento de níquel obtidas pela variação dos tempos de deposição. A Tabela 2 resume as condições do banho eletrolítico e os parâmetros de soldagem para cada amostra.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem e espessuras das camadas eletrodepositadas

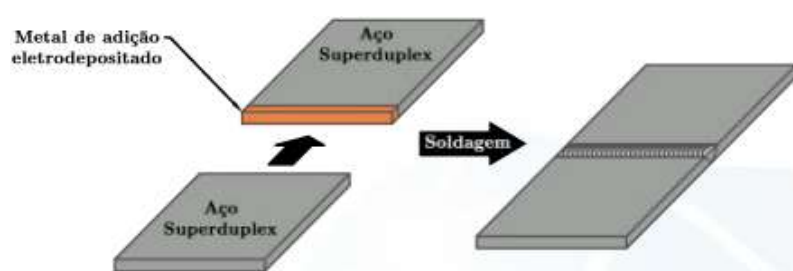
Amostra	Tempo do Watts Bath [min]	Parâmetros de Soldagem
Ni5	5	Potência de Pico: 2.0 kW Duração do pulso: 5 ms Frequência: 9Hz Velocidade de soldagem: 1mm/s Gás de proteção: Argônio Vazão: 20 l/min
Ni6	6	
Ni7	7	

Fonte: Próprio autor

Para soldagem das amostras foi utilizado um equipamento de laser pulsado Nd:YAG modelo UW-150 A (United Winners), com potência máxima de 150 W, diâmetro do feixe de

0,2 mm. Os parâmetros de soldagem (Tabela 2) foram selecionados de acordo com experimentos anteriores para resultar em uma superfície regular, sem porosidade, e uma poça de fusão profunda superior a 50% da espessura da chapa. O feixe de laser, modo *keyhole*, com energia de pulso definida em 10J, foi focado na superfície da amostra. Adotou-se uma taxa de sobreposição de 90%. O esquema de soldagem é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema de soldagem



Fonte: Próprio autor

Para caracterização microestrutural as amostras foram cortadas transversalmente ao cordão de solda, e embutidas em baquelite. O lixamento das amostras ocorreu de forma manual, alternando em 90° a posição a cada troca de lixa. A granulação das lixas obedeceu a sequência 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200. Recorreu-se ao polimento das amostras com alumina de partícula 1 e 0,3 μm , respectivamente. Para revelar a microestrutura utilizou-se o reagente químico Behara (20 ml of HCl, 80 ml of H₂O, 1,0g of K₂S₂O₅ and 2,0g of NH₄HF₂).

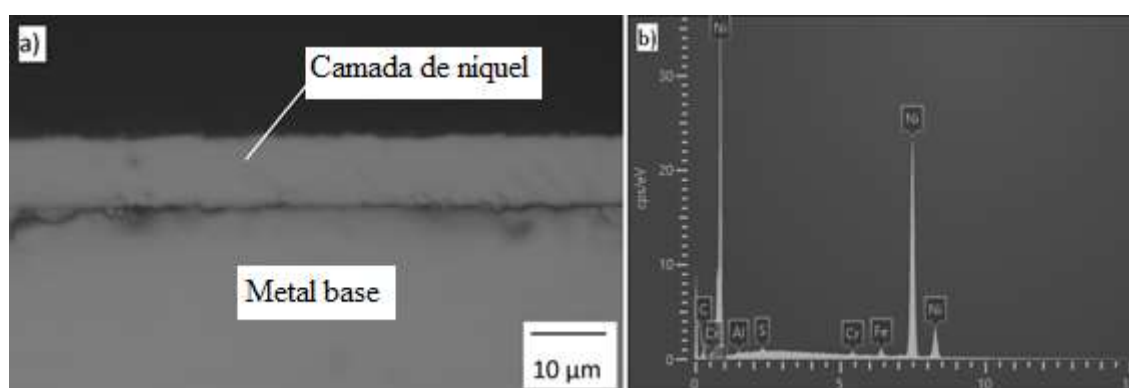
Para determinar as frações volumétricas de austenita e ferrita, foram feitas diversas micrografias por Microscopia Eletrônica de Varredura (Carl Zeiss EVO LS15) em diferentes regiões do cordão de solda. Para cada amostra, dez micrografias foram analisadas, utilizando o *software* ImageJ. As micrografias foram binarizadas (austenita em branco e ferrita em preto) permitindo calcular as frações volumétricas de cada fase.

Para confirmar a composição tanto das camadas depositadas quanto dos cordões de solda as amostras foram analisadas por meio de Espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

Análise de dados e resultados

A Figura 5a apresenta uma micrografia óptica da camada de níquel eletrodepositada para a condição Ni7 e a Figura 5b o resultado da análise da composição química da camada por EDS. Embora tenha sido apresentado apenas os resultados para a condição Ni7, as demais condições (Ni5 e Ni6) comportaram-se da mesma forma.

Figura 5 – (a) Micrografia óptica da camada de níquel Ni7 (b) EDS da camada de níquel Ni7



Fonte: Próprio autor

A camada eletrodepositada apresentou espessura constante e boa aderência a superfície do material base. Caso a espessura não fosse constante, a distribuição de níquel ao longo do cordão não seria uniforme resultando em diferentes proporções de ferrita e austenita. Não foram identificadas porosidades, que podem causar falhas na soldagem (Da Cruz Junior *et al.*, 2021; Mohammed *et al.*, 2017). O EDS revelou uma composição de aproximadamente 97% de Ni na camada depositada, sendo os outros 3% Cr e Fe do substrato. Um pico de carbono foi detectado provavelmente proveniente da baquelite onde a amostra estava embutida.

A espessura da camada eletrodepositada para as diferentes condições de tempo de exposição ao banho de Watts são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Espessuras das camadas eletrodepositadas no banho de Watts.

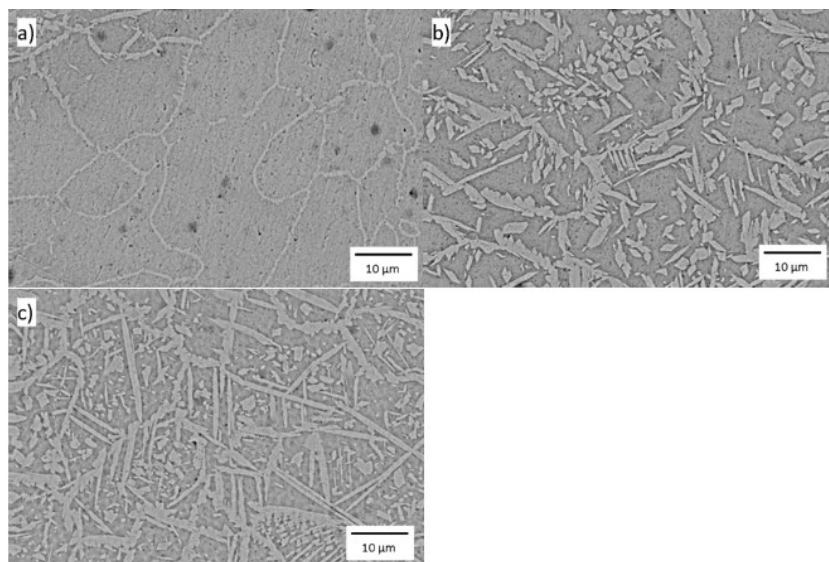
Amostra	Tempo do Watts Bath [min]	Espessura da camada de níquel [μm]
Ni5	5	5.4 ± 1.3
Ni6	6	8.3 ± 1.3
Ni7	7	9.3 ± 1.3

Fonte: Próprio autor

As microestruturas (MEV) dos cordões de solda para as condições Ni5, Ni6 e Ni7 são apresentadas na Figura 6 (a, b e c respectivamente). A camada eletrodepositada de níquel promoveu um aumento nas frações volumétricas de austenita nos cordões. Dentre as condições estudadas, quanto maior a espessura da camada depositada, mais próxima do equilíbrio de fases estava a microestrutura.

Estudos relatam que para soldagens autógenas em AISD, a fração volumétrica resultante para os cordões de solda é inferior a 10% (v/v) (Verma; Taiwade, 2017; Singh; Shahi, 2019). Para o processo de soldagem por laser pulsado Nd:YAG, devido as altas taxas de resfriamento e baixos aportes térmicos, os valores são ainda menores (Da Cruz Junior *et al.*, 2019; Salcedo *et al.*, 2016). Para todas as condições testadas, as quantidades de austenita foram maiores em comparação com a soldagem autógena.

Figura 6 – Microestruturas (MEV) dos cordões de solda para: (a) Ni5 (b) Ni6 (c) Ni7



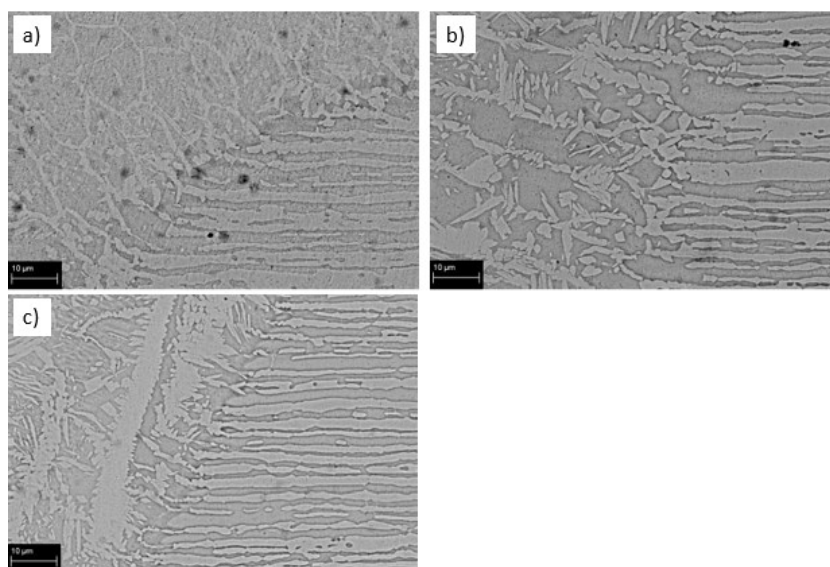
Fonte: Próprio autor

A microestrutura da condição Ni5 apresenta uma morfologia de austenita diferente das demais condições (Ni6 e Ni7). Trata-se de uma microestrutura desbalanceada, com uma grande quantidade de ferrita com pouco austenita alotriomorfa nos contornos de grãos. Na soldagem dos AISD, a primeira fase que solidifica é a ferrita (Mohammed *et al.*, 2017). A austenita é formada a partir de uma transformação difusional em estado sólido, sob altas taxas de resfriamento (típicas do processo de soldagem por laser pulsado), não há tempo para formação da austenita (Muthupandi *et al.*, 2005). A quantidade de níquel (resultado do Banho de Watts) para condição Ni5 não foi suficiente para promover um balanço adequado de ferrita/austenita frente as altas taxas de resfriamento. A estrutura majoritariamente ferrítica pode comprometer as propriedades mecânicas e de corrosão dos AISD soldados (Badji *et al.*, 2003).

Diferente da condição Ni5, as microestruturas das condições Ni6 e Ni7 apresentam em sua microestrutura austenita alotriomórfica nos contornos de grãos, austenita de Widmanstätten crescendo a partir dos contornos de grãos e austenita intragranular (idiomórfica). Na soldagem de aços inoxidáveis duplex, a austenita forma-se de três formas: alotriomórficas de contorno de grãos, Widmanstätten, que tem origem dentro do grão de ferrita a partir da austenita alotriomórfica de contorno de grão e austenita intragranular. A austenita alotriomórfica de contorno

de grãos e a de Widmanstätten formam-se a altas temperaturas, enquanto a intragranular em baixas (Mohammed *et al.*, 2017; Muthupandi *et al.*, 2003). Mesmo sob altas taxas de resfriamento, o efeito do níquel (resultado do Banho de Watts) na formação da austenita sobrepôs os efeitos dos ciclos térmicos promovendo um aumento nas frações volumétricas de austenita. As microestruturas da transição entre metal base e cordões de solda para as condições Ni5, Ni6 e Ni7 são apresentadas na Figura 7 (a, b e c respectivamente).

Figura 7 – Microestruturas (MEV) da transição para: (a) Ni5 (b) Ni6 (c) Ni7



Fonte: Próprio autor

Para todas as condições, embora mais evidente na Ni6 e Ni7, a quantidade de austenita na zona termicamente afetada (ZTA) é menor em relação ao centro do cordão, o que pode ser explicado pelo fato de nessa região as taxas de resfriamento serem superiores em relação ao centro do cordão, afetando a formação da austenita.

A Tabela 3 apresenta os valores médios das frações volumétricas de ferrita e austenita para todas as condições. Considerando que para maioria das aplicações industriais, uma fração volumétrica de austenita inferior a 25% é inaceitável, as condições Ni6 e Ni7 apresentaram bons resultados (Saravanan *et al.*, 2017; Kang; Lee, 2013). Outros autores consideram que a fração volumétrica mínima de austenita é 30% para que o cordão seja aceitável (Ramkumar *et*

al., 2014). Quantidades maiores de ferrita aumentam a resistência mecânica, porém reduzem a resistência a corrosão, enquanto quantidades maiores de austenita aumentam a resistência a corrosão, porém reduzem a resistência mecânica. Para uma boa combinação de resistência mecânica e de corrosão é importante que as fases austenita/ferrita estejam balanceadas.

Tabela 4 – Frações volumétricas das fases

Amostra	AUSTENITA %	FERRITA %
Ni5	10.5±0.4	89.5±0.4
Ni6	38.9±0.3	61.1±0.3
Ni7	56.2±0.4	43.5±0.4

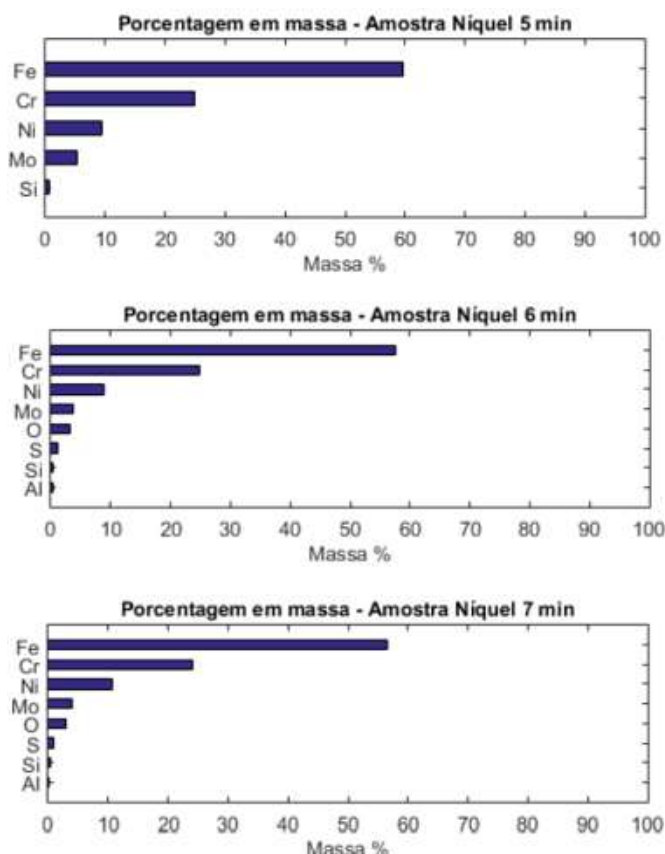
Fonte: Próprio autor

As condições Ni6 e Ni7 mostram que o Banho de Watts foi eficiente para solucionar o desbalanceamento de fases resultante da soldagem dos AISD, uma vez que os parâmetros de soldagem foram mantidos os mesmos para todas as condições. Saravanan *et al.* (2017) afirmam que apenas alterando-se os parâmetros de soldagem, para o processo laser Nd:YAG, o balanço de ferrita/austenita será inadequado, sendo necessário alguma técnica para corrigir a microestrutura. O Banho de Watts promoveu o enriquecimento de níquel no cordão de solda, e consequentemente uma microestrutura com proporções de austenita e ferrita adequadas.

A Figura 8 apresenta os resultados do EDS realizado no cordão de solda para todas as condições. Nota-se uma composição do cordão de solda aparentemente dentro do esperado, alinhado à composição própria do aço UNS S32750, porém, com maior porcentagem de níquel, uma vez que esse é o elemento depositado. Algumas amostras apresentaram alumínio em sua composição, enquanto outras não. Isso se deve ao fato que durante a preparação da amostra, ela passa por um polimento abrasivo de alumina - Al_2O_3 . Dessa forma, como as partículas são muito pequenas, houve encrustações que levaram ao seu aparecimento em pequena quantidade, porém, trata-se de um fator externo ao cordão, e não deve ser levado em consideração. O oxigênio também aparece em algumas amostras, e está associado à oxidação do cromo, formando uma camada de passivação de Cr_2O_3 , típica dos aços inoxidáveis, e, portanto, também

é um fator externo, não correspondendo à realidade do interior do cordão, e deve ser desconsiderado.

Figura 8 – EDS dos cordões de solda



Fonte: Próprio autor

Considerações finais

Com base nos resultados podemos delinear as seguintes conclusões.

- O Banho de Watts possibilitou a formação de uma camada de níquel eletrodepositada com espessura constante e bem aderida a superfícies.
- A camada eletrodepositada promoveu um aumento nas frações volumétricas de austenita, sendo que quanto maior a espessura da camada maior a quantidade de austenita.

- As condições Ni6 e Ni7 apresentaram resultados que satisfazem os padrões aceitáveis para aplicações industriais em relação as proporções de austenita e ferrita.
- O Banho de Watts foi eficiente para promover o enriquecimento de níquel nos cordões de UNS S32750 soldados por laser pulsado Nd:YAG e corrigir o balanço de fases resultante.
- A combinação do Banho de Watts, na preparação de superfícies, com o processo de soldagem por laser pulsado Nd:YAG apresentou-se uma alternativa viável para correção do balanço de fases possibilitando a aplicação industrial desse processo de soldagem a AISD.

Referências

FRANCES M. SALCEDO, Angel; BALLESTEROS C., Florencio; C. VILLANDO, Anabella; LU, Ming-Chun, Nickel recovery from synthetic Watts bath electroplating wastewater by homogeneous fluidized bed granulation process, **Sep. Purif. Technol.**, Diliman, v. 169, p. 128-136, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586616306396?via%3Dihub>. Acesso em: 09 nov. 2024.

TAHAEI, Ali; FABIOLA MIRANDA PEREZ, Argelia; MERLIN, Mattia; ARTURO REYES VALDES, Felipe; LUCA GARAGNANI, Gian, Effect of the addition on nickel powder and post weld heat treatment on the metallurgical and mechanical properties of the welded UNS S32304 duplex, **Soldag. Insp.**, São Paulo, v. 21(2), p. 197-208, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.09>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/R9LgSttm5RSkWw5jGBmDFvH/?lang=en>. Acesso em: 13 nov. 2024.

WANG, Bo-Wei; LEE, Chung-Ying; LEE, Hung-Bin, The influences of monoethanolamine additive on the properties of nickel coating electroplated in post supercritical carbon dioxide mixed Watts bath. **Surf. Coat. Technol.**, Taipei, vol. 337, pp. 232-240, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897218300355>. Acesso em: 08 nov. 2024.

ARUN, D; DAVENDRANATH RAMKUMAR, K; VIMALA, Raghavan., Multi-pass arc welding techniques of 12 mm thick Super-duplex stainless steel. **J. Mater. Process. Tech.**, Vellore, v. 271, p. 123-146, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013619301190?via%3Dihub>. Acesso em: 08 nov. 2024.

DONGHOON, Kang; HAEWOO, Lee, Study of the correlation between pitting corrosion and the component ratio of the dual phase in duplex stainless steel welds. **Corros. Sci.**, Chungnam, v. 74, p. 396-407, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.033> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X13001686>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DA CRUZ JUNIOR, Eli Jorge; GALLEGRO, J.; SETTIMI, A.G.; GENNARI, C.; ZAMBON, A.; VENTRELLA, V.A, Influence of Nickel on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of Laser-Welded Super-Duplex Stainless Steel. **J. of Materi Eng and Perform**, São Paulo, v. 30, 3024–3032, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05590-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-021-05590-x>. Acesso em: 07 nov. 2024.

GENNARI, C.; PEZZATO, L.; PIVA, E.; GOBBO, R.; CALLIARI, I, Influence of small amount and different morphology of secondary phases on impact toughness of uns s32205 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, Amsterdam, v. 729 p. 149–156, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.063>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150931830724X>. Acesso em: 11 nov. 2024.

TAN, Hua; WANG, Zhiyu; JIANG, Yiming; YANG, Yanze; DENG, Bo; SONG, Hongmei LI, Jin, Influence of welding thermal cycles on microstructure and corrosion resistance of 2304 duplex stainless steels. **Corros. Sci.**, Shangai, v. 55, p. 368-377, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.10.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X11006020?via%3Dihub>. Acesso em: 08 nov. 2024.

HU, Yu; SHI, Yonghua; SHEN, Xiaoqin; WANG, Zhongmin, Microstructure evolution and selective corrosion resistance in underwater multi-pass 2101 duplex stainless steel welding joints. **Metallurgical and Materials Transactions A**, New York, v. 49, n. 8, p. 3306–3320, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4686-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-018-4686-0>. Acesso em: 08 nov. 2024.

PILHAGEN, Johan; SANDSTRÖM, Rolf, Influence of nickel on the toughness of lean duplex stainless steel welds, **Mater. Sci. Eng. A**, Stockholm, v. 602, p 49-57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.01.093> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509314001245?via%3Dihub>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SINGH, Jastej; SINGH SHAHI, Amandeep, Metallurgical, impact and fatigue performance of electron beam welded duplex stainless steel joints. **J. Mater. Process. Technol.**, Longowal, v. 272, p. 137-148, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013619301852>. Acesso em: 13 nov. 2024.

VERMA, Jagesvar; VASANTRAO TAIWADE, Ravindra, Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments—A review. **J. Manuf. Process.**, Nag Pur, v. 25, p. 134-152, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S152661251630158X>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MIGIAKIS, Kostas; D. PAPADIMITRIOU, George, Effect of nitrogen and nickel on the microstructure and mechanical properties of plasma welded UNS S32760 super-duplex stainless steels, **J. Mater. Sci.**, Zografou, v. 44, p. 6372-6383, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3878-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-009-3878-9>. Acesso em: 09 nov. 2024.

RIDHA MOHAMMED, Ghusoon; ISHAK, Mahadzir.; NUR AQIDA, Syarifah; A. ABDULHADI, Hassan, Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: a review. **Metals**, Suíça, v. 7, f. 2, p. 39, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7020039>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/7/2/39>. Acesso em: 6 nov. 2024.

NICKEL INSTITUTE. **Nickel Planting Handbook**. 1º Edição. Durham, NC: Nickel Institute, 2014, p. 13-16.

OUALI, Naima; KHENFER, Khadidja; BELKESSA, Brahim; FAJOU, Jamal; CHENITI, Billel; IDIR, Brahim; BRANCHU, Samuel, Effect of heat input on microstructure, residual stress, and corrosion resistance of UNS 32101 lean duplex stainless steel weld joints. **J. Mater. Eng. Perform.**, Algiers, v. 28, p. 4252–4264, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04194-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-019-04194-w>. Acesso em: 08 nov. 2024.

BADJI, Riad; MABROUK, Bouabdallah; BACROIX, Brigitte; KAHLOUN, Charlie; BELKESSA, Brahim; MAZA, Halim, Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds. **Mater. Charact.**, Villetaunese, v. 59, f. 4, p. 447-453, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.03.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580307000964?via%3Dihub>. Acesso em: 12 nov. 2024

SARAVANAN, Somasundaram, RAGHUKANDAN, Krishnamurthy; SIVAGURUMANIKANDAN, N. Pulsed Nd:YAG laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel. **J. Manuf. Process**, Tamilnadu, v. 25, p. 284-289, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.015>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612516301876?_cf_chl_tk=kaQ.s6nrnsLciSYanGBJck9Uoi6RFN0OjxQMfSLbTnM-1733280417-1.0.1.1-qW2ziFQTKrEDw9QdQHoS2fsEyDWj9rmPfk.96JpoMNs. Acesso em: 09 nov. 2024.

VANTRELLA, Vicente Afonso, BERRETA, Jose Roberto, DE ROSSI, Wagner, Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils, **J. Mater. Process. Tech.**, Ilha Solteira, v. 210, f. 14, p 1838-1843, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.06.015>. Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/pii/S092401361000186X>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MUTHUPANDI, Veerappan; BALA SRINIVASAN, Parthasarathy; SESHADRI KRISHNAMMORTHY, S; SUNDARESAN, Subramaniam, Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds. **Mater. Sci. Eng. A**, Tiruchirappalli, vol. 358, f. 1-2, p. 9-16, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00077-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509303000777>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MUTHUPANDI, V; BALA SRINIVASAN, P; SHANKAR, Vani; SESHADRI, S. K; SUNDARESAN, S. Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31803) weld metals, **Mater. Lett.**, Tiruchirappalli, v. 59, f. 18, p 2305-2309, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.03.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X05002508>. Acesso em: 07 nov. 2024.

ZHANG, Zhiqiang; JING, Hongyang; XU, Lianyong; HAN, Yongdian; ZHAO, Lei; ZHOU, Chao; Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joints, **Appl. Surf. Sci.**, Tianjin, v. 404, p 110-128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.252>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016943321730274X?via%3Dihub>. Acesso em: 09 nov. 2024.