

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
LRSS – Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem
Curso de Especialização em Soldagem

Fabio Brito Bomfim

QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM HETEROGÊNEA:
Aço carbono X Inconel®

Belo Horizonte

2023

Fabio Brito Bomfim

**QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM HETEROGÊNEA:
Aço carbono X Inconel®**

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

Orientador: Ariel Rodriguez Arias

Coorientador: Reginaldo Matias Nunes

Belo Horizonte

2023

B695q

Bomfim, Fabio Brito.

Qualificação de procedimento de soldagem heterogênea
[recurso eletrônico] : aço carbono x Inconel® / Fabio Brito Bomfim. – 2023.
1 recurso online (55 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

Coorientador: Reginaldo Matias Nunes.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em
Engenharia da Soldagem da Escola de Engenharia da Universidade
Federal de Minas Gerais”

Bibliografia: f. 54-55.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Soldagem. 2. Aço. 3. Carbono. 4. Indústria. I. Arias, Ariel
Rodríguez. II. Nunes, Reginaldo Matias. III. Universidade Federal de
Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. 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 14ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia **22 de dezembro de 2023**, às 08:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: *QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM HETEROGÊNEA: AÇO CARBONO X INCONEL®*,

Aluno: FABIO BRITO BOMFIM – Matrícula: 2021662815

Local: Remotamente via plataforma “TEAMS”.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 35 minutos, é de parecer Favorável à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 95 e com (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias.

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Orientador

Eng. Reginaldo M. Nunes
CREA/MG 222592D
Eng. Internacional de Soldagem
BR 1198-085-15-048
Certified International Welding Engineer – CIWE
Instituto de Soldagem – IS1439K2

Esp. Reginaldo Matias Nunes
DELP ENGENHARIA – Avaliador

Eduardo A. Barcelos
Eng. Mecânico
CREA/MG: 210977 D

Esp. Eduardo Anacleto Barcelos
UFMG – Avaliador

Fabio Brito Bomfim
Assinado de forma digital
por Fabio Brito Bomfim
Dados: 2023.12.22
11:42:03 -03'00'

Aluno: Fabio Brito Bomfim

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por nos abençoar e nos capacitar.

Agradeço aos nossos familiares e amigos pelo apoio.

Aos amigos Wilian Coelho e Reginaldo Nunes pelo incentivo e contribuição para o meu aprendizado.

Aos professores do curso que contribuíram de forma consistente para o nosso desenvolvimento.

RESUMO

Qualificar procedimentos de soldagem é uma das atividades rotineiras das indústrias de bem de capitais, principalmente para aquelas que atuam no mercado de óleo e gás, o nível de exigência e qualidade dos equipamentos fabricados é algo desafiador, principalmente em relação ao controle de qualidade das soldas, mas isso faz todo sentido, por exemplo uma falha em um componente pressurizado pode ser catastrófica tanto para o meio ambiente quanto para a vida humana. Com base nisso, a entrega de equipamentos e soldas com qualidade é vivenciada diariamente por soldadores, técnicos e engenheiros de soldagem. A fim de garantir o sucesso de uma determinada atividade, a qualificação de procedimentos de soldagem se faz necessário para comprovar a eficácia dos parâmetros de soldagem a ser utilizados em certas condições de trabalho. Com base nisso, no decorrer desta monografia serão apresentados os requisitos técnicos e recursos para que seja possível qualificar uma EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) conforme o código normativo DNVGL-ST-F101. Ao fim deste trabalho, com os resultados dos testes mecânicos previamente estabelecidos e comprovado a eficácia da metodologia proposta é possível escrever uma EPS, com todas as variáveis essenciais, não essenciais e suplementares (quando aplicável), com suas respectivas faixas qualificadas, de acordo com os requerimentos estabelecidos no referido código normativo.

Palavras-chave: soldagem; qualidade; qualificação; EPS.

ABSTRACT

Qualifying welding procedures is one of the routine activities of capital-rich industries, especially for those that operate in the oil and gas market. The level of demand and quality of manufactured equipment is somewhat challenging, especially in relation to the quality control of welds, but this makes perfect sense, for example a failure in a pressurized component can be catastrophic for both the environment and human life. Based on this, the delivery of quality equipment and welds is experienced daily by welders, technicians and welding engineers. In order to guarantee the success of a given activity, the qualification of welding procedures is necessary to prove the effectiveness of the welding parameters to be used in certain working conditions. Based on this, throughout this monograph the technical requirements and resources will be presented so that it is possible to qualify an WPS (Welding Procedure Specification) according to the normative code DNVGL-ST-F101. At the end of this work, with the results of previously established mechanical tests and proven effectiveness of the proposed methodology, it is possible to write an WPS, with all essential, non-essential and supplementary variables (when applicable), with their respective qualified ranges, in accordance with the requirements established in the aforementioned normative code.

Keywords: welding; quality; qualification; WPS.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos materiais.....	29
Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais.....	29
Tabela 3 – Composição química do consumível ASME SFA 5.14 ERNiCrMo-3.....	30
Tabela 4 – Limite de resistência do metal de adição (típico).....	30
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem da peça de teste 1	44
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem da peça de teste 2	45
Tabela 7 – Ensaio de Tração Transversal a Peça de Teste.....	47
Tabela 8 – Ensaio de Tração metal de solda das Peças de Teste.....	47
Tabela 9 – Ensaio de dobramento lateral.....	47
Tabela 10 – Resultados ensaio de Impacto	48
Tabela 11 – Resultados ensaio de dureza	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria da junta.....	15
Figura 2 – Posição do eletrodo ou tocha.....	16
Figura 3 – Posição do eletrodo ou tocha.....	17
Figura 4 – Posição do chanfro e face da raiz	17
Figura 5 – Reforço da Face e Raiz.....	18
Figura 6 – Partes de uma Solda (Seção Transversal).....	18
Figura 7 – Posições para qualificação – Soldagem de Tubos.....	19
Figura 8 – Esquema do processo de soldagem GTAW	23
Figura 9 – Esquema do processo de soldagem GMAW.....	24
Figura 10 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW.....	25
Figura 11 – Peças de teste.....	29
Figura 12 – Exemplos de contaminação da soldagem da raiz	31
Figura 13 – Fonte de soldagem XMT 350 Mpa	32
Figura 14 – Traçagem da linha de corte na seção transversal das peças de teste...	33
Figura 15 – Corte das peças de teste	33
Figura 16 – Seção transversal das peças de teste pós usinagem	33
Figura 17 – Seção transversal das peças pós montagem.....	34
Figura 18 – Formulário de pEPS	37
Figura 19 – Peça de teste posicionado na bancada.....	38
Figura 20 – Localização para retirada dos corpos de prova.....	40
Figura 21 – Dimensões padronizadas de corpo de prova de tração	41
Figura 22 – Dimensões padrão de corpo de prova de tração transversal a solda.....	42
Figura 23 – Dimensão padrão para corpos de prova de impacto.....	42
Figura 24 – Dimensões padronizadas de corpo de prova para dobramento	43
Figura 25 – Corpo de prova para ensaio de dureza	43
Figura 26 – Croqui seção transversal da peça de teste 1	46
Figura 27 – Croqui seção transversal da peça de teste 2	46
Figura 28 – Localização dos pontos para medição de dureza	49
Figura 29 – Aspecto macrográfico da seção transversal da peça de teste 1	50
Figura 30 – Aspecto macrográfico da seção transversal da peça de teste 2	50
Figura 31 – Aspecto microestrutural da peça de teste 1	51
Figura 32 – Aspecto microestrutural da peça de teste 2	51

LISTA DE ABREVIATURAS

Ed. – Edição

Ex. – Exemplo

P. – Página

Rev. – Revisado

V. – Volume

LISTA DE SIGLAS

API – American Petroleum Institute
ARBL – Aços de alta resistência e de baixa liga
ASME – American society of mechanical engineers
ASTM – American Society for Testing and Materials
AWS - American Welding Society
BPV – Boiler and Pressure Vessel
BPVC – Boiler and Pressure Vessel Code
CP – Corpo de Prova
DNV – Det Norske Veritas
DNVGL – Det Norske Veritas Germanischer Lloyd
ENDs – Ensaio não Destrutivo
EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem
FBTS - Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
FCAW – Flux Cored Arc Welding
GMAW – Gas Metal Arc Welding
GTAW – Gas Tungsten Arc Welding
IIW - International Institute of Welding
ISO - International Organization for Standardization
Kgf – Kilograma força
MAG - Metal Active Gas
MIG - Metal Inert Gas
mm - Milímetro
MPa – Mega Pascal
RQPS – Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem
SAE – Society of Automotive Engineers
SMAW – Shielded Metal Arc Welding
SNQC – Sistema Nacional de Qualificação e Certificação
TIG – Tungsten Inert Gas
UNS – Unified Numbering System
WPS – Welding Procedure Specification
ZAC – Zona Afetada pelo Calor
ZTA – Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Conceitos Gerais	14
2.2 Termos e definições	15
2.3 Materiais	20
2.4 Soldagem	22
2.4.1 <i>Processo de soldagem GTAW</i>	22
2.4.2 <i>Processo de soldagem GMAW</i>	23
2.5 Consumíveis de soldagem	25
3 METODOLOGIA	27
3.1 Plano de qualificação da EPS	28
3.2 Peças de Teste	28
3.3 Metais de adição	30
3.4 Gás de proteção	30
3.4.1 <i>Equipamento de Soldagem</i>	32
3.4 Procedimentos adotados	32
3.4.1 <i>Requisitos de qualificação</i>	34
3.4.2 <i>Técnica de Soldagem</i>	36
3.4.3 <i>Ensaio não destrutivo</i>	39
3.4.4 <i>Amostras para ensaios e testes</i>	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 Ensaio Destrutivo	46
4.2 Exame Metalográfico - Macrografia e micrografia	49
4.3 Considerações finais	52
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos processos de manufatura mais utilizados na indústria, em uma ampla gama de aplicações, desde a união microscópica de componentes eletrônicos até a união de chapas de grande espessura em equipamentos de grande porte, como plataformas marítimas ou tubulações pressurizadas.

Os métodos de soldagem e as características das juntas soldadas podem variar significativamente para aplicações específicas, dependendo de fatores como: a forma, espessura e geometria das peças a serem soldadas; o tipo de material ou materiais a serem unidos; o processo de soldagem a ser utilizado; o tipo de desempenho esperado dos componentes soldados nas condições de serviço, que podem incluir solicitações estáticas de grande intensidade, solicitações dinâmicas ou cíclicas, calor ou meio corrosivo.

O estudo da adequação de um procedimento de soldagem a uma aplicação específica é complexo e requer experiência do profissional envolvido. Embora para a maioria das aplicações industriais existam referências básicas na literatura, na prática existem muitas variáveis envolvidas em um procedimento de soldagem que são difíceis de prever. Por isso, antes de realizar uma soldagem, é importante qualificar o procedimento, principalmente quando a aplicação envolve risco de vida, como em componentes pressurizados.

A qualificação de um procedimento de soldagem (EPS) pode ser realizada por diferentes códigos de fabricação, como AWS, ASME, ISO ou DNV entre outras. Basicamente, significa simular uma condição real de soldagem e testar um ou mais corpos de prova por meio de ensaios destrutivos que avaliam as propriedades mecânicas requeridas na aplicação de acordo com o código do projeto.

Este trabalho visa demonstrar como é realizada a qualificação de um procedimento de soldagem exclusivo para reparo de soldas conforme o código normativo DNVGL-ST-F101, que é aplicado à soldagem de componentes pressurizados na extração de petróleo em águas ultra profundas, e também demonstrar que uma junta reparada não terá perdas de propriedades mecânicas e metalúrgicas nas zonas termicamente afetadas - ZTA. Esses componentes são feitos de materiais de aço carbono e aço carbono de baixa liga revestidos internamente com ligas de níquel, que são usados em situações extremas de temperatura e pressão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Gerais

O cumprimento do requisito de qualidade de uma junta soldada envolvendo materiais metálicos na fabricação de estruturas, máquinas, equipamentos entre outros começa pelo sucesso da qualificação adequada de um procedimento de soldagem.

Segundo Modenesi, (2005), a falta ou o não cumprimento de regulamentações nas diferentes etapas de um processo de fabricação pode causar acidentes e outros problemas, com graves consequências para todos os envolvidos, incluindo produtores, usuários, população em geral e meio ambiente. Portanto, um dos objetivos primários de um código é prevenir acidentes que poderiam resultar em morte de pessoas, perdas materiais e poluição. Além disso, o uso bem-sucedido de códigos e normas pode resultar em uma produção mais uniforme, melhor controle de qualidade, maior rastreabilidade e possibilidade de correção de falhas em produtos, além de um método de produção mais sistemático.

Em operações de soldagem, a qualidade de uma junta soldada depende da correta seleção do processo de soldagem e dos parâmetros de soldagem adequados, de forma a minimizar as tensões residuais e evitar descontinuidades. Essas descontinuidades podem se tornar defeitos inaceitáveis, comprometendo a segurança e a qualidade da junta (Rodrigues et al, 2022).

Assim, as normas de soldagem padronizam a execução do processo de soldagem para garantir a qualidade necessária. Para isso, elas padronizam os materiais, como a definição dos metais de base e consumíveis, as técnicas de soldagem, a certificação de pessoal entre outros. No Brasil os códigos de soldagem mais usuais empregados na indústria de óleo e gás são: AWS D1.1 (Structural Welding Code – Steel); ASME IX (Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures); N-133 (Soldagem); N-1852 (Estruturas Oceânicas - Fabricação e Montagem de Unidades Fixas); DNVGL-ST-F101 (Submarine pipeline systems), sendo esta última a referência para o desenvolvimento deste trabalho.

A norma DNVGL-ST-F101 é abrangente e fornece orientação e requisitos para o desenvolvimento de conceitos de projeto, construção, operação e lançamento de dutos. Ela não se limita apenas aos conceitos de soldagem e qualificação de procedimentos, mas também inclui requisitos para outros aspectos importantes, como:

Seleção de materiais; Projeto de estruturas; Métodos de construção; Ensaio e inspeção.

A adoção de normas de soldagem é uma prática essencial para garantir a qualidade das juntas soldadas em aplicações críticas, como a indústria de óleo e gás.

2.2 Termos e definições

A compreensão dos termos e definições utilizados na soldagem é essencial para a interpretação de documentos técnicos e processos de fabricação que envolvem a soldagem. As normas de terminologia para soldagem apresentam definições semelhantes para os mesmos termos, como a AWS A3.0, a ISO 17659, a PETROBRAS N-1438 e a NBR 10474.

A seguir, são apresentadas algumas definições sobre terminologia extraído dessas normas que são que são fundamentais para o entendimento deste trabalho.

Abertura da raiz: separação entre os componentes a serem unidos na raiz da junta;

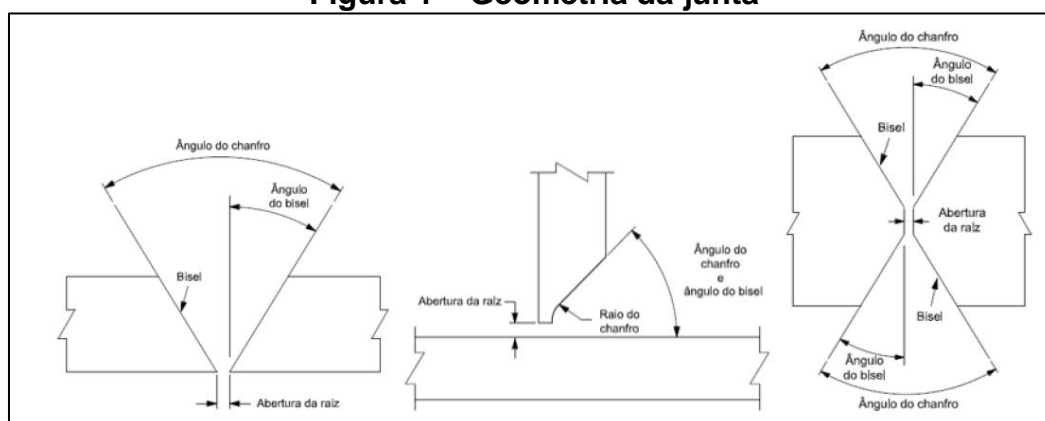
Ângulo do bisel: ângulo formado entre a borda preparada do componente e um plano perpendicular à superfície deste componente;

Ângulo do chanfro: ângulo integral entre as bordas preparadas dos componentes;

Bisel: borda do componente a ser soldado, preparada na forma angular;

Face da raiz: parte da face do chanfro adjacente à raiz da junta;

Figura 1 – Geometria da junta



Fonte: PETROBRAS, 2013, p. 20

Ângulo de arraste: ângulo de deslocamento quando o eletrodo está apontando para a direção oposta à da progressão da solda.

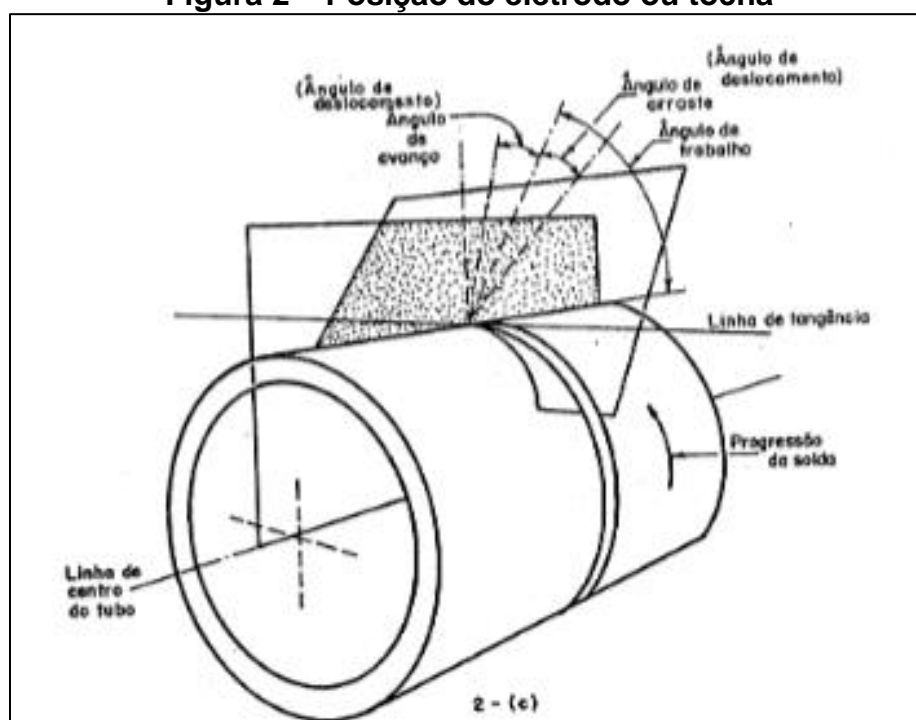
Ângulo de avanço: ângulo de deslocamento quando o eletrodo está apontando para a direção da progressão da solda.

Ângulo de deslocamento (para tubos): ângulo formado entre o eletrodo e a linha de referência tangente do tubo, no plano comum ao eixo da solda.

Ângulo de trabalho (para tubos): ângulo formado entre o eletrodo e a linha tangente do tubo, no plano comum ao eixo da solda.

Progressão da solda: sentido em que se executa a soldagem ao longo de uma junta, quando esta junta é posicionada na vertical, a progressão pode ser ascendente ou descendente.

Figura 2 – Posição do eletrodo ou tocha



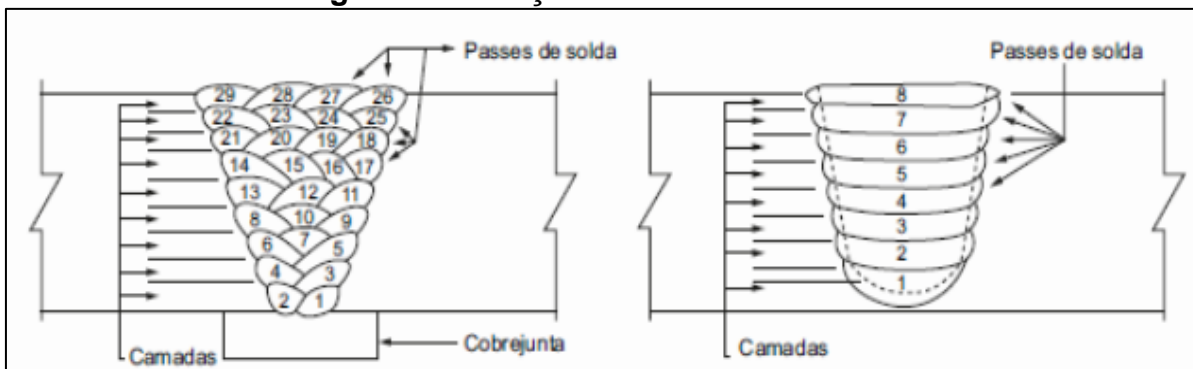
Fonte: ABNT, 2015, p. 10

Camada: deposição de um ou mais passes consecutivos dispostos lado a lado.

Cobre junta: material colocado na parte posterior da junta a ser soldada, para suportar o metal fundido, durante a soldagem.

Passes de solda: progressão simples de uma operação de soldagem ou revestimento. O resultado de um passe é um cordão de solda.

Figura 3 – Posição do eletrodo ou tocha

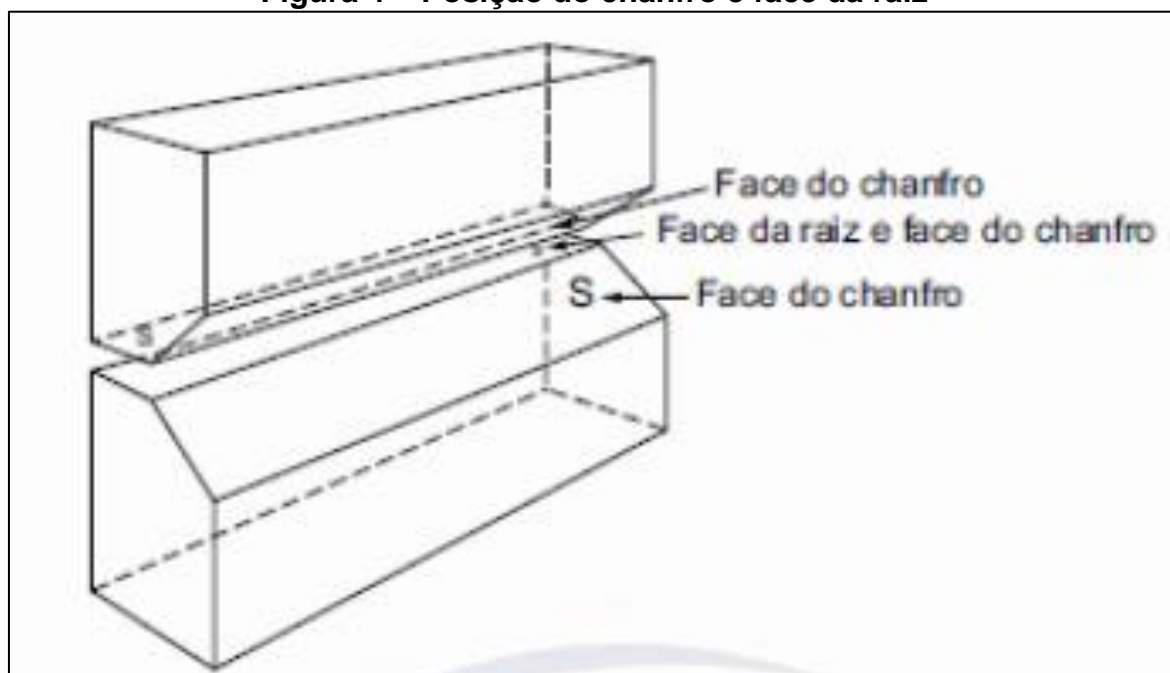


Fonte: ABNT, 2015, p. 10

Chanfro: abertura devidamente preparada, na superfície de uma peça ou entre dois componentes, para conter a solda.

Face do chanfro: superfície de um componente preparada previamente, para conter a solda.

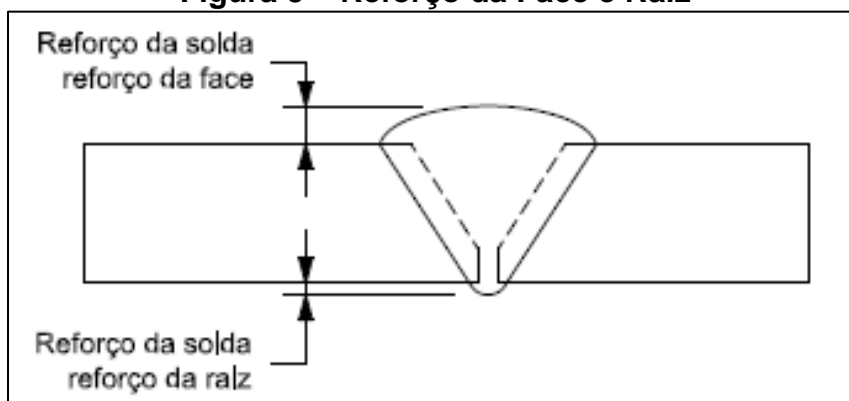
Figura 4 – Posição do chanfro e face da raiz



Fonte: ABNT, 2015, p. 12

Reforço de solda: material depositado em excesso, além do necessário para preencher a junta.

Figura 5 – Reforço da Face e Raiz



Fonte: PETROBRAS, 2013, p. 29

Face de fusão: superfície do metal de base a ser fundida durante a soldagem.

Linha de fusão: interface entre a zona de fusão e o metal de base.

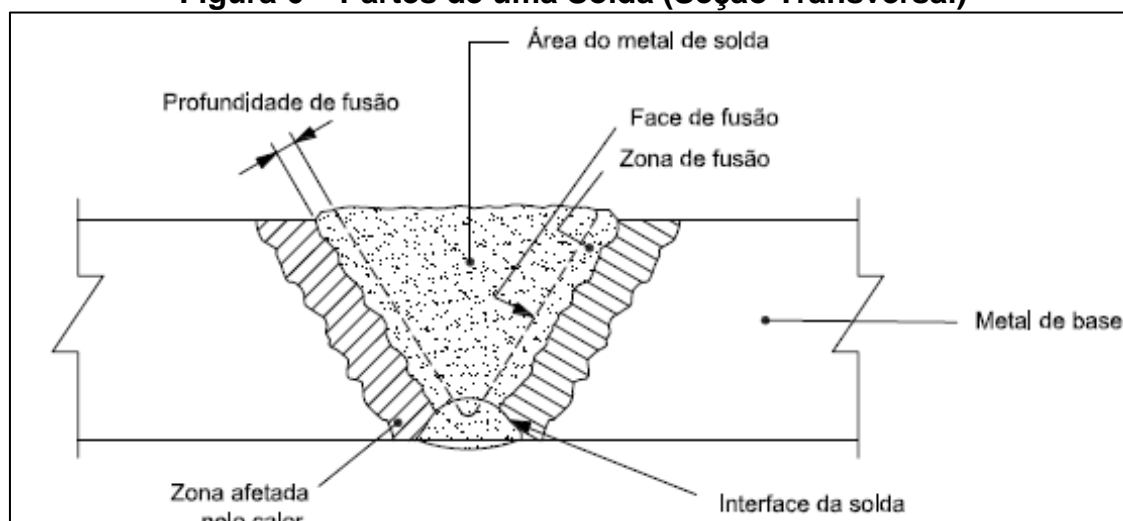
Metal de base: material a ser soldado, brasado ou cortado.

Metal de solda: região fundida durante a soldagem.

Zona afetada pelo calor: região do metal de base que não foi fundida durante a soldagem, mas cujas microestruturas e propriedades mecânicas foram alteradas devido ao calor de soldagem.

Profundidade de fusão: área fundida do metal de base, determinada sobre a seção transversal da solda.

Figura 6 – Partes de uma Solda (Seção Transversal)

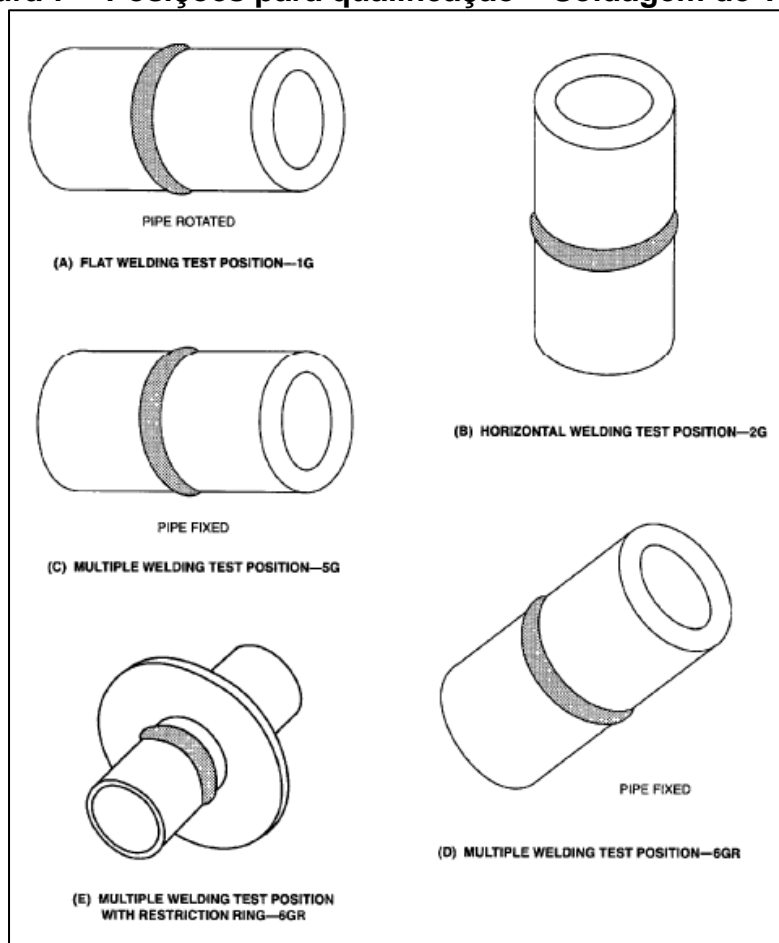


Fonte: PETROBRAS, 2013, p. 28

Posição de teste de soldagem: a orientação de uma junta para a soldagem de um procedimento ou teste de qualificação de um soldador. Uma representação

simbólica para as posições de teste para soldas de chanfros são 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 6G e 6GR.

Figura 7 – Posições para qualificação – Soldagem de Tubos



Fonte: AWS, 1994, p. 61

Gás de purga: gás utilizado para criar uma atmosfera protetora da poça de fusão, pelo lado oposto em que a solda está sendo feita, promovendo sua contenção durante a soldagem.

Aporte térmico ou energia de soldagem: energia fornecida pelo arco elétrico à peça soldada em determinado comprimento;

Atmosfera protetora: envoltório de gás que circunda a parte a ser soldada, com a finalidade de proteger a poça de fusão;

Atmosfera redutora: atmosfera protetora quimicamente ativa que, em elevadas temperaturas, reduz óxidos ao seu estado metálico;

Corpo-de-Prova: amostra retirada de uma peça de teste para executar ensaios mecânicos, químicos ou metalográficos.

Peça de teste: peça soldada para qualificação de procedimento de soldagem ou para qualificação de soldadores ou operadores de soldagem ou ainda para efeito de teste de produção.

Especificação de Procedimento de Soldagem – EPS: documento escrito emitido pela executante dos serviços, com base nas especificações do projetista, dos consumíveis, dos metais de base, provendo as variáveis de soldagem necessárias para produção de juntas soldadas com as mesmas propriedades e características da junta ensaiada na qualificação.

Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem – RQPS: documento, emitido pela executante dos serviços, onde são registrados os valores reais dos parâmetros de operação de soldagem da peça de teste e os resultados de ensaios de qualificação.

2.3 Materiais

A exploração, produção e processamento de petróleo e gás ocorrem em ambientes adversos, incluindo alta pressão, temperatura e compostos corrosivos. Portanto, a escolha de materiais apropriados é vital para garantir a segurança operacional e a integridade das instalações.

Os materiais a serem empregados na indústria offshore são designados por códigos normativos. Segundo Rodrigues et al (2022), cada código de projeto traz os requisitos específicos e adequados para que seus equipamentos trabalhem nas condições operacionais requeridas, como os requisitos de soldagem prescritos por eles. Geralmente os aços são os materiais frequentemente preferidos devido às suas propriedades mecânicas, durabilidade e disponibilidade.

Dentre os materiais utilizados na indústria offshore destacam-se os aços carbono de alta resistência e de baixa liga (ARBL), estes aços são amplamente utilizados devido à sua disponibilidade e custo relativamente baixo. Eles são adequados para ambientes menos agressivos, como tubulações e estruturas. Exemplos destes aços que vem sendo bastante utilizado neste ramo de atividade é o DNVGL SMLS 450 SFPD (API 5L X65) e o ASTM A694 Gr F65, estes aços têm como características boa resistência mecânica, aliada a uma boa tenacidade, ductilidade e soldabilidade. No entanto, são suscetíveis à corrosão em ambientes mais hostis.

Para estes ambientes hostis onde os aços são sensíveis a corrosão uma opção seria a substituição total do material, entretanto o custo pode inviabilizar esta troca. Uma solução viável, visando a redução de custos são as técnicas de proteção superficial de componentes, tais como: metalização por aspensão térmica, galvanização, cladeamento, eletrodeposição, pintura, difusão, redução química (niquelação) e soldagem para revestimento (SANTOS, MACIEL e SANTANA, 2015).

Segundo Santos, Maciel e Santana (2015), dentre as técnicas, a do revestimento por soldagem é bastante atrativa por oferecer a proteção através da aplicação de revestimentos unidos metalurgicamente ao substrato.

O revestimento por soldagem (“weld overlay”) é, portanto, um processo em que uma camada de uma liga metálica é depositada sobre uma base metálica diferente (soldagem dissimilar), com o objetivo de obter propriedades, em geral, mecânicas e químicas, e dimensões desejadas, podendo se definir como principal resultado, a criação de superfícies com características especiais. Estes revestimentos de solda, comumente chamados de “cladding”, com espessura variando entre 2 e 20 mm, podem ser obtidos utilizando-se uma variedade de processos de soldagem. (SMITH, 2012).

Uma das opções de material que possuem alta resistência à corrosão e mecânica e que são frequentemente utilizadas como metais de adição para revestimentos protetores em componentes e equipamentos da indústria do petróleo e gás natural são as ligas de níquel.

Segundo a norma técnica Petrobras N-133, rev. N, as ligas de níquel são utilizadas em aplicações na qual é necessário combinar média ou alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão em altas temperaturas. As ligas de níquel podem ser aplicadas em ampla faixa de temperaturas, desde as criogênicas até 800 °C, podendo em alguns casos chegar até 1200 °C. (PETROBRAS, 2015) Uma das formas de classificar as ligas de níquel são pela composição química (níquel comercialmente puro, ligas Ni-Cu, ligas Ni-Mo, ligas Ni-Cr, ligas Ni-Cr-Mo, ligas Ni-Cr-Fe e ligas Ni-Fe-Cr).

A designação destas ligas é mencionada pela sua classificação da SAE / ASTM (UNS - Unified Numbering System) ou, mais comumente, pela sua patente, como por exemplo, Monel® 400 (N04400), Inconel® 625 (N06625), Hastelloy® C4 (N06455), dentre outros. O código entre parênteses corresponde ao “Unified Numbering System for Metals and Alloys” - SAE/ASTM.

2.4 Soldagem

Existem diversos termos que definem a soldagem, entretanto todas as definições são equivalentes entre si. Segundo a norma AWS D1.1 – Structural Welding Steel, a soldagem é um processo que visa obter a união localizada pelo aquecimento localizado até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição.

Atualmente existem muitos processos de soldagem, segundo Okumura e Taniguchi (1982), estima-se que existem em escala comercial mais de cinquenta processos de soldagem e é usual classificá-los, por exemplo conforme o tipo de fonte de energia empregado, o processo físico envolvido ou ainda segundo alguma determinada característica. De forma genérica, os processos de soldagem são divididos em três grandes classes:

Soldagem por fusão – processo no qual as partes são fundidas por meio de energia elétrica ou química, sem aplicação de pressão.

Soldagem por pressão - processo no qual as partes são coalescidas e pressionadas uma contra a outra.

Brasagem – processo no qual as partes são unidas por meio de uma liga metálica de baixo ponto de fusão.

Será abordado neste trabalho somente a soldagem por fusão a arco elétrico, limitado aos processos GTAW e GMAW.

2.4.1 Processo de soldagem GTAW

O processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) conhecido também como TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo de união de materiais que utiliza um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça a ser soldada. A proteção do eletrodo e da zona da solda é feita por um gás inerte, geralmente argônio. O gás inerte sustenta o arco elétrico e protege a poça de fusão da contaminação atmosférica (MODENESI, MARQUES, 2011).

De acordo com Modenesi e Marques (2011), a soldagem GTAW pode ser usada na forma manual ou mecanizada, e é considerada como um dos processos de soldagem a arco que permite um melhor controle das condições operacionais. Isso

permite que a soldagem seja realizada com precisão e acabamento superior, mesmo em juntas de difícil acesso.

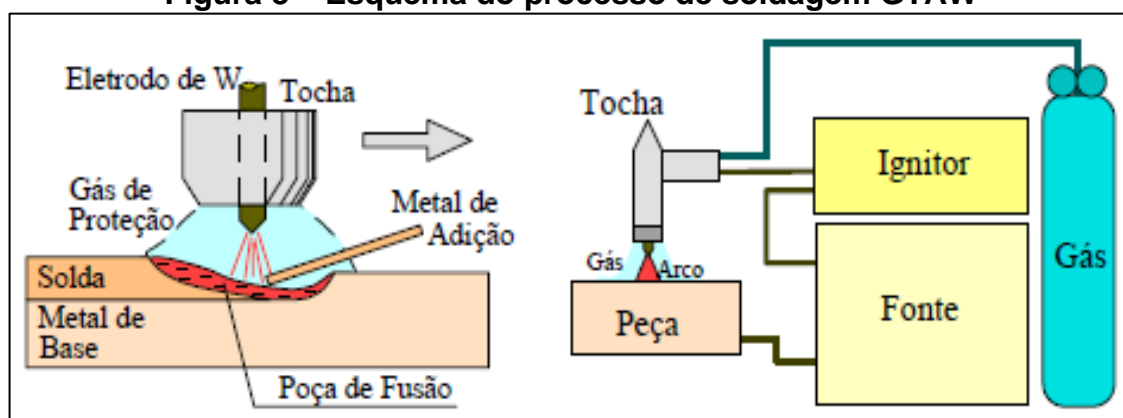
O processo é amplamente utilizado para soldagem de aço inoxidável, alumínio, magnésio, cobre e materiais reativos, como titânio e tântalo; também pode ser usado para soldagem de aço carbono e baixa liga, sobretudo em passes de raiz (ASM HANDBOOK, 1993).

Segundo Zeemann et al (2023), o processo GTAW é muito utilizado para a soldagem de chapas com menos de 10 mm de espessura e em passes de raiz, especialmente em juntas estreitas como, por exemplo, em tubulações; pode ser operado com metal de adição (varetas ou arames em bobina) ou de forma autógena (sem metal de adição).

No entanto, a soldagem GTAW é comumente relacionada à baixa produtividade quando utilizada na sua configuração tradicional. Isso ocorre porque o processo requer um maior tempo de preparação e execução do que outros processos de soldagem.

Apesar da baixa produtividade, a soldagem GTAW é preferível a sua utilização em soldagem de responsabilidade, pois produz soldas com baixo nível de defeitos, sem escórias, bom acabamento superficial e taxa de respingos praticamente nula.

Figura 8 – Esquema do processo de soldagem GTAW



Fonte: MODENESI e MARQUES, 2011, p. 15

2.4.2 Processo de soldagem GMAW

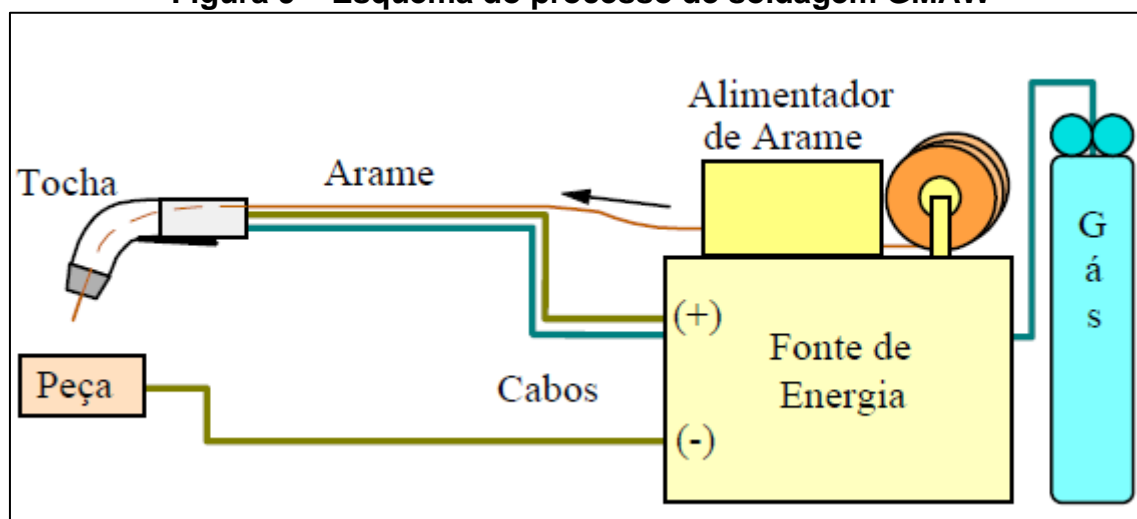
O processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), conhecido também como MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas) é processo no qual se utiliza o calor de um arco elétrico para fundir a peça de base e o eletrodo consumível. É um processo

que tem alimentação constante e automatizada do arame, que é puxado por um tracionador e levado até a tocha de soldagem.

Ainda de acordo com Modenesi, Marques e Bracarense (2011):

É um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nú, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou misturas de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil, o processo é referido como MIG (*Metal Inert Gas*) quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos (MODENESI, MARQUES E BRACARENSE, 2011, p. 233).

Figura 9 – Esquema do processo de soldagem GMAW



Fonte: MODENESI e MARQUES, 2011, p. 19

Nesse processo, o metal fundido na ponta do arame precisa se transferir para a poça de fusão. Essa transferência é influenciada pela configuração dos parâmetros de soldagem.

Segundo Modenesi (2012), para o processo GMAW, existem 3 formas básicas de modo de transferência, sendo elas: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência por *Spray* (aerossol ou goticular). Ainda, segundo Modenesi (2012), outros modos existem em função do uso de equipamentos modernos de soldagem, que impõem mudanças em valores de corrente e velocidade de alimentação de arame (transferência com corrente pulsada, por exemplo).

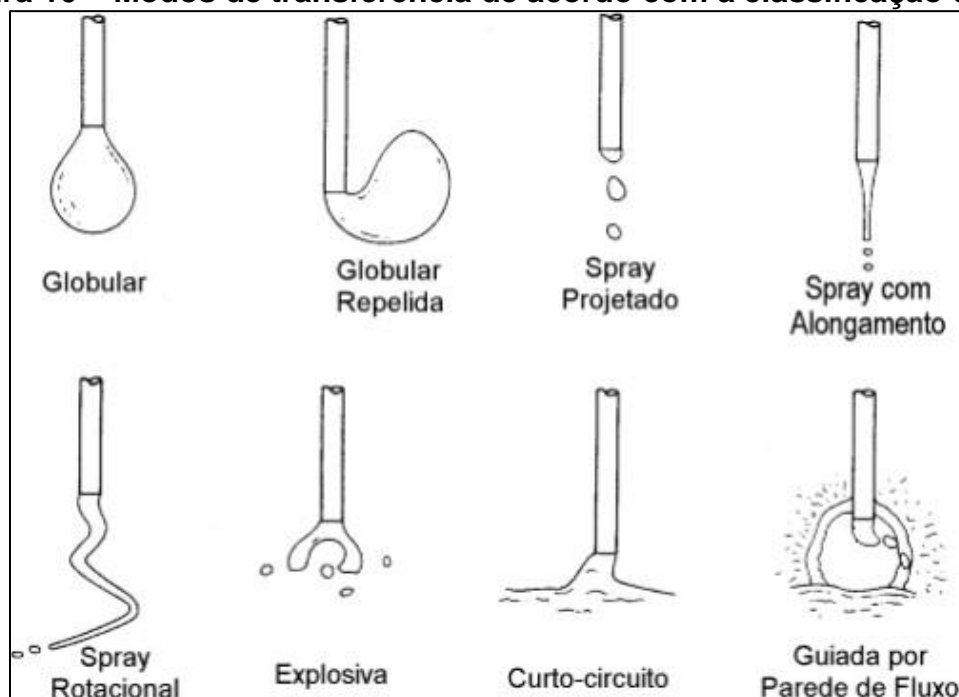
Transferência pulsada é o tipo de transferência controlada mais usado no processo GMAW. Esse tipo de transferência é aproximadamente globular, mas é mais estável e uniforme do que a transferência globular convencional.

A transferência pulsada é obtida pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares: um inferior à corrente de transição e outro superior a esta. Durante o período em que a corrente é baixa, uma gota se forma e cresce na ponta do arame. Quando a corrente salta para o valor elevado, a gota é transferida para a poça de fusão.

Uma limitação da transferência pulsada é a introdução de novas variáveis no processo GMAW, como a frequência de pulsação, a largura do pulso e a corrente de base. Essas variáveis dificultam a seleção e otimização dos parâmetros de soldagem. (MODENESI, MARQUES E BRACARENSE, 2011, p. 239).

A figura 10 demonstra alguns modos de transferência, segundo a classificação do IAW, citado por Modenesi (2012):

Figura 10 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IAW



Fonte: MODENESI, 2012

2.5 Consumíveis de soldagem

Consumíveis de soldagem são todos os materiais utilizados para depositar ou proteger o metal de solda. Além dos eletrodos, varetas e arames, os gases de proteção e fluxos também são considerados consumíveis de soldagem. Para garantir a uniformidade das características dos consumíveis de soldagem, eles devem atender a normas específicas que estabelecem padrões.

Os consumíveis de soldagem normalmente utilizados na indústria brasileira são regulamentados pelo código ASME II Part C juntamente com outras especificações AWS, ISO ou outra norma de soldagem reconhecida. De acordo com o código ASME II Part C, as seguintes especificações para consumíveis são:

AWS A5.1 Eletrodos de aço-carbono para soldagem manual a arco com eletrodos revestidos.

AWS 5.2 Varetas de aço-carbono e baixa liga para soldagem oxigás.

AWS A5.3 Eletrodos de alumínio e suas ligas para soldagem manual a arco com eletrodos revestidos

AWS A5.4 Eletrodos revestidos de aço inoxidável para soldagem a arco com eletrodos revestidos

AWS A5.5 Eletrodos de aço baixa liga para soldagem a arco com eletrodos revestidos

AWS A5.6 Eletrodos cobertos de cobre e ligas de cobre para soldagem a arco

AWS A5.7 Varetas e arames de cobre e ligas de cobre

AWS A5.8 Metais de adição para brasagem e solda brasagem

AWS A5.9 Varetas e arames de aço inoxidável para soldagem

AWS A5.10 Varetas e arames de soldagem de alumínio e ligas de alumínio

AWS A5.11 Eletrodos de níquel e ligas de níquel para soldagem a arco por eletrodo revestido

AWS A5.12 Eletrodos de tungstênio e ligas de tungstênio para soldagem a arco e corte

AWS A5.13 Eletrodos revestidos para soldagem de revestimentos

AWS A5.14 Varetas e arames de níquel e ligas de níquel para soldagem

AWS A5.15 Eletrodos e varetas para soldagem de ferro fundido

AWS A5.16 Eletrodos e varetas para soldagem de titânio e ligas de titânio

AWS A5.17 Eletrodos e fluxos para soldagem a arco submerso

AWS A5.18 Varetas e arames de aço-carbono para soldagem a arco com proteção gasosa

AWS A5.20 Arames tubulares de aço-carbono para soldagem a arco

AWS A5.21 Varetas e arames para soldagem de revestimento

AWS A5.22 Arames tubulares de aço inoxidável para soldagem a arco e varetas tubulares de aço inoxidável para soldagem pelo processo TIG

AWS A5.23 Eletrodos de aço baixa liga e fluxos para soldagem a arco submerso

AWS A5.24 Eletrodos e varetas para soldagem de zircônio e ligas de zircônio

AWS A5.25 Eletrodos de aço-carbono e aços baixa liga e fluxos para soldagem por eletroescória.

AWS A5.26 Eletrodos de aço-carbono e aços baixa liga e fluxos para soldagem por eletrogás.

AWS A5.28 Arames e varetas de aços baixa liga para soldagem a arco com proteção gasosa

AWS A5.29 Arames tubulares de aços baixa liga para soldagem a arco

AWS A5.31 Fluxos para brasagem e solda brasagem.

AWS A5.32 Gases para proteção gasosa.

Cada uma dessas especificações classifica os consumíveis cobertos por ela de acordo com critérios próprios, que podem ser composição química, propriedades mecânicas ou outros. Além da classificação, cada especificação estabelece requisitos próprios para os tipos de teste a serem aplicados, identificação, tolerâncias de fabricação e embalagem, entre outros.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho aborda uma qualificação de procedimento de soldagem - EPS - envolvendo os processos de soldagem GTAW e GMAW, que será aplicado exclusivamente em eventuais reparos em soldas de união entre tubulações fabricadas em aço carbono DNVGL SMLS 450 SFPD + Clad 625 (CRA UNS N06625) com ASTM A694 F65 + Clad 625 (CRA UNS N06625) Overlay, essas tubulações compõem equipamentos submarinos para produção e injeção de petróleo em águas profundas ~2100 metros.

Neste capítulo será abordado a sistemática para qualificação do procedimento de soldagem proposto, procurando detalhar cada etapa do processo desde a concepção do projeto até a entrega do procedimento qualificado e aprovado por um engenheiro de soldagem

3.1 Plano de qualificação da EPS

Para a qualificação de um procedimento de soldagem é necessário saber para qual finalidade é aquela qualificação, ou seja, conhecer o produto final, isto se torna fundamental para um bom planejamento da qualificação de um procedimento de soldagem conforme as diretrizes dos códigos normativos aplicáveis.

Na qualificação do procedimento proposto neste trabalho está sendo utilizado como código normativo principal a norma DNVGL-ST-F101 - Submarine Pipeline Systems, edição 2017. Esse código, assim como outros determinam critérios e os meios de como deve ser conduzida a qualificação de procedimentos de soldagem assegurando assim a qualidade e o cumprimento das variáveis essenciais requeridas para o projeto.

Após a identificação do código aplicável para a qualificação de procedimentos de soldagem, é necessário analisar minuciosamente esse código para identificar os requisitos a serem atendidos. Os principais recursos e requisitos para a qualificação de um procedimento de soldagem serão detalhados nas seções subsequentes.

3.2 Peças de Teste

O dimensionamento das peças de teste é realizado conforme as premissas do projeto, basicamente os códigos de qualificação trabalham com faixas de espessuras e diâmetros padronizados e dependendo do código normativo, agrupamento de materiais.

Para a confecção das peças de testes a serem utilizados na qualificação deste procedimento de soldagem foram utilizados tubos laminados para os materiais DNVGL SMLS 450 SFPD + Clad 625 (CRA UNS N06625) temperado e revenido e tubos forjados para os materiais ASTM A694 F65 + Clad 625 (CRA UNS N06625) Overlay também temperados e revenidos, cujos diâmetros externos e espessuras são respectivamente 280mm e 31,85mm. A escolha destes materiais foi proposital, uma vez que são os mesmos materiais utilizados nas linhas de produção do equipamento a ser soldado. A composição química e propriedades mecânicas devem atender aos valores estabelecidos nas suas respectivas normas de fabricação do material DNVGL-ST-F101 Grau SMLS DNV 450 e ASTM A694 F65. Estes valores são citados nas tabelas 1 e 2 a seguir.

Tabela 1 – Composição química dos materiais

Material	Composição, % (máximo)								
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Outros
DNVGL 450	0,18	0,45	1,70	0,025	0,015	0,09	0,05	0,06	*
ASTM A694 F65	0,26	0,15 - 0,35	1,4	0,025	0,015	-	-	-	-

* A soma de nióbio, vanádio e titânio não deve exceder 0,15%.

*Cu ≤ 0.50%; Ni ≤ 0.50%; Cr ≤ 0.50%; Mo ≤ 0.50%; B ≤ 0.0005%.

Fonte: Adaptado de DNVGL, 2017, p. 155; ASTM, 1999, p. 2

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos materiais

	DNV 450	ASTM A694 Gr F65
Limite de resistência - MPa	535 - 760	535 mín.
Limite de escoamento - MPa	450 - 570	450 mín.
e/r - máx	0,93	-
Alongamento Af (% min.)*	A0,2 Af = 1,940 U0,9	20

* Af = alongamento; A = área do corpo de prova em mm²; U = limite de resistência em MPa

Fonte: Adaptado de DNVGL, 2017, p. 155; ASTM, 1999, p. 1

As figuras abaixo evidencia os tubos de testes que foram reservados para a preparação dos corpos de prova, este registro se dá antes das etapas de corte e usinagem dos mesmos.

Figura 11 – Peças de teste

Fonte: Fotografia da autor (2023)

3.3 Metais de adição

Os metais de adição (varetas e arames) devem atender primeiramente dentre outros requisitos, no mínimo a resistência mecânica do metal de base e neste caso por se tratar de soldagem de componentes com revestimento interno com inconel, o consumível selecionado deve apresentar resistência a corrosão na raiz da solda em igual a resistência do revestimento interno.

Os consumíveis selecionados para a soldagem foram varetas e arames de liga de níquel, com bitolas de, respectivamente, 2,4mm e 1,1mm, ambos com denominação ASME SFA 5.14 ERNiCrMo-3 (N06625). As Tabelas 3 e 4 indicam, respectivamente, sua composição química e limite de resistência do metal de solda na condição “como soldado”, especificados na norma ASME II *part C*.

Tabela 3 – Composição química do consumível ASME SFA 5.14 ERNiCrMo-3

Composição	% (máximo)
Carbono	0,1
Manganês	0,5
Ferro	5,0
Fósforo	0,02
Enxofre	0,015
Silício	0,5
Cobre	0,5
Níquel	58,0 min.
Alumínio	0,4
Titânio	0,4
Cromo	20,0 - 23,0
Nióbio + Tântalo	3,15 - 4,15
Molibdênio	8,0 - 10,0
Outros	0,5

Fonte: Adaptado de ASME, 2023a, p. 446

Tabela 4 – Limite de resistência do metal de adição (típico)

Limite de resistência - MPa	760 mín
-----------------------------	---------

Fonte: Adaptado de ASME, 2023a, p. 463

Comparando-se os valores da tabela 2 com a tabela 4, pode ser verificado que o valor limite de resistência do metal depositado atende àqueles especificados para o metal de base.

3.4 Gás de proteção

Processos de soldagem como os que serão utilizados na qualificação deste

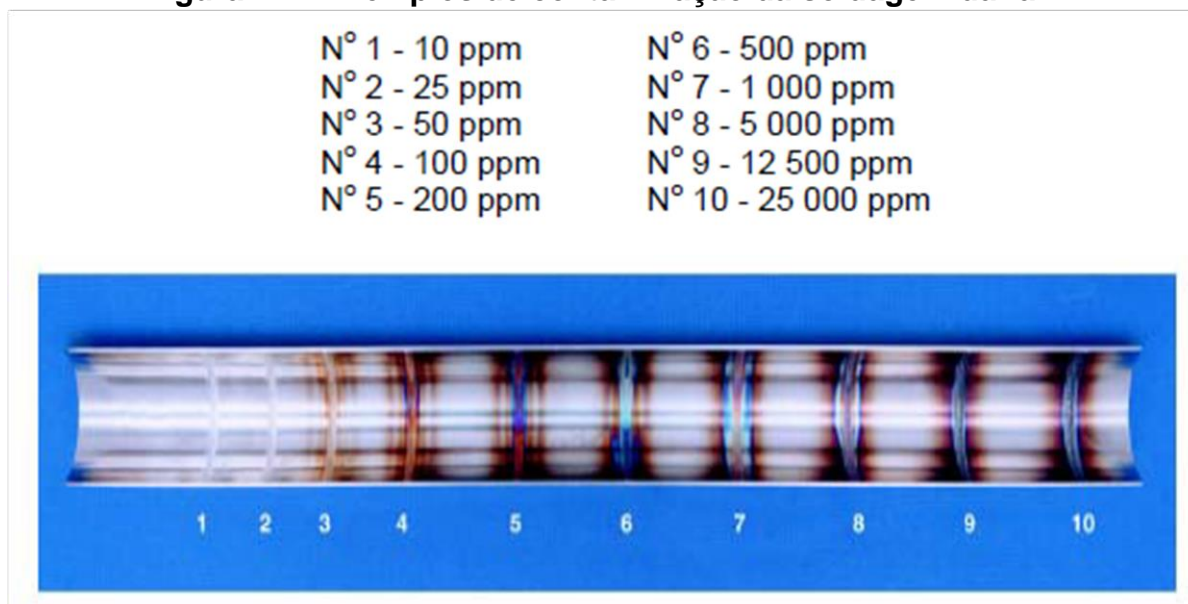
procedimento necessita de gás de proteção para evitar que os gases da atmosfera reajam quimicamente com a poça de fusão durante a execução da soldagem.

A classificação, designação e pureza dos gases de proteção e de purga devem estar em conformidade com a ISO 14175. A utilização de uma atmosfera de proteção no interior dos tubos (gás de purga) durante a soldagem é um recurso utilizado para garantir a qualidade da raiz da solda na junta realizada. A purga é realizada utilizando um gás inerte, como o argônio ou o hélio. Esses gases são inertes à oxidação e à corrosão, portanto, não reage com as ligas de níquel por exemplo.

A norma DNVGL-ST-F101 não especifica os teores dos gases a serem aplicados durante a soldagem, assim conforme a disponibilidade no momento da qualificação deste procedimento foi utilizado para o processo GTAW 100% de Ar e para o processo GMAW a mistura 70%Ar + 30%He. Para evitar quaisquer riscos de contaminação da raiz das soldas foi estabelecido que o gás de purga seria retirado após 8mm de metal de solda depositado e o teor máximo permitido de oxigênio seria de 500PPM esse valor é apenas uma referência, uma vez que a norma DNV-ST-F101 não especifica tal valor.

Abaixo uma referência de contaminação de raiz de soldas de tubulações em função de diferentes teores de oxigênio no gás de purga.

Figura 12 – Exemplos de contaminação da soldagem da raiz



Fonte: PETROBRAS, 2015, p. 59

3.4.1 Equipamento de Soldagem

Segundo a norma DNVGL-ST-F101, o equipamento de soldagem é uma variável essencial, ou seja, o mesmo modelo de equipamento utilizado durante a qualificação do procedimento deverá ser usado nas soldas de produção. (DNVGL, 2017) A fonte de soldagem utilizada para soldagem das peças de teste foi uma fonte inversora XMT 350 Mpa Auto-line do fabricante Miller (figura 13). Esta fonte é aplicável para soldagem nos processos GTAW, GMAW, FCAW, SMAW, e para corte por eletrodo de grafite e goivagem.

Figura 13 – Fonte de soldagem XMT 350 Mpa



Fonte: Fotografia da autor (2023)

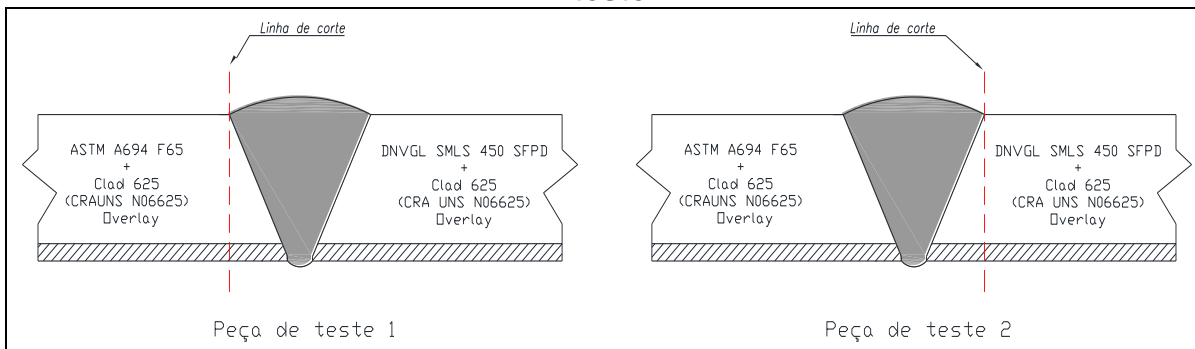
3.4 Procedimentos adotados

Para o desenvolvimento desta qualificação primeiramente as peças de teste foram concebidas na condição de soldadas e aprovadas nos ensaios: visual, líquido penetrante e radiografia para garantir que não houvesse defeitos que pudessem comprometer as etapas posteriores.

A partir deste momento deu se início ao processo de corte e usinagem das juntas das peças de teste, simulando uma condição real nas soldas de produção. Abaixo as etapas a cumprir para a preparação das peças de teste.

Etapa 1 - Traçar a linha de corte nas peças de testes previamente soldadas.

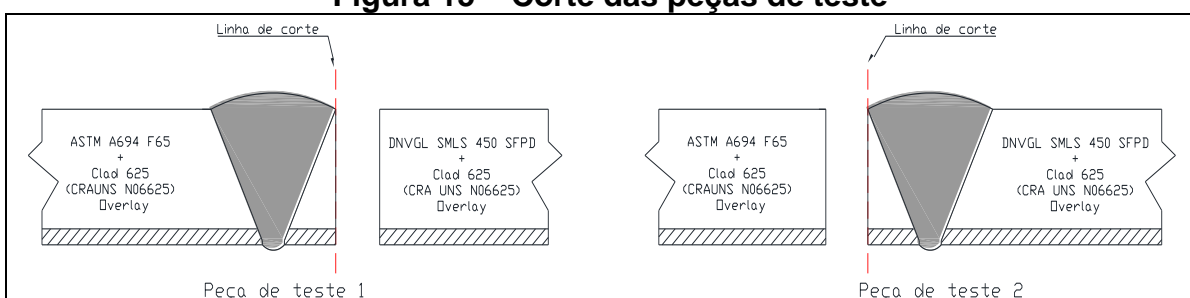
Figura 14 – Traçagem da linha de teste na seção transversal das peças de teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Etapa 2 – Cortar as peças de testes.

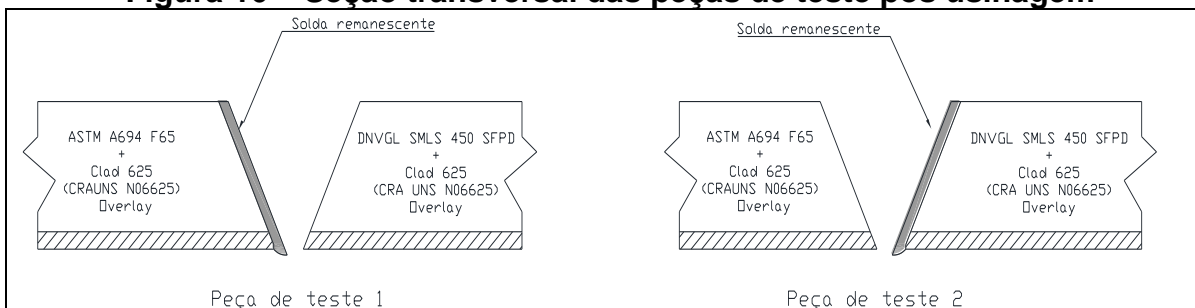
Figura 15 – Corte das peças de teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Etapa 3 - Usinar ambas os lados das peças de teste com bisel de 30°. Para o lado com metal de solda remanescente deve se deixar aproximadamente 2mm dessa solda remanescente.

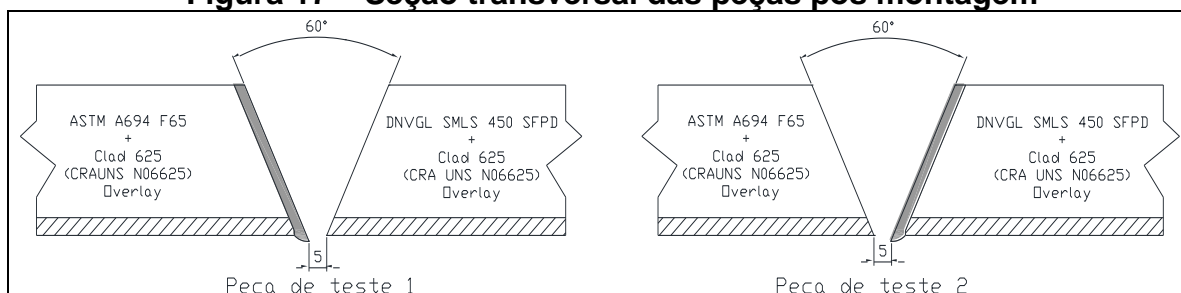
Figura 16 – Seção transversal das peças de teste pós usinagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Etapa 4 – Montar novamente as peças de teste, realizar inspeção dimensional e liberar para ressoldagem.

Figura 17 – Seção transversal das peças pós montagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Ressalta se que estas etapas não são especificadas pelo código normativo DNVGL-ST-F101, ou seja, foram desenvolvidas em comum acordo entre as partes envolvidas na qualificação deste procedimento, sendo as partes: os responsáveis pela qualificação deste procedimento de soldagem e pelo engenheiro responsável pelo projeto.

Na norma DNVGL-ST-F101, anexo C, tabela C-7 é mencionado diversos tipos de reparos por soldagem (reparo parcial, reparo no acabamento, reparo total, reparo de raiz em processo, repetição de reparos etc.) que são permitidos ou não a sua realização em função do tipo de material (aços carbono de baixa liga C-Mn, 13Cr MSS, Clad/lined, CRA/Duplex) a qual está sendo soldado. Para o caso de materiais de ligas de níquel, que é o objeto de estudo deste trabalho, o reparo total só é permitido se houver um acordo entre as partes envolvidas na qualificação. Neste acordo geralmente é definido as técnicas e métodos de preparação dos corpos de prova, técnicas de escavação e ressoldagem, ENDS, testes mecânicos entre outros que vão além do que é previsto pelo código normativo.

3.4.1 Requisitos de qualificação

A qualificação deste procedimento de soldagem se dá conforme a norma DNVGL-ST-F101, anexo C.

A soldagem de qualificação deve ser realizada de acordo com uma pré EPS escrita e aceito pelas partes envolvidas, usando o mesmo equipamento e condições que serão usados na soldagem de produção, deve conter todas as informações

necessárias para realizar uma solda de acordo com a aplicação pretendida, incluindo os processos de soldagem aplicáveis e os pontos de solda específicos além do cumprimento de todas as variáveis essenciais de soldagem da tabela C-2 da norma DNVGL-ST-F101.

Segundo o código ASME IX, são consideradas variáveis essenciais de soldagem àquelas que afetam significativamente as propriedades mecânicas de uma junta soldada, por exemplo: faixa de espessura, processo de soldagem, diâmetro e composição química do eletrodo, composição química do metal de base, grau de resistência do aço, tratamento térmico, entre outras diversas. Havendo a necessidade de alteração de qualquer que seja a variável essencial, é necessário que seja realizado uma qualificação de um novo procedimento de soldagem;

Além das variáveis essenciais, existem também as variáveis essenciais suplementares, que são aquelas que se o equipamento ou projeto para o qual se está qualificando o procedimento de soldagem requer ensaio de impacto, essas variáveis suplementares passam ser essenciais.

Ainda existem as variáveis não essenciais, que são aquelas que quando não seguidas não requer nova qualificação de procedimento de soldagem.

Todas as variáveis essenciais devem ser registradas e controladas na qualificação do procedimento de soldagem por meio de um formulário e acompanhamento de soldagem.

A medição das variáveis de soldagem deve ser realizada utilizando instrumentos de medição devidamente calibrados. Para o acompanhamento da soldagem das peças de testes, os seguintes instrumentos são utilizados:

Paquímetro: utilizado para verificação da espessura do metal base, espessura do metal de adição, comprimento do corpo-de-prova, espessura e largura dos cordões de solda.

Calibre de solda Hi Lo: Para verificação dimensional da geometria das juntas a serem soldadas e dos parâmetros das soldas realizadas (abertura da raiz, ângulo do bisél, nariz, altura do reforço).

Pirômetro de contato: para medição da temperatura da peça.

Cronômetro: para medição do tempo de cada passe soldado.

Multímetro: para verificação da tensão e corrente de soldagem.

Oxímetro: para medição do teor de oxigênio no interior das peças de teste.

Fluxômetro ou Bibímetro: verificação da vazão do gás de proteção.

O controle do aporte térmico (heat input) já definido no item 2.2, quando requerido, é uma variável de fundamental importância para o controle da qualidade da solda, influenciando diretamente na microestrutura da zona fundida e da zona termicamente afetada pelo calor, nas propriedades mecânicas e na geometria do cordão. O aporte térmico (heat input), é dado pela seguinte equação:

$$heat_input = \frac{V * A * 60}{v}$$

Sendo:

V = tensão [V]

A = corrente [A]

v = velocidade de soldagem [cm/min]

heat input = aporte térmico [J/cm]

3.4.2 Técnica de Soldagem

A norma DNVGL-ST-F101 exige que uma especificação preliminar de procedimento de soldagem (pEPS) seja preparada para cada nova qualificação de procedimento de soldagem. A pEPS deve conter as informações relevantes necessárias para realizar uma solda para a aplicação pretendida, usando os processos de soldagem aplicáveis.

Uma pEPS para soldagem de produção deve incluir as seguintes informações: Processo de soldagem; Equipamento de soldagem; Materiais de base; Configuração de chanfro; consumíveis de soldagem; Gases; Características elétricas; Técnicas de soldagem (posição, direção, sequência de deposição, número de passes etc.); Pré-aquecimento; Temperatura de interpasse; Heat input; Condições específicas para o processo aplicado.

Para a qualificação de um procedimento de reparo, são necessários outros requisitos adicionais, como: Tipo de reparo (total, parcial, acabamento); Método de remoção dos defeitos; Preparação para escavação da solda; Profundidade mínima de reparo; Comprimento permitido.

A seguir, é apresentado um formulário de pEPS contendo as informações relevantes para a soldagem das chapas de teste.

As juntas soldadas conforme já dito envolvem os materiais DNVGL SMLS 450 SFPD + Clad 625 (CRA UNS N06625) Overlay com ASTM A694 F65 + Clad 625 (CRA UNS N06625) Overlay. As peças de testes foram posicionadas em uma bancada a 45° para soldagem na posição 6G.

Figura 19 – Peça de teste posicionado na bancada



Fonte: Fotografia do autor (2023)

Antes do início da soldagem deve se tamponar as extremidades das peças de teste com fita de vedação resistente a alta temperatura, essa técnica é para introduzir um ponto de purga antes do início e também durante a soldagem para remover a umidade e os contaminantes do ar ambiente, que podem prejudicar a qualidade da solda. Como as peças de testes são revestidas internamente com Inconel® 625 (N06625), estas ligas são suscetíveis à oxidação e à corrosão. A umidade e os contaminantes do ar ambiente podem aumentar a probabilidade de formação de óxidos e nitretos na superfície da raiz da solda, o que pode reduzir a resistência à corrosão e à oxidação.

A aplicação de pré-aquecimento também se faz necessário antes do início da soldagem, essa técnica elimina a umidade dos metais de base, melhora a molhabilidade do metal de solda no metal de base, diminui a taxa de resfriamento da junta reduzindo assim a formação de tensões residuais etc. É importante garantir que

o pré-aquecimento seja uniforme ao redor da área da junta. Isso pode ser feito usando um lápis térmico ou pirômetro de contato para verificar a temperatura do metal.

Durante a soldagem, ao término de cada cordão de solda é recomendado que se faça o esmerilhamento do final do cordão anterior (“unha”) antes do início do passe seguinte para remoção de possíveis descontinuidades. O esmerilhamento somente é permitido com disco compatível com o metal de adição.

Após o término da soldagem, com as peças de testes já esfriadas deve ser realizado uma limpeza superficial nas peças de teste para realização dos END's.

3.4.3 Ensaios não destrutivos

Concluído a soldagem dos corpos de prova e passados 24 horas do término da soldagem deu se início a realização de ENDs, este tempo de espera é uma condição prevista na norma DNVGL-ST-F101, eles foram submetidos aos ensaios não destrutivos dentro das próprias instalações da delp. Os ensaios não destrutivos são realizados previamente para garantir que nenhum defeito superficial ou volumétrico interfira nos resultados dos testes mecânicos, ensaio visual, partículas magnéticas, ultrassom e radiografia são realizados nas peças de teste antes da usinagem dos corpos de prova.

Nesta etapa não foram evidenciados nenhum tipo de descontinuidade tais como, mordeduras, reforço excessivo, deposição insuficiente entre outros que viesse a reprovar a solda das peças de teste, ressalta se que a inspeções foram realizadas por inspetores devidamente qualificados por organizações certificadoras tais como Abendi, SNQC e FBTS.

3.4.4 Amostras para ensaios e testes

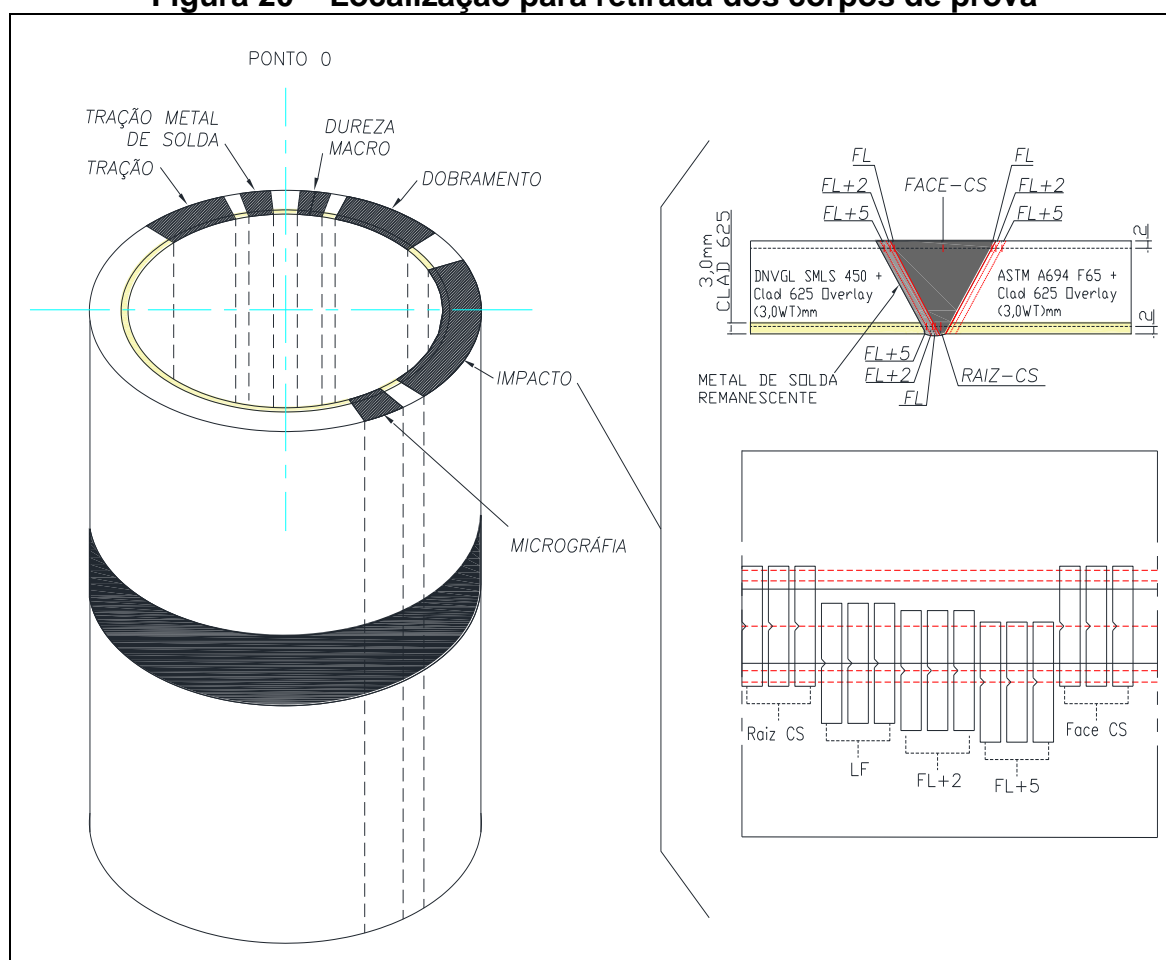
Para satisfazer a qualificação do procedimento de soldagem uma série de testes são necessários, além dos ensaios não destrutivos já relatados aqui.

Os ensaios destrutivos a serem realizados são informados na tabela C-4 da norma DNVGL-ST-F101, sendo eles: ensaio de tração, ensaio de tração transversal a solda, dobramento, impacto, dureza, macrografia e micrografia. (DNVGL, 2017) Outros testes podem ser requeridos, porém depende da aplicabilidade do procedimento a ser qualificado.

Em relação ao teste de impacto, se faz necessário conhecer a temperatura do teste. A tabela 7-6 da norma DNVGL-ST-F101 traz a referência de temperatura do teste em função da espessura das peças de teste soldadas com a temperatura de projeto para o qual está qualificando o procedimento, entretanto a temperatura estabelecida para o teste foi de -28°C , esta foi uma condição a parte, ou seja, foi uma solicitação direta do responsável pela concepção do projeto por meio de uma especificação interna de sua empresa que sobrepõe o código normativo, sendo a exigência de energia absorvida mínima individual de 38J e média mínima 45J conforme tabela 7-5 dessa mesma norma para aços com 450Mpa de resistência mecânica.

Para realização dos testes mecânicos, é necessário a divisão das peças de testes soldadas em corpos de provas específicos para cada tipo de teste a ser realizado. A figura 20 mapeia as regiões onde devem ser retirados esses corpos de prova nas peças de teste soldadas.

Figura 20 – Localização para retirada dos corpos de prova



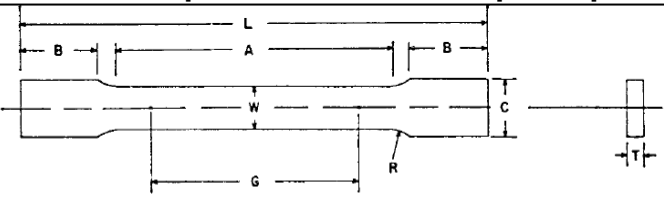
Fonte: Adaptado de DNVGL, 2017, p. 363

Após a remoção das amostras conforme orientação da figura acima, os corpos de prova devem ser preparados conforme dimensões padronizadas por códigos normativos referenciados no apêndice B da norma DNVGL-ST-F101.

Para o ensaio de tração transversal as peças de teste, as amostras podem ser retangulares ou redondas a critério do executante.

Portanto, as amostras foram preparadas conforme umas das opções da norma ASTM A370, ou seja, corpos de provas retangulares com 200mm de comprimento.

Figura 21 – Dimensões padronizadas de corpo de prova de tração



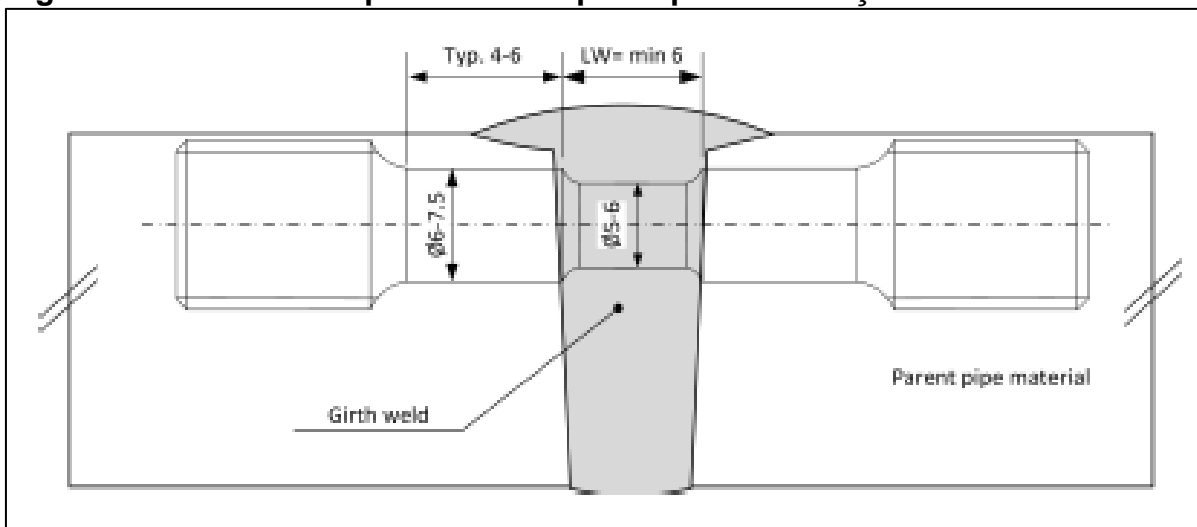
DIMENSIONS

	Standard Specimens				Subsize Specimen			
	Plate-Type, 1½-in. (40-mm) Wide							
	8-in. (200-mm) Gauge Length		2-in. (50-mm) Gauge Length		Sheet-Type, ½ in. (12.5-mm) Wide		¼-in. (6-mm) Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gauge length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.010	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ⅛ – ¼	40 + 3 – 6	1½ + ⅛ – ¼	40 + 3 – 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)	Thickness of Material							
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	½	13	¼	6
L—Overall length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approxi- mate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	2	50	¾	20	¾	10

Fonte: ASTM, 2003, p. 5

As amostras para o ensaio de tração transversal a seção da solda deve ser preparada conforme a figura B-13 da norma DNVGL-ST-F101.

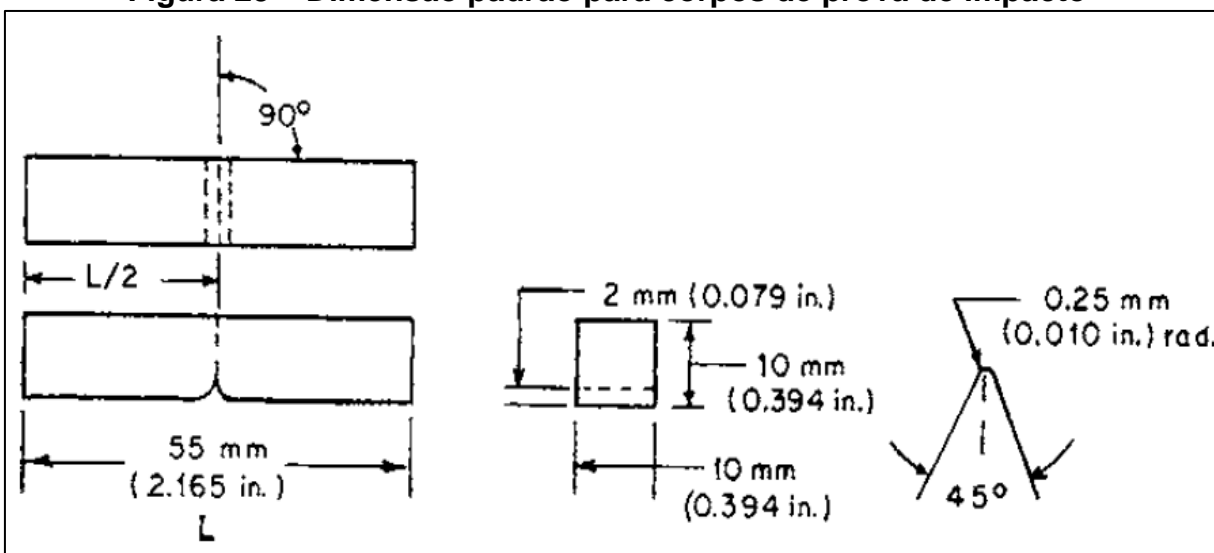
Figura 22 – Dimensões padrão de corpo de prova de tração transversal a solda



Fonte: DNVGL, 2017, p.337

Os corpos de prova para o teste de impacto foram preparados de acordo com a figura 11 da norma ASTM A370. Para cada região analisada, metal de solda (face), metal de solda (raiz), linha de fusão (face e raiz), linha de fusão +2,0mm (face e raiz), linha de fusão +5,0mm (face e raiz) três amostras são necessárias para validação do teste.

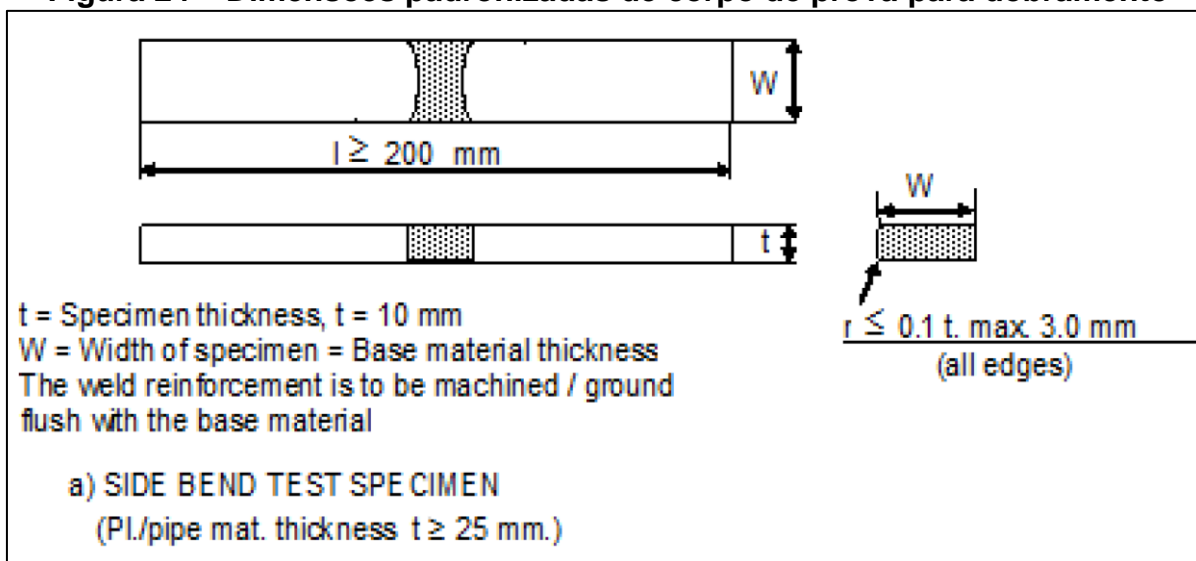
Figura 23 – Dimensão padrão para corpos de prova de impacto



Fonte: ASTM, 2003, p. 18

As amostras para o teste de dobramento lateral devem ser preparadas conforme a norma DNVGL-ST-F101, figura B-1a.

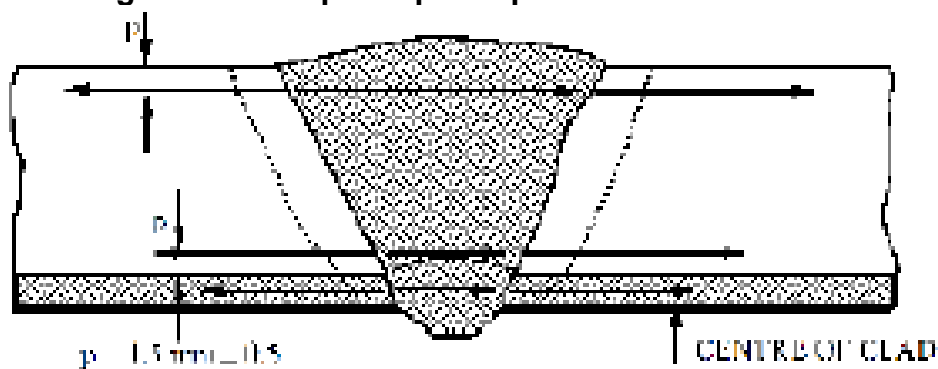
Figura 24 – Dimensões padronizadas de corpo de prova para dobramento



Fonte: DNVGL, 2017, p.331

O teste de dureza deve ser realizado na seção transversal da solda usando o Método Vickers HV10 de acordo com ISO 6507-1 e conforme figura B-11 da norma DNVGL-ST-F101.

Figura 25 – Corpo de prova para ensaio de dureza



Fonte: DNVGL, 2017, p.336

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas 5 e 6 abaixo contém os principais parâmetros de soldagem coletados durante a soldagem de duas peças de teste para qualificação deste procedimento. Em ambas as peças de teste, observa-se que a raiz, o passe quente e os seis primeiros passes de enchimento foram executados pelo processo GTAW, conforme pode-se constatar também pelas figuras 26 e 27.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem da peça de teste 1

Passe n°	Processo	CONSUMÍVEL		PARÂMETROS DE SOLDAGEM									
		Especificação	Ø	Polaridade	Corrente (A)	Tensão (V)	Temp.	Largura do cordão	Tempo		L (mm)	Velocidade (mm/min.)	Heat Input (kJ/mm)
			(mm)					(mm)	min.	seg.			
1	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	93,0 - 93,0	10,2 - 10,2	115	7	5	5	169,0	33,2	1,72
2	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	166,0 - 166,0	11,2 - 11,2	123	9	1	56	172,0	89,0	1,14
3	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	162,0 - 162,0	11,2 - 11,2	117	10	1	38	174,0	106,5	1,16
4	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	174,0 - 174,0	11,3 - 11,3	116	10	1	42	176,0	103,5	1,17
5	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	174,0 - 174,0	10,8 - 10,8	115	10	1	42	179,0	105,3	1,16
6	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	176,0 - 176,0	11,5 - 11,5	117,8	9	2	5	179,0	85,9	1,19
7	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	189,0 - 189,0	12,3 - 12,3	116	10	2	11	182,0	83,4	1,20
8	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC+	188,0 - 188,0	12,7 - 12,7	125,6	10	1	26	182,0	127,0	1,20
9	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	120,0 - 120,0	25,3 - 25,3	139,1	11	1	5	184,0	169,8	1,17
10	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	120,0 - 120,0	25,3 - 25,3	136	11	1	22	184,0	134,6	1,32
11	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	25,9 - 25,9	121,1	11	1	5	188,0	173,5	1,31
12	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	27,1 - 27,1	139,1	10	1	8	188,0	165,9	1,10
13	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	130,0 - 130,0	25,9 - 25,9	162,5	10	1	1	188,0	184,9	1,26
14	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	26,2 - 26,2	125,8	11	1	17	193,0	150,4	1,36
15	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	26,5 - 26,5	141,1	12	1	12	193,0	160,8	1,29
16	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	135,0 - 135,0	25,3 - 25,3	132,4	11,5	1	7	193,0	172,8	1,42
17	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	130,0 - 130,0	26,7 - 26,7	139,1	11	1	22	198,0	144,9	1,40
18	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	27,3 - 27,3	145	11	1	25	198,0	139,8	1,30
19	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	130,0 - 130,0	26,2 - 26,2	146,2	11	1	27	198,0	136,6	1,11
20	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	131,0 - 131,0	25,1 - 25,1	165	10	1	24	198,0	141,4	1,15
21	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	126,0 - 126,0	24,8 - 24,8	112	10	1	5	206,0	190,2	0,99
22	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	128,0 - 128,0	25,6 - 25,6	118	10	1	10	206,0	176,6	1,00
23	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	25,8 - 25,8	124,1	10,5	1	9	206,0	179,1	1,16
24	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	130,0 - 130,0	24,2 - 24,2	130,5	10	1	14	206,0	167,0	0,96
25	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	128,0 - 128,0	26,9 - 26,9	148	11	1	12	214,0	178,3	1,14
26	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	25,6 - 25,6	162	11	1	15	214,0	171,2	0,98
27	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	128,0 - 128,0	27,4 - 27,4	149,5	11,5	1	19	214,0	162,5	1,18
28	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	129,0 - 129,0	26,2 - 26,2	146,5	11	1	28	214,0	145,9	1,15
29	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	112,0 - 112,0	25,3 - 25,3	120	11	1	25	218,0	153,9	0,94
30	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	110,0 - 110,0	24,6 - 24,6	115	11	1	22	218,0	159,5	0,88
31	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	109,0 - 109,0	24,5 - 24,5	114	11	1	9	218,0	189,6	0,82
32	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	110,0 - 110,0	25,6 - 25,6	111,5	10	1	15	218,0	174,4	0,86
33	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	111,0 - 111,0	24,8 - 24,8	126	9	1	19	218,0	165,6	0,91
34	GMAW	ER NiCrMo-3	1,14	CC+	111,0 - 111,0	25,4 - 25,4	123	11	1	12	218,0	181,7	0,98

Fonte: Elaborado pelo autor

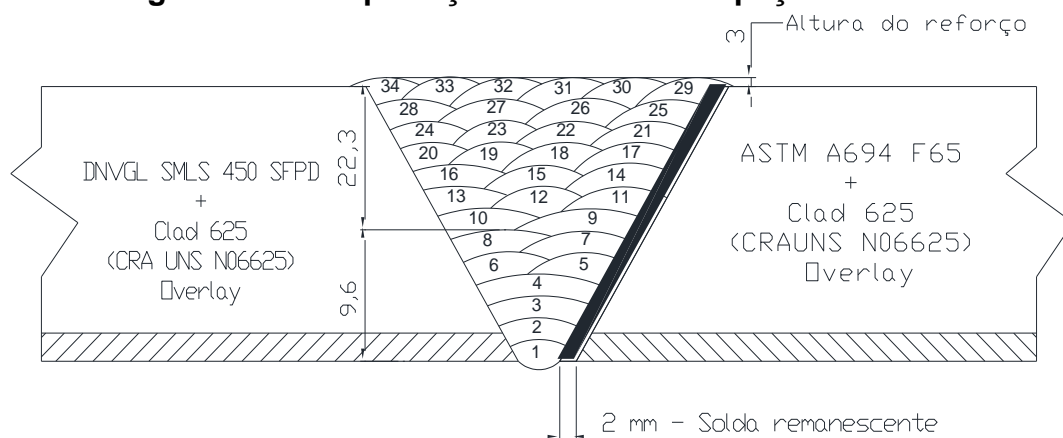
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem da peça de teste 2

Passo Nº	Processo	CONSUMÍVEL		PARÂMETROS DE SOLDAGEM									
		Especificação	Ø (mm)	Polaridade	Corrente (A)	Tensão (V)	Temperatura (°C)	Largura do cordão (mm)	Tempo		L (mm)	Velocidade (mm/min.)	Heat Input (kJ/mm)
									min.	seg.			
1º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	88,0 - 88,0	10,1 - 10,1	119	7	5	55	169,0	28,6	1,87
2º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	158,0 - 158,0	10,8 - 10,8	142	8,6	1	52	172,0	92,1	1,05
3º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	171,0 - 171,0	11,3 - 11,3	115,2	9	1	42	174,0	102,4	1,08
4º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	177,0 - 177,0	11,5 - 11,5	112	11	1	49	174,0	95,8	1,23
5º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	186,0 - 186,0	11,5 - 11,5	140	9	1	39	174,0	105,5	1,18
6º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	187,0 - 187,0	11,3 - 11,3	118	9	1	28	174,0	118,6	1,10
7º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	186,0 - 186,0	11,5 - 11,5	145	11	1	47	174,0	97,6	1,21
8º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	189,0 - 189,0	11,9 - 11,9	139	11	1	41	174,0	103,4	1,21
9º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	134,0 - 134,0	26,1 - 26,1	120	10	1	4	183,0	171,6	0,99
10º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	126,0 - 126,0	26,7 - 26,7	115,7	10	1	16	183,0	144,5	1,28
11º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	125,0 - 125,0	26,1 - 26,1	117,5	11	1	25	197,0	139,1	1,25
12º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	125,0 - 125,0	25,8 - 25,8	115,7	11,5	1	6	197,0	179,1	1,16
13º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	131,0 - 131,0	26,5 - 26,5	134,5	11	1	21	197,0	145,9	1,45
14º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	133,0 - 133,0	25,7 - 25,7	129,1	11,5	1	27	200,0	137,9	1,38
15º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	128,0 - 128,0	27,6 - 27,6	129,1	11	1	20	200,0	150,0	1,19
16º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	132,0 - 132,0	26,7 - 26,7	129,1	11	1	36	200,0	125,0	1,53
17º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	136,0 - 136,0	27,1 - 27,1	142,5	10,5	1	33	204,0	131,6	1,43
18º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	132,0 - 132,0	26,0 - 26,0	142,5	11	1	23	204,0	147,5	1,28
19º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	132,0 - 132,0	27,2 - 27,2	142,5	11	1	9	204,0	177,4	1,30
20º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	136,0 - 136,0	26,8 - 26,8	160	10,5	1	7	204,0	182,7	1,11
21º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	132,0 - 132,0	26,2 - 26,2	150,1	11,5	1	31	210,0	138,5	1,36
22º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	135,0 - 135,0	26,9 - 26,9	150,1	12	1	4	210,0	196,9	1,20
23º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	131,0 - 131,0	26,9 - 26,9	150,1	12	1	14	210,0	170,3	1,23
24º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	132,0 - 132,0	26,5 - 26,5	148,1	12	1	16	210,0	165,8	1,27
25º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	126,0 - 126,0	26,8 - 26,8	140	11	1	22	213,0	155,9	1,19
26º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	126,0 - 126,0	26,7 - 26,7	140	12	1	23	213,0	154,0	1,19
27º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	128,0 - 128,0	27,1 - 27,1	140	12	1	21	213,0	157,8	1,26
28º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	126,0 - 126,0	26,7 - 26,7	130,1	11	1	8	213,0	187,9	0,93
29º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	125,0 - 125,0	26,3 - 26,3	134,4	10	0	53	213,0	241,1	1,02
30º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	110,0 - 110,0	27,1 - 27,1	125	11	1	45	218,0	124,6	0,93
31º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	110,0 - 110,0	25,7 - 25,7	115	11,5	1	21	218,0	161,5	0,86
32º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	111,0 - 111,0	25,6 - 25,6	116	11	1	17	218,0	169,9	0,84
33º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	110,0 - 110,0	25,3 - 25,3	116,5	10	1	13	218,0	179,2	0,87
34º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	110,0 - 110,0	27,1 - 27,1	118	10	1	25	218,0	153,9	0,91
35º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC-	110,0 - 110,0	26,8 - 26,8	117,5	10	1	14	218,0	176,8	0,95

Fonte: Elaborado pelo autor

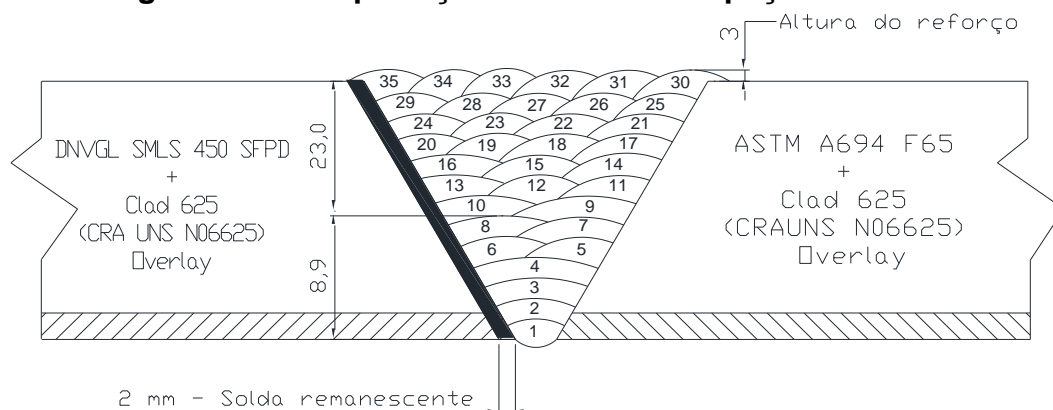
As figuras 26 e 27 abaixo mostra o esboço da seção transversal dos corpos de provas soldados. Na figura 26 o metal de solda remanescente ficou do lado do material forjado ASTM A694 F65 + Clad 625 (CRA UNS N06625) Overlay. Na figura 27 o metal de solda remanescente ficou do lado material laminado DNVGL SMLS 450 SFPD + Clad 625 (CRA UNS N06625) Overlay.

Figura 26 – Croqui seção transversal da peça de teste 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – Croqui seção transversal da peça de teste 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Ensaios Destrutivos

Os testes de tração foram realizados nas seções transversais das peças de teste. Para cada peça de teste foi realizado 1 teste. Na tabela 7 é possível ver os valores de resistência mecânica, escoamento e alongamento obtidos no qual pode se observar que os dois corpos de prova testados houve ruptura do metal de base (como era de se esperar), com valores que atendem ao especificado pelas normas dos materiais conforme citado na tabela 2, confirmando assim a integridade da solda realizada.

Tabela 7 – Ensaio de Tração Transversal a Peça de Teste

Peça de teste	Dimensões	Secção	Resistência		Escoamento	Local de ruptura
	mm	mm ²	Carga kgf	Limite Mpa	Mpa	
1	25,60 x 29,75	761,60	48257	621	530	Fora da Solda (lado DNV450 CLAD)
2	25,60 x 29,35	748,43	48509	636	530	Fora da Solda (lado DNV450 CLAD)

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi realizado também o teste de tração transversal ao metal de solda, como pode se observar os resultados da resistência mecânica foram satisfatórios se comparado com o valor de resistência citado na tabela 4, isso comprova também que os parâmetros de soldagem utilizados influenciaram positivamente no sucesso deste teste.

Tabela 8 – Ensaio de Tração metal de solda das Peças de Teste

Peça de teste	Dimensões Ø	Secção	Escoamento		Resistência		Alongamento			Estricção		Tipo de fratura
			Carga	Limite	Carga	Limite	Lo	%	L	Ø	%	
	mm	mm ²	kgf	Mpa	kgf	Mpa	mm		mm			
1	5,75	25,97	1508	570	2228	841	10	54	15,5	4	51,6	Dúctil
2	5,80	26,42	1659	616	2368	879	10	50	15	4,2	47,6	Dúctil

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o ensaio de dobramento, foram preparados quatro corpos de prova. Os resultados dos testes não apresentaram descontinuidades, ou ainda pode ser verificado uma boa fusão dos materiais por não apresentarem fissuras. Isso comprova a homogeneidade das soldas e sua capacidade de suportar esforços de flexão. Abaixo os resultados dos testes de dobramento.

Tabela 9 – Ensaio de dobramento lateral

Peça de Teste	S C.P.	Dimensões mm	Cutelo Ø mm	Distância entre roletes mm	Ângulo de dobramento graus	Resultados
1	DL1	31,85 x 10,00	50,00	73,00	180	Não apresentou fissuras
	DL2	31,85 x 10,00	50,00	73,00	180	Não apresentou fissuras
2	DL1	31,85 x 10,00	50,00	73,00	180	Não apresentou fissuras
	DL2	31,85 x 10,00	50,00	73,00	180	Não apresentou fissuras

Fonte: Elaborado pelo autor

Para realizar o teste de impacto, foram testados 10 conjuntos para cada peça de teste, sendo cada conjunto composto por 3 amostras. Os testes foram realizados a uma temperatura de -28°C. Cada amostra deveria absorver uma energia mínima de 38J sendo a média de 45J para cada conjunto. De acordo com os resultados as amostras apresentaram capacidade suficiente de absorção de energia ao impacto, evidenciado pela tabela 10, em alguns casos com energia absorvida foi de 294J, máxima capacidade do equipamento em transferir energia, neste caso as amostras não chegaram a se romper.

Tabela 10 – Resultados ensaio de Impacto

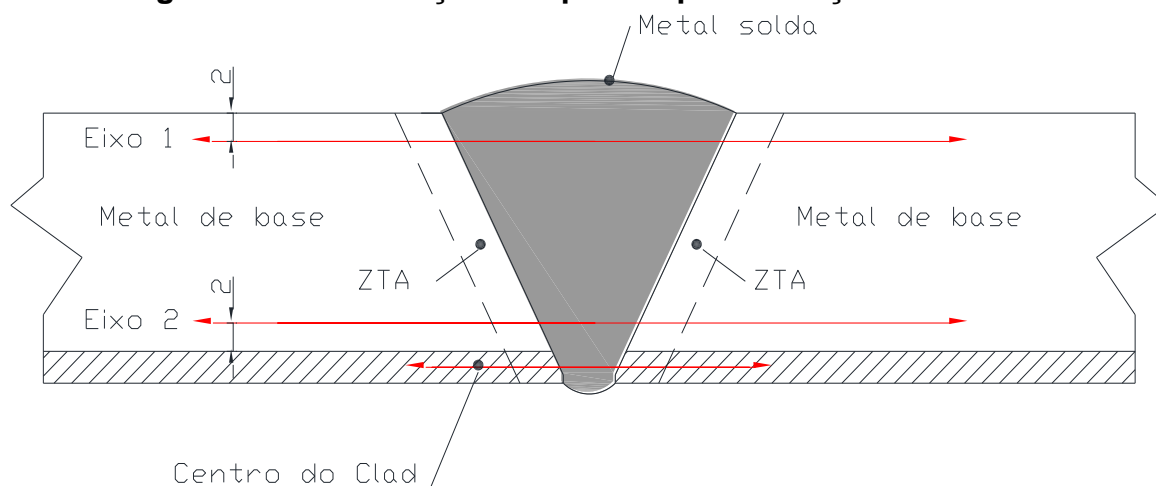
Temperatura (°C): -28°C / Tipo de Entalhe (mm): V2 X 10 X 10					
Peça de Teste 1	Energia Absorvida		Peça de Teste 2	Energia Absorvida	
	Valor Individual (J)	Valor Médio (J)		Valor Individual (J)	Valor Médio (J)
LF-A694 F65 FACE	93	143	CS FACE	220	211
	113			218	
	224			194	
LF+2-A694 F65 FACE	290	280	LF-DNV450 FACE	146	237
	265			294	
	286			271	
LF+5 -A694 F65 FACE	253	270	LF+2-DNV450 FACE	268	242
	264			186	
	292			271	
LF-A694 F65 RAIZ COM CLAD	183	173	LF+2-DNV450 FACE	294	294
	164			294	
	171			294	
LF+2-A694 F6S RAIZ COM CLAD	145	212	CS RAIZ COM CLAD	186	188
	237			177	
	255			201	
LF+5-A694 F65 RAIZ COM CLAD	263	265	LF-DNV450 RAIZ COM CLAD	137	155
	268			148	
	263			181	
LF-DNV450 FACE	167	180	LF+2-DNV450 RAIZ COM CLAD	206	228
	216			242	
	157			235	
LF+2-DN450 FACE	142	228	LF+5-DNV450 RAIZ COM CLAD	255	240
	287			249	
	254			216	
LF+5-DN450 FACE	259	254	LF+2-E694 F6S FACE	167	174
	210			265	
	294			91	
LF+5-DN450 RAIZ COM CLAD	231	242	LF+5-A694 F65 FACE	217	247
	233			261	
	261			263	

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada peça de teste foi preparada 1 amostra para medição de dureza. As medições foram realizadas no metal de base, ZTA lado DNV 450, ZTA lado A694 e

centro da solda em dois eixos e centro do revestimento conforme ilustrado na figura abaixo. A dureza máxima permitida conforme o código normativo é 350HV, todos os pontos medidos foram satisfatórios, o que demonstra que a junta possui a dureza adequada para a aplicação em que será utilizada.

Figura 28 – Localização dos pontos para medição de dureza



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 – Resultados ensaio de dureza

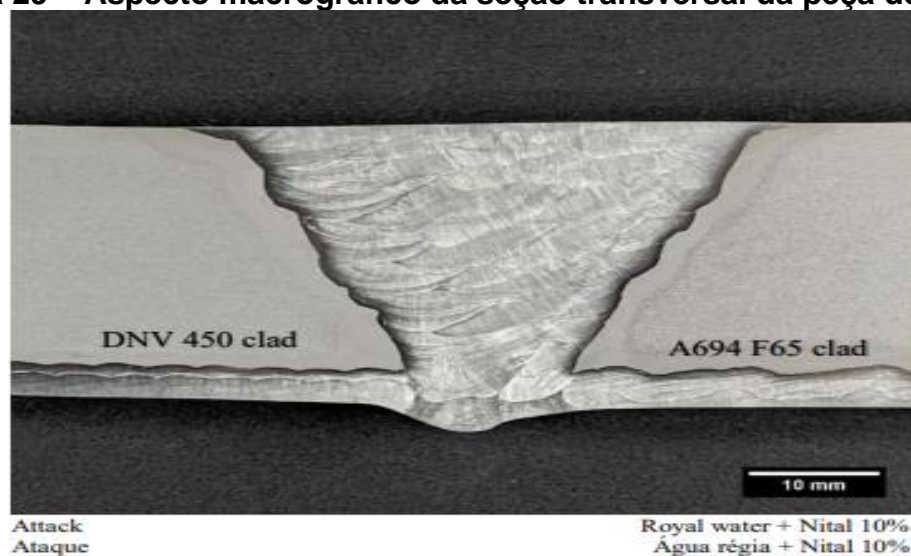
Peça de teste 1	Local do CP	Metal de Base A694				ZTA A694			Metal de solda				ZTA DNV 450			Metal de Base DNV 450			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Eixo 1	194	196	201	198	264	270	272	249	247	249	262	245	235	228	215	210	216	213
Eixo 2	207	203	207	196	199	207	215	287	289	285	274	215	216	213	213	215	219	216	
Centro do Clad	260	266	272	270	285	292	287	289	287	283	272	266	270	272	268	266	262	268	
Peça de teste 2	Local do CP	Metal de Base DNV 450				ZTA DNV 450			Metal de solda				ZTA A694			Metal de Base A694			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Eixo 1	221	216	221	227	274	283	285	304	306	302	289	264	276	287	249	230	218	219
Eixo 2	222	224	221	222	215	221	225	289	304	306	306	243	233	221	222	224	228	221	
Centro do Clad	294	283	292	302	285	292	283	309	312	314	297	317	330	317	294	292	289	281	

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Exame Metalográfico - Macrografia e micrografia

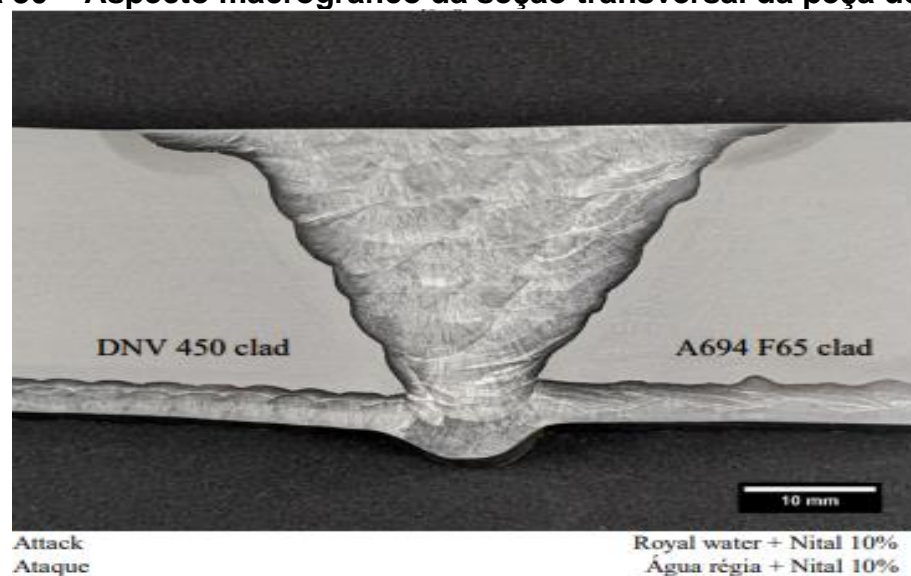
As amostras para o ensaio metalográfico foram examinadas com aumento de 10x e reagente químico utilizado foi Nital 10% e água régia, conforme pode ser visto nas figuras 29 e 30.

Figura 29 – Aspecto macrográfico da seção transversal da peça de teste 1



Fonte: Dados de pesquisa

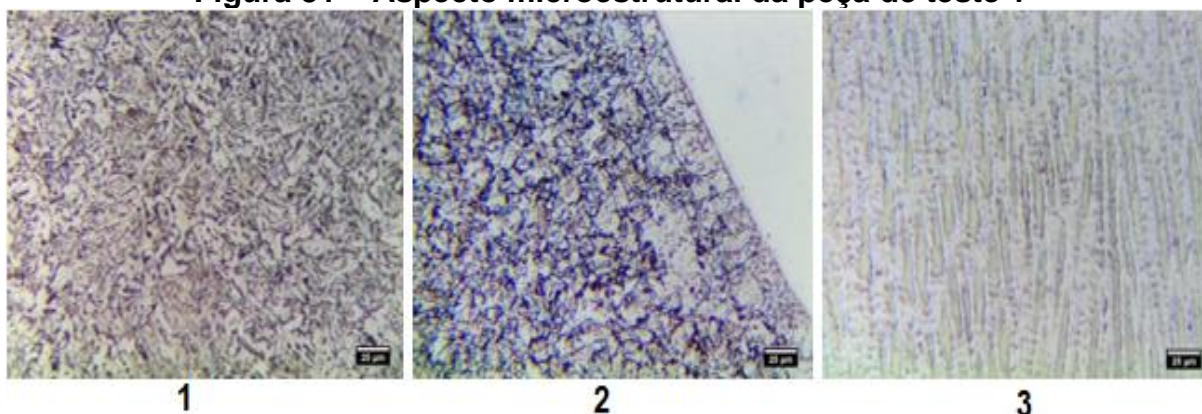
Figura 30 – Aspecto macrográfico da seção transversal da peça de teste 2



Fonte: Dados de pesquisa

Ao observar as figuras constata-se que não houve descontinuidades no metal de adição, metal de base e zona termicamente afetada. Na figura 30 é possível identificar no lado esquerdo do acabamento um avanço sobre o metal de base, isto não é aconselhável. O acabamento da solda se encontra no mesmo plano do metal de base, isto se deve ao fato delas terem sido esmerilhadas para a realização do ensaio de ultrassom.

As amostras para a análise micrográfica foram examinadas com aumento de 400x, e reagente químico utilizado foi o Nital 2% para o metal de base e ZTA e água régia para a solda conforme pode ser visto nas figuras 31 e 32.

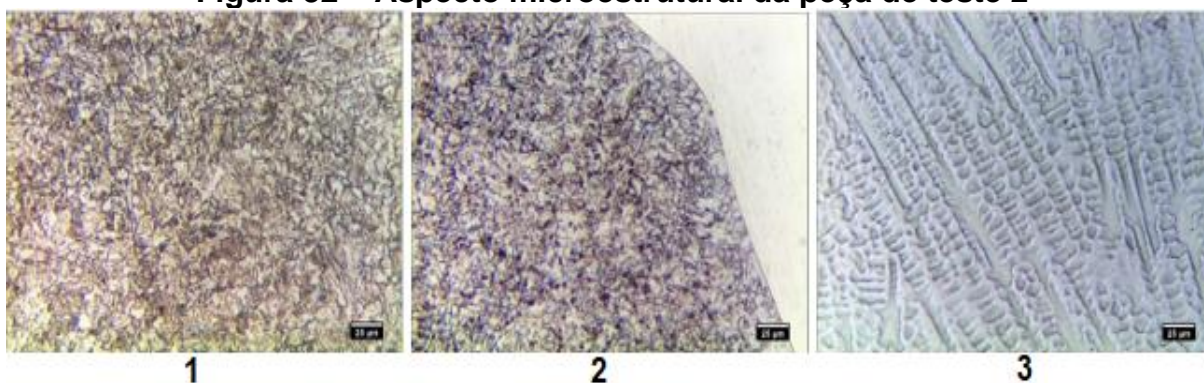
Figura 31 – Aspecto microestrutural da peça de teste 1

Fonte: Dados de pesquisa

A região 1 corresponde metal de base, lado ASTM A694 Gr F65 e apresentou uma microestrutura composta por finos grãos de ferrita de Widmanstätten.

A região 2 corresponde a zona termicamente afetada, ZTA, lado ASTM A694 Gr F65 e apresentou uma microestrutura composta por finos grãos de ferrita de Widmanstätten.

A região 3 corresponde a solda e apresentou uma microestrutura composta por matriz austenítica bruta de fusão, livre de fases intermetálicas.

Figura 32 – Aspecto microestrutural da peça de teste 2

Fonte: Dados de pesquisa

A região 1 corresponde metal de base, lado DNVGL 450 e apresentou microestrutura composta por finos grãos de ferrita de Widmanstatten e martensita revestida.

A região 2 corresponde a zona termicamente afetada, ZTA, lado DNVGL 450 e apresentou microestrutura composta por finos grãos de ferrita poligonal/perlita, e ferrita de widmanstatten.

A região 3 corresponde a solda e apresentou uma microestrutura composta por matriz austenítica bruta de fusão, livre de fases intermetálicas.

4.3 Considerações finais

Como pode se observar nos subcapítulos anteriores desta seção, todos os requisitos mínimos necessários para qualificação do procedimento de soldagem foram cumpridos na íntegra de acordo com os requisitos da norma DNVGL-ST-F101, sem nenhum tipo de reprovação nas diversas etapas dos testes, garantindo assim de forma eficaz a qualificação do procedimento de soldagem para reparo total conforme proposto no início deste trabalho.

Ressalta-se que a soldagem das peças de teste não apresentou nenhum tipo de defeito, o que demonstra a excelente performance dos soldadores envolvidos nesta qualificação.

5 CONCLUSÕES

Por meio da execução da soldagem e testes de acordo com a metodologia proposta, comprovou se a eficácia da qualificação da EPS e que a execução da soldagem de reparo com sobre posição de ZTA e criação de ZTA sobre metal de solda anteriormente depositados mostraram que os resultados mecânicos foram satisfatórios, o que indica, caso seja necessário a execução de soldas de reparo, respeitando tal procedimento qualificado há uma tendencia da junta não apresentar problemas de soldagem (defeitos) e não ter perdas de propriedades acima mencionadas o que conclui que o planejamento e execução do processo/ metodologia foi eficaz do ponto de vista mecânico, metalúrgico de acordo com as características do metal de base e da qualidade da junta segundo os requisitos normativos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 5L**: Specification for Line Pipe. 53th ed. Washington: API, 2004. 155 p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **II Materials**: part C: specifications for welding rods, electrodes, and filler metals. New York: ASME, 2023a. 1056 p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Section IX**: welding, brazing and fusing qualifications: qualification standard for welding, brazing and fusing procedures, welders, brazers, and welding, brazing and fusing operators. New York: ASME, 2023b. 372 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A370**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken: ASTM, 2003. 48 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A694**: Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Forgings for Pipe Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High-Pressure Transmission Service¹: ASTM, 1999. 3 p.

ASM HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering**: Volume 6. The United States of America: ASM International, 1993.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A3.0**. Standard Welding Terms and Definitions. Including Terms for Brazing, Soldering Thermal Spraying and Thermal Cutting. Miami, 1994. 119 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10474**: Qualificação em soldagem - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 25 p.

DET NORSKE VERITAS GERMANISCHER LLOYD. **DNVGL-ST-F101**: Submarine Pipeline Systems. 2017, 520 p.

MODENESI, Paulo José.; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011. 363 p.

MODENESI, Paulo José. **Normas e Qualificação em Soldagem**. Belo Horizonte, jan.2005.. Disponível em: <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/normasqualificacao.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2023.

MODENESI, Paulo José.; MARQUES, Paulo Villani. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte, jan. 2011. Disponível em: <<https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/processo.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2023.

MODENESI, Paulo José. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na**

soldagem dos metais. Belo Horizonte, abr. 2012. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica_da_soldagem1.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2023.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, 1982. 456 p.

PETROBRAS. **N-133:** Soldagem. rev. N. [S.l.]: [s.n.], 2015. 109 p.

PETROBRAS. **N-1438:** Terminologia Soldagem. rev. E, 1ª errata. [S.l.]: [s.n.], 2013. 45 p.

RODRIGUES, Clóvis Ribeiro et al. Soldagem na indústria do petróleo. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022. 901 p.

SANTOS, Aureliano Xavier dos; MACIEL, Theophilo Moura; SANTANA, Renato Alexandre Costa de. Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo.** 2015 Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/282412574_Avaliacao_de_Revestimentos_a_base_de_Inconel_625_depositados_atraves_do_Processo_de_Soldagem_GMAW_em_aco_API_5L_X70_utilizando_Planejamento_Fatorial>. Acesso em: 05 nov. 2023.

SMITH, Liane. **Engineering with clad steel.** 2. Ed. North Carolina: Nickel Institute – Technical Series Nº 10064, 2012. Disponível em: <https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/10064_EngineeringWithCladSteel2ndEd.ashx>. Acesso em: 27 set. 2023.

ZEEMANN, Annelise *et al.* A soldagem GTAW (ou TIG). **Revista da Soldagem**, [S.l.], [20--]. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/38403154/A-Soldagem-GTAW-Ou-TIG>>. Acesso em: 30 out. 2023.