

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIELA PEREIRA LEMOS

**EFEITO DO PRAQUECIMENTO DO METAL BASE NA MICROESTRUTURA,
PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA A CORROSÃO NO PROCESSO
GTAW DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S 32750**

Ilha Solteira - SP
2024



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIELA PEREIRA LEMOS

**EFEITO DO PRAQUECIMENTO DO METAL BASE NA MICROESTRUTURA,
PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA A CORROSÃO NO PROCESSO
GTAW DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S 32750**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eli Jorge da Cruz Junior

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L557e Lemos, Gabriela Pereira.
Efeito do preaquecimento do metal base na microestrutura, propriedades mecânicas e resistência a corrosão no processo GTAW do Aço Inoxidável Super Duplex UNS S 32750 / Gabriela Pereira Lemos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
38 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2024

Orientador: Eli Jorge da Cruz Junior

Inclui bibliografia

1. Aço Inoxidável Super Duplex. 2. Soldagem. 3. Balanceamento de fases.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITO DO PREAQUECIMENTO DO METAL BASE NA MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES MECÂNICAS E RESISTÊNCIA A CORROSÃO NO PROCESSO GTAW DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750

AUTORA: GABRIELA PEREIRA LEMOS

ORIENTADOR: ELI JORGE DA CRUZ JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em null, área: Materiais e Processos de Fabricação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ELI JORGE DA CRUZ JUNIOR (Participação Virtual)
Campus Itapetininga / Instituto Federal de São Paulo - IFSP



Documento assinado digitalmente

ELI JORGE DA CRUZ JUNIOR

Data: 30/07/2024 17:26:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Instituto Federal de São Paulo - IFSP



Documento assinado digitalmente

FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM

Data: 30/07/2024 17:10:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PEDRO ROBERTO GOULART (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Instituto Federal de São Paulo - IFSP



Documento assinado digitalmente

PEDRO ROBERTO GOULART

Data: 30/07/2024 17:19:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 30 de julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por permitir e me dar condições de participar do programa. Agradeço ao meu orientador Profº Drº Eli Jorge da Cruz Junior por todo apoio, incentivo e dedicação ao meu trabalho desde o início do programa, e até quando ainda participava como aluna especial.

Aos meus pais, familiares e em especial ao meu primo Matheus Viana de Souza que me apresentou o programa, me incentivou e me apoiou em toda a trajetória.

À UNESP, aos funcionários e professores do departamento de Engenharia Mecânica por suas contribuições durante a disciplina de Estudos Especiais e Regulares, principalmente no período de pandemia covid 19.

Ao Profº Drº Sérgio Augusto Mello da Silva do departamento de Engenharia Civil da UNESP que me acolheu nos estudos especiais e me ajudou, no dia da prova de proficiência em língua estrangeira, a chegar no campus para realização da prova.

RESUMO

Os aços inoxidáveis são caracterizados por sua resistência a corrosão. Dentre as famílias dos aços inox destacam-se aços inoxidáveis super duplex (AISD), os quais possuem uma microestrutura bifásica com proporções iguais de austenita e ferrita, o que lhes confere excelente resistência mecânica e resistência à corrosão em relação aos aços inoxidáveis austeníticos. Entretanto, nos processos de soldagem, dependendo de como são selecionados os parâmetros, o AISD sofre alteração em sua microestrutura, resultando em um desbalanceamento dessas fases, comprometendo sua resistência mecânica e a corrosão. O presente trabalho estudou efeito do preaquecimento do metal base na soldagem de arco tungstênio à gás (GTAW) de aço inoxidável super duplex UNS S 32750 e como o tratamento pode ser utilizado como alternativa para correção da microestrutura resultante. Quatro situações foram avaliadas (sem preaquecimento e com aquecimento a 100°C, 200°C e 300°C). Foram fixados os parâmetros de soldagem com base em pré-testes para termos um referencial entre as duas condições, com e sem preaquecimento, a fim de se concentrar na influência do preaquecimento na microestrutura. O preaquecimento do material base alterou a microestrutura, aumentando as frações volumétricas da austenita de 15,8% na condição sem preaquecimento para 42,4% na condição com preaquecimento à 300°C. Houve também um acréscimo à resistência a corrosão. Os valores de austenita obtidos permitem uma aplicação industrial do GTAW no grau AISD estudado.

Palavras-chave: aço inoxidável super duplex; soldagem; balanceamento de fases; soldagem; GTAW.

ABSTRACT

Stainless steels are characterized by their resistance to corrosion. Among the stainless steel families, super duplex stainless steels (AISD) stand out, which have a two-phase microstructure with equal proportions of austenite and ferrite, which provides excellent mechanical strength and corrosion resistance compared to stainless steels austenitic. However, in the modification processes, depending on how the interruptions are selected, the AISD undergoes changes in its microstructure, resulting in an imbalance of these phases, compromising its mechanical resistance and corrosion. The present work studied the effect of preheating the metal base on gas tungsten arc welding (GTAW) of super duplex electrical steel UNS S 32750 and how the treatment can be used as an alternative to correct the resulting microstructure. Four situations were evaluated (without preheating and with heating at 100°C, 200°C and 300°C). Sales configurations were established based on pre-tests to have a reference between the two conditions, with and without preheating, in order to focus on the influence of preheating on the microstructure. Preheating the base material changed the microstructure, increasing the volumetric fractions of austenite from 15.8% in the condition without preheating to 42.4% in the condition with preheating at 300°C. There was also an increase in corrosion resistance. The obtained austenite values allow an industrial application of GTAW in the trained AISD grade.

Keywords: super duplex stainless steel; welding; phase balancing; welding; GTAW.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO.....	11
2.1	Objetivo específico.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Classificação dos aços inoxidáveis	14
3.1.1	Aço inoxidável Ferrítico	14
3.1.2	Aço inoxidável Martensítico.....	14
3.1.3	Aço inoxidável Austenítico.....	14
3.1.4	Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação	15
3.1.5	Aço inoxidável Duplex	15
3.2	Diagrama Pseudo Trinário Ferro-Cromo-Níquel	17
3.3	Metalurgia da soldagem duplex	18
3.4	Processo de Soldagem GTAW	20
4	ESTADO DA ARTE.....	22
5	MATERIAIS E MÉTODOS	26
6	RESULTADOS	29
7	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

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).

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, 2003; Cruz Junior, 2022). Um problema associado a essas técnicas é o custo dos estabilizadores de austenita, que podem encarecer excessivamente o processo. Tomando o níquel como exemplo, de acordo com a Horizonte Minerals PLC (2024) e a London Metal Exchange (2024), em 2023 o preço do níquel subiu entre 70 e 80%.

Outra alternativa para corrigir o balanço de fases é a associação de tratamentos térmicos aos processos de soldagem (Zhang, 2017;). Os tratamentos térmicos têm se mostrado uma alternativa mais economicamente viável em relação a adição de elementos estabilizadores de austenita.

O processo GTAW vem sendo amplamente utilizado na soldagem dos AISD. Normalmente associa-se ao processo um metal de adição rico em elementos estabilizadores de austenita, ou ainda gás de proteção, que também contenham tais elementos. Os tratamentos térmicos podem ser uma alternativa para reduzir a utilização de estabilizadores de austenita, reduzindo os custos do processo (Amiri *at. al.* 2021).

Um tratamento térmico pré-soldagem (aquecimento do material antes da soldagem) é uma alternativa para assegurar as proporções iniciais das fases. Assim, a temperatura seria mantida por um maior período em valores que estimulem a transformação da ferrita em austenita, sem a necessidade de adicionar outros elementos (Mohammed, 2017).

Um fator a ser considerado durante os tratamentos térmicos dos AISD é a precipitação de fases secundária, que comprometerão as propriedades mecânicas e resistência a corrosão. Essas fases formam-se entre 700 e 950 °C. Tratamentos térmico pós-soldagem são realizados a temperaturas na faixa de 1100 °C (Gennari, 2018) sendo maior a possibilidade de precipitação de fases secundárias. Por serem feitos em temperaturas inferiores, os tratamentos térmicos pré-soldagem podem ser uma solução para corrigir o balanço de fases bem como evitar formação de fases secundárias.

2 OBJETIVO

Estudar o efeito do preaquecimento do metal base na soldagem GTAW do aço inoxidável super duplex UNS S32750 avaliando a microestrutura, propriedades mecânicas e resistência a corrosão.

2.1 Objetivo específico

- Realizar a caracterização macroestrutural e microestrutural dos cordões de solda.
- Calcular o balanço de fases dos cordões de solda.
- Obter o perfil da microdureza.
- Avaliar a resistência à corrosão.

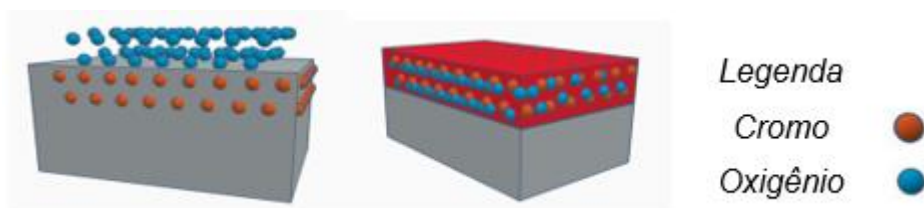
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aço inoxidável é um tipo de aço com propriedades únicas de resistência à corrosão. Consiste principalmente de ferro, carbono e cromo, com pequenas adições de outros elementos, como níquel, molibdênio e titânio. O cromo é um elemento chave no aço inoxidável porque forma uma camada de óxido de cromo na superfície do material, chamada de camada de passivação e isso o torna altamente resistente à oxidação que protege o aço da corrosão. O teor de cromo determina o grau de resistência à corrosão do aço inoxidável. Quanto maior o teor de cromo, melhor a resistência à corrosão.

O alto desempenho dos aços inoxidáveis depende principalmente da formação de camadas protetoras passivas de óxido metálico devido à presença de alto teor de cromo (Cr) para proteção contra corrosão (Lloyd; Noël , 2004).

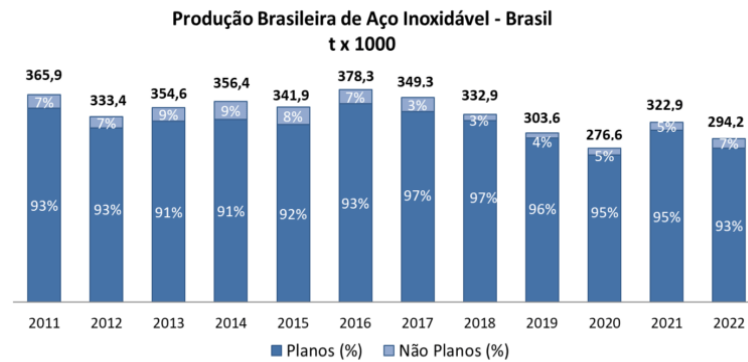
A formação da camada de óxido de cromo ocorre quando o cromo do material reage com oxigênio do ar atmosférico ou com outro ambiente oxidante. A Figura 1 traz uma ilustração da camada de passivação, para melhor compreensão do fenômeno.

Figura 1 – Camada de passivação

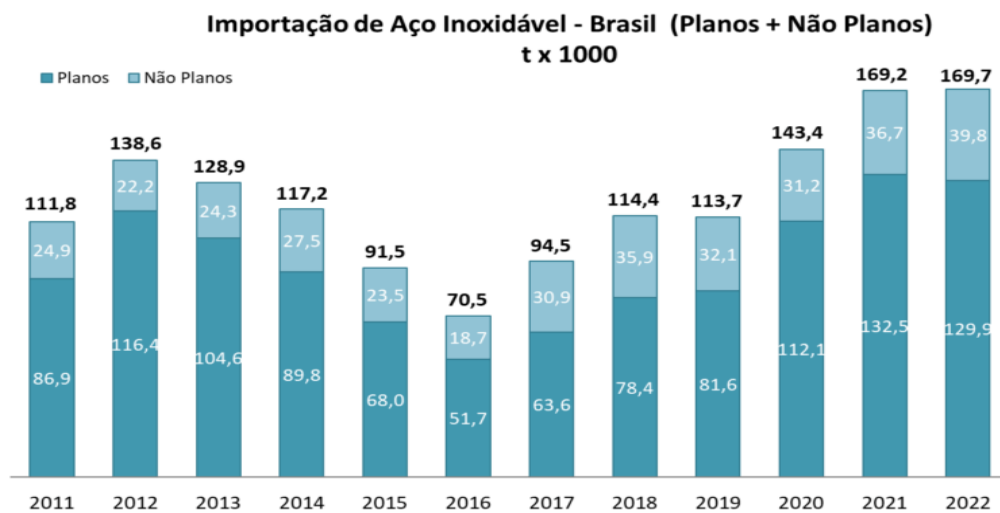


Fonte: Adaptado, Lima 2006.

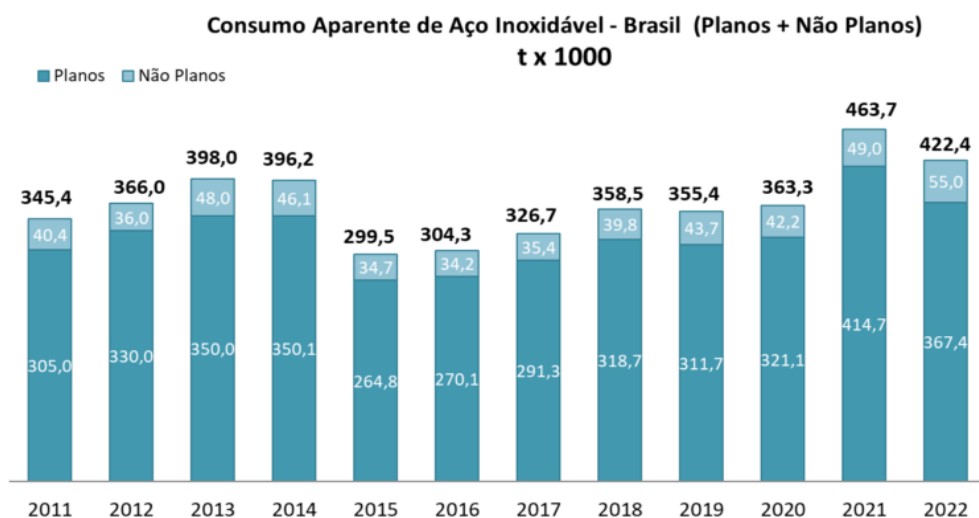
A seguir, os gráficos 1, 2 e 3 apresentam informações estatísticas sobre a produção, exportação e consumo do aço inoxidável no Brasil

Gráfico 1 – Produção Brasileira de aço inoxidável

Fonte: Instituto Aço Brasil / Análise Abinox (2023).

Gráfico 2 – Importação de Aço Inoxidável

Fonte: MDIC/SECEX (2023).

Gráfico 3 – Consumo aparente de aço inoxidável - Brasil

Fonte: Análise Abinox (2023).

3.1 Classificação dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis podem ser classificados de acordo com a microestrutura apresentada em temperatura ambiente. São eles:

3.1.1 Aço inoxidável Ferrítico

Os aços inoxidáveis ferríticos contêm 10,5% a 30% de cromo de baixo carbono (até 0,2%), não podem ser endurecidos por revenimento por não poderem ser austenizados, sendo considerados mais econômicos que os aços inoxidáveis austeníticos, pois suas composições não contêm altos teores de níquel (Peckner,1997).

3.1.2 Aço inoxidável Martensítico

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas Fe-Cr-C, que apresentam em suas composições cerca de 10,5 a 18% de cromo e 0,1 a 0,5% de carbono. são ferromagnéticos e podem ser endurecidos por têmpera, tem pequenas quantidades de Mo, W, V ou Ni para melhorar a resistência à deformação em temperaturas elevadas e outros elementos estabilizadores de austenita para substituição parcial de carbono para melhorar a resistência à corrosão (Neri,2001).

3.1.3 Aço inoxidável Austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos ou *Austenitic Stainless Steel* (ASS) são predominantemente ligas Fe-Cr-Ni, apresentando microestrutura austenítica (γ) predominante. O Cr é responsável por garantir a resistência à corrosão, enquanto o Ni proporciona a expansão da região austenítica à temperatura ambiente. Em geral o ASS desempenha boa resistência à corrosão e oxidação até 650 °C ou superior. Também apresentam excelente ductilidade e tenacidade nessa faixa de temperatura. Assim, a resistência à corrosão e à oxidação são conferidas principalmente pelo alto teor de cromo, tipicamente superior a 16% de seu peso (Kumar, 2017).

3.1.4 Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação

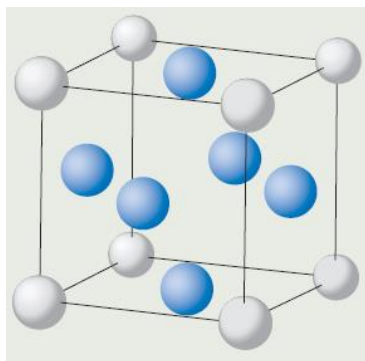
Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação possuem alta resistência quando comparados com os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. Esses apresentam limitada resistência mecânica através do endurecimento por solução sólida ou encruamento (Krauss, 1990).

Sua resistência é facilmente alcançada através de tratamento térmico onde pode ser alcançado pela formação de martensita e/ou endurecimento por precipitação, sem perder sua ductilidade e resistência a corrosão (Peckner, 1997).

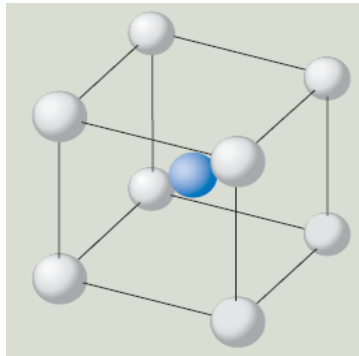
3.1.5 Aço inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são caracterizados por uma microestrutura bifásica consistindo de aproximadamente igual frações volumétricas de austenita FCC (figura 2) e ferrita BCC (figura 3), que promove uma combinação ideal de resistência mecânica e resistência à corrosão (Zhang *et. al*, 2017). De acordo com Ramkumar (2017) essas ligas são cerca de duas vezes mais resistentes que os aços austeníticos. Devido às suas excelentes propriedades, esses aços têm uma ampla gama de aplicações nas indústrias petroquímica, química, papel e celulose, óleo e gás, offshore e marítima (Saravan, 2017).

Figura 2 – Microestrutura cúbica de face centrada



FONTE: James (2009).

Figura 3 – Microestrutura cúbica de corpo centrado

FONTE: James (2009).

3.1.5.1 Duplex e Super Duplex

O que difere o aço inoxidável Duplex e o aço inoxidável super duplex são o valor do seu número de resistência à corrosão por pite (PREN) e a concentração dos elementos de liga. O número de PREN frequentemente é definido por:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3 (\%Mo) + 16 (\%N). \quad (01)$$

Geralmente, os AID contêm 17–30% em peso de Cr e 3–13% em peso de Ni (Lo, K.H. at. al, 2016), enquanto os aços inoxidáveis super duplex (AIDSp apresentam PREN acima de 40 sendo eles extremamente resistentes à corrosão por pite (YAN,2009).

Na tabela 1 temos exemplos de números de pren.

Tabela 1 – Exemplos de PREN

Material	Classificação	PREN
Aço inox. austenítico	316	28
Aço inox. duplex	S31803	38
Aço inox. superduplex	S32750	43

Fonte: (SEDRIS, 1996).

Os aços inoxidáveis Duplex oferecem um desempenho promissor em muitos ambientes corrosivos, com resistência à corrosão localizada superior devido à

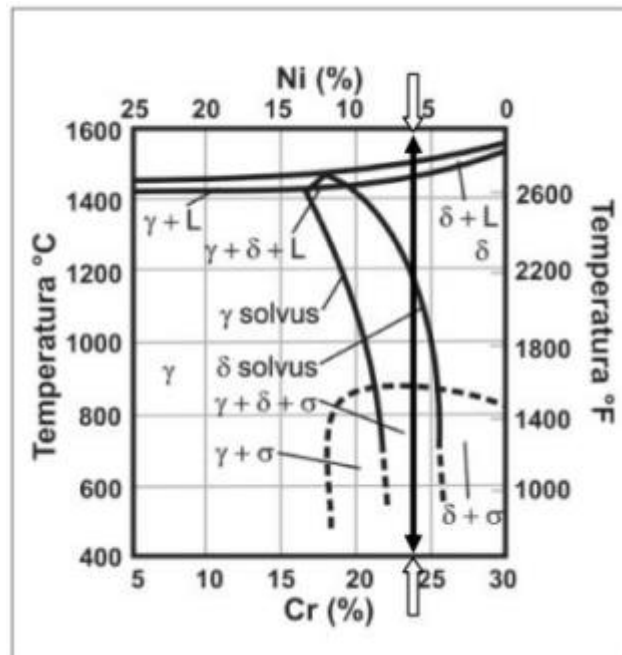
porcentagem de metade de ferrita e metade de austenita (Kang, 2013, Arun, 2019). O aumento das aplicações em muitas indústrias, como construção naval, offshore, indústrias químicas, indústrias de papel e celulose, petroquímica, usinas de dessalinização, indústrias de petróleo e gás promovem DSSs (Verma, 2017).

3.2 Diagrama Pseudo Trinário Ferro-Cromo-Níquel

A microestrutura de um aço inoxidável duplex é composta por lamelas alternadas de ferrita e austenita e diferentes tamanhos de contornos de grão (Ramírez, 2001).

Na Figura 4, temos apresentado um diagrama pseudobinário Fe-Cr-Ni, com um teor de ferro de 70%. Conforme observado e marcado no gráfico um aço inoxidável duplex com composição de aproximadamente de 6%pNi e 24%pCr, inicia a solidificação totalmente ferrítica. No processo de resfriamento a parte de ferrita se transforma em austenita e então é obtida a microestrutura bifásica de austenita e ferrita em temperatura ambiente.

Figura 4 – Diagrama Pseudo Trinário Fe-Cr-Ni



Fonte: Ramírez-Londoño (2001).

Os aços inoxidáveis duplex são laminados na região bifásica $\alpha+\gamma$, de 1000°C a 1200°C, temperatura na qual a precipitação das fases intermetálicas limita a

temperatura de trabalho a quente. É necessário então um tratamento térmico de solubilização de temperatura entre 1050°C e 1150°C e o rápido esfriamento até que seja atingida a temperatura ambiente (Verma, 2017).

O desbalanceamento das fases austenita e ferrita é ocasionado devido ao aporte de calor no processo de soldagem e o tempo de resfriamento da peça. Para resolver o desbalanceamento de fases de ferrita e austenita em aços inoxidáveis, podem ser aplicados tratamentos térmicos específicos. Esses tratamentos visam ajustar a microestrutura do aço inoxidável e promover o equilíbrio desejado entre as fases

Recentemente, a fim de obter um equilíbrio de fases ideal, vários estudos têm focado no tratamento térmico pós-soldagem em juntas de solda DSSs. No tópico estudo da arte apresentado uma análise com base nessas referências.

3.3 Metalurgia da soldagem duplex

Os aços inoxidáveis se diferem muito dos aços comuns ou de baixa liga a respeito de sua soldabilidade. Conforme Tan (2011), os aços inoxidáveis duplex, após passarem pelo processo de soldagem, exibem uma estrutura microscópica desequilibrada, predominantemente constituída por ferrita, comprometendo suas características. Dessa forma, a soldagem torna-se crítica devido à manifestação de fases frágeis e à modificação das propriedades originais do metal base, ocasionada pelos elevados teores de diversos elementos de liga.

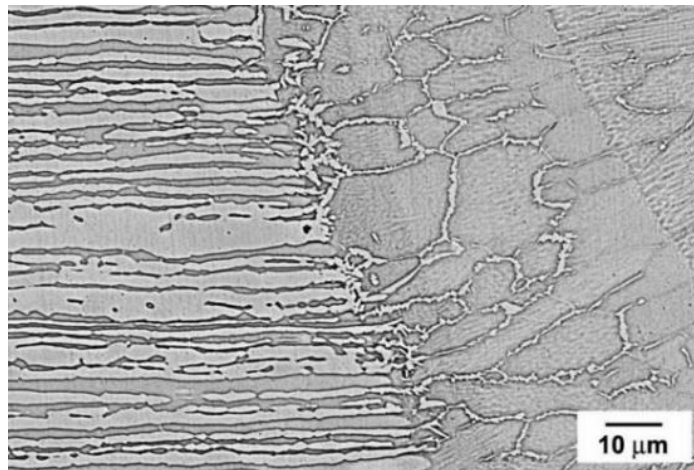
Segundo Mohammed (2017), no processo de soldagem do aço inoxidável duplex, a austenita é originada a partir da ferrita em estado sólido. As condições de soldagem com baixas taxas de resfriamento favorecem a ampliação de grãos ferríticos na zona termicamente afetada (ZTA) e a criação de nitretos e carbonetos. Elevadas taxas de resfriamento promovem uma quantidade maior de ferrita, não proporcionando tempo adequado para a formação de austenita. De acordo com Mohammed (2017), ao aplicar quantidades significativas de calor e baixas taxas de resfriamento, as propriedades da soldagem do aço inoxidável duplex podem progredir com precisão. Muthupandi *et al.* (2003) categorizam que a austenita se desenvolve em três morfologias nas ligas de solda do AID:

- Alotriomorfos, nos contornos dos grãos ferríticos anteriores, formam-se em temperaturas elevadas.

- Placas laterais Widmanstätten, surgindo no grão a partir dos contornos de grão alotriomorfo, também se formam em altas temperaturas.
- Idiográficas intragranulares, formam-se em temperaturas mais baixas.

Em processos de soldagem que induzem altas taxas de resfriamento, não há tempo suficiente para a formação de austenita, resultando em uma estrutura microscópica predominantemente ferrítica. A Figura 5 ilustra a estrutura microscópica desbalanceada do UNS 32750 soldado utilizando o processo de laser Nd:YAG pulsado. Para alcançar um equilíbrio na estrutura microscópica, é necessário realizar um tratamento térmico pós-soldagem, ou então, adicionar elementos que promovam a formação de austenita, como níquel ou nitrogênio.

Figura 5 – Micrografia da região de transição entre metal base e zona de fusão para UNS 32750 Nd:YAG pulsado a laser soldado



Fonte: Cruz *et al.* (2019).

Dentre as maiores dificuldades em selecionar um processo de soldagem para os aços inoxidáveis super duplex está a dificuldade de manter a proporcionalidade entre as fases de austenita e ferrita durante o processo.

Uma vez iniciada a solidificação, a sequência com que este processo ocorre irá determinar a distribuição dos elementos de liga que compõe as ligas do grupo Fe-Cr-Ni. Além do modo de solidificação, também atuam sobre a distribuição dos elementos de liga pelos diferentes microconstituintes presentes a velocidade de crescimento na solidificação e a velocidade de resfriamento no estado sólido (Muthupandi, 2003).

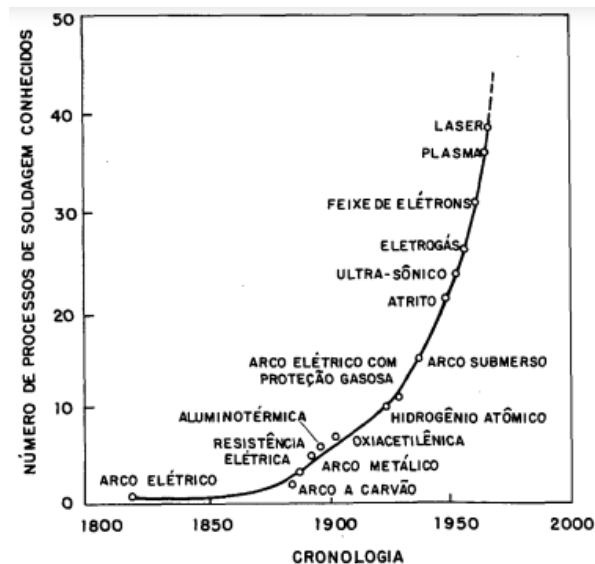
3.4 Processo de Soldagem GTAW

Na indústria de fabricação, a união de metais é um importante processo em que o principal objetivo é garantir uma montagem com as mesmas características do material original e que, por manter as propriedades mecânicas e a corrosão resistência da junta de solda no mesmo nível do metal base (Urbikain,2016).

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão (Wainer, 1992).

Na figura 6 temos a evolução do processo de soldagem ao longo do tempo.

Figura 6 – Evolução do processo de Soldagem ao longo do tempo



Fonte: WAINER (1992).

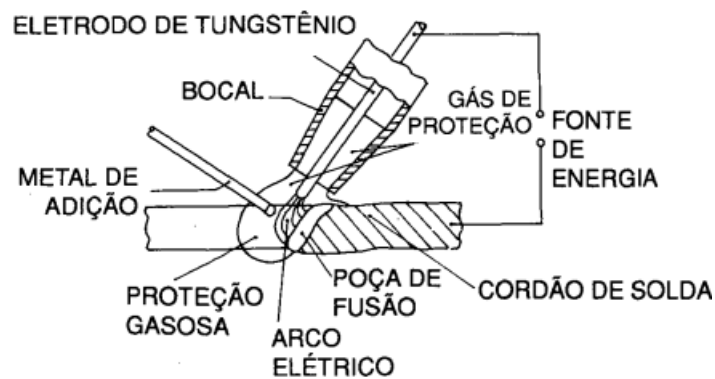
Conforme WAINER (1992), a maioria dos processos de soldagem usam o calor como fonte principal de energia, portanto o calor é um elemento essencial à execução de uniões soldadas, mas pode ser fonte de problemas, pois influencia diretamente nas transformações metalúrgicas.

O processo de soldagem GTAW, também conhecido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), tem por característica utilizar com fonte de calor um arco elétrico criado entre a peça e o eletrodo de tungstênio não consumível, enquanto o arco é protegido pelo fluxo de um gás inerte. Esse processo pode ser realizado com adição de material ou de modo autógeno, ou seja, sem adição de material.

O processo GTAW utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição e pode ser manual ou automática (Wainer, 1992).

O processo de soldagem GTAW é frequentemente usada para soldar seções finas de aços inoxidáveis e metais não ferrosos (Muhammad, 2020).

Figura 7 – Processo de soldagem GTAW



Fonte: Wainer (1992).

Entretanto, esse tipo de processo afeta as frações volumétricas das fases ocasionando o desbalanceamento de fases de ferrita e austenita dos aços inoxidáveis super duplex.

4 ESTADO DA ARTE

Para a realização deste trabalho foi feito uma revisão da literatura. Foi possível avaliar, analisar e interpretar as publicações relevantes ao tema norteador da pesquisa. As plataformas de busca foram Science Direct, Google acadêmicos e livros publicados. Os termos de busca foram palavras chaves como: aços inoxidáveis, soldagem, tratamento térmico e caracterização de matérias. Foi utilizado também combinação entre eles, como por exemplo: aços inoxidáveis AND soldagem.

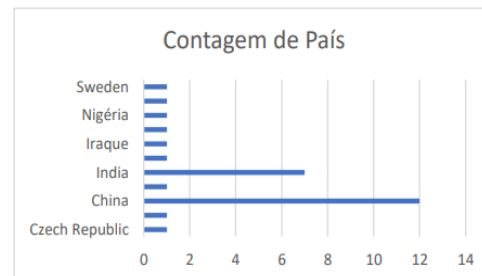
A busca realizada a partir da estratégia resultou em um total de 30 documentos analisados e o critério de seleção aplicado levou em consideração a data de publicação e a adesão do título ao assunto do tema. O controle foi feito por uma planilha no Microsoft Excel onde foi classificado como Título, autores, instituições, país, tipo de arquivo, Fator de impacto, Qualis, ano de publicação, objeto de estudo e link ou fonte. Após foi processado os dados que geraram gráficos onde conseguimos ver de modo mais organizado as informações.

A análise se inicia pelo gráfico de publicações em relação ao ano de publicação, representado no gráfico 4, contados a partir do ano de 2003, mas notamos que aumento das publicações ocorreram a partir de 2016 e a maior em expressividade em 2022, ou seja é possível observar um crescimento substancial nas pesquisas ao longo dos anos com uma tendência crescente para os próximos anos.

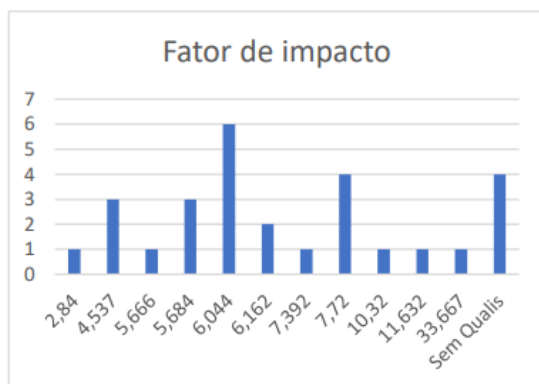
Já partindo para uma análise geográfica, o gráfico 5 nos mostra que o país que mais realizou pesquisas sobre o tema foi a China e sem seguida a Índia, embora o gráfico apresenta uma ampla distribuição geográfica entre 11 países. As publicações também foram avaliadas quanto ao seu fator de impacto, seu cite core e a revista na qual foi publicada. Informações essas que temos nos Gráficos 6, 7 e 8

Gráfico 5 – Ano de Publicação

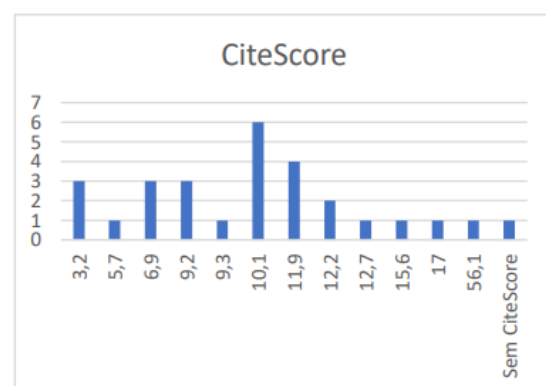
Fonte: Própria Autora.

Gráfico 4 – Contagem de País

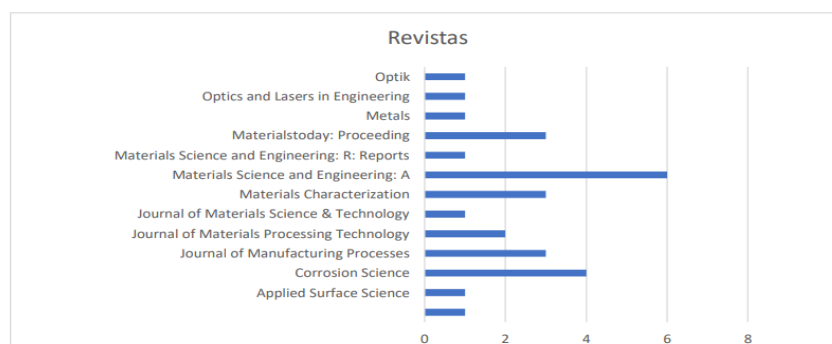
Fonte: Própria Autora.

Gráfico 6 – Fator de impacto

Fonte: Própria Autora.

Gráfico 7 – CiteScore

Fonte: Própria Autora.

Gráfico 8 – Revistas

Fonte: Própria Autora.

Após esses recortes bibliográficos podemos observar uma variedade de pesquisas relacionadas aos aços inoxidáveis que já foram e estão sendo realizadas, há muitas revisões sobre o assunto também. A seguir alguns exemplos e análises.

Começando por uma revisão que retrata o atual crescimento, demanda e consumo mundial rápido de aços inoxidáveis duplex, particularmente em aplicações petroquímicas, marítimas, de usinas de energia e outras aplicações de engenharia,

o artigo relata o desafio de unir ligas duplex devido ao número de precipitados fragilizantes e alterações metalúrgicas menciona técnicas avançadas, como plasma, laser, PCGTAW, A-TIG e processos de soldagem híbridos, estão sendo desenvolvidas para atender aos requisitos de maior produtividade sem distorção e tem como objeto de estudo mostrar sistematicamente o efeito dos processos e condições de soldagem na microestrutura, propriedades mecânicas e resistência à corrosão de aços inoxidáveis duplex e suas várias combinações com base na correlação estrutura propriedade (Verma, 2016).

O seguinte artigo tratou de um estudo relacionado a caracterização metalúrgica e a corrosão de juntas de aço inoxidável duplex soldadas por feixe de elétrons empregado de forma autógena. As soldas foram avaliadas quanto às suas características metalúrgicas, comportamento à corrosão no estado soldado, envelhecido e envelhecimento seguido de solução tratada e analisando os resultados as soldas EB mostraram uma propensão relativamente maior à corrosão por pites do que o metal base (Singh, 2019).

Nos deparamos também com pesquisas relacionadas a processos de fabricação que fazem parte da indústria 4.0, um processo de manufatura não muito recente, mas que estava concentrado nas mãos de um grupo pequeno devido a posse da patente da tecnologia. Entretanto após a queda da patente, a manufatura aditiva passou a ser foco de pesquisas e a seguir um exemplo de pesquisa que trata do aço inoxidável e esse processo de fabricação.

Manufatura aditiva de arco de arame (WAAM), deposição de metal a laser (LMD) e fusão de leito de pó a laser (L-PBF) têm sido utilizadas para fabricar DSSs. No entanto, é um grande desafio alcançar a qualidade de formação e a microestrutura esperadas ao mesmo tempo, considerando o complicado processo *layer-up-layer*. [...] Um controle delicado das condições de processamento é altamente necessário com base na compreensão dos materiais DSS. [...] Uma visão geral do status atualizado da pesquisa e perspectivas futuras sobre a MA de SADs é apresentada a partir de pontos de vista extensivos, incluindo materiais, processamento, microestrutura e propriedades. [...] A evolução da microestrutura durante os processos de MA é destacada em detalhes. [...] A falta de fusão e a porosidade são defeitos comuns (Zhang, 2021).

Visto tudo o que foi explanado, os aços inoxidáveis têm um papel importante para a sociedade, dando destaque ao super duplex, devido as suas propriedades e a versatilidade de aplicações. Esse estudo sobre o assunto nos mostra quanto interesse há em relação ao objeto de estudo, pois foram encontrados diversos artigos

publicados relacionados ao tema. Seja sobre o material em si, quanto processos de soldagem, caracterização do material após passar por processos diversos e também revisões.

O estudo aponta que os processos ainda precisam ser aprimoramentos para que seja mantida as propriedades do material após ser submetidos a uma aplicação, como por exemplo, o desbalanceamento de fases devido ao aporte de calor nos processos de soldagem ou união. Diante disso, é imprescindível aumentar a produção acadêmica sobre o tema para apresentarmos soluções mais assertivas para os problemas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de soldagem, caracterização microestrutural, ensaios e mecânicos e de corrosão foram desenvolvidos nos laboratórios do IFSP campus Itapetininga. Como metal base, utilizou-se chapas de aço inoxidável Superduplex UNSS 32750 com espessura de 1,5mm. A seguir tabelas com as composições químicas do material.

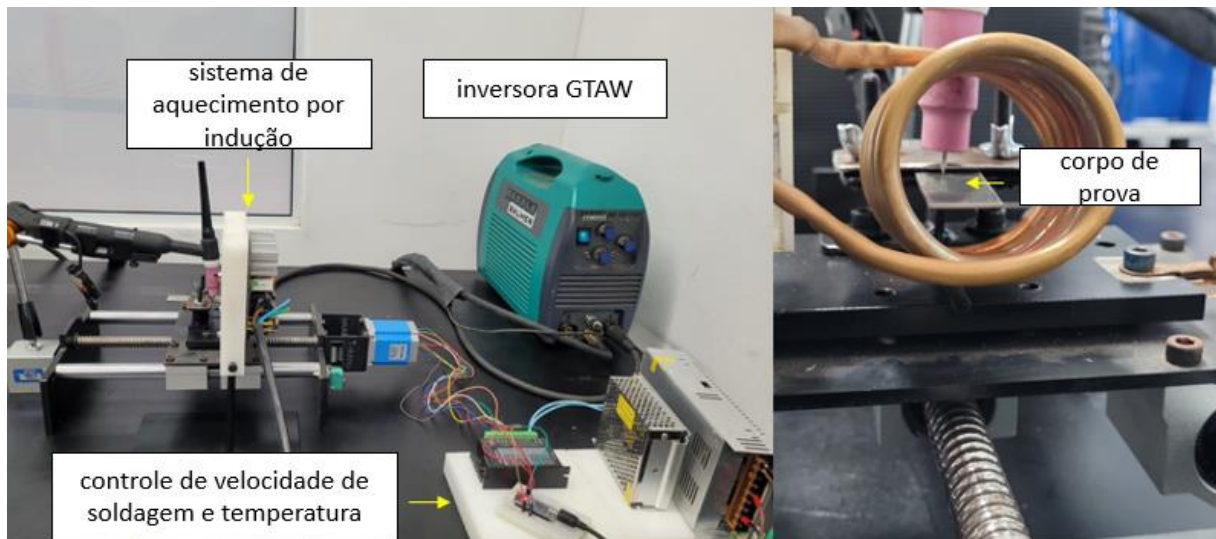
Tabela 2 – Composição química do aço Superduplex UNSS 32750 (wt.%)

Metal	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
Base	0,1018	0,29	0,63	0,02	<0,0003	25,61	3,84	6,97	0,15	0,27

Fonte: Realum.

As soldagens foram realizadas utilizando uma inversora Balmer MB 180 TIGP, ligado a uma guia linear controlado por Arduino. Para o tratamento térmico foi utilizado um sistema de aquecimento por indução, conforme mostrado na Figura 8

Figura 82 – Forno e sistema de soldagem utilizado

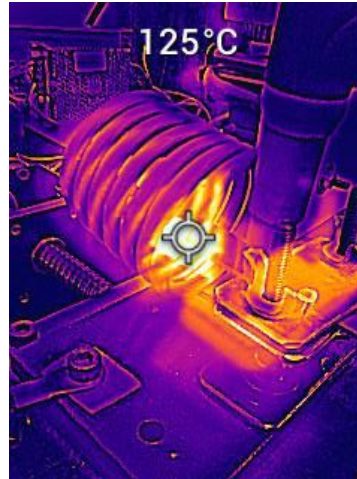


Fonte: Própria Autora.

Foram avaliadas as seguintes condições para soldagem: soldagem à temperatura ambiente (TA) e aquecimento a 100°C, 200°C e 300°C. As amostras foram aquecidas e quando atingiam a temperatura de ensaio, iniciava-se a soldagem.

As temperaturas foram monitoradas usando uma câmera termográfica (Flir TG297), conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Imagem da câmera termográfica (Flir TG297)



Fonte: Própria Autora.

As soldagens foram feitas na condição *bead on plate* autógena. Foi utilizado eletrodo de tório tungstênio AWS EW7H2 com 1,6 mm de diâmetro, ângulo de 90°, com distância da chapa de 1 mm. Os parâmetros de soldagem foram selecionados com base em pré-testes, de forma que a profundidade do cordão fosse superior a 50% a espessura da chapa. As condições utilizadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem

Condição	Temperatura do preaquecimento	Parâmetros de Soldagem
TA	Sem tratamento	Tensão de soldagem: 29 V Corrente de soldagem: 45 A Velocidade de soldagem 500 mm/min Gás de proteção: Argônio puro: 15 l/min
T100	100 °C	
T200	200 °C	
T300	300 °C	

Fonte: Própria Autora.

Após a soldagem, os corpos de prova foram cortados transversamente a solda, com o auxílio de uma eletroerosão de corte a fio, Eletrocut Novick e embutidas em resina epóxi.

As amostras foram preparadas metalograficamente de forma padrão: embutimento, lixamento, polimento. O lixamento das amostras ocorreu manualmente, alternando a posição em 90° a cada troca de lixamento. A granulação da lixa seguiu a sequência 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200. Para o polimento, foram utilizadas partículas de alumina com 1,0 e 0,3 μm , respectivamente.

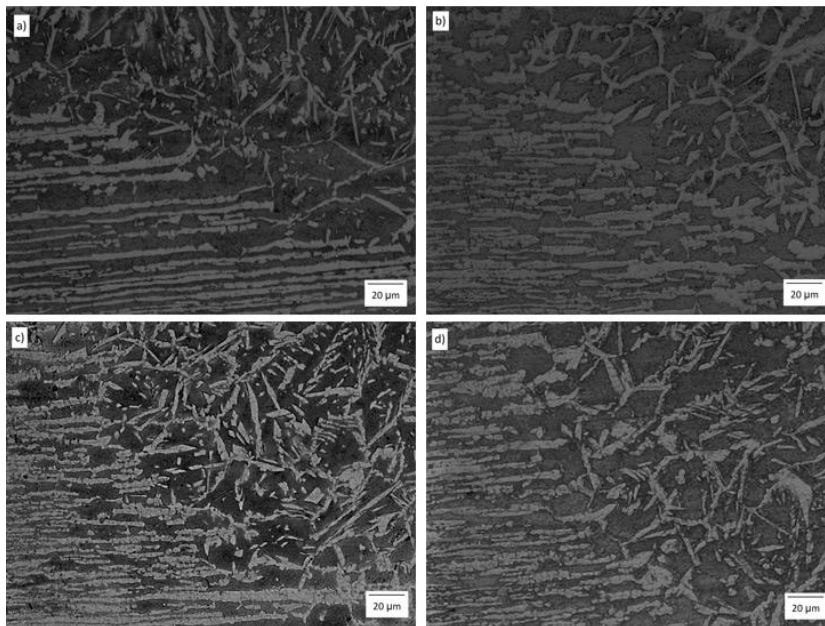
A microestrutura foi revelada utilizando Beraha (20 ml de HCl, 80 ml de H₂O, 1,0g de K₂S₂O₅ e 2,0g de NH₄HF₂). Foram obtidas dez micrografias ópticas utilizando o microscópio da marca Zeiss para cada condição. As micrografias foram binarizadas, com a ferrita aparecendo preta e a austenita aparecendo branca. A fração volumétrica de austenita e ferrita foi avaliada comparando as áreas na micrografia e as frações volumétricas foram calculadas com o auxílio do software livre *ImageJ*.

Os testes de microdureza Vickers foram realizados na zona de fusão e no metal base usando um EMCO *TEST Duravision* com uma carga de 1 gf. O comportamento de corrosão das amostras de solda foi avaliado de acordo com o padrão ASTM G1. Uma área de superfície de 1 cm², que continha um cordão de solda, foi exposta a uma solução eletrolítica de NaCl a 3,5% em um ambiente corrosivo. Para medir as propriedades eletroquímicas, um eletrodo (Ag/AgCl (3 M, KCl)) foi usado como eletrodo de referência, e um eletrodo auxiliar de platina (Pt) foi usado como eletrodo de teste. O teste eletroquímico foi realizado em temperatura ambiente usando um instrumento potenciostato AMETEK VersaSTAT 4, com uma taxa de varredura de 1 mV/s para todas as amostras. Os resultados obtidos foram analisados usando o software *Origin*.

6 RESULTADOS

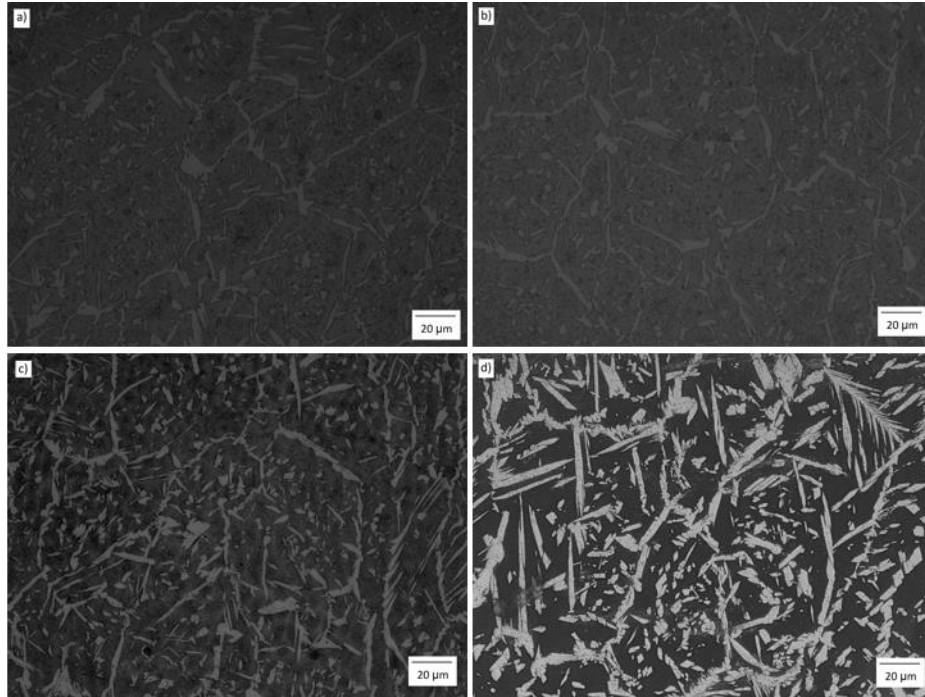
A Figura 10 apresenta mostra as micrografias da transição entre o metal base e a zona de fusão para cada amostra. Para todas as condições é possível observar duas regiões características do GTAW: metal base (MB) e zona de fusão (ZF). No caso das condições TA (a) e T100 (b), a ZAT é claramente definida. No entanto, para outras condições, onde c é T200 e d T300 é desafiador diferenciá-la da ZF. Essas micrografias também revelam o crescimento epitaxial e competitivo de grãos colunares é observado a partir da linha de fusão. O crescimento ocorre na direção da extração de calor.

Figura 103 – Micrografia da região de transição entre o metal base e a zona de fusão



Fonte: Própria Autora.

A Figura 11 mostra a micrografia ZF. Como os parâmetros de soldagem adotados foram os mesmos, as diferenças nas microestruturas das ZF foram consequência do preaquecimento do substrato.

Figura 4 – Micrografias da zona de fusão

Fonte: Própria Autora.

Nos metais de solda do AISD, a austenita se forma em três modos: alotriomorfos, nos contornos dos grãos ferríticos anteriores; Placas laterais de Widmanstätten, crescendo no grão a partir dos contornos de grão alotriomorfo; e austenita intragranular (Muthupandi, 2003). Com relação à morfologia da austenita, não houve alterações significativas nas microestruturas, pois em todas as condições são observadas as três morfologias típicas da soldagem AISD. É possível observar um aumento na quantidade de austenita, associado ao aumento da temperatura de preaquecimento.

As frações volumétricas de austenita e ferrita no BM e na ZF para cada uma das condições são apresentadas na Tabela 3. Os resultados foram obtidos por análise de imagens em diversas regiões do metal base e nas ZFs

Tabela 4 – Resultado das frações volumétricas

	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA		
	AUSTENITA [%]	FERRITA [%]	DESVIO PADRÃO
MB	50.1	49.9	0.2
TA	15.8	84.2	2.1
T100	16.5	83.5	1.9
T200	25.8	74.2	1.5
T300	42.4	57.6	2.3

Fonte: Próprio Autora

O efeito quantitativo do preaquecimento na microestrutura é bastante evidente na Tabela 4, onde a fração volumétrica aumentou de 15,8% (condição TA) para 42,4% (condição T300). Considerando que, como mencionado anteriormente, os parâmetros de soldagem foram os mesmos, esse aumento é atribuído ao efeito do preaquecimento do AISD que a solda solidifica na estrutura totalmente ferrítica e a austenita nuclea abaixo da temperatura do solvus ferrítico. Como a formação da austenita deriva da transformação difusional do estado sólido, sob altas taxas de resfriamento não há tempo suficiente para completar a formação da austenita (Mohammed, 2017), como observado na condição T100 e mais acentuadamente na condição TA. Para a condição T200 e T300, o aumento nas frações volumétricas de austenita, indicam que a temperatura de preaquecimento modificou as taxas de resfriamento, permitindo que as temperaturas fossem mantidas por mais tempo na faixa de formação de austenita.

Como já mencionado, o equilíbrio de fases no AISD é muito importante para que o material mantenha sua resistência mecânica e propriedades à corrosão (Gennari, 2018). Segundo a literatura, o cordão de solda deve ter um índice mínimo de austenita de 25% para a maioria dos usos industriais (Saravanan, 2017, Kang, 2013). Com base nessas referências, o préaquecimento para as condições T200 e T300 permitiu o aumento das frações volumétricas de austenita para valores adequado para aplicações industriais.

Os resultados obtidos podem significar uma economia no processo de soldagem GTAW de AISD, pois dispensam a utilização de metais de adição ao processo de soldagem.

A microdureza média para o cordão de solda para cada condição é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado da microdureza

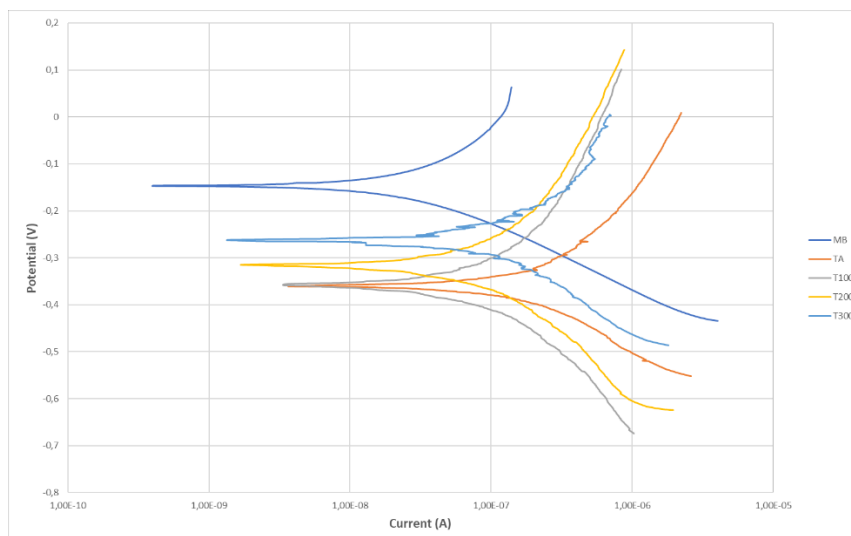
	Dureza [HV]
MB	302 ±2
TA	341 ±2
T100	342 ±3
T200	327 ±2
T300	314±1

Fonte: Própria Autora.

Devido o aumento do percentual de austenita houve uma diminuição nas microdurezas. O valor médio de microdureza na zona de fusão para a condição TA foi de 341 ± 2 HV enquanto para a condição T300 foi de 314 ± 1 HV. Como a condição TA apresentou uma microestrutura predominantemente ferrítica, a microdureza na zona de fusão foi maior. Pode-se prever que a condição T300 poderá fornecer um cordão de solda com mais tenacidade em comparação ao TA.

A Figura 12 apresenta as curvas de polarização de Tafel entre o metal base e as amostras soldadas. O alto potencial observado no metal base sugere uma alta resistência à corrosão (AMIRI, 2021, WANG, 2023). Por outro lado, as amostras soldadas apresentaram um potencial menor, com a amostra TA tendo o menor potencial, consequentemente menor resistência a corrosão.

Figura 12 – Curvas de polarização de Tafel



Fonte: Própria Autora.

A resistência à corrosão do AISD depende de vários fatores, incluindo a razão de das fases sólidas α/γ , tamanho de grão e fases intermetálicas. Geralmente, maiores quantidades de austenita no AISD resultam em maior resistência à corrosão (menor taxa de corrosão). Isso ocorre porque a alta quantidade de austenita desloca o potencial de corrosão para valores mais positivos, ao mesmo tempo em que reduz a corrente de corrosão (LIMA, 2006).

Uma comparação das amostras pré-aquecidas com TA revelou que as curvas de polarização gradualmente deslocam-se para cima em direção a potenciais positivos, e a esquerda em direção a correntes menores. Essa mudança indica uma redução na taxa de corrosão (alta resistência à corrosão). A Tabela 6 apresenta os potenciais e correntes de corrosão para todas as condições.

Tabela 6 – Potenciais e Correntes de corrosão

MB	ECorr = -0,15870	ICorr = 3,1706E-9
TA	ECorr = -0,37992	ICorr = 3,4316E-8
T100	ECorr = -0,37606	ICorr = 2,5420E-8
T200	ECorr = -0,30629	ICorr = 9,9724E-9
T300	ECorr = -0,26690	ICorr = 6,2829E-9

Fonte: Própria Autora.

Com base nos resultados do teste, a amostra TA e T100 apresentaram a pior resistência à corrosão devido ao seu alto teor de ferrita. O potencial foi reduzido significativamente de aproximadamente -159 mV para - 386 mV vs. eletrodo de referência em comparação ao metal base. O potencial de corrosão das amostras T200 e T300 apresentaram um aumento em relação a TA e T100 sendo T300 em torno de -266 mV.

Em relação as correntes de corrosão, as amostras TA e T100 apresentaram as maiores correntes, indicando uma resistência menor a corrosão (as correntes estão diretamente relacionadas as taxas de corrosão) (LIMA, 2006). A condição T300 é a que apresentou menor corrente de corrosão, confirmando assim que a amostra possui maior resistência a corrosão.

7 CONCLUSÕES

O preaquecimento do material base foi considerado eficaz, pois diminuiu o desbalanceamento de fases devido ao processo de soldagem GTAW na microestrutura, aumentando as frações volumétricas da austenita de 15,8% na condição sem preaquecimento para 42,4% na condição com preaquecimento à 300°C, aumentando assim mais de 268% em função do efeito da temperatura, já que os parâmetros de soldagem foram mantidos e esses valores obtidos de austenita permitem uma aplicação industrial do GTAW no grau AISD estudado.

O valor médio de microdureza reduziu, como esperado. Na zona de fusão na condição TA foi de 341 ± 2 HV enquanto para a condição T300 foi de 314 ± 1 H, isso devida a presença predominante da ferrita na condição TA.

Houve também um acréscimo à resistência a corrosão indicados pelas curvas de Tafel, o gráfico nos mostra a tendência onde as linhas das amostras submetidas ao tratamento deslocam-se para cima em direção a potenciais positivos, e a esquerda em direção a correntes menores.

REFERÊNCIAS

- AMIRI, E.; OSTOVAN, F.; TOOZANDEHJANI, M.; SHAFIEI, E.; MOHAMED, I. F. Study and selection of most appropriate filler rod for GTAW of S32750 super duplex steel joints: A comprehensive study on microstructural, mechanical and corrosion properties. **Materials Chemistry and Physics**, Amsterdam, v. 270, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124839>.
- ARUN, D.; RAMKUMAR, K. D.; VIMALA, R. Multi-pass arc welding techniques of 12 mm thick super-duplex stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 271, p. 126–143, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.031>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- DA CRUZ JUNIOR, E. J.; FRANZINI, O. D.; CALLIARI, I.; VENTRELLA, V. A. Effects of nickel addition on the microstructure of laser-welded UNS S32750 duplex stainless steel. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Estados Unidos, v. 50, n. 4, p. 1616–1618, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05115-1>.
- DA CRUZ JUNIOR, E. J.; SELOTO, B. B.; VENTRELLA, V. A.; SETTIMI, A. G.; GENNARI, C.; CALLIARI, I.; ZAMBON, A. Addition of nickel by the watts bath as a way to correct the phase balance on Nd:YAG pulsed-laser-welded UNS S32750. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Estados Unidos, v. 53, p. 25-28, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06521-0>.
- 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>.
- HORIZONTE MINERALS PLC. **Mercado de níquel**. Pará, 2019. Disponível em: <https://horizonteminerals.com/br/pt/niquel/>. Acesso em: 18 jan. 2024.
- HU, Y.; SHI, Y.; SHEN, X.; WANG, Z. 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>.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas anuais do inox**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://abinox.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 18 jan.2023.
- KANG, D. H.; LEE, H. W. Study of the correlation between pitting corrosion and the component ratio of the dual phase in duplex stainless steel welds. **Corrosion Science**, Oxford, v. 74, p. 396–407, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.04.033>.
- KRAUSS, G. **Steels: heat treatment and processing principles**. Michigan: ASM International, 1990. 497 p.

KUMAR, N.; MUKHERJEE, M.; BANDYOPADHYAY, A. Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. **Optics & Laser Technology**, London, v. 94, p. 296-309, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.008>.

LIMA, D. B. P. L. **Avaliação Da Soldabilidade Do Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/7358>. Acesso em: 18 jan. 2024.

LLOYD, A. C.; NOËL, J.J.; MCINTYRE, S.; SHOESMITH, D. W. Cr, Mo and W alloying additions in Ni and their effect on passivity. **Electrochimica Acta**, Amsterdam, v. 49, n.17-18, p. 3015-3027, 2004.

LO, K.H.; KWOK, C.T.; CHAN, W.K.; KUAN, H.C.; LAI, K.K.; WANG, K.Y. Duplex Stainless Steels. *In*: COLÁS, R.; TOTTEN, G. E. **Encyclopedia of iron, steel, and their alloys**. Boca Raton: CRC Press, 2016. p. 1150–1160.

LONDON METAL EXCHANGE. **LME Nickel**. Londres, 2020. Disponível em: <https://www.lme.com/en-GB/Metals/Non-ferrous/Nickel#tabIndex=0>. Acesso em: 18 jan. 2024.

MDIC/SECEX. **Estatísticas anuais do inox**. São Paulo: ABINOX, 2023. Disponível em: <https://abinox.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 18 Mar. 2023.

MOHAMMED, G. R.; ISHAK, M.; AQIDA, S. N.; ABDULHADI, H. A. Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: a review. **Metals**, Suíça, v. 7, n. 2, p. 39, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/7/2/39>. Acesso em: 18 jan. 2024.

MOHAMMED, G. R.; ISHAK, M.; AQIDA, S. N.; ABDULHADI, H. A. Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: a review. **Metals**, Suíça, v. 7, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7020039>.

MUHAMMAD AZWAN, ...MOHAMMAD M RAHMAN, TIG Torch Melting as Surface Engineering Technology. **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**. 1st Edition, p. 629-637, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10835-5>

MUTHUPANDI, V.; SRINIVASAN, P, B.; SESHADRI, S. K.; SUNDARESAN, S. Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds. **Materials Science and Engineering: A**, Amsterdam, v. 358, n. 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).

NERI, M., COLÁS, R. Analysis of a martensitic stainless steel that failed due to the presence of coarse carbides. **Materials Characterization**, Philadelphia, v. 47, n. 3-4, p.283-289,

NEWELL, JAMES. **Essentials of modern materials science and engineering**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2009. 38 p.

OUALI, N.; KHENFER, K.; BELKESSA, B.; J. FAJOUJ.; CHENITI, B.; IDIR, B.; BRANCHU, S. Effect of heat input on microstructure, residual stress, and corrosion resistance of UNS 32101 lean duplex stainless steel weld joints. **J. Mater. Eng. Perform.** v. 28, p. 4252–4264, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04194-w>.

PECKNER, D.; BERNSTEIN, I.M. **Handbook of stainless steels**, Estados Unidos: McGraw-Hill, 1997. 1100 p.

RAMÍREZ-LONDOÑO, A. J. **Precipitação das fases intermetálicas e austenita secundária na zac de soldagens multipasse de aços inoxidáveis duplex**. 2001. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

REALUM IND E COM DE METAIS PUROS E LIGAS LTDA. São Paulo. Disponível em: <https://www.realum.com.br/produto-08b.php>. Acesso em: 14 nov. 2023.

SARAVANAN, S.; K. RAGHUKANDAN, AND N. SIVAGURUMANIKANDAN. Pulsed nd: yag laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 25, p. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.015>.

SEDRIKS, A. J. **Corrosion of stainless steels**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

SINGH, J.; SHAHI, A. S. Metallurgical, impact and fatigue performance of electron beam welded duplex stainless steel joints. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 272, p. 137-148, out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.010>.

TAN, H.; WANG, Z.; JIANG, Y.; YANG, Y.; DENG, B.; SONG, H.; LI, J. Influence of welding thermal cycles on microstructure and pitting corrosion resistance of 2304 duplex stainless steels. **Corrosion Science**, Oxford, v. 55, p. 368-377, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.10.039>

URBIKAIN, G.; PEREZ, J.M.; LACALLE, L. N. L.; ANDUEZA, A. Combination of friction drilling and form tapping processes on dissimilar materials for making nutless joints, **Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.**, Reino Unido, v. 232, n. 6, p. 1–14, 2016.

VERMA, J.; RAVINDRA, V. Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments - a review. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 25, p.134-152, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.003>.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

WANG, Q.; GU, G.; JIA, C.; LI, K.; WU, C. Investigation of microstructure evolution, mechanical and corrosion properties of SAF 2507 super duplex stainless steel joints by keyhole plasma arc welding. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 22, p. 355-374, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.107>.

YAN, H.; BI, H.; LI, X.; XU, Z. Microstructure, texture and grain boundaries character distribution evolution of ferritic stainless steel during rolling process. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 209, n. 5, p. 2627–2631, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.012>.

ZHANG, D.; LIU, A.; YIN, B.; WEN, P. Additive manufacturing of duplex stainless steels - A critical review. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 73, p. 496-517, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.036>

ZHANG, Y.; CHENG, F.; WU, S. Improvement of pitting corrosion resistance of wire arc additive manufactured duplex stainless steel through postmanufacturing heat-treatment. **Materials Characterization**, Philadelphia, v. 171, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110743>

ZHANG, Z.; JING, H.; XU, L.; HAN, Y.; ZHAO, L.; ZHOU, C. Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 404, p. 110-128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.252>.

ZHANG, Z.; ZHAO, Z.; ZHANG, H.; HU, J.; JIN, J. Microstructure evolution and pitting corrosion behavior of uns s32750 super duplex stainless steel welds after shorttime heat treatment. **Corrosion Science**, Oxford, v. 121, p. 22–31, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.02.006>.