

ADIÇÃO DE ELEMENTOS GAMAGÊNICOS NA SOLDAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750 COM LASER Nd:YAG PULSADO

Bruna B. Seloto¹, Ayslan D. S. Borges¹, Emilly S. Andrade¹, Eli J. C. Junior² e Vicente A. Ventrella^{1*}

1 – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Av. Brasil Centro-56, Ilha Solteira, CEP 15.385-000, SP.

vicente.ventrella@unesp.br

2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Campus Itapetininga.

RESUMO

Os aços inoxidáveis super duplex possuem uma microestrutura bifásica, com frações volumétricas aproximadamente iguais de ferrita e austenita, conferindo-lhes excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão. O problema na soldagem a laser desses aços é obter a zona de fusão com uma microestrutura balanceada, garantindo suas propriedades e aplicações. Em geral, quando soldado com processo de alta taxa de resfriamento, como a soldagem a laser, obtém-se uma microestrutura majoritariamente ferrítica. Para equilibrar a microestrutura, são indicadas a adição de elementos estabilizadores de austenita ou tratamentos térmicos. Dada a importância do equilíbrio de fases para manter as propriedades e aplicações desses aços a presente pesquisa estudou o uso do banho de Watts como forma de promover o enriquecimento da junta com um elemento gamagênico na união do aço UNS S32750 pelo processo de laser Nd:YAG pulsado e, consequentemente, formar uma microestrutura com frações volumétricas aproximadamente iguais de ferrita e austenita. As faces das juntas de topo do aço inoxidável UNS S32750 foram submetidas ao banho Watts em diferentes tempos, formando camadas de elementos gamagênicos com diferentes espessuras. Essas juntas foram soldadas usando um laser Nd:YAG pulsado. A caracterização microestrutural dos cordões de solda foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura, e as frações volumétricas foram obtidas com auxílio de um software gráfico. Os resultados mostraram que a adição de níquel e cobalto na zona de fusão foi eficiente para corrigir o indesejável desbalanceamento da microestrutura resultante da soldagem a laser Nd:YAG dos aços inoxidáveis super duplex à medida que as frações volumétricas de austenita aumentou, melhorando assim suas propriedades de resistência à corrosão.

Palavras-chave: Soldagem laser, Nd:YAG, aço duplex, UNS S32750, microestrutura.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis superduplex (AISD) são materiais que combinam elevadas propriedades mecânicas com alta resistência à corrosão. Essas características são obtidas principalmente

devido a microestrutura praticamente bifásica balanceada de austenita (γ) e ferrita (δ) advindas de tratamento termomecânico⁽¹⁾. Por essas razões o aço inoxidável superduplex é utilizado em indústrias químicas e petroquímicas principalmente offshore⁽²⁾. Embora possua boas propriedades, é um desafio a manutenção da estrutura dos aços inoxidáveis superduplex após a soldagem⁽³⁾. Considerando a elevada taxa de resfriamento nos processos de soldagem na Zona Fundida(ZF) e Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA) é esperado haver maior quantidade de ferrita nesses materiais⁽²⁾. Atualmente, os processos semi-automáticos ou totalmente automatizado como GTAW e MIG/MAG são os processos mais utilizados na manufatura e soldagem de aços inoxidáveis, porém, possuem muitas deficiências como baixa eficiência de soldagem e alta deformação térmica⁽⁴⁾. Por essas razões faz necessário o estudo de processos de soldagem para aços inoxidáveis superduplex. Uma das alternativas é a soldagem a laser. Entre as vantagens da soldagem a laser estão a alta velocidade de soldagem, facilidade de automatização, baixo calor de entrada e pequena ZTA⁽⁵⁾. A estreita área de focalização do feixe do laser produz baixo aquecimento de entrada no cordão de solda que, por conseguinte, cria uma ZTA diminuta, inclusive menor que no processo GTAW. Devido a isso, a soldagem a laser é viável para aços inoxidáveis duplex e superduplex pois os precipitados - fases sigma (σ) e chi (χ) podem ser evitados. Apesar das vantagens da soldagem a laser em materiais duplex e superduplex com relação aos processos citados, alguns trabalhos mostraram que o balanceamento de 50% de ferrita e 50% de austenita na região de soldagem autógena são afetados⁽⁶⁾. Alguns elementos como carbono (C), nitrogênio (N), níquel(Ni) e cobalto (Co) são gamagênicos, ou seja, estabilizadores de austenita⁽⁷⁾. Portanto a união dos elementos C, N, Ni e Co com a soldagem a laser em aços inoxidáveis duplex é vantajoso.

Alguns trabalhos indicam a melhora no balanceamento de fases na soldagem de aços inoxidáveis duplex ou superduplex com adição de elementos gamagênicos. Segundo o trabalho de Leite⁽⁸⁾ na soldagem dissimilar a laser Nd:YAG entre os aços inoxidáveis UNS S32750 e 316L ocorre a formação de austenita na Zona Fundida por causa da influência do níquel do aço inoxidável austenítico. Junior et al.⁽⁹⁾ adicionou níquel eletrolítico em formas de folhas de 30 μ m de espessura em chapas de UNS S32750 soldados a laser pulsado, os resultados demonstraram formação de aproximadamente 50% de ferrita e 50% austenita no cordão de solda.

O presente trabalho adicionou os elementos gamagênicos níquel (Ni) e Cobalto (Co), através de deposição eletrolítica na região da junta de chapas de aço superduplex UNS S32750 e posterior soldagem com laser pulsado Nd:YAG. Esse método é uma boa alternativa para depositar pequenas espessuras como o necessário para obtenção de fases balanceadas em aços superduplex na soldagem a laser.

MATERIAIS E MÉTODOS

O metal de base utilizado foi o aço inoxidável superduplex UNS S32750 em chapas laminadas de 1,5mm de espessura, cortadas por eletroerosão a fio (Eletrocut NOVIK), nas dimensões de 30x12,5x1,5mm. A composição química do metal base encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em peso) do metal base UNS S32750.

Metal base	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N
	0,018	0,29	0,63	25,61	6,97	3,84	0,003	0,022	0,269

Após o corte, cada amostra foi preparada em lixa com granulometria 1500 e colocadas em banho de NaOH 200g/l em agitação ultrassônica por 5 minutos. Posteriormente, depositou-se eletroliticamente camadas de níquel e de cobalto, conforme mostra Figura 1a. Finalmente, o material foi soldado no sentido longitudinal a laminação do metal de base utilizando o processos de soldagem a laser Nd:YAG na condição pulsado.

Os parâmetros de soldagem levaram em conta a literatura⁽⁹⁾ e alguns pré-testes. Este trabalho não teve como objetivo encontrar os parâmetros de soldagem, apenas analisar a influência dos elementos gamagênicos na soldagem a laser do aço superduplex e seu efeito na formação da microestrutura final do metal de solda, visto que na soldagem autógena essa microestrutura é desbalanceada. Os elementos adicionados eletroliticamente foram níquel e cobalto. A figura 1b mostra uma vista superior do cordão de solda.

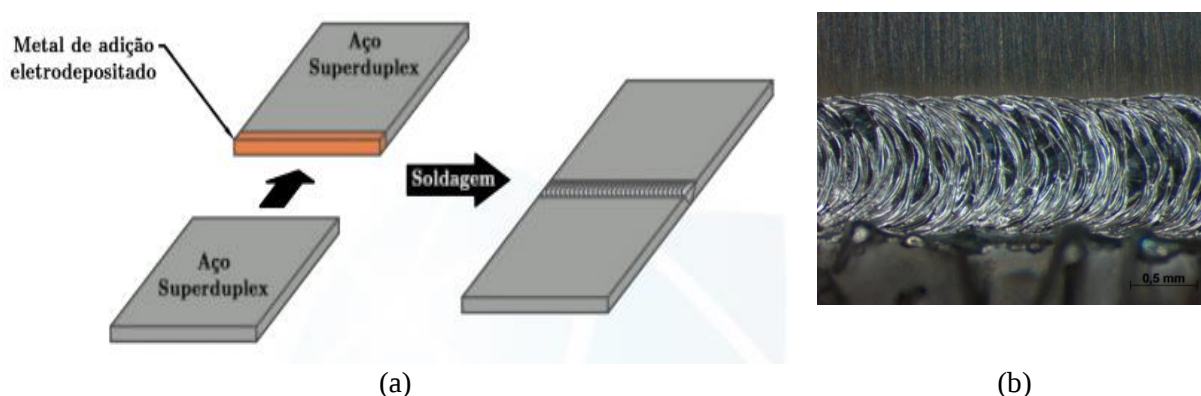


Figura 1: Representação esquemática da soldagem (a) e vista superior do corpo de prova após a soldagem (b).

Foram preparados cinco corpos de prova, sendo um sem adição de elemento gamagênico (AUT) e dois com adição de níquel (Ni01 e Ni02) e dois com adição de cobalto (Co01 e Co02). Todas as soldagens foram autógenas. A Tabela 2 mostra as espessuras da camada depositada em função do tempo de exposição.

Tabela 2: Condições de soldagem.

amostras	Tempo de eletrodeposição [min]	Espessura da acamada [μm]
AUT	Sem adição	Sem adição
Ni01	5	5,0
Ni02	7	10,0
Co01	15	14,0
Co02	30	29,0

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na Figura 2, amostra AUT, a qual foi soldada sem adição de elementos gamagênicos, que a quantidade de austenita formada no cordão de solda é bem reduzida, em torno de 5,43%, surgindo basicamente como austenita de contorno de grão. Dessa forma, fica claro que a soldagem de aços duplex com laser sem adição de elementos gamagênicos resulta em uma microestrutura basicamente ferrítica, o que caracteriza um desbalanceamento da microestrutura duplex desses aços.

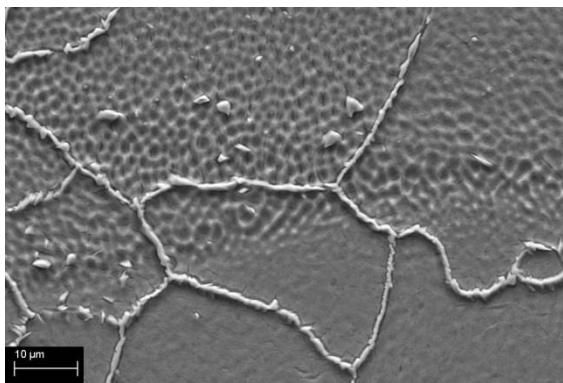
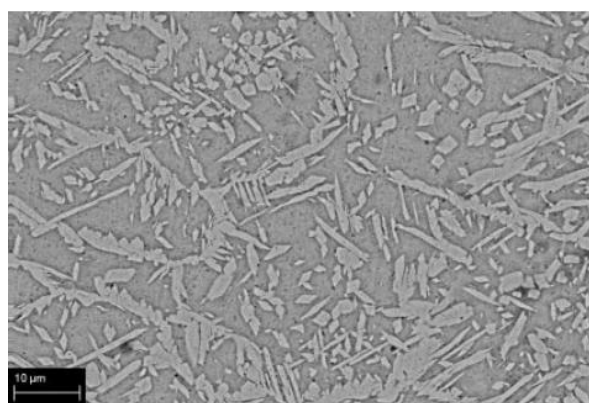
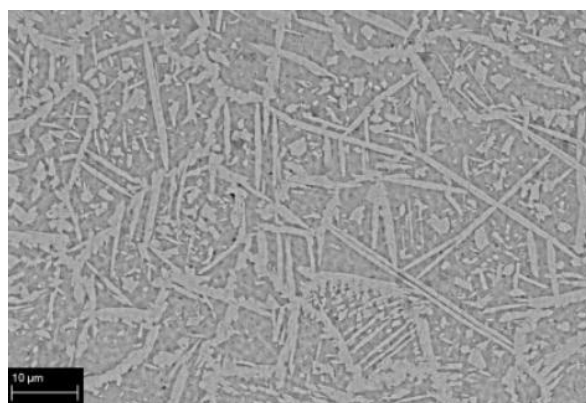


Figura 2: Micrografia obtida por MEV da amostra AUT, sem adição de elementos gamagênicos. Região escura é ferrita e região clara austenita.

Observa-se na Figura 3a, amostra Ni01, que a quantidade de austenita formada no cordão de solda já começa a ser expressiva, em torno de 38,93%, surgindo nas formas intragranular e Widmanstatten, além do contorno de grão que sempre está presente nas amostras de níquel. A amostra Ni02, Figura 3b, apresenta um balanço de fase bem próximo do metal base, em torno de 43,84%. Dessa forma, podemos observar que a adição de níquel no metal de solda corrige o desbalanceamento causado pela soldagem laser.



(a)



(b)

Figura 3: Micrografias obtidas por MEV das amostras com adição de Ni. (a) Ni01 e (b) Ni02.

Observa-se na Figura 4a, amostra Co01, que a fração volumétrica de austenita, em torno de 20,48%, está presente principalmente na forma de austenita de contorno de grão. A amostra Co02, Figura 4b, apresenta um balanço de fase bem próximo do metal base, em torno de 47,91%. Dessa forma, podemos observar que a adição de cobalto, assim como a adição níquel no metal de solda também restaura o balanceamento das fases ferrita e austenita na zona de fusão. Dessa forma, fica claro que a adição dos elementos gamagênicos, níquel e cobalto, na zona de fusão em processos de soldagem laser de aços da família duplex é uma técnica viável para restaurar a microestrutura duplex e consequentemente as boas propriedades mecânicas e de corrosão características dos aços duplex.

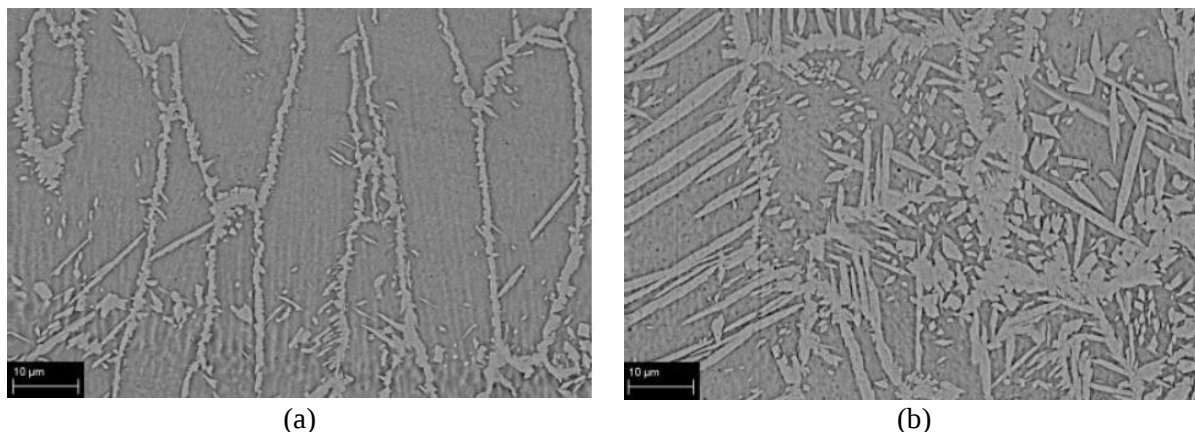


Figura 4: Micrografias obtidas por MEV das amostras com adição de Cobalto. (a) Co01 e (b) Co02.

CONCLUSÕES

A adição dos elementos gamagênicos níquel e cobalto através da eletrólise no aço inoxidável superduplex UNS S32750 para a soldagem a laser Nd:YAG pulsada permitiu concluir que:

- A soldagem do aço inoxidável superduplex UNS S32750 pelo processo laser Nd:YAG pulsado, sem a adição de elementos gamagênicos, gera uma microestrutura basicamente ferrítica no cordão de solda, portanto um desbalanceamento da estrutura duplex.
- A adição de níquel restaurou a microestrutura do metal de solda, isto é, com 7 minutos de deposição eletrolítica de níquel no metal base foi possível obter uma zona de fusão com 43,84% de austenita.
- A adição de cobalto, assim como adição de níquel, restaurou a microestrutura do metal de solda, isto é, com 30 minutos de deposição eletrolítica de cobalto no metal base foi possível obter uma zona de fusão com 47,81% de austenita.
- Todas as amostras que recuperaram o balanço de fases apresentaram austenita de contorno de grão, austenita intergranular e austenita de Widmanstätten.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP**. Processos: 2018/17362-6 e 2014/16.932-2.

REFERÊNCIAS

1. SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis aisi 304l/316l. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p. 175–181, 2007.
2. MIRAKHORLI, F.; GHAINI, F. M.; TORKAMANY, M. Development of weld metal microstructures in pulsed laser welding of duplex stainless steel. Journal of materials engineering and performance, New York, v. 21, n. 10, p. 2173–2176, 2012.
3. SIVAKUMAR, G.; SARAVANAN, S.; RAGHUKANDAN, K. Investigation of microstructure and mechanical properties of nd: Yag laser welded lean duplex stainless steel joints. Optik, v. 131, p. 1–10, 2017.

4. WU, S. et al. A study of the behavior and effects of nitrogen take-up from protective gas shielding in laser welding of stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, Londres, v. 34, p. 477–485, 2018.
5. BOLUT, M. et al. Yb-fibre laser welding of 6 mm duplex stainless steel 2205. *Physics Procedia*, Vienna, v. 83, p. 417–425, 2016.
6. MUTHUPANDI, V. et al. Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (uns 31803) weld metals, *Materials Letters*, Amsterdam, v. 59, n. 18, p. 2305–2309, 2005.
7. SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis aisi 304l/316l. *REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 60, n. 1, p. 175–181, 2007.
8. LEITE, C. G. et al. Nd: YAG Pulsed Laser Dissimilar Welding of UNS S32750 Duplex with 316L Austenitic Stainless Steel. *Materials*, v.12, p.01-11, 2019.
9. JUNIOR, E. J. da C. et al. Effects of nickel addition on the microstructure of laser-welded uns s32750 duplex stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, New York, v. 50, 4, p. 1616–1618, 2019.

ADDITION OF GAMMAGENIC ELEMENTS IN THE WELDING OF UNS S32750 SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL WITH PULSED Nd:YAG LASER

ABSTRACT

Super duplex stainless steels have a two-phase microstructure, with approximately equal volumetric fractions of ferrite and austenite, giving them excellent mechanical properties and high corrosion resistance. The problem in laser welding of these steels is to obtain the fusion zone with a balanced microstructure, guaranteeing its properties and applications. In general, when welded with a high cooling rate process, such as laser welding, a mostly ferritic microstructure is obtained. To balance the microstructure, the addition of austenite stabilizing elements or heat treatments are indicated. Given the importance of phase balance to maintain the properties and applications of these steels, the present research studied the use of Watts bath as a way to promote the enrichment of the joint with a gammagenic element in the union of UNS S32750 steel by the Nd:YAG pulsed laser process and, consequently, form a microstructure with approximately equal volumetric fractions of ferrite and austenite. The faces of the UNS S32750 stainless steel butt joints were subjected to the Watts bath at different times, forming layers of gammagenic elements with different thicknesses. These joints were welded using a pulsed Nd:YAG laser. The microstructural characterization of the weld beads was performed using OM, SEM and EDS, and the volumetric fractions were obtained with the aid of graphic software. The results showed that the addition of nickel and cobalt in the fusion zone was efficient in correcting the undesirable microstructure imbalance resulting from Nd:YAG laser welding of the SDSS as the volumetric fractions of austenite increased, thus improving its corrosion resistance properties.

Keywords: *Laser welding, Nd:YAG, duplex steel, UNS S32750, microstructure.*