

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**Curso de Especialização em Soldagem**

Raffael de Araujo Santos

**QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE TUBULAÇÃO  
SUPERDUPLEX UTILIZANDO GTAW**

Belo Horizonte  
2025

Raffael de Araujo Santos

**QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE TUBULAÇÃO  
SUPERDUPLEX UTILIZANDO GTAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Soldagem.

Professor orientador: Reginaldo M. Nunes.

S237q

Santos, Raffael de Araujo.

Qualificação de procedimento de soldagem de tubulação superduplex utilizando GTAW [recurso eletrônico] / Raffael de Araujo Santos. – 2025.

1 recurso online (26 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Reginaldo Matias Nunes.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Inclui bibliografia.

1. Soldagem. 2. Tubos de aço. 3. Tungstênio. I. Nunes, Reginaldo Matias. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Programa de Pós-Graduação  
Curso de Especialização em Soldagem



---

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **4/12/2025**, às **15:00 h**, a Comissão examinadora se reuniu presencialmente para avaliar o trabalho durante o 1ª Congresso Nacional em Engenharia e Soldagem:

**Título: QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE TUBULAÇÃO SUPERDUPLEX UTILIZANDO GTAW**

**Nome Completo Aluno:** Raffael de Araujo Santos

**Nº da Matrícula na UFMG:** 19804

**Local:** Presencialmente no auditório da Escola de Engenharia da UFMG.

### Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 20 minutos, é de parecer **FAVORÁVEL** à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de **80 pontos** e **COM** sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador **Reginaldo Matias Nunes**.

### **Assinaturas:**

---

**Reginaldo Matias Nunes**  
**DEMEC/UFMG - Orientador**

---

**Reginaldo Matias Nunes**  
**DEMEC/UFMG – Avaliador**

---

**Aluno:** Raffael de Araujo Santos  
**CPF:** 131.265.607-76

## AGRADECIMENTO

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus e à minha família, que sempre estiveram ao meu lado, me dando força e apoio para seguir em frente e não desistir. Em especial a minha esposa Lucélia Lindoso que sempre me deu forças para continuar.

Agradeço à TechnipFMC pela oportunidade de crescimento e aperfeiçoamento profissional na área em que atuo. Também sou grato aos meus colegas de trabalho, que contribuíram com apoio e incentivo durante a elaboração deste estudo, em especial ao Daniel Rasel por ser um grande professor.

Agradeço ao meu orientador que sempre foi solícito e me ajudou durante a escrita deste trabalho.

## RESUMO

Este estudo apresenta a qualificação de um procedimento de soldagem aplicado à fabricação de um componente da árvore de Natal, equipamento essencial na indústria de óleo e gás. Utilizou-se o processo GTAW para a união entre o aço superduplex UNS S32750 e o metal de adição ER2594, selecionado por sua composição química capaz de preservar a microestrutura ferrítico austenítica indispensável à resistência mecânica e à corrosão. A qualificação envolveu sete corpos de prova, variando aporte térmico, abertura de raiz e composição do gás de proteção. Ensaios de corrosão indicaram que o aumento do aporte térmico promoveu pitting e perda de massa, mesmo com a presença de nitrogênio na composição do gás de purga e proteção. Por outro lado, o menor aporte térmico, obtido com abertura de raiz reduzida, eliminou essas falhas. O estudo evidencia a influência direta dos parâmetros de soldagem na integridade do material, destacando a relevância da qualificação para garantir o desempenho do componente.

Palavras-chave: Superduplex 25Cr, ER 2594, Qualificação de EPS.

## ABSTRACT

This study presents the qualification welding procedure applied to the fabrication of a component of a Christmas tree, essential equipment in the oil and gas industry. The GTAW process was used to join UNS S32750 superduplex steel with ER2594 filler metal, selected for its chemical composition capable of preserving the ferritic-austenitic microstructure indispensable for mechanical strength and corrosion resistance. The qualification involved seven test specimens, varying heat input, root opening, and shielding gas composition. Corrosion tests indicated that increased heat input promoted pitting and mass loss, even with the presence of nitrogen in the purge and shielding gas composition. On the other hand, the lower heat input, obtained with reduced root opening, eliminated these defects. The study highlights the direct influence of welding parameters on material integrity, emphasizing the relevance of qualification to guarantee component performance.

Keywords: Superduplex 25Cr, ER 2594, EPS Qualification.

## LISTA DE SÍMBOLOS

MIG Metal Inert Gas

MAG Metal Active Gas

TIG *Tungsten Inert Gas*

EPI Equipamento de Proteção Individual

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

CC+ Corrente contínua com polaridade inversa

CC- Corrente contínua com polaridade direta

GTAW Gas Tungsten Arc Welding – Soldagem por gás inerte de tungstênio

ASTM American Society for Testing and Materials - Sociedade americana de testes e materiais

ISO International Organization for Standardization - Organização Internacional para Padronização

ASME *American Society of Mechanical Engineers* – Sociedade americana de engenheiros mecânicos

EPS Especificações de Procedimento de Soldagem

END Ensaios Não Destrutivos

ESAB Empresa multinacional da indústria de soldagem e corte

Ø Diâmetro

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplo de árvore de Natal e conjunto de produção submarina. Fonte: Marinho (2020). .....	11
Figura 2 - Corpo de prova. (Fonte: Produzido pelo autor). .....	13
Figura 3 - Antes e depois da junta soldada. A distância B e o número de camadas e cordões sofrem alterações dependendo do CP. (Fonte: Produzido pelo autor). .....	14
Figura 4 - Plano de remoção das amostras para os ensaios mecânicos e metalográfico. (Fonte: Produzido pelo autor). .....	15
Figura 5 - Posições de retirada das amostras para ensaio de impacto.(Fonte: DNV-RPB204). .....	16
Figura 6 - Perfil de dureza que será performado. (Fonte: Figura 5-5 da DNV RP-B204). .....	16
Figura 7 - Imagem das amostras após o teste de corrosão, apresentando as regiões da raiz e o reforço (CAP) da junta. ....	17
Figura 8 - Metalografia com amplificação de 400x e quantificação de fase do CP5.....	19
Figura 9 -Metalografia com amplificação de 400x e quantificação de fase do CP1.....	20
Figura 10 - Gráfico de acordo com o perfil de dureza HV10, das amostras CP1 e CP6. Nas regiões do reforço (CAP), região intermediária da junta (MED) e raiz da junta (RAIZ). .....	22

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros de solda utilizados. Gás utilizado para purga (Gpg.) e Gás utilizado para proteção (Gpt.).....	14
Tabela 2 - Resultado da perda de peso das amostras após teste de corrosão. ....	17
Tabela 3 - Ensaio de tração dos CPs 1 e 6, com amostras retiradas nos sentidos transversais (12h) e longitudinal (6h) à direção da junta. ....	21
Tabela 4 - Resultados do teste de impacto Charpy a -46°C dos CPs 2 e 4. ....	23

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Metodologia.....	13
2.1 Materiais e parâmetros.....	13
2.2 Plano de teste.....	14
2.2.1 Ensaio não destrutivo.....	14
2.2.2 Ensaio destrutivo.....	15
3. Resultados e análise.....	16
3.1 Corrosão e Metalografia.....	17
3.2 Ensaio mecânico.....	20
4. Conclusão.....	23
5. REFERÊNCIAS.....	25

## 1. Introdução

Este trabalho tem por objetivo descrever a metodologia para qualificar uma especificação do procedimento de soldagem, desta forma, garantir a qualidade e repetibilidade na fabricação de árvores de Natal que utiliza componentes superduplex em sua construção.

Na exploração de petróleo e gás, a árvore de Natal desempenha papel fundamental como interface entre o poço e os sistemas da superfície regulando o fluxo dos fluidos extraídos. Composta por um conjunto de válvulas e conexões, sua estrutura remete ao formato de uma árvore decorativa, o que originou seu nome. Pode ser instalada tanto em terra quanto em ambientes submarinos, sendo sua configuração determinada por fatores como pressão, temperatura e composição dos fluidos do reservatório. A base da estrutura abriga a cabeça de poço, responsável por vedar e manter a sustentação. Já a árvore de Natal atua diretamente no controle da produção, permitindo o gerenciamento preciso do escoamento. Para garantir a segurança operacional, o sistema é equipado com válvulas que se fecham automaticamente em situações críticas. O direcionamento dos fluidos para as unidades de processamento ocorre por meio de um manifold, que distribui o fluxo conforme a demanda, de acordo com o esquema mostrado na figura 1. (NEVES, 2012 e Marinho 2020).

O componente a ser fabricado integra o sistema de elevação artificial por gás lift. O sistema de gás lift consiste na injeção de gás comprimido no interior da coluna de produção com o objetivo de reduzir a densidade do fluido, promovendo a diminuição da pressão hidrostática e, conseqüentemente, facilitando o escoamento até a superfície. A árvore de Natal desempenha função crítica no controle operacional desse processo, permitindo a gestão precisa da injeção de gás seja em regime intermitente ou contínuo por meio de válvulas e conexões dedicadas, conforme os parâmetros de projeto e as condições dinâmicas do poço (ELLDAKLI, 2017). Por este motivo o sistema sofre com grandes magnitudes de pressão, sendo necessário utilizar componentes que são adequados ao regime severo de trabalho (LONG, Yan et al.2022).

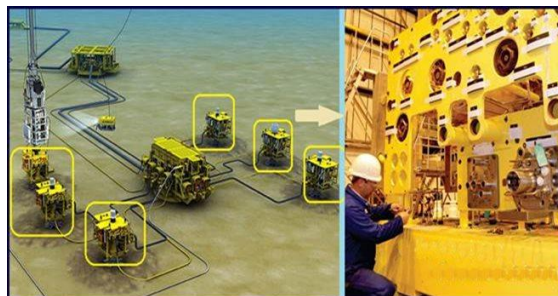


Figura 1- Exemplo de árvore de Natal e conjunto de produção submarina. Fonte: Marinho (2020).

A ASME Seção IX estabelece orientações gerais para a qualificação de procedimentos de soldagem (EPS) e de profissionais responsáveis pela execução, exigindo a elaboração do registro de qualificação de procedimento (RQP), documento técnico que especifica detalhadamente as variáveis essenciais, suplementares e não essenciais envolvidas no processo de soldagem. RQP e EPS são documentos que garantem a correta execução da soldagem em tubulações e equipamentos industriais, conforme os códigos de projeto, fabricação e inspeção (SILVA, Ana Carla S. et al 2019).

Em complemento a ASME IX, a API 6A se refere a requisitos para produção de equipamentos para cabeça de poços e árvores de Natal, na industrial de óleo e gás. Essa norma garante que válvulas, flanges e outros equipamentos usados em poços de petróleo e gás sejam feitos com materiais adequados, nas medidas certas e com controle de qualidade, para funcionarem com segurança e eficiência mesmo em condições difíceis (SOTOODEH, 2019).

Os aços inoxidáveis duplex possuem em sua microestrutura aproximadamente 50% de ferrita ( $\alpha$ ) e 50% de austenita ( $\gamma$ ). Essa composição é responsável por proporcionar alta resistência mecânica, boa ductilidade e tenacidade. A liga possui em sua composição a adição de nitrogênio, onde proporciona a melhora da distribuição dos elementos entre as fases, aumenta a resistência da austenita, melhora a resistência a corrosão e facilita a soldagem. Apresenta elevado teor de cromo e molibdênio quando comparado com o duplex, elevando sua capacidade de resistência a corrosão (FRANCIS, 2021). A sua propriedade mecânica se deve as duas estruturas atômicas, FCC( $\gamma$ ) e CCC ( $\alpha$ ), presentes na liga. Os diferentes arranjos atômicos promovem reações distintas durante a deformação do material. Dessa maneira, uma estrutura atua como barreira à deformação da outra. Além da elevada resistência à oxidação, essa característica confere às ligas inoxidáveis superduplex um diferencial significativo para a fabricação de equipamentos submarinos destinados a ambientes altamente agressivos (CALLISTER JR, 2020).

A soldagem de um material superduplex é complexa e é altamente técnica, exige um bom controle dos parâmetros de soldagem para que as suas propriedades mecânicas e à corrosão sejam preservadas. Como já descrita, a sua principal característica é possuir duas fases a ferrita ( $\alpha$ ) e a austenita ( $\gamma$ ), o desafio é o equilíbrio entre elas na junta soldada o seu desequilíbrio representa o comprometimento da resistência a corrosão e a fratura, precipitação de fases deletérias como a sigma ( $\sigma$ ), carbeto e nitreto podem se formar durante o resfriamento lento ou o excesso de temperatura, sendo prejudicial a tenacidade e a corrosão de acordo com (Vasconcellos 2010).

As técnicas de soldagem são essenciais para se ter o controle do aporte térmico, a energia de soldagem deve ser suficiente para permitir a transformação da ferrita em austenita, mas não tão alta para desenvolver a precipitação das fases deletérias, desta forma, é indicado o uso do processo de soldagem GTAW com alimentação de arame de forma manual, a temperatura interpasses também evita a formação de intermetálicos de acordo com de acordo com (Silva 2017). O uso de proteção gasosa como argônio com adição de nitrogênio (até 3%) ajuda a estabilizar a austenita e evitar a oxidação na raiz da solda de acordo com o trabalho de (Paiva 2013).

## 2. Metodologia

### 2.1 Materiais e parâmetros

Para validar o procedimento de soldagem, foram confeccionados seis corpos de prova em forma de tubo, utilizando como metal base o aço inoxidável superduplex UNS S32750. A união foi realizada por meio do processo de soldagem GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), empregando o consumível ER2594 com diâmetro de 2,4 mm, escolhido por sua adequada compatibilidade metalúrgica com o metal base. A geometria da junta e as dimensões dos tubos seguiram rigorosamente as diretrizes estabelecidas na Figura 2, assegurando uniformidade e confiabilidade nos resultados. A execução da soldagem foi feita na posição 6G ascendente, por ser uma posição de teste inclinada a 45° que simula três posições durante a soldagem, sobre cabeça, vertical com progressão ascendente e plana. Após a conclusão do processo de soldagem, os tubos passaram primeiramente por ensaios não destrutivos, após aprovação os CPs foram para o laboratório passar por ensaios destrutivos, com o objetivo de avaliar a qualidade e a integridade das juntas soldadas. A temperatura de interpasse mínima usada foi de 27°C e a máxima foi de 85°C, as amostras não passaram por tratamento térmico pós solda.

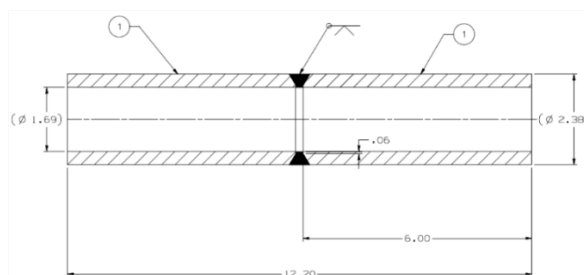


Figura 2 - Corpo de prova. (Fonte: Produzido pelo autor).

A disposição da junta está de acordo com a figura 3, sendo B a abertura da raiz, ela sofre alterações de acordo com a tabela 1. O número de camadas é alterado quando comparado entre os CPs devido aos parâmetros de solda utilizados.

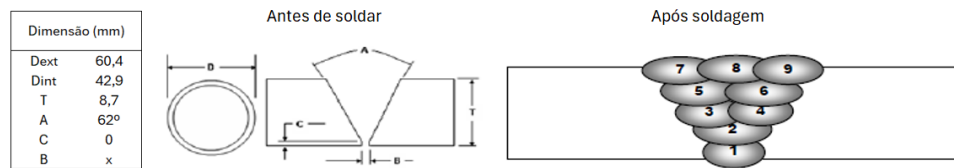


Figura 3 - Antes e depois da junta soldada. A distância B e o número de camadas e cordões sofrem alterações dependendo do CP. (Fonte: Produzido pelo autor).

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos parâmetros elétricos empregados durante a soldagem das juntas dos corpos de prova, utilizando dois diferentes tipos de gases. O tipo 1 corresponde a uma mistura composta por 2,5% de Nitrogênio (N<sub>2</sub>) e 97,5% de Argônio (Ar), enquanto o tipo 2 consiste em Argônio com pureza de 99,9%.

Tabela 1- Parâmetros de solda utilizados. Gás utilizado para purga (Gpg.) e Gás utilizado para proteção (Gpt.).

Id	B	I (A)	Tensão (V)	VS (mm/min)	Vazão (l/min)	Aporte (J/mm)	Nº de camadas	Nº de passes	Gpg.	Gpt.
CP1	5,5	118,3	11,5	69,2	15,0	1200	5	9	1	1
CP2	4,5	112,5	11,5	63,0	15,0	1240	4	8	1	1
CP3	4,5	123,0	11,6	85,1	15,0	1053	5	10	1	1
CP4	4,5	115,4	11,1	73,9	20,0	1052	5	10	2	1
CP5	4,0	134,0	12,3	126,6	20,0	823	6	11	2	1
CP6	4,0	134,5	12,3	125,6	20,0	840	6	11	2	1

## 2.2 Plano de teste

### 2.2.1 Ensaios não destrutivos

Para simplificação do estudo, os resultados dos ensaios não destrutivos não entrarão na discussão de resultados. Foram realizados ensaio visual, ultrassom, radiografia e ensaio de líquido penetrante.

A inspeção visual das juntas soldadas é realizada com base em critérios técnicos que determinam as condições de aceitação e rejeição. São consideradas descontinuidades inaceitáveis: trincas, falta de fusão ou penetração e porosidade. Irregularidades geométricas, como concavidade na superfície ou na raiz, são toleradas desde que não excedam 1 mm de profundidade ou 10% da espessura da parede adotando-se o menor valor como referência. Adicionalmente, a altura do reforço ou protusão na raiz deve ser limitada a no máximo 1,5 mm.

Ensaios complementares, como o de líquido penetrante, seguem critérios específicos para identificação de descontinuidades superficiais. Já os métodos de ultrassom e radiografia são empregados para detectar falhas internas e garantir a integridade estrutural das juntas soldadas. Os ensaios estão de acordo com as normas API 6A, ASME V, ISOs 17640, 22825, 17637, 5817 e 3452.

### 2.2.2 Ensaios destrutivos

O teste de corrosão foi feito de acordo com a ASTM G48 método A, o critério de aceitação está de acordo com a ISO 17781 para juntas soldadas para materiais duplex 25 Cr. As dimensões da amostra devem ter a espessura total de parede de 1 a 2 polegadas ao longo da solda, a decapagem utilizada por 5 min a 60°C em solução de 20% HNO<sub>3</sub> + 5% HF seguida de enxague em etanol, após seca ela é pesada. Para o teste G48 a amostra ficará em solução de cloreto férrico por 24 Hrs a 40°C, após decorrido o tempo, a amostra é novamente pesada para comparação com o peso inicial e em seguida é feito uma inspeção visual com aumento de 20X. O ensaio deve ser considerado aprovado quando não houver formação de pitting e não houver perda de massa superior a 4.0 g/m<sup>2</sup>.

O teste de tração de solda transversal foi realizado de acordo com a seção IX da ASME. O teste de dobramento também obedece a mesma norma em que depois de dobrar a amostra não deve apresentar descontinuidades (como trincas, falta de fusão etc.) na zona fundida ou zona afetada pelo calor que excedam a 3mm em qualquer direção da superfície convexa do CP. O plano de retirada das amostras seguiu as orientações da Figura 4. Para o ensaio de tração, as amostras foram posicionadas nos ângulos de 0° (correspondente à posição 12 horas) e 360° (correspondente à posição 6 horas).

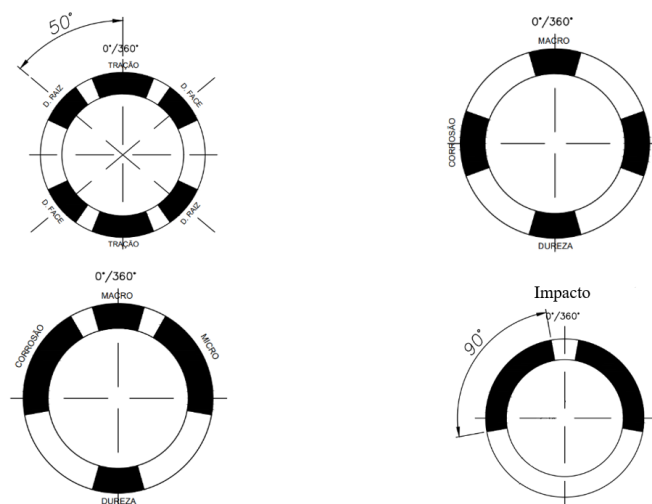


Figura 4 - Plano de remoção das amostras para os ensaios mecânicos e metalográfico. (Fonte: Produzido pelo autor).

O método utilizado para realizar o ensaio foi em conformidade com a ISO148, e as amostras foram extraídas conforme previsto na norma DNV RPB B204. Quatro amostras foram extraídas: uma no centro da junta no metal de solda (MS), uma na linha de fusão (LF), outra a 2 mm da linha de fusão (LF+2) e a última a 5 mm da linha de fusão (LF+5), conforme

apresentado na figura 5. A temperatura de de ensaio foi fixada em  $-46^{\circ}\text{C}$ , e a expansão lateral será avaliada e não deverá ultrapassar 0,38mm.

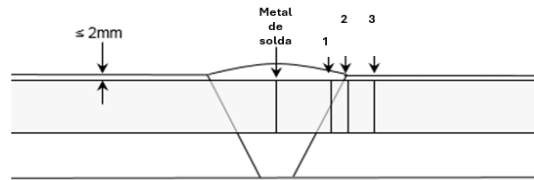


Figura 5 - Posições de retirada das amostras para ensaio de impacto. (Fonte: DNV-RPB204).

As amostras para os ensaios microscópicos foram preparadas conforme a norma ASTM E3-01R07. O ataque químico foi realizado segundo a ASTM E407-10, utilizando solução de KOH a 40%. A quantificação da fase ferrítica seguiu os procedimentos estabelecidos na ASTM E562-10, enquanto os termos e definições adotados estão em conformidade com a ASTM E7-03. Os critérios de aceitação foram baseados nas diretrizes da DNVGL-RP-B204-2019 e da Norsok M-601. A detecção de fases foi conduzida conforme o Método A da norma ASTM A923-2014.

A avaliação da dureza Vickers com carga de 10 kgf (HV10), foi realizado de acordo com a ASTM E92. Esse ensaio é amplamente utilizado para caracterizar a resistência superficial de materiais metálicos, especialmente em regiões afetadas termicamente e zonas de fusão. O perfil de dureza está de acordo com a figura 6.

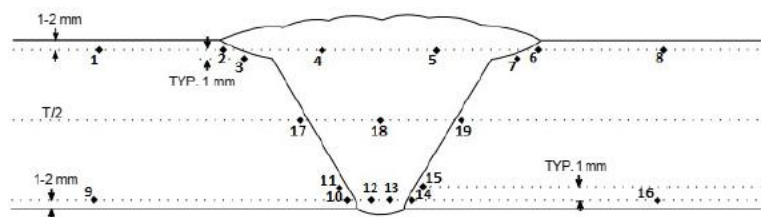


Figura 6 - Perfil de dureza que será performedo. (Fonte: Figura 5-5 da DNV RP-B204).

### 3 Resultados e análise

Os resultados foram avaliados em dois grupos, definidos com base na similaridade dos parâmetros de soldagem. O Grupo 1, composto pelos corpos de prova (CPs) 1, 2 e 3, apresenta uma média de aporte térmico de 1164 J/mm. Já o Grupo 2, formado pelos CPs 4, 5 e 6, possui média de aporte térmico de 905 J/mm. A divisão foi adotada devido à quantidade limitada de amostras disponíveis para os ensaios, tornando necessário o uso de CPs distintos para viabilizar a execução completa dos testes laboratoriais exigidos para a qualificação da EPS.

### 3.1 Corrosão e Metalografia

Os resultados de corrosão pelo método G48 estão de acordo com a tabela 2, o grupo 1 foi reprovado por perda de massa maior que 4 g/m<sup>2</sup>. Na figura 7 é possível ver as imagens das amostras após o teste de corrosão.

Tabela 2 - Resultado da perda de peso das amostras após teste de corrosão.

Id	Perda de peso (g/m <sup>2</sup> )
CP1	45,81
CP2	59,69
CP3	5,1
CP4	3,16
CP5	0
CP6	0

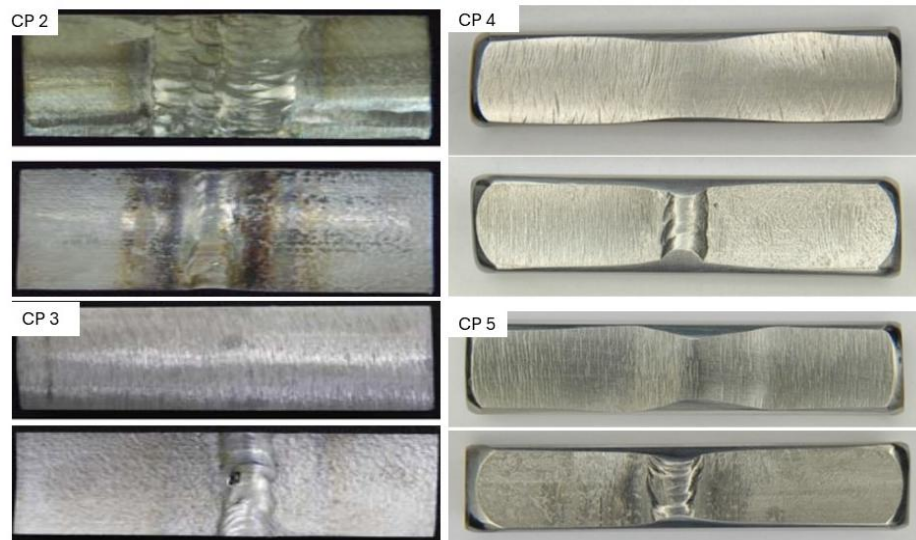


Figura 7 - Imagem das amostras após o teste de corrosão, apresentando as regiões da raiz e o reforço (CAP) da junta.

As figuras 8 e 9 possuem os resultados da análise metalográfica do CP5 e CP1 respectivamente. As imagens possuem amplificação de 400x e apresentam a quantificação de fase ferrítica das regiões do metal de base (MB), do metal de solda (MS), das regiões da raiz e do reforço da junta (CAP), além da zona térmica afetada (ZTA) das regiões citadas anteriores.

Não foram identificadas precipitados intermetálicos ou fases deletérias que possam prejudicar a capacidade de passivação da liga superduplex. Nas zonas termicamente afetadas (ZTA) e no metal de solda (MS), observam-se os microconstituíntes típicos das áreas submetidas ao processo de soldagem, incluindo ferritas com morfologias Widmanstätten,

poligonais e aciculares — sendo esta última a mais desejável por proporcionar maior resistência mecânica. (Lippold, 2005) .

Como era esperado, o CP1 (Grupo 1) apresenta uma maior proporção de fase ferrítica, especialmente no metal de solda, em comparação ao CP5 (Grupo 2). Esse comportamento está relacionado ao elevado aporte térmico aplicado durante o processo de soldagem. À medida que o aporte térmico aumenta, o pico de temperatura atingido pelo ciclo térmico também se eleva. Como resultado, a capacidade da peça de dissipar calor é reduzida, o que leva a uma diminuição da taxa de resfriamento. Esse resfriamento mais lento prolonga o tempo de permanência na faixa de temperatura crítica, favorecendo a decomposição da austenita e, conseqüentemente, o aumento da fração de ferrita na microestrutura (Callister JR, 2020).

Durante a solidificação e a formação da ferrita, ocorre a segregação de elementos químicos na frente de solidificação. A austenita, devido à sua estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), apresenta maior solubilidade para elementos substitucionais, o que favorece a retenção de elementos ligados à passivação, como cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo). Essa característica contribui significativamente para a resistência à corrosão. Em contrapartida, a fase ferrítica tende a se formar empobrecida desses elementos passivadores, tornando-se mais suscetível à corrosão localizada, especialmente à corrosão por pites (Kou Sindo, 1987).

A maior quantidade de ferrita observada no Grupo 1, resultado do elevado aporte térmico na soldagem, justifica a maior perda de massa registrada no teste de corrosão G48, conforme os dados apresentados na Tabela 2 (Zhang, 2016).

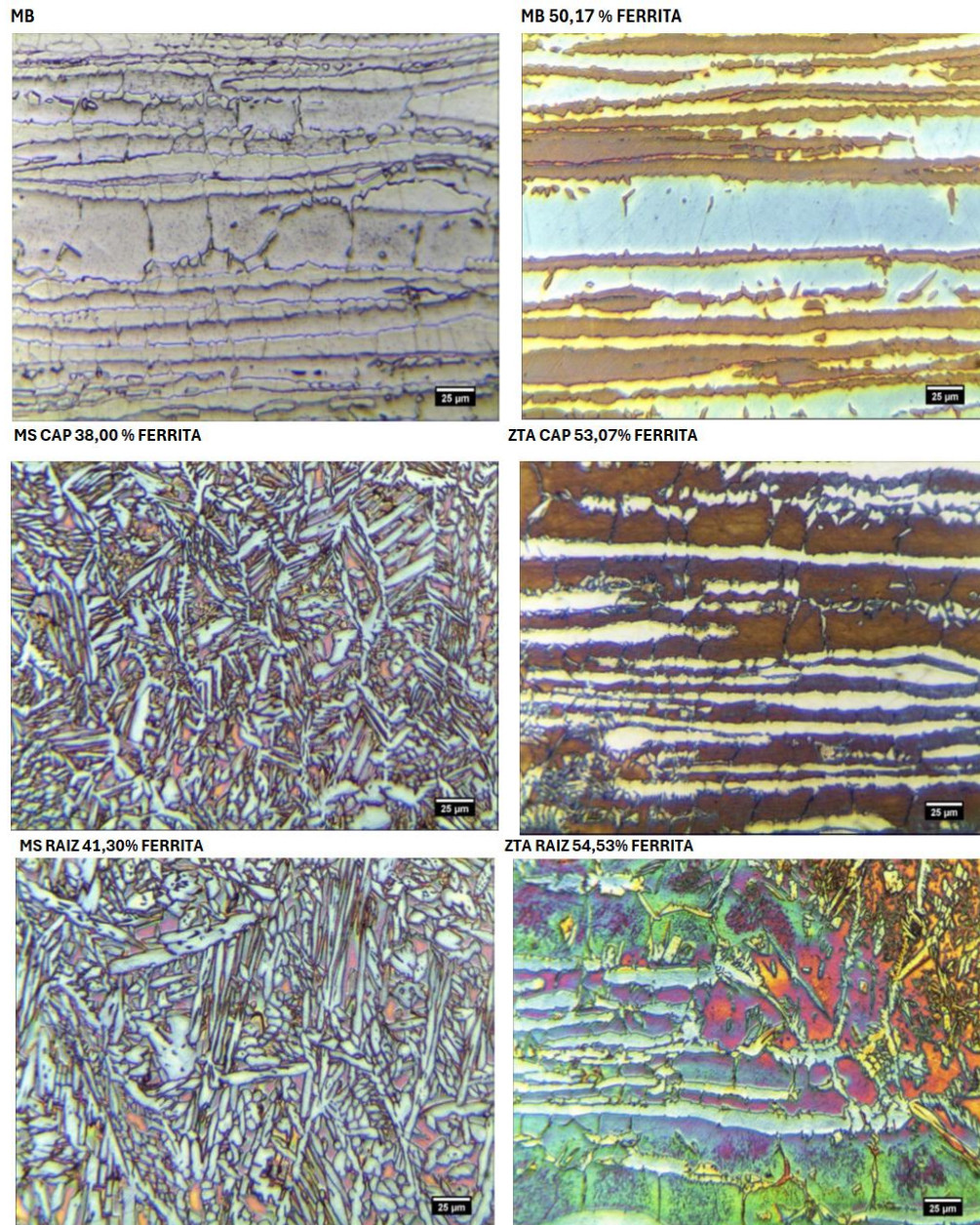


Figura 8 - Metalografia com amplificação de 400x e quantificação de fase do CP5.

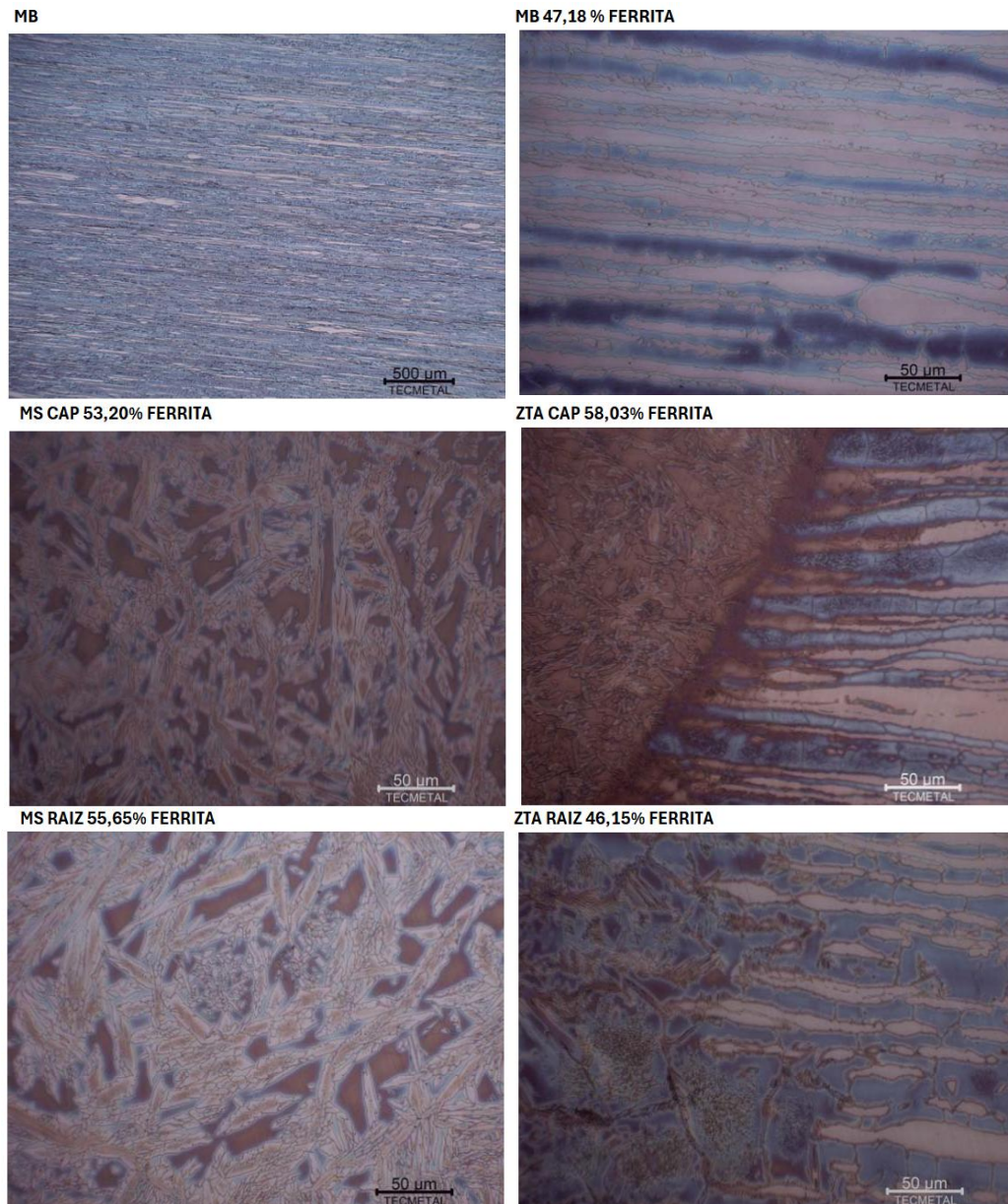


Figura 9 -Metalografia com amplificação de 400x e quantificação de fase do CP1.

### 3.2 Ensaio mecânicos

Os dois grupos apresentaram desempenho semelhante no ensaio de tração, conforme indicado na Tabela 3. Todas as amostras foram aprovadas segundo os requisitos da norma ASME IX, atendendo aos critérios mínimos de limite de resistência (750 MPa). A fratura ocorreu em todas as amostras na região do metal base (MB), o que corrobora as expectativas da análise metalográfica, que identificou microconstituintes previamente mencionados nas regiões do metal de solda (MS) e da zona termicamente afetada (ZTA).

Durante a realização do ensaio de dobramento, os corpos de prova (CPs) de ambos os grupos foram submetidos à inspeção visual das superfícies tracionadas, não foram observadas fissuras,

trincas ou qualquer outro tipo de falha nas amostras analisadas. Esse resultado confirma a adequada ductilidade e integridade das juntas soldadas.

Tabela 3 - Ensaio de tração dos CPs 1 e 6, com amostras retiradas nos sentidos transversais (12h) e longitudinal (6h) à direção da junta.

Posição do CP	ID	Seção (mm <sup>2</sup> )	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)
12h	CP1	162,75	640	884
6h	CP1	173,13	606	815
12h	CP6	106,26	644	900
6h	CP6	99,84	641	881

A partir da Figura 10, é possível observar o perfil de dureza ao longo das diferentes regiões da junta soldada. O corpo de prova 1 (CP1) apresentou valores de dureza mais elevados na região do CAP, resultado influenciado pelo fato de o metal base (MB) já possuir, originalmente, uma dureza superior quando comparado ao corpo de prova 6 (CP6).

Na região do cordão de acabamento (CAP), é esperado que o metal de solda (MS) do CP1 apresente maior dureza, resultado da maior quantidade de ferrita provocada pelo elevado aporte térmico, possuindo a formação de microconstituintes de maior resistência mecânica (Kou, Sindo 1987). As regiões intermediárias da junta exibem valores de dureza similares entre os dois corpos de prova, o que pode ser atribuído aos múltiplos ciclos térmicos sofridos durante o processo de soldagem. Esses ciclos influenciam diretamente o crescimento e o refinamento dos grãos, variando conforme a região afetada, seja o MS, MB ou a ZTA (Lippold, 2005).

Ambas as amostras atenderam o valores de dureza inferiores ao limite máximo de 350 HV estabelecido pela norma DNV-RP-B204:2021, em todos os pontos analisados no teste.

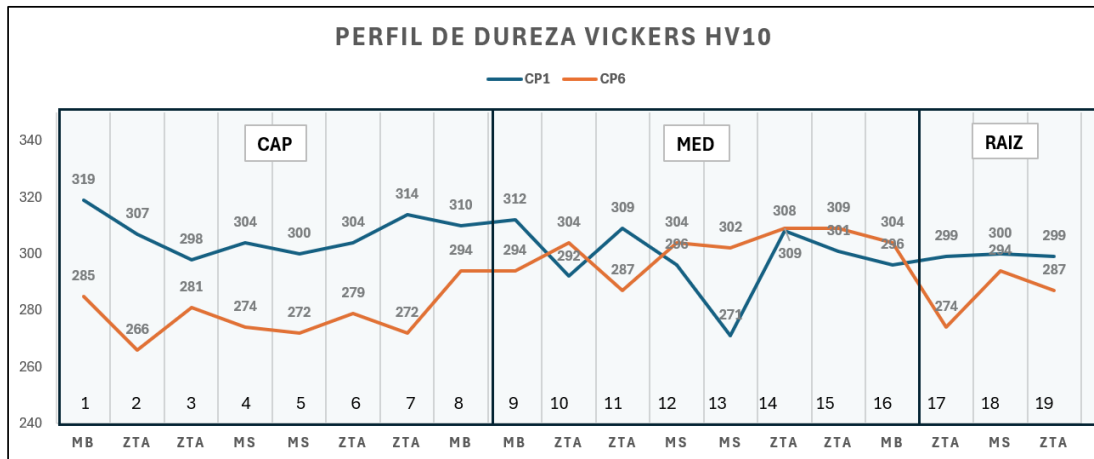


Figura 10 - Gráfico de acordo com o perfil de dureza HV10, das amostras CP1 e CP6. Nas regiões do reforço (CAP), região intermediária da junta (MED) e raiz da junta (RAIZ).

A Tabela 4 apresenta as médias dos valores obtidos no ensaio Charpy realizado a  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com medições nas regiões do metal de solda (MS), linha de fusão (LF), a 2 mm da LF e a 5 mm da LF. A principal diferença observada entre os corpos de prova está nas regiões do metal de solda (MS) e, especialmente, na linha de fusão (LF), que apresentaram variações significativas nos níveis de energia absorvida no ensaio de impacto. No caso do CP2, não se esperava um valor elevado de energia absorvida, considerando sua maior fração de ferrita.

Ambas as amostras apresentaram fratura de caráter dúctil e atenderam ao critério normativo mínimo de expansão lateral, que exige pelo menos 0,38 mm. Além disso, todas as amostras foram aprovadas quanto à absorção de energia, com valores médios superiores a 27 J e valores individuais não inferiores a 20 J.

Tabela 4 - Resultados do teste de impacto Charpy a -46°C dos CPs 2 e 4.

ID	Energia absorvida		Expansão lateral (mm)
	Valor Individual (J)	Valor médio (J)	
CP2 MS	77	49	1,39
	31		0,56
	39		0,83
CP2 LF	81	81	1,3
	84		1,35
	77		1,42
CP2 LF +2	66	80	1,35
	94		1,89
	79		1,57
CP2 LF +5	87	99	1,84
	87		1,66
	123		2,01
CP4 MS	23	32	0,62
	36		0,92
	37		0,84
CP4 LF	56	51	1,49
	63		1,45
	34		0,66
CP4 LF +2	60	83	1,55
	69		1,59
	119		2,37
CP4 LF +5	120	100	2,31
	110		2,28
	71		1,67

#### 4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que os parâmetros que promoveram melhor desempenho, como menor abertura de raiz, aporte térmico reduzido e maior vazão de gás, serão incorporados à elaboração da Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). Esses ajustes não apenas asseguram conformidade com os requisitos normativos, como também favorecem o equilíbrio entre as fases ferrítica e austenítica, contribuindo para a preservação da resistência à corrosão e da integridade mecânica das juntas soldadas. A adoção desses parâmetros na qualificação do procedimento reforça a confiabilidade em serviço e evidencia a relevância do controle rigoroso das variáveis essenciais e suplementares ao longo do processo de soldagem.

A estabilidade da microestrutura, com adequada proporção entre ferrita e austenita, aliada à ausência de defeitos internos relevantes, reforça a confiabilidade do processo de soldagem qualificado. Além disso, o controle rigoroso dos parâmetros essenciais, como tipo de gás de proteção, temperatura entre passes e técnica de soldagem, foram decisivos para o sucesso da qualificação.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a influência significativa do aporte térmico no comportamento microestrutural e nas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão de

juntas soldadas em ligas superduplex. A análise comparativa entre os corpos de prova revelou que o Grupo 1, submetido a maior aporte térmico, apresentou maior proporção de fase ferrítica, especialmente no metal de solda, o que contribuiu para sua reprovação no ensaio de corrosão pelo método G48 devido à perda de massa superior a  $4 \text{ g/m}^2$  (Almeida, 2022).

Apesar dessa limitação, ambos os grupos atenderam aos requisitos normativos nos ensaios mecânicos, incluindo tração, dobramento, dureza e impacto Charpy. As amostras exibiram fratura dúctil, ausência de defeitos visuais nas superfícies tracionadas e valores de dureza inferiores ao limite de 350 HV, evidenciando a integridade das juntas soldadas. A análise metalográfica confirmou a presença de microconstituintes típicos da soldagem, com destaque para a ferrita acicular, desejável por sua contribuição à resistência mecânica.

O uso do gás nitrogênio na mistura não resultou em efeito significativo quando utilizado como proteção e na purga durante o processo de soldagem do grupo 1, o aporte térmico teve efeito determinante no desbalanceamento de fases e consequentemente nos resultados desfavoráveis aos CPs do grupo 1, onde se observou maiores quantidades de ferrita e perda de massa durante o ensaio de corrosão.

Dessa forma, o EPS aprovado representa uma base segura para a execução de soldas em componentes de superduplex, contribuindo para a longevidade e desempenho de estruturas em ambientes agressivos, como os encontrados na indústria de óleo e gás. A qualificação obtida não apenas valida o procedimento, mas também fortalece a confiança na aplicação do aço superduplex em projetos de alta responsabilidade técnica.

## 5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Darlene Souza da Silva et al. Efeito do aporte térmico e do gás de proteção sobre a microestrutura de juntas soldadas do aço inoxidável superduplex SAF 2507. *Revista ABINOX*, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2022. Disponível em: <https://abinox.org.br/wp-content/uploads/2022/12/efeito-do-aporte-termico-e-do-gas.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2025.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. *Callister's materials science and engineering*. John Wiley & Sons, 2020.

ELLDAKLI, Fathi. Gas lift system. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*, v. 1, n. 4, p. 1-11, 2017.

FRANCIS, Roger; BYRNE, Glenn. Duplex stainless steels—alloys for the 21st century. *Metals*, v. 11, n. 5, p. 836, 2021.

KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. New York: Wiley-Interscience, 1987.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. John Wiley & Sons, Inc, 2005.

LONG, Yan et al. Investigation on leakage cause of 13Cr pipe flange used for a Christmas tree in a high-pressure and high-temperature gas well. *Engineering Failure Analysis*, v. 142, p. 106793, 2022.

MARINHO, Flavia. Para instalação de árvores de Natal, há vagas offshore hoje para técnicos e engenheiros. *Click Petróleo e Gás*, 23 jan. 2020. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/para-instalacao-de-arvores-de-natal-ha-vagas-offshore-hoje-para-tecnicos-e-engenheiros/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

NEVES, Maxstaley L. et al. *Alocação de Equipamentos Críticos em Projetos de Produção de Petróleo Offshore*. Rio de Janeiro, RJ: SBPO-Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2012.

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. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 7., 2013, Penedo. *Anais [...]*. Rio de Janeiro: ABCM, 2013. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0439.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2025.

SANDS, Donald E. *Introduction to Crystallography*. New York: Dover Publications, 1993.

SILVA, Ana Carla S. et al. Aplicação da metodologia para qualificação de procedimentos de soldagem de tubulações industriais conforme parâmetros dos códigos ASME B31. 3 e ASME SECTION IX. *Soldagem & Inspeção*, v. 24, p. e2423, 2019.

SILVA, Daniel Fernando da. *Influência do aporte térmico na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L soldadas pelo processo GTAW*. Dissertação de Mestrado — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2017. Disponível em UNESP Repositório.

SILVA, M. A.; BATISTA, B. A.; BATISTA, L. A. CARACTERIZAÇÃO DE UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX EM COMPARAÇÃO A AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS E AUSTENÍTICOS EM RELAÇÃO À MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS EM TRAÇÃO. 16º ENEMET – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgicas, de Materiais e de Minas. ABM Week, Rio de Janeiro, 2016.

SOTOODEH, Karan. Valve operability during a fire. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 141, n. 4, p. 044001, 2019.

Vasconcellos, P. I. G. de., Rosenthal, R., & Paranhos, R. P. da R.. (2010). Estudo da soldagem de tubos de aço inoxidável duplex e superduplex na posição 5G. *Soldagem & Inspeção*, 15(3), 191–199. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000300005>.

ZHANG, Z.; ZHANG, H.; ZHAO, H.; LI, J. Effect of prolonged thermal cycles on the pitting corrosion resistance of a newly developed LDX 2404 lean duplex stainless steel. *Corrosion Science*, Vol. 103, p. 189-195, 2016