

AVALIAÇÃO DE SOLDABILIDADE EM AÇOS INOX SUPER DUPLEX

Henry Kemper¹,
Jader Fernandes de Oliveira¹,
Livia França dos Santos¹,
Alan Victor Ferreira Modolo²

1 Graduando em Engenharia Mecânica

2 Docente da Faculdade Multivix Vila Velha

RESUMO

Os aços inoxidáveis super duplex (AISD) são ligas utilizadas de forma abrangente nas atividades de exploração e produção de petróleo em componentes tais como, cabos umbilicais, trocadores de calor, linhas de injeção de água salgada e em diversos equipamentos que requeiram uma elevada resistência à corrosão associada a altos valores de resistência mecânica. Logo, para que os componentes e equipamentos possam manter o desempenho mínimo requerido em operação, é de suma importância que o material mantenha suas características e propriedades mecânicas após procedimentos de soldagem, que se faz necessário para fabricação, montagem e reparo desses componentes e equipamentos, visto que a soldagem pode ocasionar defeitos e modificações microestruturais e alteração das propriedades mecânicas do material. Deste modo, o presente trabalho buscou avaliar e comparar as propriedades mecânicas do aço inoxidável super duplex (AISD) após ser submetido a um processo de soldagem do tipo TIG. Os resultados apresentados durante o trabalho foram obtidos por meio de ensaios mecânicos e químicos, onde os ensaios foram realizados utilizando os corpos de prova fabricados de aço inoxidável super duplex UNS S32750. Em seguida, buscou-se confrontar os resultados experimentais obtidos com o referencial teórico apresentado

Palavras-chave: Aço inoxidável super duplex. Soldagem. Resistência a corrosão. Propriedades mecânicas. Ensaios mecânicos.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de ligas de maior resistência à corrosão e mecânica tem sido objetivo de muitos fabricantes para atender a indústria petrolífera nos dias atuais. A escassez do petróleo e seu elevado preço possibilita a extração deste em ambientes mais agressivos, como a prospecção de petróleo em águas profundas e

ultraprofundas. Desta forma torna-se necessário o desenvolvimento de ligas que suportem às exigências para que os equipamentos trabalhem em condições extremamente adversas (nível de sollicitação mecânica, ambiente agressivo, dificuldade de inspeção e manutenção, etc.). Um dos mais modernos aços com relação à resistência à corrosão/custo nos dias de hoje, e cuja demanda cresce a cada ano na indústria do petróleo, são os aços inoxidáveis super duplex (Leite, 2009).

Levando em consideração os fatores abordados, o presente trabalho busca avaliar a influência do processo de soldagem TIG (GTAW) orbital sobre as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão do aço inox super duplex UNS S32750.

A maioria dos processos de soldagem causa, nas partes que estão sendo unidas, variações de temperatura e deformações plásticas que resultam em alterações na estrutura dos materiais da junta soldada e, portanto, de suas propriedades. Assim, sob certos aspectos, a soldagem pode ser considerada um tratamento termomecânico violento, cujo efeito nas características metalúrgicas do material deve ser cuidadosamente considerado (Marques, 2014).

O estudo que será realizado levará em consideração a utilização do UNS S32750 na fabricação de tubos metálicos aplicados como componentes funcionais em cabos umbilicais submarinos. Visto que, segundo Reboh (2014), tubos metálicos aplicados na fabricação de cabos umbilicais, normalmente são fabricados de ligas de aço inoxidável das famílias dos aços inoxidáveis super duplex e duplex, como o UNS 32750, por exemplo.

Figura 1 – Cabo umbilical submarino com componentes de AISD UNS S32750.



Fonte: Prysmian, 2018.

Desse modo a partir de tubos fabricados da liga UNS S32750, será preparados corpos de prova retirados de regiões de junta soldada entre dois tubos, e de regiões livres de qualquer influência por parte do calor proveniente do processo de soldagem.

Um par de corpos de prova – sendo um com solda e o outro sem solda – será submetido à análise metalográfica, por meio de microscopia óptica, para observação das mudanças microestruturais ocorridas ao longo do procedimento de soldagem. Visto que, segundo Marques (2014), O processo de solidificação do cordão determina várias características macro e microestruturais do cordão, tendo assim, um importante efeito sobre as propriedades e o comportamento da solda.

As propriedades mecânicas do material serão avaliadas com base em resultados numéricos obtidos por meio de ensaios de tração, dobramento e fadiga e dureza, sendo utilizados dois corpos de prova para cada teste.

Além disso, buscará avaliar a resistência à corrosão do UNS S32750 através do ensaio de corrosão, executado tanto na junta soldada, quanto na região do metal base, ou seja, região que não sofreu alteração microestrutural em decorrência do processo de soldagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 APLICAÇÃO DO SUPER DUPLEX NA PROSPECÇÃO DE PETRÓLEO

A necessidade de materiais com maiores resistências mecânica e à corrosão em ambientes corrosivos, como na extração de petróleo em meios salinos, têm conduzido à utilização de aços inoxidáveis super duplex em projetos como o do Pré-sal (Balancin; Dias, 2021, p. 68).

Os aços inoxidáveis super duplex (AISD) são amplamente utilizados na exploração e produção de petróleo naval e offshore, devido à sua elevada resistência à corrosão e excelentes propriedades mecânicas, sendo aplicados em componentes como trocadores de calor, linhas de injeção de água salgada e cabos umbilicais (Souza et al., 2014). Esses cabos são essenciais para o controle e a comunicação com equipamentos submarinos, como Árvores de Natal molhadas e manifolds, além de permitirem a injeção de produtos químicos no processo produtivo (Gonçalves, 2009).

Conforme a norma ISO 13628-5 (2009), cabos umbilicais são conforme a norma ISO 13628-5 (2009), cabos umbilicais são conjuntos de cabos elétricos, ópticos, mangueiras e tubos para serviços hidráulicos, injeção de fluidos e comunicação.

Falhas nesses componentes podem gerar perdas significativas de produção, o que tem levado à crescente adoção de tubos metálicos em substituição às mangueiras termoplásticas, devido à maior confiabilidade e resistência à permeação de fluidos (Gonçalves, 2009). Os tubos metálicos para cabos umbilicais estão detalhados na tabela H da norma ISO 13628-5 (2009).

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

2.2.1 TIG (GTAW)

O processo TIG é largamente utilizado na soldagem de aços inoxidáveis, requerendo controle rigoroso de parâmetros para evitar a formação de fases indesejadas como sigma (σ) e nitretos de cromo (Cr_2N), que comprometem a resistência à corrosão (Paiva et al., 2014). Para AISD, recomenda-se um aporte de calor entre 0,3 e 1,5 kJ/mm e temperatura interpasse inferior a 100°C para manter a microestrutura bifásica (Paiva et al., 2014). A principal vantagem do TIG reside no controle preciso da energia transferida ao metal, essencial para a integridade e desempenho da junta soldada (Marques, 2014; Purnell, 2003).

2.2.2 TIG ORBITAL

A soldagem TIG orbital é uma versão automatizada do TIG manual, focada na união de tubulações. Seu objetivo principal é reduzir a interferência humana e aumentar a produtividade, atendendo à demanda industrial por soldagens mais eficientes (Pigozzo, 2015). Neste processo, a tocha de soldagem acompanha o perfil geométrico dos tubos, que permanecem estacionários (Figueirôa et al., 2015).

Para os testes propostos, serão utilizados cabeçotes de câmara aberta para soldagem de tubos de AISD, pois permitem o uso de metal de adição. Esses cabeçotes se movem sobre um trilho ao redor da tubulação, controlando a distância entre o eletrodo e a peça pela leitura da tensão do arco elétrico (Pigozzo, 2015). Eles também oferecem flexibilidade operacional, incluindo movimentos longitudinais ao eixo do tubo para controle oscilatório do eletrodo (Pigozzo 2015). A parametrização da soldagem orbital permite ajustar parâmetros distintos para segmentos da circunferência do tubo, como a corrente de soldagem, para um maior controle do aporte térmico.

2.3 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX E SUPER DUPLEX

O aço é uma liga de ferro e carbono (0,008% a 2,11% de carbono) com elementos residuais (Chiaverini, 2005). Classifica-se em aços-carbono e aços-liga, sendo estes últimos com elementos adicionais em teores mais elevados (Chiaverini, 2005). Os aços inoxidáveis, desenvolvidos por Harry Brearley em 1913, contêm no mínimo 10,5% de cromo, que confere resistência à corrosão pela formação de uma camada de óxido na superfície (Carbó, 2008; Lopes, 2006; Sousa, 2021).

A classificação dos aços inoxidáveis inclui martensíticos, ferríticos, austeníticos, duplex (ferrítico-austeníticos) e endurecidos por precipitação (Da Costa, 2006). Os aços inoxidáveis duplex (AID) possuem estrutura bifásica equilibrada de ferrita e austenita (Sousa, 2021). Já os aços inoxidáveis super duplex (AISD) apresentam resistência superior à corrosão por pites ($PREN > 40$), mas exigem controle rigoroso na soldagem para evitar a precipitação de fases intermetálicas que comprometem suas propriedades (Brandi et al., 2010; Sousa, 2021).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas descrevem o comportamento de um material sob esforços mecânicos, determinando sua capacidade de resistir e transmitir esses esforços sem ruptura ou deformações incontroláveis (Chiaverini, 1986). Para tubos de liga UNS S32750 em cabos umbilicais submarinos na prospecção de petróleo, as propriedades mecânicas são cruciais, especialmente a alta resistência à fadiga apresentada por essa liga de AISD (Chaves, 2022).

A resistência à oxidação em altas temperaturas está ligada às propriedades mecânicas, com uma diminuição dos valores em ambientes de alta temperatura. Essa perda é menos significativa em aços inoxidáveis especiais, como o super duplex, em comparação com aços comuns, justificando sua escolha para aplicações em altas temperaturas (Carbó, 2008). Os AISD são demandados em aplicações que requerem alta resistência à corrosão e mecânica, devido à sua microestrutura bifásica fina com proporções semelhantes de austenita e ferrita, e à composição de elementos de liga como Cr, Mo, Ni, W, Cu, Mn e Si (Souza et al., 2014). A influência desses elementos de liga nas propriedades mecânicas é fundamental, pois cada um pode afetar a ferrita e a austenita (endurecibilidade) (Chiaverini, 2005).

2.5 CORROSÃO

A corrosão é definida como um ataque nas regiões dos contornos dos grãos, resultando em perdas de propriedades mecânicas (Rodrigues, 2023). Viveros (2020) explica que isso ocorre devido à diferença de potenciais eletroquímicos entre o interior do grão e seus contornos. Ligas de alumínio com cobre são suscetíveis a esse tipo de corrosão pela formação de precipitados de Al_2Cu nos contornos de grão (Araujo, 2019; Santos, 2023).

Sendo um processo espontâneo, a corrosão altera os materiais metálicos, comprometendo sua durabilidade e desempenho (Frauches-Santos et al., 2013). A deterioração por interação físico-química entre o material e o ambiente operacional causa alterações prejudiciais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando o material inadequado (Gentil, 2011). Na indústria petrolífera, a corrosão eletroquímica é a mais prejudicial, devido à água de produção, fluidos de perfuração com gases dissolvidos e microrganismos, além de alta temperatura e pressão (Frauches-Santos et al., 2013).

A corrosão eletroquímica é um processo espontâneo que ocorre quando um metal ou liga está em contato com um eletrólito (como água do mar, ar úmido ou solo), resultando em reações anódicas (oxidação) e catódicas (redução) simultâneas, que deterioram o metal (Frauches- Santos et al., 2013).

2.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Segundo Souza (2007), os ensaios mecânicos são realizados para determinar as propriedades mecânicas de um material metálico pela aplicação de esforços possíveis como tração, compressão, cisalhamento, pressão interna e outros, sendo classificados em ensaios destrutivos e não destrutivos.

2.6.1 DESTRUTIVOS

Segundo Souza (2007), os ensaios destrutivos promovem a ruptura ou a inutilização do material e estão classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros.

2.6.2 NÃO DESTRUTIVOS

Segundo Souza (2007), os ensaios não-destrutivos são utilizados para determinação de algumas propriedades físicas do metal, bem como detectar falhas internas do mesmo sem causar a inutilização do material e estão classificados os ensaios com

raios X, ultrassom, elétricos e outros.

3 METODOLOGIA E METODO DA PESQUISA

3.1 MATERIAIS

Para a realização da avaliação proposta por este trabalho, foram utilizados corpos de prova retirados de tubos metálicos sem costura, com diâmetro interno de 1/2" e espessura de parede nominal igual a 1,24 mm, utilizados para aplicações no contexto "off-shore", fabricados a partir do aço inoxidável super duplex UNS S32750, cuja composição química pode ser verificada na Tabela 1.

Os tubos utilizados para preparação dos corpos de prova foram fornecidos por uma empresa atuante no setor de petróleo e gás. Tendo em vista esse fato, a composição química apresentada na tabela abaixo foi obtida a partir do certificado de qualidade enviado a esta empresa pelo fornecedor dos tubos de aço super duplex. Por motivos éticos e buscando preservar as informações internas desta empresa, seu nome, bem como o nome do fornecedor dos tubos não serão revelados neste trabalho.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável super duplex UNS S32750.

Teor de Elementos de Liga (%)				
C	S	Mn	P	S
0,016	0,200	0,500	0,023	<0,0003
Cr	Mo	Ni	W	Cu
25,540	4	7,05	0,070	0,170
Co	Ti	Al	Nb	B
0,06	<0,01	0,009	0,012	0,002
N	O	As	Sn	Sb
0,270	0,002	0,006	<0,005	<0,005

Fonte: Certificado do fornecedor.

Como metal de adição, foi utilizado o arame ER2594 SFA 5,9 com diâmetro de 1,0 mm, cuja composição química pode ser verificada na tabela 2.

Tabela 2. Composição química do metal de adição utilizado.

Teor de Elementos de Liga (%)					
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
0,0140	25,470	9,220	4,040	0,560	0,410
P	S	N	Cu	W	
0,019	0,0007	0,2520	0,190	0,010	

Fonte: Certificado do fornecedor.

Como gás de purga, foi utilizada uma mistura gasosa composta por 1,8% de Nitrogênio (N₂) e 98,2% de Argônio (Ar). Desse modo, essa mistura foi aplicada no interior dos tubos a serem soldados.

3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Os processos de soldagem dos corpos de prova foram feitos em juntas de topo (chanfro reto), na posição 5G tanto ascendente quanto descendente (orbital).

Todas as soldas foram realizadas em apenas um passe, utilizando o equipamento de soldagem mecanizado modelo Orbital do fabricante Fronius. Entretanto, durante a execução da solda, a circunferência da junta foi dividida em 4 segmentos, cada um com uma parametrização diferente, objetivando evitar ao máximo um desbalanceamento microestrutural da junta soldada, ocasionada pelo descontrole do aporte térmico.

Vale ressaltar que, anteriormente à soldagem, foi executada a limpeza de toda a superfície interna dos tubos a serem soldados, para retirar todo o resíduo gerado pelo processo de corte dos segmentos de tubo, como pó e pequenas limalhas de aço.

A parametrização para os procedimentos de soldagem realizados durante o presente estudo foi estabelecida a partir de estudos internos para desenvolvimento do procedimento de soldagem de tubos de aço inoxidável super duplex, com diâmetro interno de ½" e espessura de parede igual a 1,24 mm, realizados por uma empresa atuante no setor de petróleo e gás.

Ao longo do primeiro segmento, definido com uma extensão de 90 graus, a velocidade adotada foi de 8,0 cm/min, a corrente básica utilizada foi de 26 A a

corrente de pulso adotada foi de 46 A.

Ao longo do segundo e do terceiro segmento, cada um com uma extensão de 90 graus, os parâmetros se mantiveram. Ou seja, a velocidade adotada foi de 8,0 cm/min, a corrente básica utilizada foi de 26 A e a corrente de pulso foi de 46 A.

Por fim, ao longo do quarto e último segmento, definido com uma extensão de 110 graus, a velocidade adotada continuou sendo 8,0 cm/min, mas os valores de corrente foram alterados, sendo a corrente básica foi de 23 A e a corrente de pulso foi de 43 A.

Ao final do processo, a purga do gás foi mantida durante 35 segundos, objetivando a proteção posterior da zona fundida e adjacências durante o resfriamento.

3.3 TESTES EXECUTADOS

Para realizar a avaliação das soldas executadas, os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos, de corrosão e ensaio não destrutivos, objetivando avaliar a influência da soldagem sobre as propriedades mecânicas, resistência à corrosão e susceptibilidade a trincas do AISD.

Para a escolha dos ensaios, foi tomada como base as diretrizes apresentadas pela norma ISO 13628-5 (2009), que trata sobre o processo de qualificação de tubos metálicos utilizados para fabricação de cabos umbilicais submarinos, em conjunto com as diretrizes apresentadas pela norma ASME IX (2021), que trata sobre o processo de qualificação de procedimentos de soldagem.

Desse modo, foi proposta a realização dos seguintes ensaios, descritos na tabela 3.

Tabela 3. Ensaios propostos para avaliação de soldabilidade.

Ensaio de Tração
Ensaio de Dobramento (Face e Raiz)
Ensaio de Microdureza Vickers
Ensaio de Líquido Penetrante
Análise Metalográfica
Ensaio de Corrosão

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3.1 Ensaio de tração

Para realização deste ensaio, foram utilizados 2 corpos de prova, ambos possuindo junta soldada.

Devido ao fato de as dimensões do tubo testado serem suficientemente pequenas, o ensaio foi realizado no tubo completo. Ou seja, não houve a necessidade de corte e preparação de corpos de prova. Desse modo, as dimensões dos corpos de prova podem ser encontradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)	Secção (mm)	Comprimento entre garras (mm)
1	15,40	59,59	300
2	15,37	59,89	300

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como critério de aceitação para o ensaio, conforme solicita a ASME IX (2021), é necessário que seja obtido um limite de escoamento de, no mínimo, 800 Mpa, e que a ruptura aconteça fora do cordão de solda.

3.3.2 Ensaio de Dobramento

Para a realização deste ensaio, foram utilizados 4 corpos de prova, sendo 2 para DR (Dobramento Raiz) e 2 para DF (Dobramento Face). A preparação destes corpos de prova foi feita conforme ASME IX (2021).

Desse modo, as dimensões dos corpos de prova podem ser encontradas na Tabela 5. Tabela 5 – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de dobramento.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)	Ø Cutelo	Distância entre apoios
1 – DF	11,91 x 1,23	4,92	10,58
2 – DF	11,91 x 1,23		
1 – DR	11,91 x 1,23		
4 – DR	11,91 x 1,23		

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como critério de aceitação para o ensaio, é necessário que não haja quaisquer trincas ou fissuras na região que está sofrendo esforços de tração devido ao dobramento (face ou raiz da solda).

3.3.3 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi realizado utilizando um micro-durômetro Vickers da marca PanTec. Para a realização deste ensaio, foi utilizada apenas uma amostra. A região da junta soldada foi cortada radialmente em dois pontos, de forma a separá-la do resto do tubo. Logo após, esta mesma secção foi cortada longitudinalmente, de forma a expor o perfil da junta soldada, e embutida em baquelite.

Após o embutimento, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento, para o qual as lixas de granulometria 240G, 300G, 400G, 600G, 800G, 1000G e 1200G foram utilizadas, respectivamente. O processo de lixamento ocorreu sob água corrente, sendo a peça girada em 90° em cada momento de troca de lixa.

A microdureza Vickers (HV) foi medida em 3 pontos para cada região da junta soldada (metal base, ZTA e zona fundida). Após isso, foi calculada a média aritmética de microdureza em cada região.

Após o cálculo, os valores obtidos em HV foram convertidos para valores de dureza Rockwell C (HRC), para possibilitar a comparação com o critério de aceitação dado pela norma ASTM A 789/A 789M (2001), que define uma dureza máxima igual a 32 HRC para ligas do tipo UNS S32750.

3.3.4 Líquido Penetrante

Para a realização deste ensaio foram preparados 5 corpos de prova, no qual a inspeção foi realizada na região das juntas soldadas com as superfícies escovadas, utilizando uma escova com cerdas de aço inoxidável, antes do início do ensaio em si.

O penetrante utilizado no ensaio foi o SKL-WP da fabricante Magnaflux, que é comumente utilizado para localizar falhas e trincas abertas à superfície. O removedor SKC-S da fabricante Magnaflux foi utilizado para realizar a pré-limpeza e a remoção do excesso de penetrante aplicado. O revelador utilizado foi o SKD-S2 da fabricante Magnaflux, que é um solvente não clorado e não halogenado à base de solvente não aquoso.

3.3.5 **Análise Metalográfica**

Para esta análise metalográfica, foi utilizado um microscópio óptico da marca Zeiss. Para realização deste ensaio, foi utilizada apenas uma amostra, embutida em baquelite.

Após o embutimento, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento, para o qual as lixas de granulometria 240, 300, 400, 600, 800, 1000 e 1200 foram utilizadas, respectivamente. O processo de lixamento ocorreu com a presença de água corrente, sendo as amostras giradas em 90 graus no momento da troca de lixa, alternando assim o sentido de lixamento.

Todas as regiões da junta (metal base, ZTA e zona fundida) foram avaliadas através de microscopia óptica (onde um aumento de 500x foi adotado) e aferição do percentual de ferrita. Vale a pena ressaltar que este cálculo foi realizado por um software utilizado por uma empresa atuante no setor de petróleo e gás.

Apenas como referência, segundo a norma ISO 13628-5 (2009), é necessário que a ferrita ocupe entre 35% e 55% da área analisada na microestrutura do material.

3.3.6 **Ensaio de Corrosão**

Este ensaio de Corrosão foi realizado tendo como base as diretrizes da norma ASTM G48-03 (2009), juntamente com os requisitos adicionais apresentados pela norma ISO 13628-5 (2009).

Para realização deste ensaio, foram utilizados 2 corpos de prova, sendo cada corpo de prova uma secção longitudinal cortada do tubo soldado na região onde o cordão foi realizado.

Para a realização do teste em si, os tubos de ensaio foram colocados em um banho termostático em silicone líquido condicionado a 50°C, e foi aguardado um tempo de 5 minutos para que a solução de cloreto de ferro atingisse o equilíbrio térmico com o silicone líquido, ou seja, à 50°C.

Nesse momento, antes de inserir os corpos de prova nas soluções de Cloreto de Ferro, cada um dos corpos de prova foi submetido à avaliação dimensional (diâmetro interno, diâmetro externo, altura e espessura da solda) e pesagem.

As misturas foram inseridas em suas soluções e mantidas durante 24 horas, condicionadas a uma temperatura constante de 50°C.

4 RESULTADOS

A partir dos ensaios realizados em corpos de prova, seguindo os parâmetros informados na metodologia, obtivemos os resultados apresentados nos tópicos dos respectivos ensaios abaixo. Os resultados foram comparados com os critérios de aceitação para cada respectivo teste.

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

A tabela abaixo apresenta os resultados obtidos para cada corpo de prova testado.

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio de tração.

CP	Carga de ruptura (kgf)	Tensão de ruptura obtida (Mpa)	Local da fratura
1	5181	853	Fora da solda
2	5196	851	Fora da solda

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 2 e Figura 3 apresentam os resultados obtidos do ensaio de tração realizado em ambos os corpos de prova.

Figura 2 – Resultado de ensaio de tração (CP 1).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Resultado de ensaio de tração (CP 2).

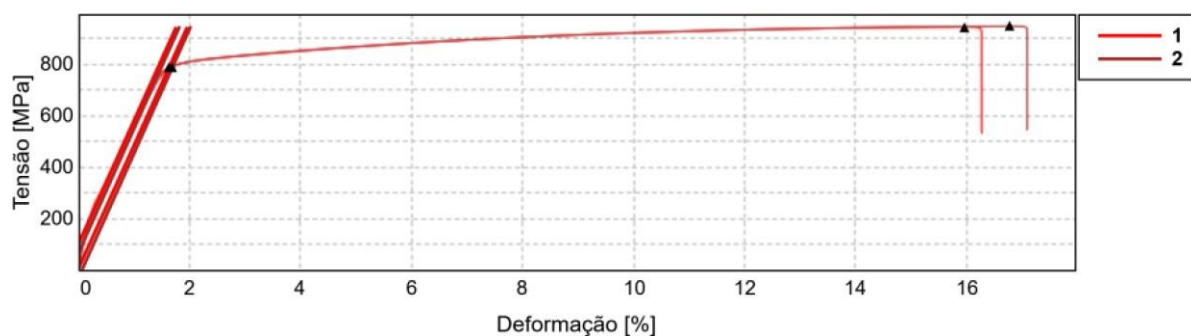


Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme a Tabela 6, os corpos de prova atingiram uma tensão de ruptura de 853 MPa e 851 MPa, para o primeiro e segundo corpo de prova, respectivamente. Além disso, para ambos os corpos de prova, a ruptura ocorreu na região da ZTA, ou seja, fora da solda, conforme pode ser verificado na Figura 2 e Figura 3.

O diagrama tensão-deformação obtido destes ensaios para ambos os corpos de prova pode ser verificado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Diagrama tensão-deformação obtido para CP's 1 e 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O teste de dobramento foi realizado para avaliar qualitativamente a superfície soldada quanto à ductilidade, conforme ASME IX (2021).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para cada corpo de prova testado. Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio de dobramento.

CP	Dimensões (mm)	Diâmetro do cutelo (mm)	Distância entre roletes (mm)	Ângulo de dobramento (graus)	Resultado obtido
DF - 1	11,91 x 1,24	4,92	10,58	180	Não apresentou fissuras
DF - 2	11,91 x 1,24	4,92	10,58	180	Não apresentou fissuras
DR - 1	11,91 x 1,24	4,92	10,58	180	Não apresentou fissuras
DR - 2	11,91 x 1,24	4,92	10,58	180	Não apresentou fissuras

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Corpos de prova após ensaio de dobramento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Desse modo, como não foram encontrados nenhum surgimento de trincas ou fissuras, tanto na região de raiz, quanto na região do reforço da solda, não é possível dizer que o processo de soldagem executado contribuiu para a perda de ductilidade do AISD UNS S32750. Assim como não é possível dizer também que este aço possui uma alta susceptibilidade a trincas, mesmo após ser soldado pelo processo TIG Orbital, considerando os parâmetros que aqui foram utilizados.

4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O teste de microdureza Vickers foi realizado em tubo com solda e a dureza medida em três pontos diferentes da secção do tubo com/forme informado no item metodologia. A Tabela 8, a Tabela 9 e a Tabela 10 trazem os valores de dureza aferido em cada ponto, bem como a média desses valores para cada região da junta.

Tabela 8 – Resultados obtidos do ensaio de microdureza – Metal Base.

CP	Resultados obtidos
	297,00
Metal Base	305,00
	296,00
Média	299,33

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em relação ao metal base, a dureza encontrada durante os ensaios deste trabalho apresenta valores ligeiramente maiores do que os valores fornecidos em HV pelo certificado do fornecedor, os quais foram evidenciados pelo referencial teórico.

Tabela 9 – Resultados obtidos do ensaio de microdureza – ZTA.

CP	Resultados obtidos
	291,00
ZTA	283,00
	283,00
Média	285,67

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 10 – Resultados obtidos do ensaio de microdureza – Zona fundida.

CP	Resultados obtidos
	273,00
Zona fundida	275,00
	279,00
Média	275,57

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota-se que houve uma ligeira queda no valor médio de dureza na zona fundida e na ZTA, em comparação ao valor para o metal base. Desse modo, é plausível levantar a hipótese de que existe a possibilidade de que a diminuição da dureza na junta esteja relacionada com o aumento de ferrita.

4.4 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

Os resultados obtidos a após o ensaio de Líquido Penetrante podem ser visualizados a partir da Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Execução de ensaio de líquido penetrante.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir desse ensaio de líquido penetrante, em nenhuma das 5 amostras foram identificadas trincas superficiais, tendo sido analisada todas as regiões da junta (metal base, ZTA e zona fundida) e ao longo de toda a circunferência de cada junta.

Considerando que o ensaio de Líquido Penetrante não indicou a ocorrência de trincas superficiais é plausível concluir que, conforme já mencionado no referencial teórico, mesmo que o AISD seja um aço que necessite de cuidados específicos

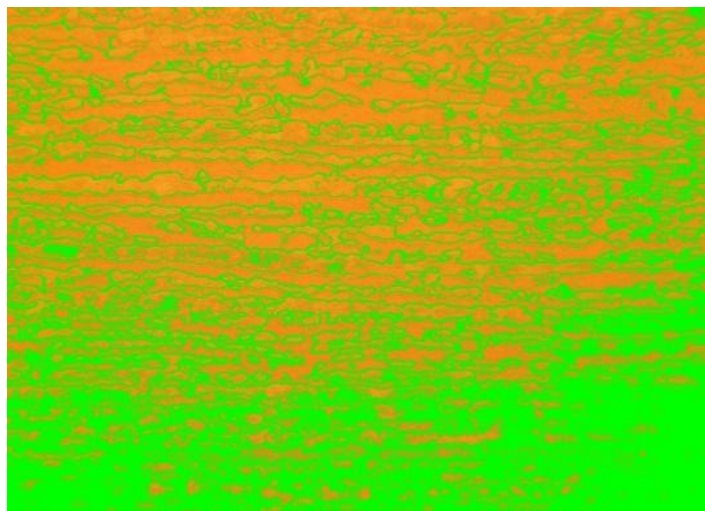
durante a soldagem, como o controle do aporte térmico, por exemplo, é possível dizer que os parâmetros utilizados para soldagem TIG Orbital executada durante este trabalho foram suficientes para proporcionar uma união sem susceptibilidade a trincas superficiais.

Portanto, não é possível dizer que o UNS S32750 apresenta alta susceptibilidade a trincas, caso sejam adotados os parâmetros adequados durante sua soldagem.

4.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A avaliação microestrutural foi realizada no CP com solda e foi observado a microestrutura (aumento de 500x) para contabilizar o percentual de área de ferrita em cada região (metal base, ZTA e zona fundida). As figuras abaixo mostram os resultados dos cálculos de área obtidos em 1 ponto de cada região por meio da utilização de software utilizado por uma empresa atuante no setor de petróleo de gás.

Figura 3 – Metalografia na região de metal base.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como resultado do cálculo de área e porcentagem de ferrita na região do metal base, foi obtido o valor de 40% respectivamente.

Figura 7 – Metalografia na região da ZTA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como resultado do cálculo de área e porcentagem de ferrita na região de ZTA, foi obtido o valor de 51% respectivamente.

Figura 8 – Metalografia na região da solda.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como resultado do cálculo de área e porcentagem de ferrita na região da solda, foi obtido o valor de 51% respectivamente.

Apenas como valores de referência, segundo a norma ISO 13628-5 (2009), é necessário que a ferrita ocupe entre 35% e 55% da área analisada na microestrutura do material, e conforme medições através software de análise microscópica, os valores obtidos nesta amostra estão dentro do limite estabelecido, portanto, considerariamos o resultado do teste como satisfatório.

4.6 ENSAIO DE CORROSÃO

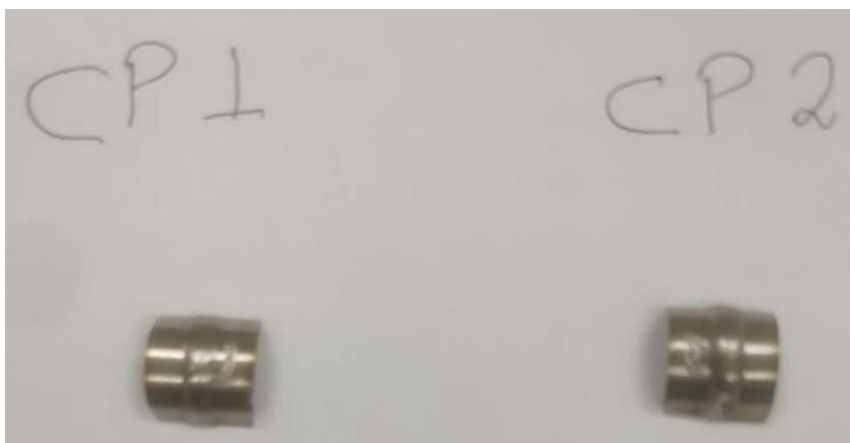
Após a realização do ensaio, os corpos de prova foram pesados novamente para que a variação de massa e a perda de massa efetiva pudessem ser calculadas, conforme evidenciado na Tabela 11.

Tabela 11 – Massa final e variação de massa obtidas de ensaio de corrosão.

CP	Massa final	Variação de massa	Perda de massa efetiva
1	2,7733 g	0,0002 g	0,3 g/m ²
2	3,1817 g	0,0003 g	0,4 g/m ²

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Corpos de prova após ensaio de corrosão.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ao analisar os resultados obtidos, é possível perceber que a perda de massa foi pequena em relação ao critério de aceitação imposto pela norma ISO 13628-5 (2009), que especifica a perda máxima de massa efetiva de 1,0 g/m².

Como conclusão para o ensaio de corrosão, podemos observar na Figura 9 que não houve sinais de corrosão na superfície das juntas soldadas. Sendo assim, não é possível dizer que o processo de soldagem executado foi prejudicial para a propriedade de resistência à corrosão do AISD UNS S32750.

5 CONCLUSÃO

Tendo como objetivo deste trabalho realizar avaliações criteriosas da influência exercida pela soldagem TIG Orbital sobre as propriedades mecânicas e resistência à corrosão do AISD, se fez possível, através dos ensaios realizados, avaliar a variação dessas propriedades antes e após o procedimento de soldagem. Logo, após analisar

todos os resultados obtidos nessa bateria de testes, é plausível dizer que é possível obter uma união de qualidade entre ligas de aços inoxidável super duplex UNS S32750, sem que haja qualquer fragilização do material ou perda de sua elevada resistência à corrosão, se forem utilizados os parâmetros adequados e tomados os devidos cuidados durante o processo, como o controle do aporte térmico, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, João Victor de Sousa. **Influência dos tratamentos termomecânicos na microestrutura e no comportamento de corrosão da liga AA2198**. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

BALANCIN, Oscar; DIAS, Clayton Pereira. **Análise do comportamento mecânico a quente do aço inoxidável super duplex UNS S32760 através de mapas de processamento**. In: **Ciência e Engenharia de Materiais: conceitos, fundamentos e aplicação**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2021. p. 68–79.

BRANDI, Sérgio Duarte; SILVEIRA, Lauro MY; VASCONCELLOS, Daniel LB. **Aplicação da norma astm A923-Prática a para identificação de fases intermetálicas em junta soldada de aço inoxidável superduplex UNS 32750**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 63, p. 153-158, 2010.

CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: Arcelor Mittal Brasil, v. 29, 2008.

CHAVES, Antelmo Santos et al. **Efeito da deformação plástica acumulada no desempenho à fadiga de aço super duplex empregados em tubos umbilicais para produção de petróleo**. Research, Society and Development, v. 11, n. 5, p. e49711528614- e49711528614, 2022.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

DA COSTA, André Luiz V.; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

FIGUEIRÔA, Daniel Wallerstein et al. **Influência da posição e dos parâmetros de soldagem na soldagem TIG orbital aplicada a tubulações de aço baixo carbono**. Soldagem & Inspeção, v. 20, p. 446-455, 2015.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. **A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos**. Seropédica-RJ: Revista Virtual de Química, 2013.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2011.

GONÇALVES, André Athayde. **Análises Global e Local de Umbilicais com Tubos de**

Aço.

2009. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GROUP, Prysmian. Steel Tube Umbilicals (STU). **Prysmian Group**, 2018. Disponível em: <https://at.prysmiangroup.com/products-and-solutions/oil-and-gas/steel-tube-umbilicals>. Acesso em: 03 setembro. 2025.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 13628-5**: Petroleum and natural gas industries – Design and operation of subsea production systems – Part 5: Subsea umbilicals. 2 ed. Suíça: Iso, 2009. 178 p.

LEITE, Raphael Aragonês. **Avaliação da Tenacidade À Fratura De Uma Junta Soldada De Um Aço Inoxidável Super Duplex Com A Utilização De Proteção Catódica**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LOPES, Jorge Teofilo de Barros. **Influência da presença de fases frágeis e da temperatura nas propriedades de propagação de trinca por fadiga do aço inoxidável duplex UNS S31803**. 2006.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

PAIVA, Tobias Carvalho Campos et al. **Análise da influência do gás de purga na raiz de juntas soldadas pelo processo GTAW em aço inoxidável superduplex UNS S32750**. Soldagem & Inspeção, v. 19, p. 125-133, 2014.

PIGOZZO, Ivan Olszanski et al. **Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz**. 2015.

PURNELL, Steve; III, Jack Heinzman. **How to achieve a clean process line in stainless steel pipes**. Cleanroom Technology, Peterborough, 2003.

RODRIGUES, Helder Caldas. **Estudo da resistência à corrosão em ligas Al 3%Cu-xNb (x = 0,5, 3, 5%) solidificadas horizontalmente sob regime transiente de extração de calor**. 2023. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém, Belém, 2023.

SANTOS, Bianca Sanches. **Caracterização microestrutural da liga de alumínio 2024 após shot peening**. 2023. 73 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

SOUSA, João Matheus Batista Amaro de. **Influência dos Elementos de Liga nos Aços Inoxidáveis Duplex Esuperduplex Utilizados na Indústria do Petróleo: Uma Revisão**. 2021. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

SOUZA, Guttemberg Chagas de et al. **Avaliação das propriedades mecânicas e da resistência à corrosão em soldas de reparo pelo processo GTAW no aço inoxidável superduplex UNS S32760**. Soldagem & Inspeção, v. 19, p. 302-313, 2014.

SOUZA, Sérgio Augusto De. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos**

teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2007.

VIVEIROS, Bárbara Victoria Gonçalves de. **Resistência à corrosão das ligas de alumínio AA2050-T84 e AA7050-T7451 soldadas por fricção e mistura**. 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.