

## **Soldagem TIG autógeno em condições limítrofes de aporte térmico em chapas de aço Duplex SAF 2205 para aplicações em reparos de equipamentos industriais no setor Petróleo e Gás**

Bruno Carlos Amaral da Silva<sup>1</sup>; 0009-0006-2894-7249  
Nathan Souza Baêta<sup>1</sup>; 0009-0009-5566-7906  
Fábio Mazza Batista<sup>1</sup>; 0000-0002-1439-9177  
Sandro Rosa Corrêa<sup>2</sup>; 0000-0001-8973-2002  
Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira<sup>1</sup>; 0000-0002-6580-7687

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.  
[bruno.silva4@unifoa.edu.br](mailto:bruno.silva4@unifoa.edu.br)

2 – CEFET/RJ – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Itaguaí, RJ.

**Resumo:** A utilização de materiais com excelente resistência mecânica e corrosão tornam os aços Duplex uma boa escolha para aplicação na indústria do petróleo e gás, papel celulose e processos químicos. Esse material quando unido por processo de união por soldagem, é comum utilizar o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*). Entretanto, quando submetidos a ciclos de soldagem, surgem fases deletérias que comprometem a aplicação da junta soldada. Diante disto, este trabalho visa submeter amostras do aço Duplex SAF 2205 a diversos ciclos de soldagem em chapas com 2 mm de espessuras utilizadas em painéis industriais simulando a condição de reparo por soldagem. Amostras de aço foram submetidas a ciclos de soldagem utilizando o processo TIG autógeno com variação no aporte térmico introduzido através de passes de solda executados na chapa. Foi possível executar a soldagem com duas correntes, 55 A e 70 A, e para cada condição os seguintes números de passes: 2, 3, 5 e 7. Os resultados mostraram o surgimento de austenita secundária nos contornos de grãos em maior quantidade nas amostras com 5 e 7 passes e com maior corrente de soldagem.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas. Microestrutura. Aporte térmico.



## INTRODUÇÃO

A soldagem a arco com eletrodo não consumível de tungstênio e proteção gasosa (TIG - *Tungsten Inert Gas*) é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e consequente fusão destas, através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e as peças a unir (Paulraj; Garg, 2016).

O aporte térmico representa a intensidade de calor entregue por unidade de comprimento durante a soldagem, e é expressa em J/mm. Ele relaciona a potência da fonte de energia em watts (J/s), definida pelo produto entre a tensão ( $U$ ) e a corrente elétrica ( $I$ ), com a velocidade de deslocamento da fonte de calor ( $v$ ), dada em (mm/s) e um fator de eficiência térmica da soldagem ( $\eta$ ), conforme Equação (1) (Silva *et al.*, 2020).

$$H = \eta(UI/v) \quad (\text{Eq. 1})$$

Os aços duplex são materiais que possuem excelente resistência mecânica e elevada resistência a corrosão em meios agressivos, fatores que contribuem para o seu emprego em larga escala nas indústrias de petróleo e gás, papel e celulose e processos químicos.

Os aços duplex SAF 2205 são ligas baseadas no sistema ferro-cromo-níquel-nitrogênio, possuem baixo carbono e adições também de molibdênio e cobre resultando em uma mistura aproximada de fases, 50% de austenita e 50% de ferrita na microestrutura. Elementos químicos destes aços, por exemplo, o cromo e o molibdênio, favorecem a formação de ferrita ( $\alpha$ ) e são chamados de alfa-gênicos; os elementos que promovem a formação de austenita ( $\gamma$ ), níquel, nitrogênio, são chamados de gama-gênicos. A faixa de cromo nos aços duplex varia de 20,1% até 25,4%, enquanto o níquel está entre 1,4 e 7,0% (Pereira, 2014).

Em muitas aplicações o processo de soldagem é utilizado, sendo realizados ciclos térmicos no material durante o processo, que geram modificações estruturais. Se o processo não for devidamente controlado podem ocorrer severas modificações da microestrutura característica do material e ainda causar precipitação de fases intermetálicas, que são danosas para as propriedades mecânicas e de resistência a corrosão dos aços duplex (Polinski, 2017).



A faixa de aporte térmico possível de ser aplicada nesses materiais é relativamente ampla, varia de 0,5 kJ/mm até 2,5 kJ/mm. Entretanto, o uso de um menor aporte térmico pode levar ao excesso de ferrita formada e conseqüentemente possibilidade de formação de nitretos de cromo no interior dos seus grãos, o que pode prejudicar propriedades mecânicas e resistência à corrosão. E um maior aporte térmico diminui a taxa de resfriamento, facilitando a formação da austenita, mas também aumentando as chances de formação da fase sigma, ou outras fases intermetálicas (Silva *et al.*, 2020).

As normas de soldagem limitam a execução de no máximo dois reparos na junta soldada e este trabalho visa a extrapolação das condições limítrofes de aporte térmico e verificar o que acontece com a microestrutura após sofrer vários ciclos de soldagem.

## MÉTODOS

O material utilizado foi o aço duplex SAF 2205, fornecido pela empresa Aperam, em chapas com dimensões de 200 mm de largura, 230 mm de comprimento e 2 mm de espessura.

A soldagem foi realizada utilizando o equipamento de soldagem modelo MIGPulse Sinérgico 4000R fabricado pela empresa Castolin/Eutectic com sistema automatizado de movimentação da tocha, Figura 1.

Figura 1 - Equipamento de soldagem TIG utilizado para soldagem e o sistema automatizado



Fonte: Os autores (2025)

O processo utilizado para a soldagem das chapas foi o TIG autógeno, no qual se realizou passes de solda sobre as chapas na posição plana, fornecendo o aporte térmico desejado. Foram produzidos ao todo oito chapas, variando-se a quantidade de passes de solda e o aporte térmico. Foram realizados testes para determinar a quantidade máxima de passes



que a chapa suportará sem deformar excessivamente e o máximo conseguido foi 7 passes. Utilizou-se nesse trabalho corpos de prova com 2, 3, 5 e 7 passes de solda.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de soldagem utilizados.

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Valores
Diâmetro do eletrodo	3,20 mm
Velocidade de soldagem	3,5 mm/s
Rendimento ( $\eta$ )	80%
Gás	Argônio
Vazão do gás	18 L/min
Comprimento do arco	1,0 mm
Corrente ( $I$ )	55 A e 70 A
Tensão ( $U$ )	11,4 V
Posição da tocha	90°

Fonte: Os autores (2025)

Foi utilizado câmera FLIR para medição da temperatura interpasse não ultrapassasse 150 °C.

A caracterização metalográfica consistiu na análise qualitativa por microscopia ótica de uma amostra retirada da seção transversal à solda de cada amostra soldada.

O ataque químico foi realizado com solução de Behara modificada composto por uma solução de 100 mL de água destilada, 20 mL de ácido clorídrico e 0,45 g de metabissulfito de potássio por 3 minutos. Para obtenção das micrografias óticas, foi utilizado o microscópio óptico marca Opton, modelo TNM-07T-PL e caracterizado a fase escura como ferrita e a clara como austenita.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos aportes térmicos e observa-se um aumento em função da quantidade de passes e em relação a corrente de soldagem. Mesmo assim, os valores utilizados encontram-se dentro da faixa de aporte térmico para este material, 0,5

a 2,5 kJ/mm (Santos *et al.*, 2007).

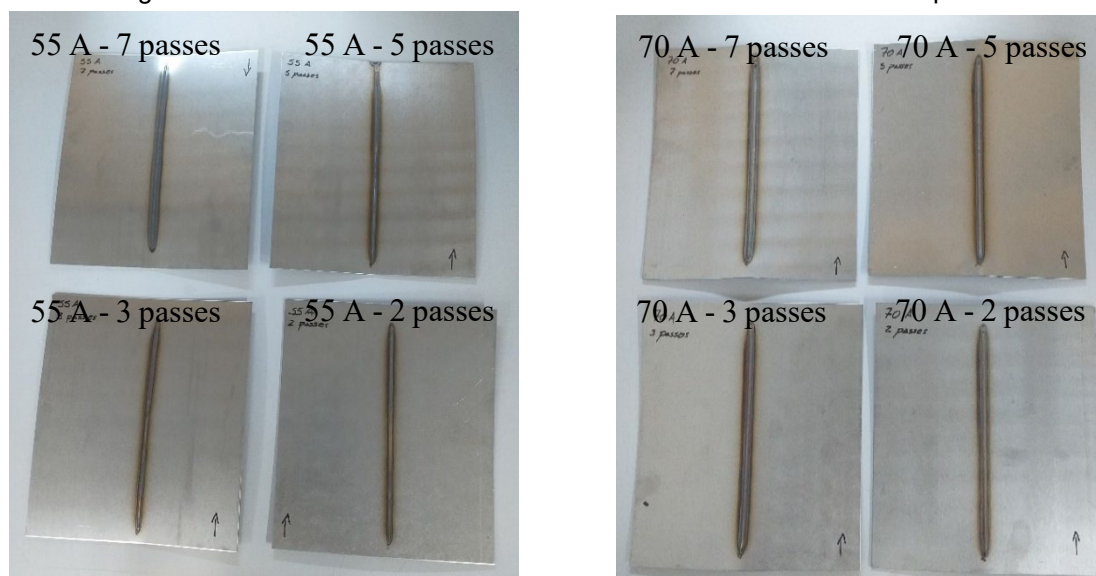
Tabela 2 – Aporte térmico de soldagem

Amostra	Corrente (A)	Voltagem (V)	Aporte térmico (kJ/mm)
5.2	55	11,4	0,29
5.3	55	11,4	0,43
5.5	55	11,4	0,72
5.7	55	11,4	1,00
7.2	70	11,4	0,36
7.3	70	11,4	0,55
7.5	70	11,4	0,91
7.7	70	11,4	1,28

Fonte: Os autores (2025)

Na Figura 2 são apresentadas as chapas soldadas onde é possível observar o efeito do aporte térmico aplicado na amostra em função dos números de passes. Nota-se um aumento da região aquecida em função do aporte térmico.

Figura 2 – Amostras soldadas com corrente de 55 A e 70 A – face superior



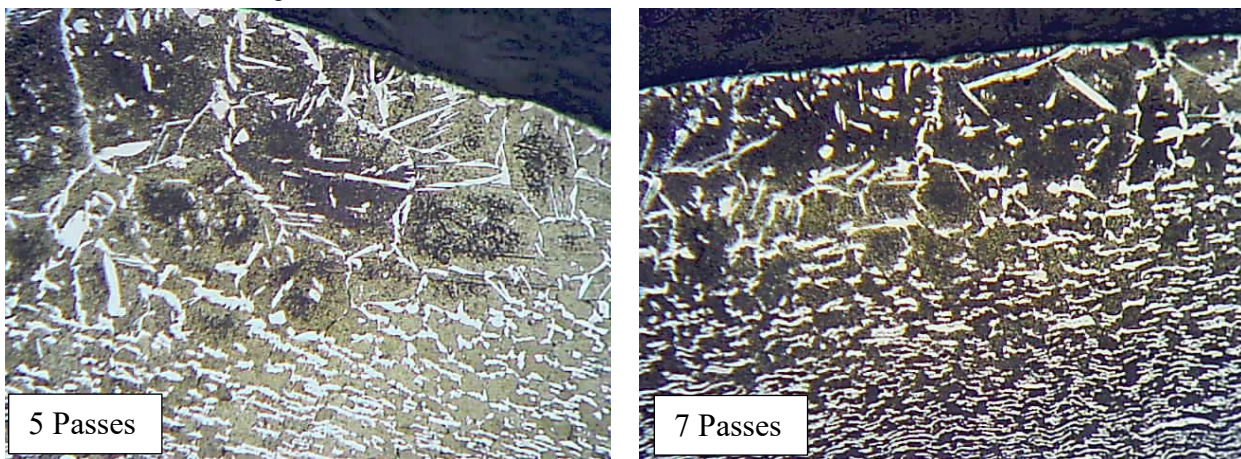
Fonte: Os autores (2025)

Nas Figuras 3 e 4, observa-se as micrografias das amostras com corrente de 55 e 70 amperes e com 5 e 7 passes que apresentaram maior a variação microestrutural.



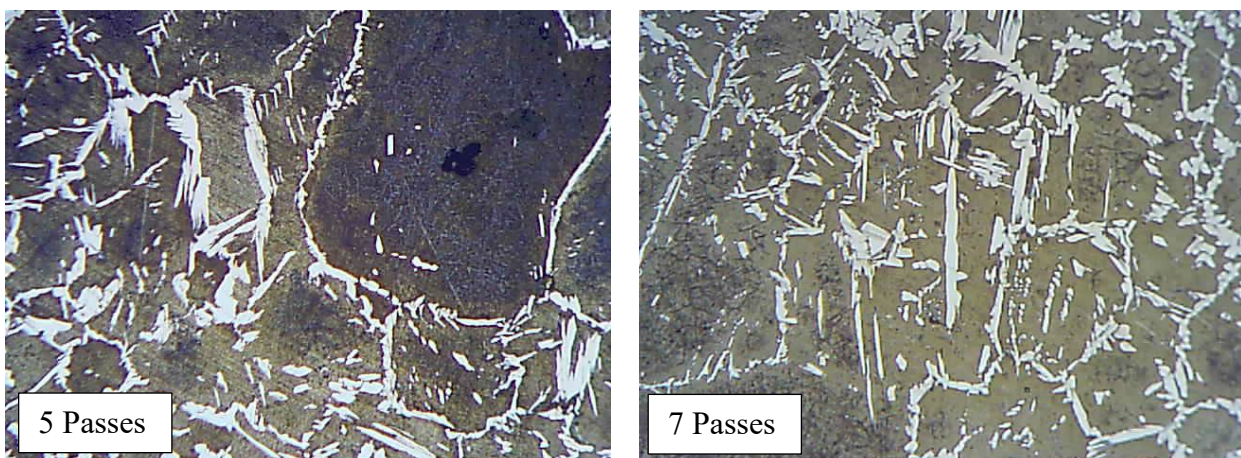
O reaquecimento através de passes de soldagem ocasionou a formação de austenita secundária formada nos contornos de grãos ferríticos. Sendo que a presença de resfriamento lentos podem formar precipitados intermetálicos indesejáveis nessa região, o que requer uma análise com outras técnicas de microscopia (Santos *et al.*, 2007). Foi observado a presença de austenita Widmanstätten em maior quantidade nas amostras com 5 e 7 passes e corrente de 70 A como encontrado por Vasconcellos (Vasconcellos; Rosenthal; Paranhos, 2010).

Figura 3 – Amostras soldadas com corrente 55 A – aumento 200X



Fonte: Os autores (2025)

Figura 4 – Amostras soldadas com corrente 70 A – aumento 200X



Fonte: Os autores (2025)

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo evidenciam que a soldagem TIG autógena

aplicada ao aço duplex SAF 2205, sob diferentes condições de aporte térmico, apresentou comportamento microestrutural coerente com os limites esperados para este material. A variação da intensidade de corrente e do número de passes demonstrou influência direta na formação de fases secundárias, notadamente a austenita nos contornos de grão, em especial quando submetidas a maiores aportes térmicos.

A análise metalográfica revelou que, embora os parâmetros utilizados tenham permanecido dentro da faixa recomendada pela literatura, a repetição dos ciclos de aquecimento ocasionou modificações significativas na microestrutura, como a presença mais acentuada de austenita Widmanstätten nas condições de 70 A e maior número de passes. Esses resultados confirmam a sensibilidade do aço duplex SAF 2205 à variação térmica e reforçam a necessidade de rigoroso controle dos parâmetros de soldagem em situações de reparo, visando preservar tanto a integridade microestrutural quanto as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão.

Portanto, conclui-se que a extrapolação dos limites operacionais de soldagem, embora viável tecnicamente, deve ser conduzida com cautela. A formação de fases indesejáveis pode comprometer a confiabilidade da junta soldada em aplicações críticas, como no setor de petróleo e gás. Assim, este trabalho contribui para a compreensão dos efeitos do aporte térmico em condições extremas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de práticas de soldagem mais seguras e eficazes para os aços duplex em cenários industriais desafiadores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FOA e ao CNPq pela bolsa PIBITI/CNPq.

## REFERÊNCIAS

PAULRAJ, P.; GARG, R. Effect of welding parameters on pitting behavior of GTAW of DSS and super DSS weldments. **Engineering Science and Technology, an International Journal**. 2016, v. 19, Issue 2, June 2016, Pages 1076-1083. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.01.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098615301567#bib0020>. Acesso em: 20 out. 2022.

PEREIRA, G. B. H. **Influência do grau de deformação na cinética de precipitação de fases intermetálicas dos aços inoxidáveis Duplex UNS S31803 e Lean Duplex UNS**

**S32304.** 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica). Curso de Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/14249/1/monopoli10009993.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2022.

POLINSKI, E. L. **Influência da energia de soldagem na resistência à corrosão por pites do aço inoxidável Duplex SAF 2205.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/165210/001044515.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SANTOS, N. B.; NUNES, F. C.; MATOS, T. F.; SALUSTIANO, A. Z.; MOTA, R. O. **Aços inoxidáveis duplex e superduplex: aspectos de metalurgia física, soldagem e corrosão**, p. 1088-1097. In: *62º Congresso anual da ABM*, Vitória, 2007. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/2594-5327-0121. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/aos-inoxidveis-duplex-e-superduplex-aspectos-de-metalurgia-fsica-soldagem-e-corroso>. Acesso em 20 set. 2024

SILVA, R. S. *et al.* Influência do Aporte Térmico sobre as Características e Propriedades de Cordões de Solda dos Aços AISI 316 e AISI 316L. **Soldagem & Inspeção [online]**. 2020, v. 25, e2504. ISSN 1980-6973. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/S125.04>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/Z7fPkjJtqQ4DyLjSbQQmFpC/?lang=pt#>. Acesso em: 20 out. 2022.

VASCONCELLOS, P. I. G.; ROSENTHAL, R., PARANHOS, R. P. R. (2010). Estudo da soldagem de tubos de aço inoxidável duplex e superduplex na posição 5G. **Soldagem & Inspeção**, 2010. v15(3), 191-199. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000300005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/mcc6QCFv4bwf55kJhX6YZ6N/?lang=pt#>. Acesso em 20 ago. 2024