

## PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX PELO PROCESSO TIG ORBITAL

Nandara da Silva Alves, [nandarasalves@gmail.com](mailto:nandarasalves@gmail.com)<sup>1</sup>  
Bruno da Silva de Paiva, [bruno0paiva22@gmail.com](mailto:bruno0paiva22@gmail.com)<sup>1</sup>  
Marília Garcia Diniz, [mgarciadiniz@gmail.com](mailto:mgarciadiniz@gmail.com)<sup>2</sup>  
André Rocha Pimenta, [andre.pimenta@ifrj.edu.br](mailto:andre.pimenta@ifrj.edu.br)<sup>1-2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Instrumentação e Simulação Computacional – LISCOMP, Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Rua Sebastião Lacerda, s/nº, centro, Paracambi - RJ, Brasil

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPG-EM, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rua Fonseca Teles, 121, São Cristovão, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

**Resumo.** Os aços inoxidáveis duplex e superduplex são muito utilizados em indústrias químicas, de celulose, de petróleo e gás natural, dentre outras, contudo, em algumas situações de corrosão mais agressiva, sua aplicação não é indicada. Para atender esta demanda, o aço hiperduplex, que é relativamente novo na indústria, e tem como propriedade uma resistência melhor do que a das gerações anteriores, foi inserido no mercado. O objetivo deste projeto é estudar o comportamento do aço hiperduplex à soldagem TIG autógena e avaliar os melhores parâmetros de frequência e corrente de soldagem. Os resultados indicam uma forte influência da corrente de soldagem na geometria dos grãos e na fração volumétrica da fase austenita.

**Palavras-chave:** Aços inoxidáveis duplex. TIG. Aços Hiperduplex.

**Abstract.** Duplex and superduplex stainless steels are widely used in chemical, cellulose, oil, and natural gas industries. However, their application is not indicated in some situations of more aggressive corrosion. To meet this demand, hyperduplex steel, which is relatively new to the industry and has better strength than previous generations, was introduced onto the market. This project aims to study the behavior of hyperduplex steel to autogenous TIG welding and to evaluate the best parameters of frequency and welding current. The results indicate a strong influence of welding current on the geometry of the grains and the volumetric fraction of the austenite phase.

**Keywords:** Duplex stainless steels. TIG. Hyperduplex steel.

### 1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex possuem grande aplicação nas indústrias químicas, de celulose, petróleo e gás, dentre outras. É considerado um material de alta resistência mecânica e à corrosão, devido a sua microestrutura bifásica, composta por ferrita e austenita na proporção 1:1, como representado na Fig. 1. A utilização do aço é limitada quando em ambientes sujeitos a uma corrosão química extremamente agressiva, assim como, quando submetidos a cloreto férrico, ácido sulfúrico ou ácido clorídrico (Souza, 2020). O aço hiperduplex, tem como principal propriedade sua alta resistência a corrosão, e assim como o duplex, também é composto por fases ferrita-austenita e livre de fases secundárias (Villa Lobos-Vera; Mendoza-Bravo, 2019). O seu diferencial é a sua alta resistência a corrosão, pois possuem uma maior quantidade de elementos de ligas, diferente das gerações anteriores (Kumar et al., 2020). A resistência à corrosão localizada nessas ligas geralmente é classificada usando o PREN (Pitting Resistance Equivalent number). O PREN é calculado utilizando a Eq. 1 (Tavares et al., 2017), que consideram os teores dos elementos de liga Cr, Mo, N e W. As ligas que contêm PREN até 40 são denominadas aço duplex, acima de 40 aço super duplex, e acima de 49 é de um aço hiperduplex (Tavares et al., 2010).

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3(\%Mo + (0,5\%W)) + 16(\%N) \quad (1)$$

O setor de óleo e gás é um dos mais importantes da economia e indústria mundial, pois contribui para a geração de divisas com sua exportação, empregos de alta qualificação e produtividade, e arrecadação de tributos nas esferas municipal, estadual e federal, além de, alimentar as principais matrizes energéticas. A produção de petróleo para o Rio de

Janeiro é primordial, pois a instalação de diversas empresas em áreas marítimas, é seguida pela geração de milhares de empregos. O estado é responsável por 60% da produção nacional, além de 98,8% da produção de petróleo no Brasil, segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2013), por este motivo o setor extrativo mineral corresponde a 15% do PIB do estado.

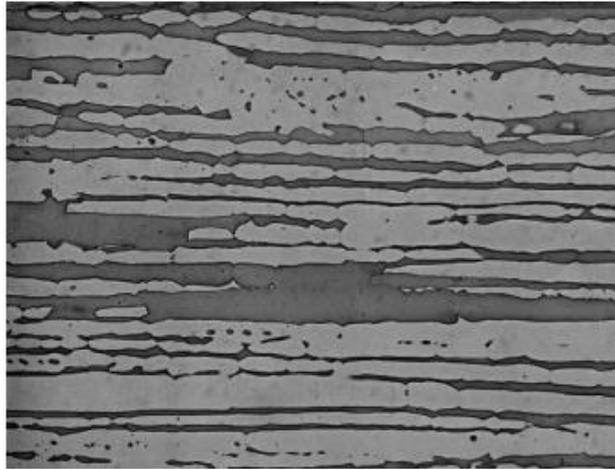


Figura 01: Microestrutura típica de aços inoxidáveis duplex. (Revie e Uhlig, 2008)

A manufatura TIG é um processo de soldagem a arco que utiliza um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem, no caso da soldagem TIG autógena não é utilizado o metal de adição (ASM, 1993). Quando os aços inoxidáveis duplex são expostos à processo de soldagem pode-se ocorrer o desequilíbrio nas proporções de ferrita e austenita, assim como também a precipitação de fases deletérias, nitretos ou carbonetos, prejudicando o desempenho desses materiais, além de possíveis alterações nas propriedades de dureza, tenacidade e resistência à corrosão (Pimenta et al., 2020).

A avaliação da soldabilidade é importante para os aços inoxidáveis duplex (Hosseini, et al., 2021), pois avalia os efeitos do processo de soldagem nas propriedades do material, assim como no aparecimento de defeitos e descontinuidades, tais como, trincas, falta ou excesso de penetração e forma da poça de fusão. É possível que ocorram falhas, assim como o desenvolvimento de fases sigmas, o que torna o material duro e frágil (Shuxin, 2020). Como também pode ocorrer uma erosão-corrosão ocasionado por uma corrosão eletroquímica (Tian, et al., 2019).

O propósito deste trabalho foi investigar os efeitos dos parâmetros de soldagem do processo TIG autógeno na microestrutura do aço inoxidável hiperduplex. Foram investigadas a variação da frequência do arco pulsado e a corrente de soldagem. Para isso, a microestrutura da zona de fusão e do metal de base, foram investigadas utilizando microscopia eletrônica de varredura.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

O material utilizado no presente trabalho foi o aço inoxidável duplex UNS S32707, identificado pela Unified Numbering System (UNS), fabricado e comercializado pela Alleima, sob o nome comercial: SAF 2707HD®. A Tab. 1 apresenta a composição química esperada para o material, conforme a ficha do fabricante, e a composição do lote da amostra utilizada neste estudo, conforme dados do certificado de rastreabilidade. A matéria prima foi fornecida na forma de tubos sem costura, no estado recozido, com o diâmetro externo de 19,05 mm e espessura de 2,24 mm.

Segundo as informações do fabricante, o material deve apresentar uma microestrutura formada por austenita e ferrita, limite de resistência variando entre 920 a 1100 MPa, alongamento mínimo de 25% e dureza de 34 HRC (Alleima, 2022).

### 2.2 Soldagem

A primeira etapa do projeto foi a soldagem dos corpos de prova de aços inoxidáveis hiperduplex. O presente estudo utilizou processo de soldagem TIG autógeno (sem metal de adição). A escolha desse processo foi realizada com o objetivo de simular uma soldagem de selagem para tubos de trocadores de calor. A solda foi realizada no sentido transversal do tubo de forma automatizada. A operação de soldagem foi realizada utilizando os seguintes parâmetros: arco pulsado; corrente de base igual a 60% do valor da corrente de pico; corrente de pico e corrente de base com 50% do tempo cada; gás de proteção Ar + 2,5% N com vazão de 13 L/min; eletrodo AWS classe EWTH-2 com 2,4 mm; ponta do eletrodo com 37°; bocal de soldagem #5. Durante o experimento a frequência do arco pulsado e a corrente de soldagem foram

variadas de acordo com a Tab. 2. Os parâmetros foram baseados em um procedimento de soldagem já utilizado na indústria e qualificado para aços super duplex.

Tabela 1 – Composição química do aço UNS S32707

Elemento	Composição química (% em peso)	
	Padrão (Alleima, 2022)	Amostra do projeto
C	Máximo 0,030	0,019
Si	Máximo 0,5	0,22
Mn	Máximo 1,5	0,92
P	Máximo 0,035	0,013
S	Máximo 0,010	0,001
Cr	27	26,68
Ni	6,5	6,37
Mo	4,8	4,77
N	0,4	0,38
Co	1,0	0,96

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem

Amostra	A	B	C	D
Intensidade da corrente de pico (I)	30 A	40 A	40 A	50 A
Frequência do arco	2000 Hz	200 Hz	2000 Hz	2000 Hz

### 2.3 Preparação Metalográfica

Para avaliar a microestrutura resultante do processo de soldagem, amostras foram retiradas no sentido transversal da junta soldada utilizando equipamento de corte metalográfico de precisão modelo Mecatome T/80 da marca Premsi. Os corpos de prova foram preparados em uma prensa de embutimento no modelo PRE-30Mi da marca Arotec, utilizando a resina a cura quente Polyfast da marca Struers, a qual é condutora, portanto, ocorrerá um fácil manuseio na etapa posterior, quando da caracterização em Microscópio Eletrônico de Varredura. A etapa de lixamento utilizou lixas de 220 a 1200 mesh, e o polimento, pasta de diamante de 3 e 1  $\mu\text{m}$  em uma Politriz metalográfica modelo Aropol 2V da marca Arotec.

### 2.4 Microscopia eletrônica de varredura

A caracterização da microestrutura dos corpos de prova foi realizada por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). As imagens em MEV com ampliação variando de 200x a 1000x, foram obtidas com as amostras apenas polidas, ou seja, sem ataque químico, em um MEV marca Hitachi, modelo TM3000, operando em 5kV em modo Elétrons Retroespalhados (BSE). A caracterização teve como objetivo de revelar as fases presentes, bem como a geometria dos grãos, além da possível identificação do surgimento de fases deletérias.

Após análise em MEV, as imagens passaram por uma quantificação da fração volumétrica das fases austenita e ferrita, utilizando duas metodologias. A primeira segundo o método ASTM E112 (2021); e a segunda, utilizando a técnica de processamento digital de imagem (Gonzales e Woods, 2017; Paciornik e Mauricio, 2004), com auxílio do software ImageJ (ImageJ, 2022).

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Aspectos microscópicos

A Figura 2 apresenta a microestrutura observada no metal de base (MB) das amostras estudadas. As imagens foram obtidas por microscopia de varredura eletrônica, sem ataque químico, operando em modo BSE. Observa-se uma estrutura

formada por lamelas alternadas das fases de ferrita e austenita, típicas do processo de laminação. É possível observar que o metal de base possui um grão muito refinado, fator que contribui para a alta resistência mecânica apresentada pelos aços inoxidáveis hiperduplex. A fase ferrita apresenta coloração mais escura, enquanto a austenita, mais clara. Quando operando em modo BSE o MEV atribui coloração mais escura às regiões com presença de elementos químicos de menor peso atômico (Goldstein, et al., 2018).

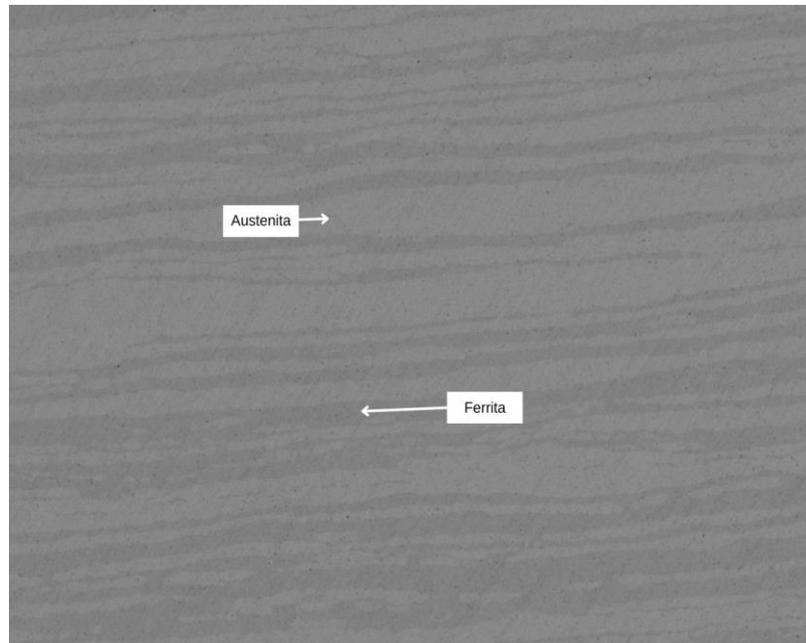


Figura 2: Microscopia do metal de base; MEV-BSE; sem ataque químico; 1.000X.

A Fig. 3 apresenta as micrografias da ZTA para as quatro condições estudadas utilizando MEV com aumento de 300x. Para todas as amostras testadas, a ZTA apresentou similaridade microestrutural, se caracterizando por uma alteração no formato dos grãos de austenita, que tendem a crescer para dentro das lamelas de ferrita. Assim como esperado, observa-se que o aumento da corrente de soldagem, e, portanto, do aporte térmico, provocou um aumento no tamanho da ZTA. A alteração na frequência do arco pulsado, Fig. 3b e 3c parece não ter afetado significativamente a ZTA.

Não foram identificadas a presença de fases deletérias na ZTA. Caso houvesse, as fases sigma e chi apareceriam com tonalidade bem mais clara, comparativamente às fases ferrita e austenita, já que tem uma maior quantidade de Mo, elemento de alto peso atômico (Marques e Santos, 2016). É importante verificar da existência de fases deletérias na zona termicamente afetada, pois as condições desta região oferecem meios propícios à formação das fases sigmas e chi, que se formam a partir da ferrita, geralmente quando o material é exposto a altas temperaturas.

A zona de fusão para as 4 condições está representada na Fig. 4, representada em 500x. A zona fundida é formada por grãos equiaxiais de ferrita com a austenita preferencialmente no contorno de grão, contudo, alguma presença de austenita no interior dos grãos ferríticos também é observada. O aumento da corrente de soldagem e a diminuição da frequência do arco provocam a formação de austenita nos contornos de grão com maiores espessuras. Na amostra com maior corrente de soldagem, 50A, esse efeito pode ser atribuído ao maior aporte térmico fornecido, favorecendo a formação de austenita. Já na amostra com menor frequência, a menor agitação da poça de fusão provavelmente propiciou uma taxa de resfriamento mais lenta, também favorecendo a formação de austenita. Destaca-se também que a soldagem com arco não pulsado resulta em grãos colunares, como observado por Wang, et al., (2006). Contudo, a utilização de 200 Hz já foi suficiente para evitar este efeito indesejável.

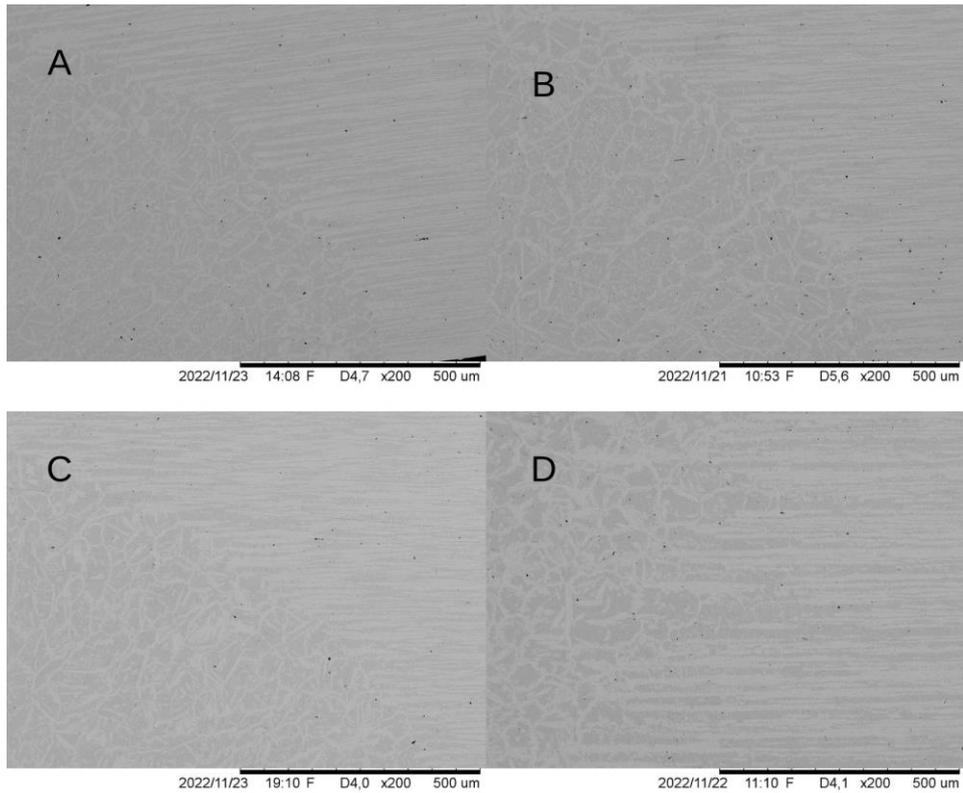


Figura 3: Micrografias da ZTA das 4 condições, 200x.

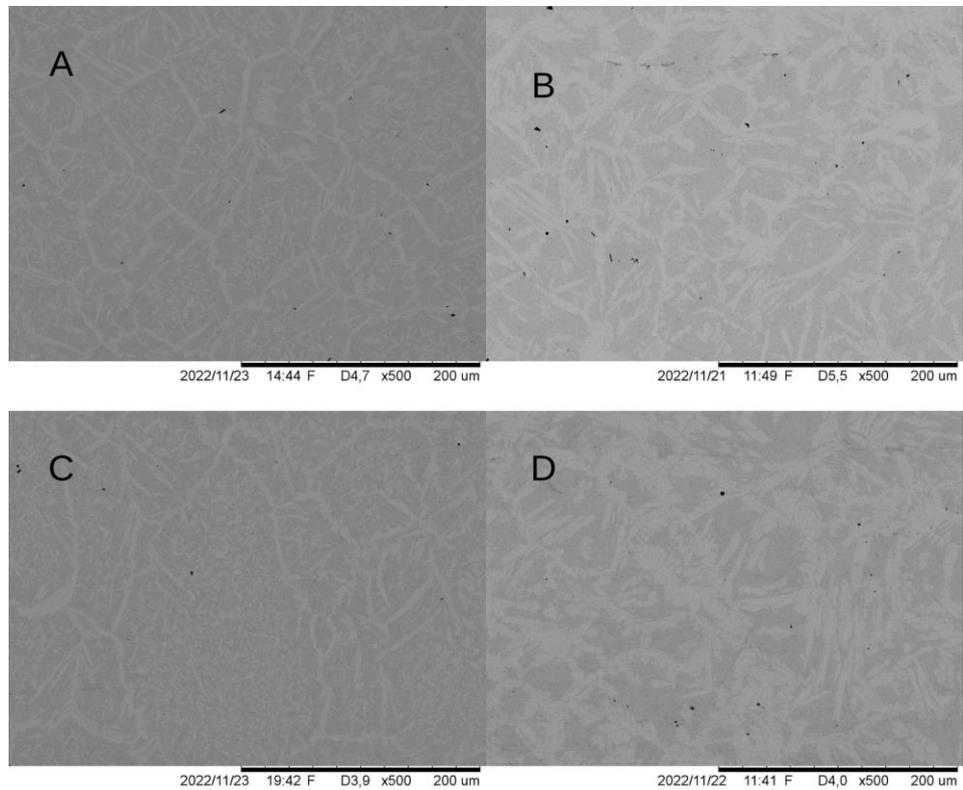


Figura 4: – Micrografias da zona de fusão. MEV operando em modo BSE, sem ataque, 500x. Austenita apresentando coloração clara e ferrita em um tom cinza um pouco escuro.

### 3.2. Quantificação da fração volumétrica

A Tabela 3 apresenta as frações volumétricas medidas pelas técnicas de Processamento Digital de Imagem e pela norma ASTM E112 para as amostras A, B, C e D.

Tabela 3 – Média da fração volumétrica de austenita das imagens analisadas

	Amostra	Fração volumétrica média das imagens (%)	
		ASTM E112 (2021)	ImageJ
Metal de base		54,25	50,14
ZONA DE FUSÃO	A	41,65	33,16
	B	44,21	38,21
	C	49,25	39,78
	D	53,63	47,75

É notório que na zona de fusão, houve uma queda no percentual de fração volumétrica de austenita, assim predominando a ferrita. Primeiramente, podemos observar a amostra A, houve uma queda de mais de 10% na fração volumétrica, este fato é atribuído ao menor aporte térmico da amostra soldada com 30A. É nítido que o aumento da corrente de soldagem acarretou um aumento na fração volumétrica da austenita. A amostra soldada com 50A ficou próximo ao encontrado no metal de base.

Acerca da frequência de soldagem aparentemente a mudança de 2000Hz para 200 Hz não afetou a fração volumétrica das fases presentes, como pode ser observado nos resultados de quantificação utilizando o ImageJ. Contudo, os resultados obtidos pela norma ASTM E112 apontam para um pequeno decréscimo na quantidade de austenita. Por outro lado, a distribuição da austenita foi drasticamente modificada (Fig. 4). Enquanto a amostra soldada com 2000 Hz apresentou austenita com pequenas dimensões nos contornos de grão da ferrita e uma grande quantidade de austenita secundária no interior dos grãos de ferrita, a amostra soldada com 200 Hz apresentou pouca formação de austenita no interior dos grãos de ferrita, e a austenita localizada nos contornos possuía maiores dimensões.

### 4. CONCLUSÃO

Os ensaios realizados no aço hiperduplex utilizando soldagem TIG autógena com diferentes frequências de arco pulsado e diferentes correntes de soldagem permitiu concluir que:

- O aumento da corrente de soldagem favorece a formação de austenita na zona de fusão, atingindo valores próximos ao encontrado para o metal de base quando utilizando-se 50A e valores próximo ao ideal apontado pela literatura quando utilizado 40A.

### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os suportes financeiros concedidos pelos projetos FAPERJ (E-26/211.412/2021) e IFRJ (Edital PIBIC - Prociencia 2022). E as bolsas de Iniciação Científica concedidas pela FAPERJ (E26-205.306/2022) e pela Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas ABCM (Edital PABIC 2022).

### 6. REFERÊNCIAS

- Alleima, 2022. “Folha de dados do aço SAF™ 2707 HD”. 20, Dez. 2022. <<https://www.alleima.com/en/technical-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/saf-2707-hd/>>
- ANP, 2013. “Anuário estatístico da ANP”. 20 Dez. 2022 <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2013/versao-impressao.pdf>>
- ASM, 1993. *Handbook volume 6: welding, brazing, and soldering*, ASM International, Ohio.
- ASTM, 2021. *Standard test methods for determining average grain size*. ASTM International.
- Kumar, S., Krisam, S., Jacob, A., Kiraly, F., Keplinger, A., Abart, R. e Povoden-Karadeniz, E., 2020. “Microstructures and element distributions in an aged hyper duplex stainless steel and corresponding hardness variation”. *Materials & Design*, Vol. 194, p. 108951.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J. e Joy, D.C., 2018. *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis*. 2018. New York, NY: Springer, New York, 4ª edição.
- Gonzales, R.C. e Woods, R.E., 2017. *Digital image processing*. 2017. London: Pearson, 4ª edição.
- Hosseini, V.A., Thuvander, M., Lindgren, K., Oliver, J., Folkesson, N., Gonzalez, D. e Karlsson, L., 2021. “Fe and Cr phase separation in super and hyper duplex stainless steel plates and welds after very short aging times”. *Materials & Design*, Vol. 210, n. 15, p. 110055.
- ImageJ, 202. “Programa de processamento digital de imagem”. 19 Jun. 2022 <<https://imagej.nih.gov/ij/index.html>>

- Marques, I.J. e Santos, T.F.A., 2016. Cinética de precipitação de fases intermetálicas deletérias em aços inoxidáveis duplex UNS S32205. In *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - 22o CBECIMAT*. Recife, Brazil.
- Paciomik, S. e Mauricio, M.H.P., 2004. Digital Imaging. In: ASM, ASM handbook vol9 Metallography and microstructures. Ohio: ASM International.
- Pimenta, A.R., Diniz, M.G., Perez, G. e Solórzano-Naranjo, I.G., 2020. “Nitrogen addition to the shielding gas for welding hyper-duplex stainless steel”. *Soldagem & Inspeção*, Vol. 25, p. E2512.
- Revie, R.W. e Uhlig, H.H., 2008. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons, New Jersey, 4º edição.
- Shuxin, Z., 2020. “Failure analysis on tee pipe of duplex stainless in an oilfield”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 115, p. 104676.
- Souza, L.M., 2020. *Estrutura, propriedades e caracterização do aço inoxidável duplex s31803 submetido aos meios corrosivos de ácido clorídrico, cloreto férrico e ácido sulfúrico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.
- Tavares, S.S.M., et al. “Influence of Microstructure on the Corrosion Resistance of AISI 317L (UNS S31703)”. *Materials Research* [online]. 2017, v. 20, n. Suppl 2
- Tavares, S.S.M., Pardal, J.M., Ponzio, E., Loureiro, A. e de Souza, J.A., 2010. “Influence of microstructure on the corrosion resistance of hyperduplex stainless steel”. *Materials and Corrosion*, Vol. 61, n. 4, p. 313–317.
- Tian, J., Wang, L., Sun, W., Yang, Y., Liu, Z., Wang, G., Zhao, L., Zhou, Y. e Liu, G., 2019. “Failure analysis of steam jet pump at top of crude oil vacuum distillation tower”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 103, p. 9–19.
- Villalobos-Vera, D.I. e Mendoza-Bravo, I., 2019. “Effect of annealing temperature on the microstructure of hyperduplex stainless steels”. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. 20, n. (2), p. 1–6.
- Wang, S.H, Chiu, P.K., Yang, J.R. e Fang, J., 2006. Gamma phase transformation in pulsed GTAW weld metal of duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 420, p. 26-33.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.