

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Soldagem

Henrique Lopes Martins Pereira

Estudo de caso de qualificação de especificação de procedimento de soldagem para reparo em serviço de mineroduto pressurizado de longa distância

Belo Horizonte

2023

Henrique Lopes Martins Pereira

Estudo de caso de qualificação de especificação de procedimento de soldagem para reparo em serviço de mineroduto pressurizado de longa distância

Monografia de especialização em apresentada a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Especialista em Soldagem

Orientador. Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias

Belo Horizonte

2023

P436e Pereira, Henrique Lopes Martins.
Estudo de caso de qualificação de especificação de procedimento de soldagem para reparo em serviço de mineroduto pressurizado de longa distância [recurso eletrônico] / Henrique Lopes Martins Pereira. – 2023.
1 recurso online (58 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Ariel Rodriguez Arias.

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

Bibliografia: f. 57-58.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica. 2. Minerodutos. 3. Soldagem. I. Arias, Ariel Rodríguez. 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 08ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 23 de novembro de 2023, às 09:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: ESTUDO DE CASO DE QUALIFICAÇÃO DE ESPECIFICAÇÃO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM PARA REPARO EM SERVIÇO DE MINERODUTO PRESSURIZADO DE LONGA DISTÂNCIA

Aluno: HENRIQUE LOPES MARTINS PEREIRA – Matrícula: 2021662394,

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 _40_ minutos, é de parecer ___favorável___ à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de ___95___ e ___sem___ (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de _____ 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

Eduardo A. Barcelos
Eng. Mecânica
CCE/UFMG 2149271

Eduardo Anacleto Barcelos
Especialista UFMG – Avaliador

Prof. Dr. Fagner Guilherme Ferreira Coelho
UFMG - Avaliador

Henrique Lopes Martins Pereira
Aluno: Henrique Lopes Martins Pereira
Anglo American
Minério de Ferro Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado, dando saúde, clareza e forças durante toda a jornada de minha vida.

Agradeço a minha família, esposa Gisela e filho Rafael pelos momentos de ausência e por me incentivarem ao longo de todo o curso de pós-graduação.

Agradeço a empresa Anglo American por incentivar que seus colaboradores busquem constante aprendizado e se especializem para buscar as melhores técnicas e aplicá-las no mercado de trabalho.

Agradeço ao Dr. Ariel Rodriguez pela orientação e todo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho, pelo compartilhamento técnico durante todas as aulas e por contribuir no meu desenvolvimento profissional.

Agradeço aos professores das aulas práticas que estiveram incansavelmente disponíveis nas sextas feiras e aos sábados em um período pós pandemia com muita dedicação.

Agradeço a todos os professores das aulas *online* que precisaram se reinventar em um momento de pandemia e não se hesitaram em fazer o melhor para compartilhar conhecimento, pela paciência e disponibilidade.

Agradeço ao secretário do curso, Alexandre Alves, por todo suporte aos alunos para que o curso ocorresse de forma organizada e pela disponibilidade em ajudar a todos.

Agradeço ao Pedro Menezes e Dr. Alexandre Bracarense pelo apoio nas atividades de treinamento e acompanhamento da equipe de soldagem da Anglo American que contribuíram para as atividades de soldagem aqui descritas neste trabalho.

“Corte sua própria lenha. Assim, ela aquecerá você duas vezes.”

(Henry Ford)

RESUMO

A malha dutoviária no Brasil para transporte de petróleo e seus derivados, gases, polpas minerais contam com mais de 17 mil quilômetros instalados e a maior parte implantada está em operação por mais de 10 (dez) anos. Procedimentos qualificados para reparo do ativo dutoviário são necessários para garantir a segurança e confiabilidade para atendimento da vida útil do ativo. O presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de caso para qualificação de uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) para possibilitar o reparo de um mineroduto pressurizado e em serviço através da aplicação luvas bipartidas (ou calhas) fabricadas de materiais conforme a norma API 5L X70 PSL2. O modelo de luvas bipartidas será o tipo B, com aplicação de soldas longitudinais e circunferenciais realizadas através do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. Neste trabalho estará descrito o planejamento da atividade de soldagem, materiais e processos de soldagem e os respectivos resultados dos ensaios dos corpos de provas obtidos em laboratório conforme requisitos da norma API 1104 (2021), apêndice B.

Palavras chaves: especificação de procedimento de soldagem, API 5L X70 PSL2, mineroduto, qualificação procedimento, soldagem.

ABSTRACT

The pipeline infrastructure installed in Brazil for oil and oil-based products, gas, slurries transportation is more than 17 thousand kilometers installed, and the majority part implemented is above to 10 (ten) years in operation. Highly qualified repair asset procedures are required to keep the pipeline safety and reliability to achieve the total life cycle. The current work aims to present a case study for qualification the welding procedure specification (WPS) to enable pipeline repairs for in service slurries pipelines applying sleeves and all materials used were manufactured in API 5L X70 PSL2. The type B sleeves will be applied, with side seam (butt weld) and end fillet weld using shield metal arc welding procedure. At this work will be described the planning welding activities, materials, welding process and the destructive tests results from the specimen analysis from the laboratory according to the requirements from the API 1104 (2021) annex B.

Keywords: welding procedure specification, API 5L X70 PSL2, slurry pipeline, procedure qualification, welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de classificação dutoviário do Brasil.	15
Figura 2 - Evolução da malha de minerodutos de transporte no Brasil	16
Figura 3 - Evolução da malha de gasodutos de transporte no Brasil.	17
Figura 4 - Perfil hidráulico do Mineroduto Minas Rio - Anglo American	21
Figura 5 - Tendência de redução da quantidade de carbono com aumento do limite de resistência	23
Figura 6 - Danos em dutos e procedimentos para detecção, acompanhamento e inibição.	24
Figura 7 - Métodos aceitáveis de reparos.	26
Figura 8 - Métodos aceitáveis de reparos para dutos com amassamentos, deformações, vazamentos e defeitos reparados anteriormente.	26
Figura 9 - Luva ou calha ou dupla calha, tipo B.	27
Figura 10 - Fatores que afetam a ocorrência de formação de trincas de hidrogênio para solda em serviço.	29
Figura 11 - Processo de soldagem por eletrodo revestido e equipamentos.	30
Figura 12 - O efeito da corrente, comprimento do arco e velocidade de soldagem.	32
Figura 13 – Configuração de montagem para qualificação do procedimento para soldagem em serviço.	35
Figura 14 - Configuração para qualificação do procedimento para soldagem em serviço da peça de teste.	35
Figura 15 - Sugestão de localização das amostras dos corpos de prova da peça de teste.	36
Figura 16 - Conjuntos para fabricação das peças de teste (ao lado esquerdo o tubo condutor, ao lado direito, luvas bipartidas).	37
Figura 17 - Arranjo das peças de testes para soldagem.	39
Figura 18 - Posicionamento da luva bipartida e pontos de entrada/saída de água.	41
Figura 19 - Geometria da luva bipartida (dupla calha).	41
Figura 20 - Esquema de sequência de passes e comprimento mínimo requerido.	42
Figura 21 - Pré-aquecimento e controle da temperatura de aquecimento e interpasses.	43

Figura 22 - Pré-aquecimento e controle da temperatura de aquecimento e interpassas da solda longitudinal (solda de chanfro).	44
Figura 23 - Aspecto final da solda longitudinal (solda de chanfro).	44
Figura 24 - Ilustração da execução da solda em ângulo.	45
Figura 25 - Sequência de deposição dos cordões da solda em ângulo.	45
Figura 26 - Etapas de pré-aquecimento e soldagem em ângulo.	46
Figura 27 - Aspecto final da solda em ângulo em uma das extremidades da luva bipartida.	46
Figura 28 - Esquemático para identificação dos corpos de prova dos soldadores.	47
Figura 29 - Corpo de prova para preparação do ensaio de macrografia.	49
Figura 30 - Corpo de prova para avaliação da dureza.	50
Figura 31 - Corpos de prova - Dobramento de face.	50
Figura 32 - Amostras para ensaio "nick break".	51
Figura 33 - Dobramento guiado.	52
Figura 34 - Corpo de prova de ensaios de dobramento de raiz e face – chanfro.	53
Figura 35 - Corpo de prova para ensaios de dobramento lateral - chanfro.	53
Figura 36 - Perfil de dureza medido na solda em chanfro.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Malha dutoviária de transporte no Brasil	16
Tabela 2 - Propriedades mecânicas – tubo condutor e luva bipartida.	38
Tabela 3 - Propriedades químicas (%) das peças de teste – tubo condutor e luva bipartida.	38
Tabela 4 - Propriedades químicas e mecânicas do eletrodo revestido fornecido pelo fabricante.	39
Tabela 5 – Ensaio e quantidades de corpos de prova (procedimento de qualificação de teste – em serviço).	47
Tabela 6 - Identificação dos corpos de prova - solda em ângulo.	48
Tabela 7 - Identificação dos corpos de prova - Solda em chanfro.	48
Tabela 8 - Resultados de dureza na ZTA	54
Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração da solda em chanfro.	54
Tabela 10 - Resultados do ensaio de dobramento.	55
Tabela 11 - Resultados do ensaio de fratura “Nick-break”.	55

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

API	American Petroleum institute
ARBL	Aços resistentes de baixa liga
ASME	American Society Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
BLAR	Baixa liga e alta resistência
C.P.	Corpo de Prova
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
EPSp	Especificação de Procedimento de Soldagem Preliminar ou Pré Especificação do procedimento de soldagem
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GMAW	Gas Metal arc Welding – Processo de Soldagem a arco gás-metal
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding – Processo de Soldagem a arco gás-tungstênio
HSLA	High Strength Low Alloy
MB	Metal de base
MS	Metal de solda
PEMAT	Plano Decenal de Expansão da Malha Dutoviária de Transporte de Gás Natural
PQPS	Plano de qualificação do procedimento de soldagem
PRCI	Pipeline Research Council Institute
PSL	Product Specification Level – Nível de especificação de produto
RQPS	Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem
SMAW	Shielded Metal Arc Welding – Processo de soldagem a arco com eletrodo revestido
ZTA	Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo geral	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	Mineroduto	20
3.2	Norma API 5L (2020)	21
3.3	Aços ARBL	22
3.4	Danos em duto	24
3.5	Norma ASME B31.4.....	25
3.6	Luva bipartida tipo B	27
3.7	Trincas por hidrogênio	28
4	PROCESSOS DE SOLDAGEM	30
4.1	Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW)	30
4.2	Especificação do procedimento de soldagem (EPS).....	32
4.3	Especificação do procedimento de soldagem preliminar (EPSp)	33
4.4	Registro de qualificação do procedimento de soldagem (RQPS)	33
5	METODOLOGIA.....	34
5.1	Aspectos gerais – Qualificação do Procedimento de Soldagem.....	34
5.2	Desenvolvimento do plano de qualificação`	37
5.3	Informações dos tubos e eletrodo aplicados no estudo de caso.....	37
5.4	Desenvolvimento da pré-especificação de soldagem (pEPS)	39
5.5	Preparação, montagem e execução de soldagem	40
5.5.1	<i>Passo inicial – solda de chanfro da luva bipartida.....</i>	<i>42</i>
5.5.2	<i>Passo final – solda em ângulo da luva bipartida.....</i>	<i>44</i>
5.6	Preparação dos corpos de provas e ensaios	47

5.7	Ensaio de metalográfico - macrografia	49
5.8	Ensaio de dureza	49
5.9	Ensaio de dobramento de face – solda em ângulo	50
5.10	Ensaio de fratura “nick-break”	51
5.11	Ensaio de dobramento de raiz, face e lateral – solda de chanfro	52
5.12	Resultados.....	53
5.12.1	<i>Ensaio de dureza</i>	53
5.12.2	<i>Ensaio de tração</i>	54
5.12.3	<i>Ensaio de dobramento</i>	55
5.12.4	<i>Ensaio de fratura “Nick-Break”</i>	55
6	CONCLUSÃO.....	56

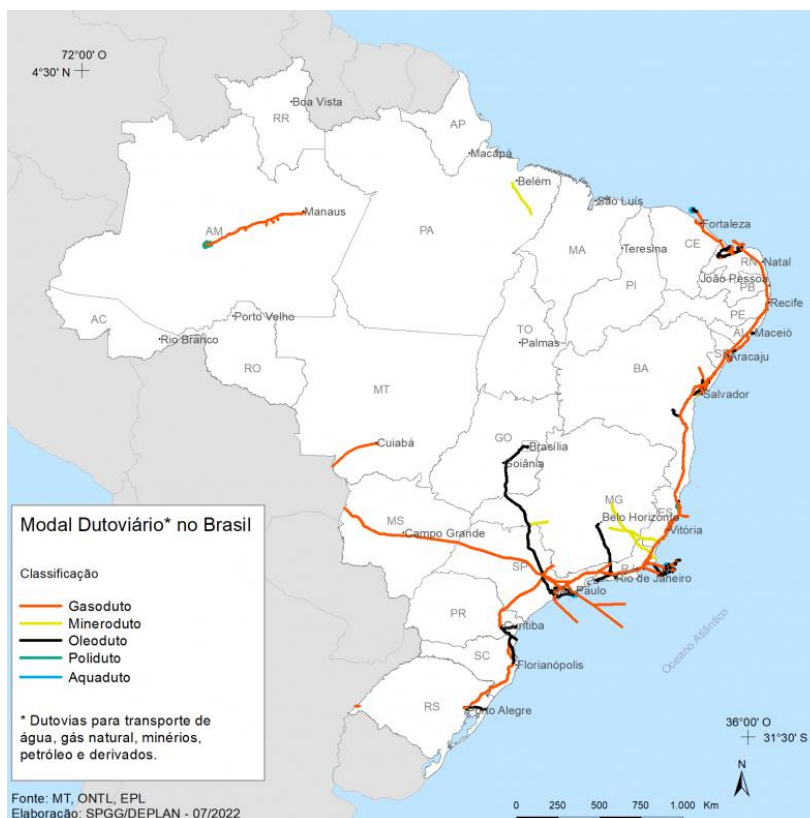
1 INTRODUÇÃO

O transporte dutoviário é conhecido por um modal formado por um duto ou um conjunto de tubos que são conectados entre si para interligarem as unidades operacionais, projetados e implantados de acordo com normas internacionais para atender o transporte de materiais como petróleo e seus derivados, etanol, gás natural e minerais por longas distâncias e grandes volumes de produção.

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), o transporte dutoviário é dividido em:

- Oleodutos, cujo produtos transportados são em sua grande maioria: petróleo, óleo combustível, gasolina, diesel, álcool, gás liquefeito de petróleo (GLP), querosene e nafta e outros.
- Minerodutos, cujo produtos transportados são: minério de ferro e concentrado fosfático.
- Gasodutos, cujo produto transportado é o gás natural.

Figura 1 - Mapa de classificação dutoviário do Brasil.



Fonte: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/aeroportos-e-dutovias> acessado em 12 de Outubro de 2023.

A malha mundial e brasileira de dutos se destina, em sua maioria, ao transporte de gás e derivados. Quando comparado com modais de transporte rodoviário e ferroviário, por exemplo, os dutos se apresentam como uma alternativa segura, de baixo impacto ambiental e baixo custo operacional. Apesar do modal dutoviário ser um excelente modal de transporte, no Brasil a malha dutoviária ainda é pouco utilizada.

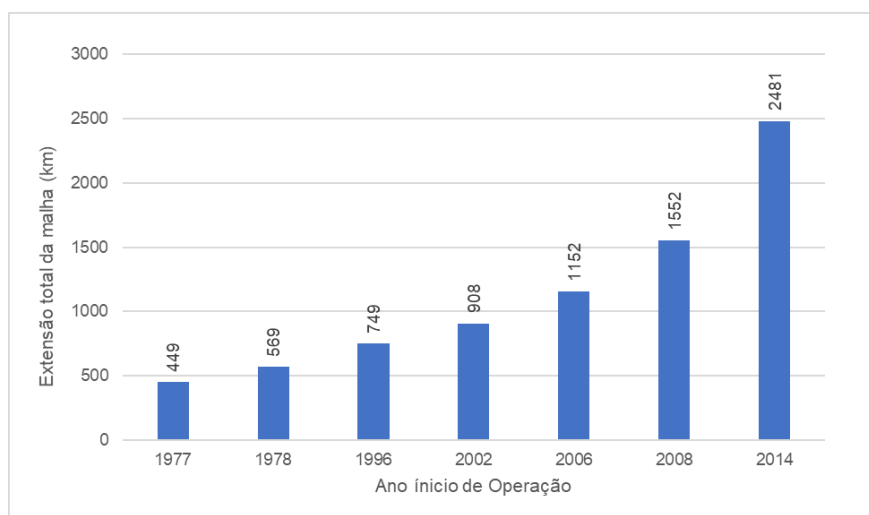
Tabela 1 - Malha dutoviária de transporte no Brasil

Dutovia	Extensão [km]
Gasodutos	9306
Derivados	4459
Minerodutos	2481
Petróleo	2142
Etanol	431

Fonte: Anuário estatístico de transportes (2010-2018), adaptado.

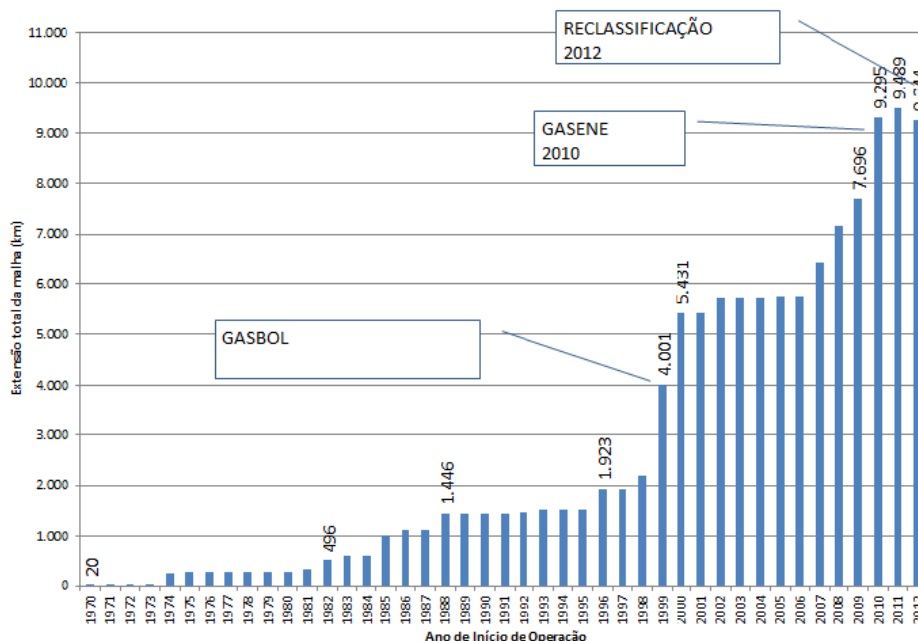
A evolução da malha dutoviária de minerodutos e gasodutos no Brasil pode ser observada nas figuras 2 e 3. Na década de 70, mais de 1.000 quilômetros de dutos iniciaram suas operações, sendo o setor mineral sendo o maior responsável pelo desenvolvimento do setor dutoviário da década. Com o crescimento relevante da produção de gás natural, na década de 90 o setor de gasoduto atinge mais de 4.000 quilômetros de dutos instalados e em operação.

Figura 2 - Evolução da malha de minerodutos de transporte no Brasil



Fonte: Torres (2021), adaptado.

Figura 3 - Evolução da malha de gasodutos de transporte no Brasil.



Fonte: Plano decenal de expansão da malha dutoviária de transporte de gás natural, PEMAT (2022).

Dentro das etapas de implantação do empreendimento dutoviário, o processo de soldagem mundialmente aplicado na união dos tubos é o eletrodo revestido (ER). Nesta etapa de implantação, procedimentos de soldagem são adotados para garantir o controle rígido de temperatura de pré-aquecimento e interpasse, eletrodos corretos e secos e toda a sequência de passes para evitar o possível aparecimento de defeitos de trinca a frio após a soldagem circunferencial de união dos tubos da linha tronco.

Completada a fase implantação, o ativo é entregue a equipe operacional para que seja operado e mantido até durante toda a vida útil prevista em projeto. Procedimentos operacionais de inspeção da tubulação são necessários para identificar e reparar defeitos nos tubos causados por agentes internos ou externos como, corrosões internas e externas, amassamentos, erosões e trincas que possam ocorrer ao longo de toda vida do ativo.

Neste contexto, o cenário se torna mais desafiador devido a necessidade de executar, em alguns casos, reparos com a tubulação pressurizada e em operação com fluxo contínuo. De acordo com a norma ASME B31.4 (2019) existe uma variedade de opções de reparo para determinados tipos de defeito.

Este trabalho irá apresentar em um estudo de caso para qualificação de uma especificação de procedimento de soldagem para reparo de mineroduto, em operação, utilizando luva bipartida, tipo B, para reparo de defeitos. A luva utilizada

para reparo em dutos pode ser fabricada a partir de duas metades de cilindros, tubos ou chapa curvada sendo acopladas diretamente na tubulação. Existem 02 (dois) tipos de luvas, sendo luvas do tipo A, onde são instaladas nos dutos através da solda longitudinal (ou chanfro) para união das partes bipartidas onde não existirá contato entre a luva e tubo transportador. Este tipo de aplicação não é considerado uma soldagem em serviço. Para a luva do tipo B além da solda longitudinal (ou chanfro) é aplicado a solda circunferencial ou solda de ângulo onde é realizado o contato entre luva e duto principal ou condutor. Esta aplicação é considerado como solda em serviço.

Para garantir o sucesso do reparo, faz-se necessário seguir as orientações das especificações de soldagem, mantendo controle rigoroso da temperatura de pré-aquecimento e interpasses devido influências de queda de temperatura normalmente gerada pela movimentação interna de produtos transportados pela internamente na tubulação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Apresentar estudo de caso de qualificação de especificação do procedimento de soldagem em operação para reabilitação de dutos através de reparo por soldagem de luvas bipartidas, tipo B, utilizando a norma API 1104 – apêndice B.

2.2 Objetivos específicos

Apresentar o roteiro de pré-especificação de soldagem para um tubo API 5L X70 – PSL2.

Apresentar o passo a passo da qualificação do procedimento de soldagem atendendo os critérios da norma API 1104 para dutos em operação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mineroduto

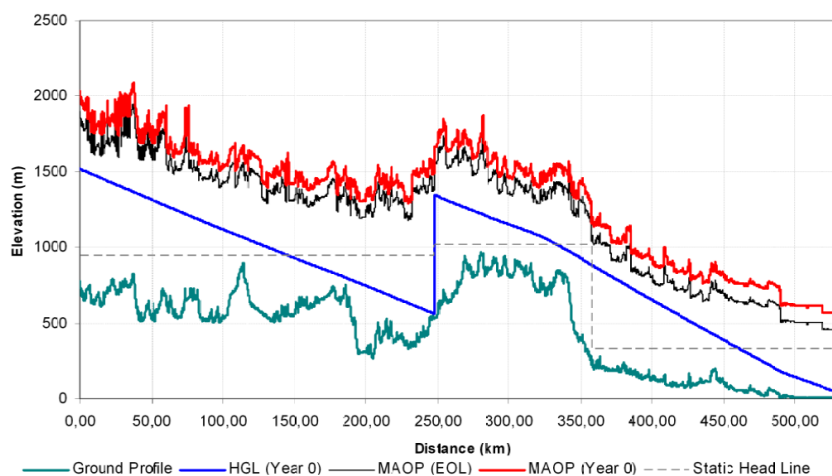
Mineroduto é definido como uma tubulação por onde se transporta sólidos minerais granulares juntamente com um meio de transporte líquido de um ponto para outro, seja por bombeamento ou por gravidade (Chaves, 2002). A mistura entre sólidos minerais granulares juntamente com um meio fluído são conhecidos como polpas de concentrados, rejeitos ou pastas.

Em transporte de polpas, normalmente o fluido utilizado como meio de transporte é água, entretanto exclui a possibilidade de utilização de outros líquidos, por exemplo, álcool etílico, metanol, salmoura, etc. O sólido mineral granular pode ser constituído também por diversos materiais: carvão, minério de ferro, minério de cobre, concentrado de cobre, ferro, fosfato, calcário, bauxita, calcário, rejeitos de beneficiamento, etc (Chaves, 2002).

O transporte da polpa mineral poderá ser por gravidade, caso exista um desnível geométrico favorável por onde a rota da tubulação irá estar instalada. Caso contrário, aplica-se bombas para impulsar o fluído até o seu destino de entrega final.

Em condições operacionais normais, a tubulação opera constantemente sob pressão e cheia de fluído. O regime hidráulico destes sistemas pressurizados normalmente é turbulento para que as partículas estejam suspensas no fluido e não sejam arrastadas no fundo da tubulação, gerando desgaste na geratriz inferior ou gerem obstrução da tubulação por depósito.

Figura 4 - Perfil hidráulico do Mineroduto Minas Rio - Anglo American



Fonte: Perfil hidráulico do Mineroduto Minas – Rio – Anglo American.

Para construção de Minerodutos, os projetos são desenvolvidos atendendo os critérios normativos da norma americana ASME B31 – Código para tubulações pressurizadas. Por serem projetos de longa distância, normalmente são aplicados tubos de aço de alta resistência e baixa liga, conhecidos como ARBL, que atendam a norma de fabricação API 5L (2020). Estas tubulações estão na maior parte enterradas e, com isto são revestidas externamente e possuem um sistema de proteção catódica para evitar corrosões externas do aço carbono em contato com o solo.

3.2 Norma API 5L (2020)

A norma API 5L (American Petroleum Institute – Instituto Americano do Petróleo) (Specification for Line Pipe – Especificação para linha de tubos) tem como objetivo especificar a fabricação de tubos com ou sem costura aplicáveis em transporte dutoviário de alta responsabilidade atendendo a dois níveis de especificação de produtos PSL1 e PSL2 (Product Specification Level), se diferindo em requisitos técnicos.

Segundo a norma API 5L (2020) os tubos designados são conhecidos por conter uma designação alfa ou alfanumérica que identifica o limite de escoamento do tubo que está ligado à sua composição química. Os tubos indicados com a letra X podem ser conhecidos como ARBL ou aços de alta resistência e baixa liga. Os tubos de nível de especificação PSL2 incluem adicionalmente um sufixo de uma letra simples (R, N, Q ou M) o qual identifica em à condição de fornecimento do material.

Para título de exemplo, um tubo com as características API 5L X70Q – PSL2 pode ser interpretado como:

API 5L = Tubo fornecido conforme norma API 5L.

X = Tubo de alta resistência e baixa liga.

70 = Limite de escoamento do material, ou seja, 70.000 psi (ou 483 MPa).

Q = Fornecido tratado termicamente com têmpera e revenimento. Esta letra pode ter outras variações como R (Laminado), N (Normalizado), M (Tratado termicamente na junta soldada e/ou tubo completo).

Conforme as orientações da norma API 5L (2020), as diferenças básicas entre os níveis de especificação de produtos PSL1 e PSL2 podem ser descritas em: faixa de grau de aços, teor de carbono máximo, teor de carbono equivalente, teor de fósforo máximo, teor de enxofre máximo, limite de escoamento e resistência a tração, resistência a impacto, ensaios não destrutivos, certificação e rastreabilidade.

Neste presente trabalho será abordado o desenvolvimento de uma qualificação de uma especificação de procedimento de soldagem para aplicação de reparo em operação utilizando uma luva bipartida de configuração B em um mineroduto de longa distância. Os materiais da luva e tubo são do tipo API5L X70 PSL2.

3.3 Aços ARBL

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) também podem ser conhecidos como BLAR (Baixa Liga e Alta Resistência) e do inglês HSLA (High Strength Low Alloy). Estes aços possuem baixos teores de elementos de liga e alta resistência mecânica devido a serem microligados com elementos de liga como o Nióbio, Titânio e Vanádio aliado a tratamentos termomecânicos para obter microestrutura de grãos finos.

De acordo com a AWS (2011) o principal microligante adicionado aos aços ARBL são Nióbio e Vanádio, adicionado isoladamente ou em combinações em quantidade máxima de 0,10%. Para algumas aplicações onde necessita materiais de seções mais finas e mais resistentes, níquel ou molibdênio podem ser utilizados para completar a formulação da liga. Anteriormente os aços ARBL continham Nitrogênio

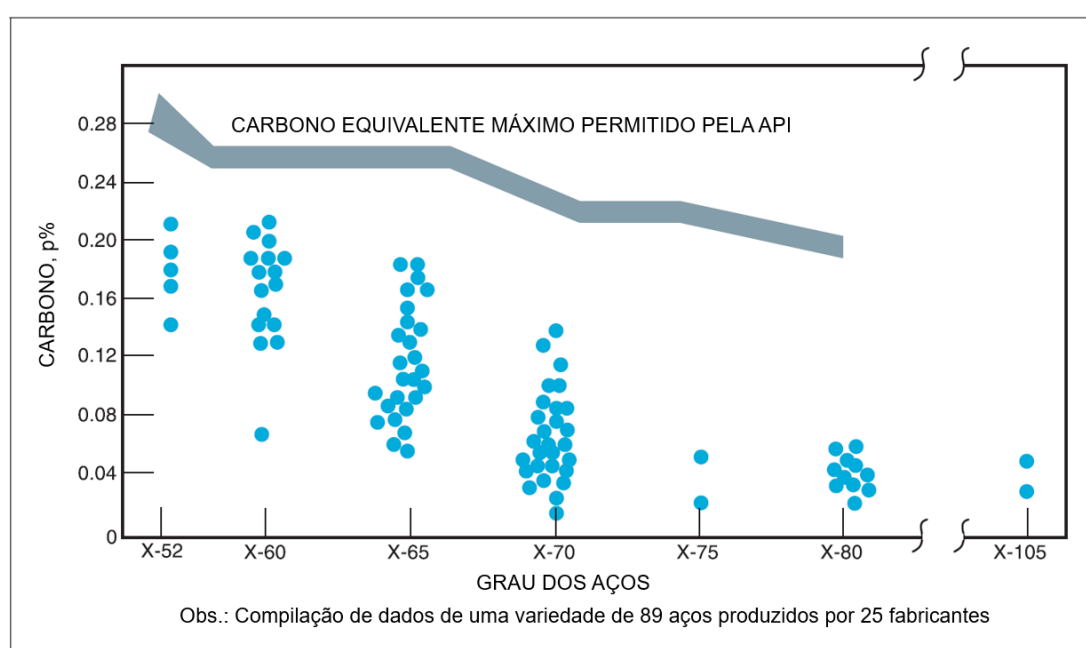
adicionado em combinação com o Vanádio, entretanto, esta prática foi eliminada devido aos efeitos prejudiciais do nitrogênio na tenacidade, particularmente na ZTA.

A motivação da indústria para desenvolvimento destes aços vem de encontro com a crise energética que demandou a necessidade de produzir aços mais resistentes e mais leves. Diante a estas características, estes aços ganharam grande espaço na indústria com aplicação destes materiais em setores da indústria dutoviária, automobilística e estrutural.

Segundo SANTOS (2003) houve grande avanço na fabricação destes aços para obter materiais a cada dia com limites de escoamento superiores. Até o ano de 1970, estes aços eram produzidos através do processo de laminação à quente seguido de normalização. A partir de 1970, foi introduzido o processo de conformação termomecânica que permitiu a evolução de aços de grau X70. Novos estudos foram realizados e aplicando técnicas de resfriamento controlado atrelado a conformação mecânica, foi possível obter aços de grau X80. Atualmente, com adição de elementos de ligas especiais como o molibdênio, cobre e níquel juntamente com processos de resfriamento controlado, permite-se obter aços de grau X100 e X120.

A norma AWS (2011) indica que a faixa de limite de escoamento dos aços ARBL é de 290 MPa a 760 MPa (42 a 110 ksi).

Figura 5 - Tendência de redução da quantidade de carbono com aumento do limite de resistência



Fonte: AWS (2011) volume 4 – adaptado.

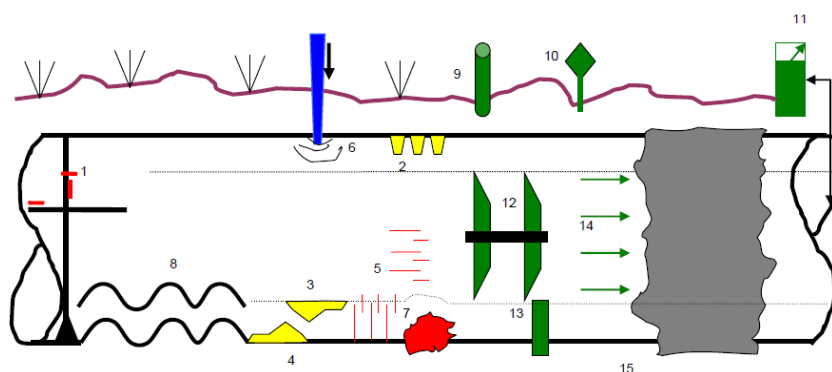
3.4 Danos em duto

Segundo o livro Engenharia de dutos (2009), um dano em um duto é considerado como uma transformação na microestrutura do material ou na geometria de um duto. O dano em um duto pode ocorrer por motivos como: por aquecimento localizado, através da interação com o ambiente ou fluido transportado, por ataque de hidrogênio, perda de espessura por corrosão ou erosão, por interferência de terceiros ao produzirem mossas (amassamentos) ou perfurações e através de mecanismos de danos por fadiga e trincamento sob tensão em ambiente corrosivo podem introduzir trincas isoladas ou colônias de trincas.

O defeito em um duto é o dano limite ou crítico para as condições desejadas de operação da estrutura. É caracterizado quando o estado de dano acumulado põe em risco a funcionalidade da estrutura.

A figura 6 apresenta alguns riscos que os dutos estão sujeitos e medidas de inspeção ou controle para avaliação de anomalias.

Figura 6 - Danos em dutos e procedimentos para detecção, acompanhamento e inibição.



1-Trincas, propagadas de defeitos de fabricação e trincas de fadiga ou induzidas pelo hidrogênio
 2-Pits de corrosão
 3- Corrosão interna
 4- Corrosão externa
 5-Colônias de trincas (longitudinais e circunferenciais) induzidas por stress corrosion crack
 6-Mossa (dent, groove e gouge) provocada por ferramenta (estaca, ancora). As mossas podem

ter perda de material, sulcos ou cavas e trincas a elas associadas

7-Mossa provada por apoio em rocha

8-Enrugamento, flambagem e ovalização

9-Sinalização

10-Comunicação

11-Proteção catódica

12-Pigs (inspeção para diversos fins)

13-Coupon para monitoramento de corrosão

14-Emprego de inibidores de corrosão

15-Revestimeto anticorrosão

Fonte: Livro Engenharia de dutos (2009).

A partir dos danos identificados, uma avaliação de integridade é realizada para tratamento dos eventos para cada tipo de dano encontrado. Todos os eventos são avaliados e classificados como defeitos ou desgastes sendo tratados considerando o respectivo grau de risco.

Define-se o risco como a função da severidade e da significância, onde a severidade pode ser entendida como a gravidade de um evento ou defeito identificado e a significância o impacto que o defeito poderá causar em caso de falha.

Todos os eventos que forem classificados como um nível de risco alto, serão tratados e definidos como prioritários.

3.5 Norma ASME B31.4 (2019)

De acordo com a norma ASME B31.4 (2019) – Sistemas de transporte por dutos para líquidos e polpas, são apresentados os requisitos de projetos, materiais, construção, montagem, inspeção, testes, operação e manutenção de sistema de transporte de polpas líquidas não perigosas como carvão, minérios, concentrados e outros materiais sólidos entre a planta de processamento de polpa ou terminal e uma planta de recebimento ou terminal.

Dentre os capítulos da referida norma, um tópico é destinado a operação de dutos e reparos. A norma detalha que procedimentos de reparo com solda e o desempenho dos soldadores deverão ser qualificados de acordo com a norma API1104 ou ASME Seção IX. Os soldadores deverão estar familiarizados com as precauções de segurança e outros problemas associados com cortes e soldagem de dutos que estão em serviço.

Para cada tipo de defeito, a norma fornece uma orientação sobre o tipo de métodos aceitáveis de reparo. Neste trabalho, terá o foco no reparo através de luva bipartida, do tipo B.

Os requisitos da norma ASME B31.4 (2019) detalham que a luva bipartida de configuração tipo B deverão ser projetadas para suportar pressão de projeto e nunca inferior a pressão do ponto no qual o duto será reparado. A solda longitudinal da luva bipartida deverá ser realizada do tipo topo com penetração total. As soldas circunferenciais das extremidades da luva bipartida serão de ângulo em contato tubo condutor utilizando, preferencialmente, um processo de soldagem que forneça baixa formação de hidrogênio. De forma resumida, as figuras 7 e 8 detalham a

aplicabilidade do método de reparo de luva bipartida para os diversos tipos de defeitos abordado pela norma ASME para cada caso.

Figura 7 - Métodos aceitáveis de reparos

Métodos aceitáveis para reparo de dutos (tubos sem mossas, sem dobras e sem deformação)	
	Métodos de reparo
Tipo de Defeito	Luva de contenção de pressão (tipo B)
Corrosão externa $\leq 80\%$ t (excluindo ranhuras, seletiva, ou corrosão preferencial em soldas ERW e EFW)	Sim
Corrosão externa $> 80\%$ t	Sim
Corrosão interna $\leq 80\%$ t	Sim
Corrosão interna $> 80\%$ t	Sim
Gouge ou outras perdas de metal seletiva ou corrosão preferencial na solda ERW e EFW	Sim
Gouge, entalhes ou queimadura do arco	Sim
Trincas	Sim
Inclusões	Sim
Empolamentos	Sim
Defeitos na solda circunferencial	Sim
Laminação	Sim

Fonte: Adaptado ASME B31.4 (2019).

Figura 8 - Métodos aceitáveis de reparos para dutos com amassamentos, deformações, vazamentos e defeitos reparados anteriormente.

Métodos aceitáveis para reparo de dutos para amassamentos, deformações, vazamentos e defeitos reparados anteriormente

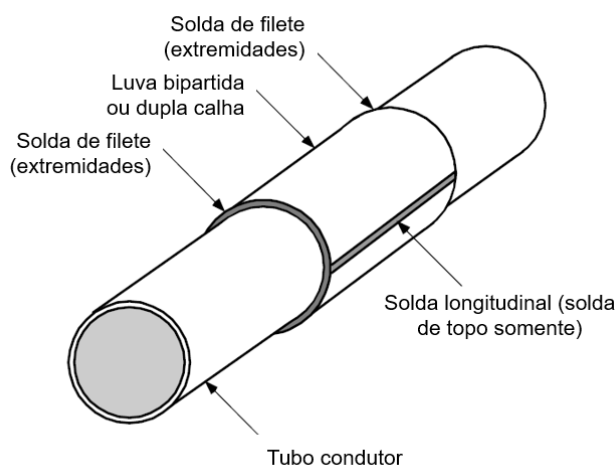
	Métodos de reparo
Tipo de Defeito	Luva de contenção de pressão (tipo B)
Amassamentos $\leq 6\%$ do diâmetro do tubo contendo solda longitudinal ou circunferencial	Sim
Amassamentos $\leq 6\%$ do diâmetro do tubo contendo gouges, perda de metal ou trinca	Sim
Amassamentos $\leq 6\%$ do diâmetro do tubo contendo corrosão externa com profundidade excedendo $12 \frac{1}{2}\%$ da espessura da parede	Sim
Amassamento excedendo 6% da diâmetro do tubo	Sim
Mossas, dobras ou deformações	Sim
Vazamento em acomplamentos	Sim
Luvras defeituosas de reparos anteriores	Sim

Fonte: Adaptado ASME B31.4 (2019).

3.6 Luva bipartida tipo B

A luva bipartida do tipo B é um tipo de reparo aplicado para abranger uma alta variedade de defeitos encontrados em tubos no ramo dutoviário. A configuração deste tipo de reparo permite conter toda a pressão operacional do duto e consequentemente reter vazamentos no local aplicado. A luva bipartida precisará ser dimensionada para suportar a pressão de projeto no ponto de aplicação. Recomenda-se que seja utilizado o mesmo material e espessura do tubo transportador no local de reparo, entretanto, é permitido aplicar materiais de características diferentes do tubo transportador. Ficará a cargo do Operador ou equipe de Engenharia avaliar se irá aplicar materiais de espessura e limites de resistência diferentes do tubo transportador, desde que sejam realizados uma avaliação de integridade para validar que os materiais aplicados suportam a pressão operacional do local com reparado. De forma esquemática, a aplicação da luva bipartida pode ser obtida na figura 9.

Figura 9 - Luva ou calha ou dupla calha, tipo B.



Fonte: Pipeline Research Council International, PRCI (2006), adaptado.

A luva bipartida pode ser formada por partes do tubo transportador, chapas curvas ou partes de um cilindro de aço fabricados e posicionados sobre o tubo transportador. Segundo a ASME B31.4 (2019) este método de reparo é amplamente utilizado por ser aplicável em grande parte dos defeitos em dutos relacionados pela norma. Dentre os requisitos de instalação, a norma ASME B31.4 (2019) não permite a instalação de tiras de aço ou chapas laterais de sobreposição para travamento das

luvas bipartidas longitudinalmente devido a vulnerabilidade de tensões induzidas pelo processo de pressurização interna do tubo transportador. É necessário ressaltar que a luva deverá envolver toda a área do local do defeito de forma exceder, pelo menos, 2 polegadas (50 mm) em ambas as extremidades.

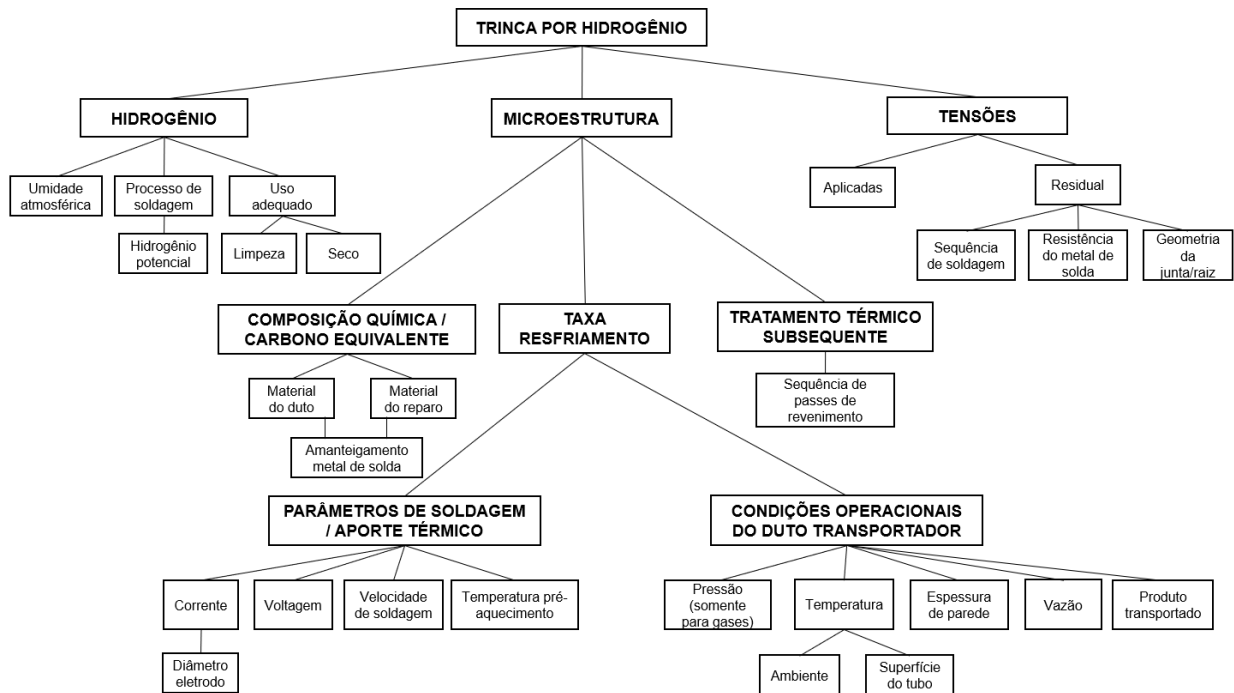
A PRCI (2006) detalha os desafios de aplicação de luvas bipartidas do tipo B, devido a necessidade devido o resfriamento acelerado causado pelo fluxo de material no interior do tubo condutor e dificuldades em controlar a temperatura da poça de fusão podendo gerar microestruturas duras que são susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio. Neste contexto, torna-se necessário a qualificação de especificação de procedimentos de soldagem (EPS) e registro de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS) para garantir um procedimento de soldagem controlado.

3.7 Trincas por hidrogênio

Devido a aplicação de soldagem em dutos em serviço, um grande gradiente de temperatura ocorre devido à alta taxa resfriamento da parede do tubo condutor causada pela transferência de fluidos e outros materiais no interior da tubulação. As trincas por hidrogênio após um período inicial da soldagem e podendo se propagar de forma lenta, podendo ser até dias após o término da soldagem.

Modenesi (2012) explica que a trinca por hidrogênio pode ocorrer basicamente por 3 fatores: presença de hidrogênio na região da solda, formação de microestrutura de elevada dureza capaz de ser fortemente fragilizada pelo hidrogênio e solicitação de tensões residuais e externas. Desta forma, para evitar ou minimizar o aparecimento de trincas por hidrogênio deverá, no mínimo, controlar a taxa de resfriamento da soldagem, escolha de processos de soldagem adequados e redução dos níveis de tensões residuais aplicando uma correta disposição e sequência de passes de soldagem e cuidados para evitar regiões com mordeduras. A figura 10 ilustra os fatores ligados a ocorrência de formação de trincas de hidrogênio para soldagem de tubulações em serviço.

Figura 10 - Fatores que afetam a ocorrência de formação de trincas de hidrogênio para solda em serviço.



Fonte: Pipeline Research Council International, PRCI (2006), adaptado.

Conforme *Pipeline Research Council International*, PRCI (2006), todos os processos de soldagem introduzem hidrogênio de alguma forma, pois não existe nenhum processo que é isento de hidrogênio. Processos de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) utilizando eletrodos básicos ou processos com gás de proteção como GMAW e GTAW produzem baixa quantidade de hidrogênio. De forma análoga, eletrodos celulósicos introduzem uma quantidade considerada de hidrogênio na solda – em ordem de 50 a 60 ml/100g.

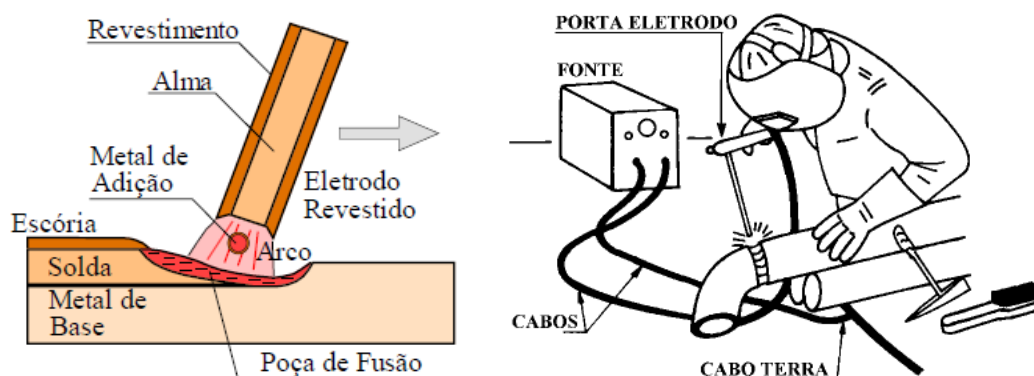
Ressalta a PRCI (2006) que as microestruturas da ZTA tendem a ser mais susceptíveis a formação de trincas por hidrogênio. Testes de dureza são realizados na região da ZTA para avaliação da suscetibilidade da região e, de forma prática, valores abaixo de 350 HV são utilizados como referência pois não são esperadas trincas por hidrogênio na região abaixo destes valores. A norma API 1104 (2021), apêndice B detalha os valores de dureza aceitáveis na região da ZTA.

4 PROCESSOS DE SOLDAGEM

4.1 Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW)

De acordo MODENESI, MARQUES e BRACARENSE (2003) a soldagem a arco com eletrodo revestido ou *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) é um processo que produz coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e uma peça que está sendo soldada. Este é o processo mais antigo e mais simples comparando-se outros processos de soldagem. Devido a versatilidade do processo, a soldagem a arco com eletrodo revestido é o mais utilizado nas indústrias de manutenção devido a pequena quantidade de equipamentos empregados, sendo uma fonte de energia de corrente constante, porta eletrodo, eletrodo e cabos elétricos.

Figura 11 - Processo de soldagem por eletrodo revestido e equipamentos.



Fonte: Modenesi (2012).

O eletrodo revestido utilizado no processo de soldagem SMAW é formado por uma “alma” que conduz a corrente elétrica fornecendo o metal de adição para enchimento da junta soldada. Em relação ao revestimento do eletrodo, este pode ser aplicado pelo fabricante através do processo de extrusão ou imersão. De acordo com a AWS (2011) o revestimento do eletrodo contém elementos estabilizadores, de proteção, materiais fundentes, desoxidantes e formadores de escória essenciais ao processo. Além de estabilizar o arco elétrico e fornecer metal de adição, a decomposição do eletrodo introduz materiais dentro ou ao redor do arco elétrico ou em ambos.

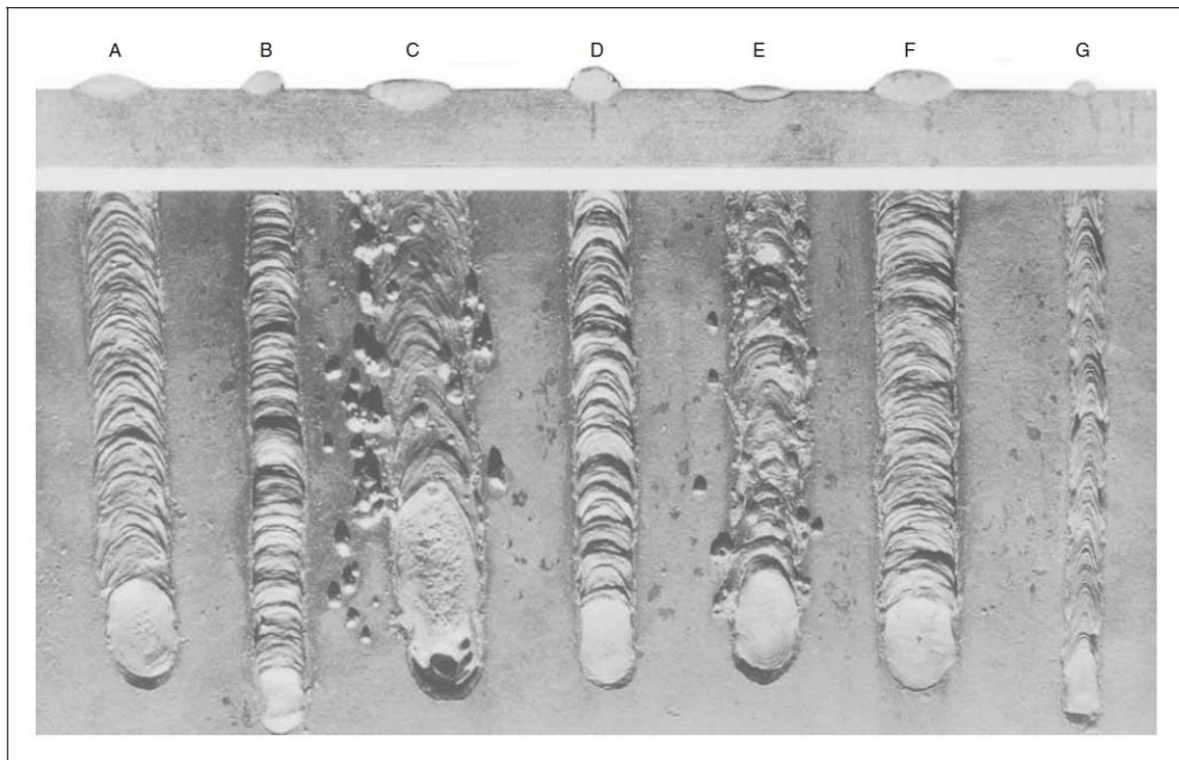
Em processo manual de soldagem a arco com eletrodo revestido, o soldador é o responsável por iniciar o processo de soldagem e controlar o comprimento do arco elétrico e poça de fusão. A abertura do arco elétrico ocorrerá quando o eletrodo é tocado rapidamente na peça a ser soldada. A partir do arco elétrico aberto, o soldador deverá garantir uma distância entre eletrodo e peça de forma que o arco permaneça aceso e o processo de soldagem seja realizado. Devido a utilização de uma fonte de corrente constante, o soldador tem uma ideia aproximada da taxa de deposição para o tipo de soldagem executada. É importante ressaltar que em cada término de eletrodo utilizado, o soldador interrompe a soldagem apagando o arco elétrico. A continuidade do ciclo se dará após a completa remoção de escória do local onde foi finalizado a soldagem do passe anterior. Este ciclo se repete várias vezes até a conclusão da atividade de soldagem.

Dentre as principais vantagens do processo é possível citar a simplicidade, baixos custos e equipamentos portáteis, os eletrodos revestidos fornecem proteção e material de adição, não é necessário utilização de gás de proteção adicional ou fluxo e o processo é flexível podendo ser aplicável em vários tipos de juntas e posições de soldagem.

Por outro lado, dentre as limitações do processo é visível a baixa produtividade devido a comprimentos limitados de eletrodos revestidos alinhado a necessidade de substituição constante e não aplicação em materiais de baixo ponto de fusão devido a vaporização destes em estado sólido.

A norma AWS (2011) reforça a necessidade de obter uma boa qualidade da soldagem a partir dos controles das variáveis essenciais da soldagem a arco com eletrodo revestido. Dentre as variáveis essenciais, deverão estar consideradas o tipo e diâmetro do eletrodo aplicado e orientação durante a soldagem, informações da corrente elétrica, comprimento do arco e velocidade da soldagem. Por ser um processo manual e dependente da habilidade do soldador, é necessário que os materiais aplicados sejam cuidadosamente selecionados e execução de um correto procedimento de soldagem com soldadores treinados e certificados.

Figura 12 - O efeito da corrente, comprimento do arco e velocidade de soldagem.



- | | | |
|--|--|----------------------------------|
| (A) Corrente, arco e velocidade de soldagem corretas | (C) Alta corrente de soldagem | (F) Velocidade baixa de soldagem |
| (B) Baixa corrente de soldagem | (D) Comprimento curto do arco elétrico | (G) Velocidade alta de soldagem |
| | (E) Comprimento longo do arco elétrico | |

Fonte: AWS (2011), adaptado.

4.2 Especificação do procedimento de soldagem (EPS)

A especificação do procedimento de soldagem é um documento técnico que define os parâmetros de soldagem necessários a serem aplicados durante uma operação de soldagem, de forma garantir a perfeita execução da junta soldada em atendimento as propriedades mecânicas necessárias no projeto. No respectivo documento estarão detalhadas as faixas de trabalho que deverão ser atendidas conforme uma determinada norma ou código de aplicação.

Estará detalhada na especificação de soldagem um roteiro de ações a serem seguidas, incluindo o tipo processo de soldagem e parâmetros, recomendações, referências a materiais, consumíveis, preparação, pré-aquecimento, controle de soldagem e tratamento térmico pós soldagem.

Para que a especificação do procedimento de soldagem seja utilizada na produção, é necessário que seja realizado previamente a qualificação do procedimento, o qual atestará que a especificação foi adequadamente desenvolvida

para produzir juntas soldadas dentro de critérios de propriedades mecânicas aprovadas. Com isto, uma especificação de procedimento de soldagem preliminar ou pré-especificação do procedimento de soldagem é utilizada na produção de peças de testes para obtenção de corpos de provas para análise em laboratório.

A qualificação ou rejeição dos parâmetros adotados na especificação do procedimento de soldagem preliminar se dará através dos resultados dos ensaios destrutivos e não destrutivos, que serão avaliados em laboratório e serão documentados no registro de qualificação do procedimento de soldagem, ou RQPS. Caso algum ensaio não atenda aos requisitos normativos, poderá ser realizados novos testes ou reavaliar a especificação do procedimento de soldagem para execução de novas peças de teste.

Ao término de toda avaliação, a especificação do procedimento de soldagem aprovada deverá estar disponível no local de trabalho da equipe de soldagem.

4.3 Especificação do procedimento de soldagem preliminar (EPSp)

A especificação do procedimento de soldagem preliminar ou pré-especificação do procedimento de soldagem é um documento que contém as referências técnicas a serem utilizadas na fabricação da peça de teste. Basicamente, este documento pode ser considerado como uma referência inicial onde todos os requisitos para execução das peças de testes estarão detalhados.

Este documento será utilizado como um roteiro preliminar, o qual permitirá revisões de pequena magnitude utilizando as condições de soldagem da peça de teste.

4.4 Registro de qualificação do procedimento de soldagem (RQPS)

O registro de qualificação do procedimento de soldagem é o documento que testemunha e valida todos os parâmetros de soldagem que foram aplicados durante a fabricação da peça de teste com seus respectivos resultados dos ensaios mecânicos dos corpos de prova.

No documento deverão constar toda a faixa especificada e qualificada conforme a norma de aplicação, ensaios mecânicos, químicos, metalográficos e equipe de soldagem executante da peça de teste.

O registro da qualificação do procedimento de soldagem validará a especificação do procedimento de soldagem para execução dos trabalhos de soldagem em campo. É importante ressaltar que a equipe de soldagem que realiza a fabricação da peça de teste estará apta para execução dos trabalhos em campo, desde que os parâmetros normativos tenham sido atendidos na íntegra.

5 METODOLOGIA

5.1 Aspectos gerais – Qualificação do Procedimento de Soldagem

Para realização de soldagem aplicada em tubulações em serviço, a norma API 1104 (2021), apêndice B, além da identificação do limite de escoamento mínimo, a norma reforça a necessidade de identificação do carbono equivalente dos materiais a serem aplicados na especificação do procedimento de soldagem, e o nível de carbono equivalente poderá ser agrupado em diferentes níveis.

A necessidade da identificação e agrupamento do carbono equivalente tem como objetivo evitar a suscetibilidade a trinca de hidrogênio, devido à grande variação na quantidade de carbono equivalente entre fabricantes ou do lote de fabricação dos tubos. É necessário ressaltar que a norma API 1104 (2021) apresenta em tópicos gerais os requisitos necessários para soldagem em tubulação em serviço, entretanto, este trabalho está direcionado a tubos fabricados conforme os critérios de aceitação na norma API 5L PSL2 (2020), onde os níveis mínimos e máximos de carbono equivalente são requisitos normativos nos quais os fabricantes deverão seguir rigorosamente os parâmetros estabelecidos.

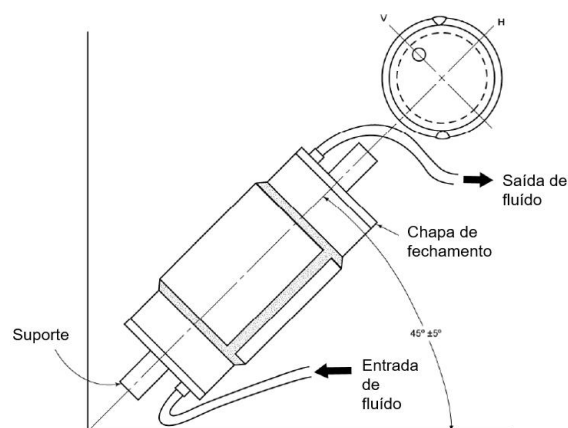
Além do carbono equivalente, a norma API 1104 (2021) indica que as condições de operação da tubulação (material transportado internamente na tubulação, vazão de transporte, etc) deverão ser identificados e agrupados, devido a influenciarem na determinação na temperatura entre passes de soldagem e suscetibilidade a trincas.

A norma API 1104 (2021), apêndice B, não considera como variáveis essenciais os parâmetros de limite de escoamento do material, bem como a espessura da parede do tubo, pois a execução de operação de soldagem em tubulações em serviço a severidade térmica (em termos das taxas de resfriamento da

solda resultantes para uma determinada entrada de calor) não depende apenas da espessura da parede, mas sim das condições de operacionais da tubulação.

Além das variáveis essenciais já citadas, a norma indica que alterações na sequência dos passes de solda podem ser consideradas como uma variável essencial. As condições operacionais da tubulação deverão ser simuladas durante a execução da qualificação do procedimento de soldagem com o intuito de simular se o fluxo de vazão do material transportado internamente no tubo condutor afetará na taxa de remoção de calor durante os passes de soldagem. A figura 13 detalha a montagem da peça de teste com a entrada e saída de fluxo de vazão para execução da qualificação da especificação do procedimento de soldagem.

Figura 13 – Configuração de montagem teórica para qualificação de soldagem em serviço.



Fonte: API 1104 (2021) – Apêndice B, adaptado.

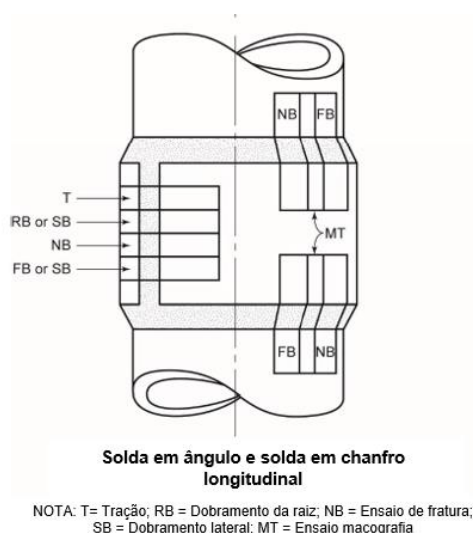
Figura 14 - Configuração de montagem em campo para qualificação de soldagem em serviço da peça de teste.



Fonte: Qualificação da EPS da Anglo American (2023).

Em relação as avaliações dos ensaios mecânicos nos corpos de prova da peça de teste, o apêndice B da norma API1104 (2021) inclui as disposições necessárias para obtenção de amostras das soldas da peça de teste fabricada utilizando uma configuração de soldagem de luvas bipartidas conforme apresentado na figura 15. Itens adicionais para preparação, ensaios visuais, de dureza e requisitos de aceitação também são apresentados na referida norma. A quantidade de corpos de prova necessários para realização dos ensaios mecânicos e visuais também poderão ser encontrados nos subitens da norma API 1104 (2021).

Figura 15 - Sugestão de localização das amostras dos corpos de prova da peça de teste.



Fonte: API 1104 (2021) – Apêndice B, adaptado.

Outro ponto importante na avaliação de soldas em tubulação em serviço é o ensaio de dureza da junta soldada, onde o principal objetivo é revelar a presença de microestruturas duras na zona termicamente afetada. A norma API 1104 (2021) utiliza como referência um valor de dureza de até 350 HV e, valores superiores a este número de referência deverão ser avaliados devido ao elevado risco de surgimento de trincas por hidrogênio.

Um ensaio adicional solicitado pela norma API 1104 (2021) é o ensaio de dobramento da face nas soldas da luva bipartida. O principal objetivo deste ensaio é revelar a presença de trincas por hidrogênio na área da raiz da solda.

5.2 Desenvolvimento do plano de qualificação

Neste tópico será discutido as premissas adotadas para condução do processo de qualificação de uma especificação de procedimento de soldagem, EPS, para soldagem em serviço para reparo de mineroduto pressurizado com aplicação de luvas bipartidas, configuração B, conforme os parâmetros da norma API 1104 (2021), apêndice B.

As informações dos materiais empregados durante a realização da qualificação do procedimento de soldagem em serviço estão descritas a seguir.

5.3 Informações dos tubos e eletrodo aplicados no estudo de caso

A elaboração do trabalho iniciou com a preparação das peças de teste, utilizando tubos de diâmetro de 26 polegadas (660,4 mm) e espessura de parede de 0,562 polegadas (14,3mm). O tubo condutor foi cortado em um comprimento de 700 mm.

As luvas foram fabricadas a partir de um tubo de diâmetro de 24 polegadas (609,6 mm) e a espessura de 0,500 (12,7 mm) e comprimento de 400 mm. Foram ajustadas através de corte abaixo da linha de centro e ajustadas para acoplar no tubo de diâmetro de 26 polegadas (660,4mm).

Figura 16 - Conjuntos para fabricação das peças de teste (ao lado esquerdo o tubo condutor, ao lado direito, luvas bipartidas).



Fonte: Qualificação da EPS Anglo American (2023).

As características mecânicas, composição química estão fornecidas na tabela 2 conforme informações disponibilizadas pelo fabricante através do certificado de materiais.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas – tubo condutor e luva bipartida.

Diâmetro tubo fabricação	Número tubo	Corrida	Peça	Material	Limite escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Razão LE/LR
Ø24 in	934	30329	Luva	API 5L X70 - PSL2	499	664	34	0,75
Ø26 in	6187	5-44376	Tubo condutor	API 5L X70 - PSL2	565	656	34	0,86

Fonte: Certificado de materiais adquiridos pela Anglo American (2023).

A composição química (%) das peças de teste poderão ser encontradas na tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades químicas (%) das peças de teste – tubo condutor e luva bipartida.

Material			Composição Química (%)									
Diâmetro tubo fabricação	Número tubo	Corrida	C	Mn	P	S	Si	Al	Cr	Ni	Mo	V
Ø24 in	934	30329	0.06	1.66	0.015	0.001	0.28	0.036	0.02	0.03	0.017	0.01
Ø26 in	6187	5-44376	0.04	1.62	0.017	0.001	0.19	0.036	0.02	0.01	0.01	0.003

Material			Composição Química (%)								
Diâmetro tubo fabricação	Número tubo	Corrida	Cu	Sn	Nb	Ti	Co	B	Ca	Ceq1	Pcm
Ø24 in	934	30329	0.01	0.002	0.06	0.021	0.01	0.0003	0.0023	0.35	0.16
Ø26 in	6187	5-44376	0.01		0.06	0.012		0.0019	0.0019	0.32	0.13

Fonte: Certificado de materiais adquiridos pela Anglo American (2023).

O processo de soldagem aplicado na união luva bipartida no tubo condutor utilizado neste trabalho será a soldagem a arco com eletrodo revestido, o qual será aplicado eletrodo E9018-D1 H4R nos passes de raiz, enchimento e acabamento atendendo as seguintes especificações da tabela 4:

Tabela 4 - Propriedades químicas e mecânicas do eletrodo revestido fornecido pelo fabricante.

ANÁLISE QUÍMICA %								
C	Mn	Si	S	P	Mo	-	-	-
0,048	1,61	0,45	0,010	0,012	0,50	-	-	-

(*) ENSAIOS MECÂNICOS		
Limite de Escoamento MPa	Resistência à Tração MPa	Alongamento %
≥ 580	≥ 680	≥ 22
Resistência ao Impacto J a +20°C	Dureza Hardness	H2 (ml/100g)
≥ 150	-	-

(*) como soldado

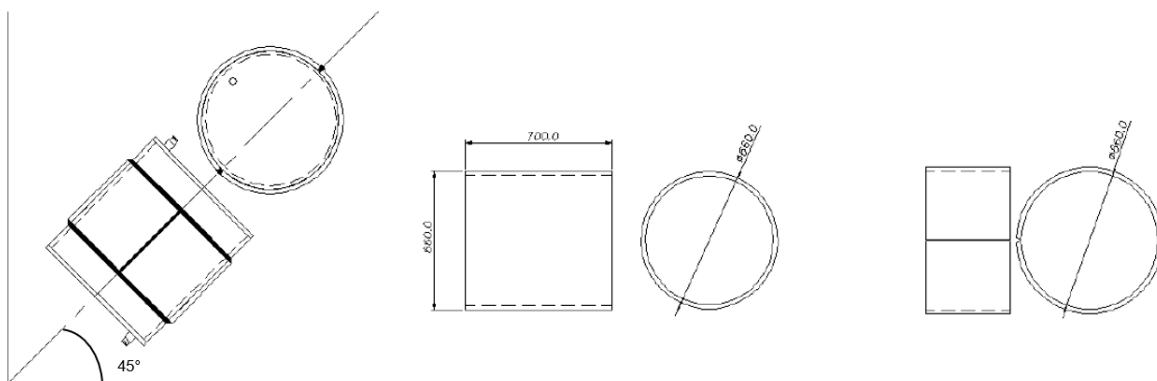
Fonte: Certificado de qualidade do eletrodo E9018 D1 H4R.

5.4 Desenvolvimento da Especificação de soldagem preliminar (EPSp)

Antes de iniciar a etapa de soldagem, um plano de qualificação do procedimento de soldagem (PQPS) foi elaborado para trabalho em conjunto a pré-especificação do procedimento de soldagem. O plano de qualificação descreve os documentos e normas de referência, metodologia com as instruções gerais, peças de testes, soldagem, registros, ensaios não destrutivos, ensaios mecânicos e as orientações para repetição de ensaios caso sejam necessários.

Na figura 17 e na tabela 5 poderão ser encontradas as informações que foram aplicadas na especificação do procedimento de soldagem preliminar

Figura 17 - Arranjo das peças de testes para soldagem.



Fonte: Certificado de materiais adquiridos pela Anglo American (2023).

Tabela 5 - Descrição dos itens considerados na EPSp

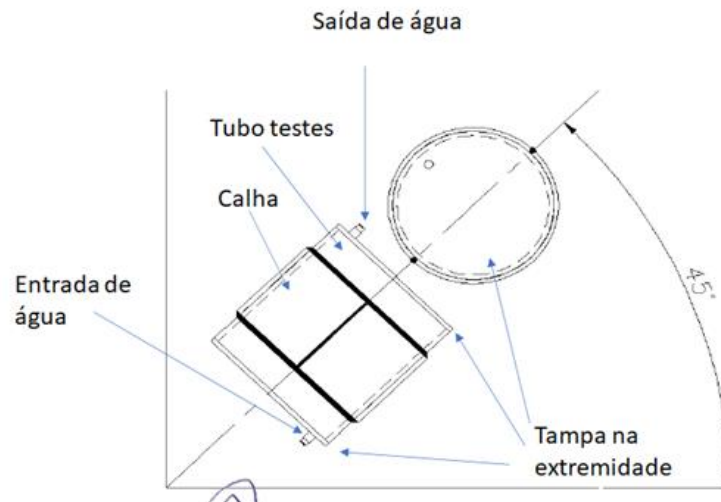
METAL DE BASE			
1.1 - ESPECIFICAÇÃO TUBO TRANSPORTADOR:	API 5L X70 PSL2		
1.2 - ESPESSURA DO TUBO TRANSPORTADOR:	14,3 mm (0,562 in)		
1.3 - DIÂMETRO EXTERNO DO TUBO TRANSPORTADOR:	660,4 mm (26 in)		
1.4 - COMPRIMENTO DO TUBO TRANSPORTADOR:	700 mm		
1.5 - ESPECIFICAÇÃO DA LUVA:	API 5L X70 PSL2		
1.6 - ESPESSURA DA LUVA:	12,7mm (0,500 in)		
1.7 - COMPRIMENTO DA LUVA:	400 mm		
METAL DE ADIÇÃO			
2.1 - ESPECIFICAÇÃO:	AWS 5.5 / ASME SFA5.5		
2.2 - CLASSIFICAÇÃO:	E9018-D1-H4R		
2.3 - DIÂMETRO:	3,2 mm		
TÉCNICA			
3.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM:	SMAW		
3.2 - TIPO DE SOLDAGEM:	MANUAL		
3.3 - NORMA APLICÁVEL:	API 1104 - APÊNDICE B		
3.4 - POSIÇÕES DE SOLDAGEM:	6G		
3.5 - PROGRESSÃO DE SOLDAGEM:	ASCENDENTE		
3.6 - LIMPEZA INICIAL:	ESCOVAMENTO/ESMERILHAMENTO		
3.7 - LIMPEZA INTERPASSES:	ESCOVAMENTO/ESMERILHAMENTO		
3.8 - GÁS DE SOLDAGEM:	NÃO APLICÁVEL		
3.9 - GAS DE PURGA:	NÃO APLICÁVEL		
3.10 - NÚMERO DE SOLDADORES:	2		
PRÉ-AQUECIMENTO E INTERPASSES			
4.1 - TEMPERATURA DE PRÉ AQUECIMENTO:	100 °C		
4.2 - CONTROLE:	PIRÔMETRO ÓPTICO		
4.3 - TEMPERATURA INTERPASSE:	100 °C		
4.4 - TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM:	NÃO APLICÁVEL		
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS			
5.1 - CAMADA DE SOLDA	RAIZ	ENCHIMENTO	ACABAMENTO
5.2 - PROCESSO:	SMAW	SMAW	SMAW
5.3 - CLASSIFICAÇÃO:	E9018-D1-H4R	E9018-D1-H4R	E9018-D1-H4R
5.4 - DIÂMETRO:	3,2 mm	3,2 mm	3,2 mm
5.5 - TIPO:	CC	CC	CC
5.6 - POLARIDADE:	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
5.7 - FAIXA DE CORRENTE (A):	70-120	70-120	70-120
5.8 - FAIXA DE TENSÃO (V):	20-28	20-28	20-28
5.9 - FAIXA DE VELOC. AVANÇO (cm/min):	N/A	N/A	N/A
5.10 - FAIXA DE ENERGIA DE SOLDAGEM (J/cm)	N/A	N/A	N/A

5.5 Preparação, montagem e execução de soldagem

De acordo com a norma API 1104 (2021), apêndice B, foi necessário realizar a montagem da peça de teste a 45° conforme figura 18. Nesta montagem, realizou a

instalação de um circuito aberto com a recirculação de água para simular uma operação com fluxo contínuo.

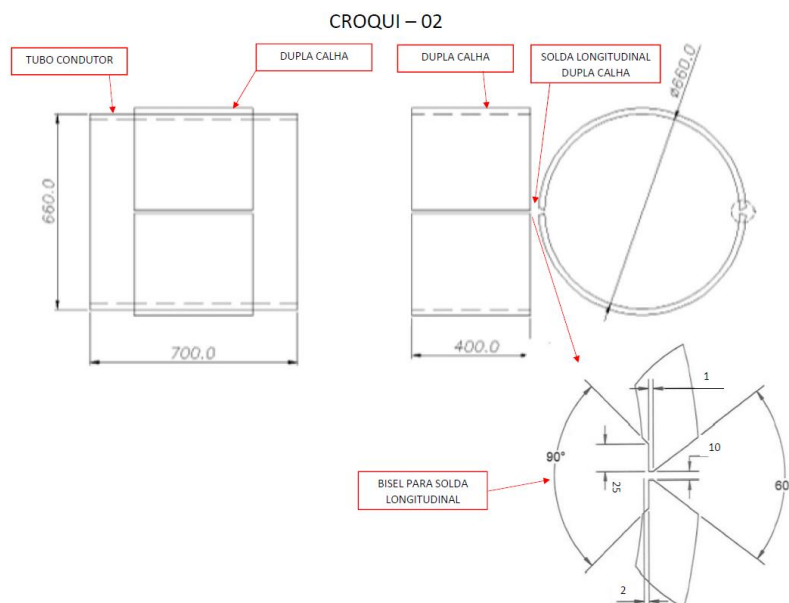
Figura 18 - Posicionamento da luva bipartida e pontos de entrada/saída de água.



Fonte: Pipeline Research Council International, PRCI (2006), adaptado.

As luvas bipartidas foram fabricadas com um canal para instalação do cobre junta para a soldagem longitudinal da luva bipartida. A geometria da luva pode ser observada na figura 19.

Figura 19 - Geometria da luva bipartida (dupla calha).

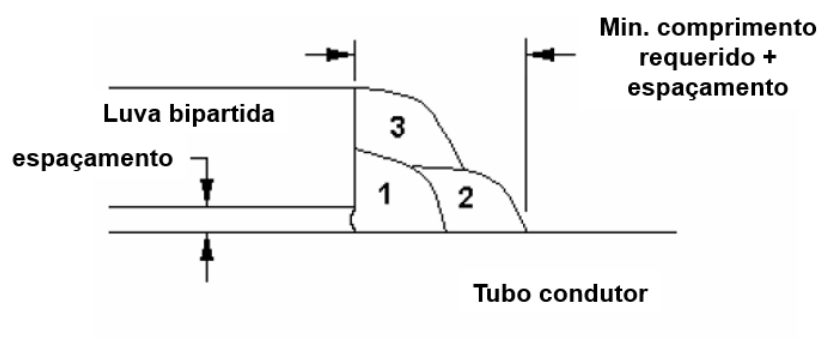


Fonte: Croqui da peça de teste.
Elaborado pelo autor.

Para o acoplamento das luvas bipartidas na peça de teste, foi necessário a remoção do reforço longitudinal da solda do tubo transportador da peça de teste. O posicionamento das luvas bipartidas foi centralizado longitudinalmente e o chanfro para solda longitudinal foi deslocado angularmente com da solda longitudinal do tubo condutor.

A PRCI (2006) recomenda que seja evitado o menor espaçamento entre luva bipartida e tubo condutor devido a necessidade de incrementar o valor do espaçamento no comprimento do pé da solda conforme ilustrado na figura 20 a seguir:

Figura 20 - Esquema de sequência de passes e comprimento mínimo requerido.



Fonte: Pipeline Research Council International, PRCI (2006), adaptado.

5.5.1 Passo inicial – solda de chanfro da luva bipartida

A primeira etapa do trabalho se inicia através da preparação das superfícies onde serão realizadas as soldas de chanfro. Utilizando o método de limpeza através de escovas rotativas, foi possível remover todos os resíduos da região de soldagem. Esta etapa contou com 02 (dois) soldadores denominados (R e A) que ficaram posicionados em cada lado da peça de teste para realização das atividades de soldagem de chanfro.

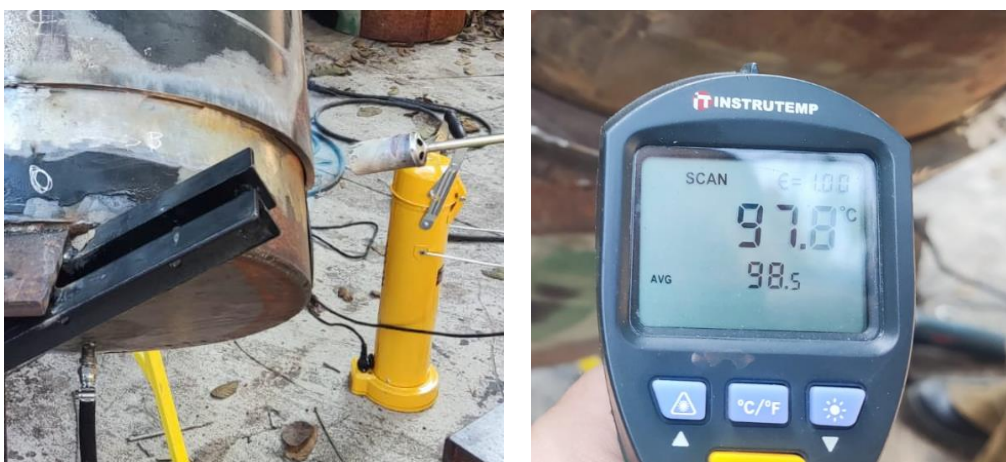
O primeiro passe de soldagem foi o passe de raiz da solda longitudinal, com penetração total, utilizando um eletrodo básico E9018-D1-H4R de 3,2 mm de diâmetro.

As principais características do eletrodo escolhido, de acordo com o fabricante, é a excelência na soldagem em todas as posições, exceto na posição vertical e descendente, resistência a trincas e ao envelhecimento e revestimento resistente a

absorção de umidade (classe R). O eletrodo de revestimento básico e aplicado em aço carbono, baixa liga e com limite de escoamento de 580 MPa.

Na execução dos passes de raiz, a faixa de corrente foi de 90 a 100 amperes com temperatura de interpasses de 100°C e pré-aquecimento entre 80 a 100°C. A verificação e controle da temperatura de pré-aquecimento e interpasses foi obtida através das medições locais com pirômetro digital conforme figura 21.

Figura 21 - Pré-aquecimento e controle da temperatura de aquecimento e interpasses.



Fonte: Qualificação EPS Anglo American (2023).

Completada execução dos passes de raiz, iniciou a etapa de aplicação dos passes de enchimento e acabamento da solda de chanfro. Para a camada de enchimento e acabamento, foi aplicado o mesmo eletrodo do passe da raiz, ou seja, eletrodo E9018-D1 H4R. Nesta etapa foi necessário ajustes nos parâmetros de soldagem com o ajuste na faixa de corrente para 94 a 120 amperes. Com a variação na corrente, uma maior quantidade de deposição de metal de adição é esperada.

O controle da temperatura de interpasse e pré-aquecimento se manteve na faixa de entre 80 e 100 °C devido a máxima faixa de temperatura obtida na fase de fabricação da peça de testes.

Ao término da solda de chanfro da camada de acabamento, as extremidades do cobre junta foram cuidadosamente removidas em ambas as extremidades da luva através do método de esmerilhamento.

Figura 22 - Pré-aquecimento e controle da temperatura de aquecimento e interpassas da solda longitudinal (solda de chanfro).



Fonte: Qualificação EPS Anglo American (2023).

Figura 23 - Aspecto final da solda longitudinal (solda de chanfro).



Fonte: Qualificação EPS Anglo American (2023).

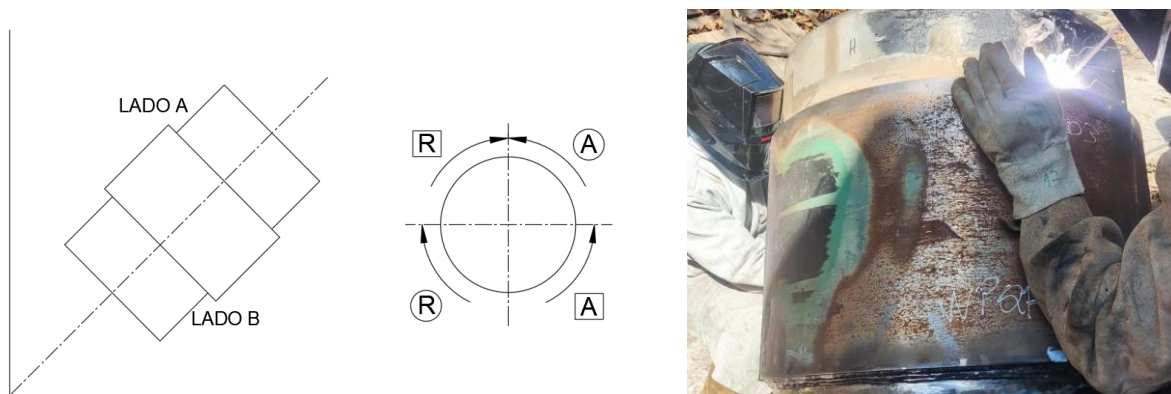
5.5.2 Passo final – solda em ângulo da luva bipartida

Semelhante ao tópico anterior, o início é através da preparação das superfícies onde serão realizadas as soldas em ângulo. Com a aplicação de escova rotativa, foi possível obter as superfícies isenta de resíduos e aprovadas para início do passe de raiz. Nesta etapa, a solda será considerada uma atividade em serviço, ou seja, o tubo condutor estará em operação com gradientes de temperatura, sabendo-se que a solda em ângulo terá contato entre a luva bipartida e tubo condutor. O grande desafio desta etapa é manter a temperatura de pré-aquecimento e interpasse dentro dos limites especificados.

A etapa de soldagem em ângulo contou com a utilização de 02 (dois) soldadores denominados (R e A). Para melhor entendimento da atividade, a figura 24

ilustra o detalhe para realização da atividade. Foram realizadas 02 (duas) etapas, sendo a etapa 1 com o fechamento completo das soldas em ângulo em uma das extremidades antes de prosseguir para o lado oposto. A soldagem ocorreu na posição vertical e ascendente.

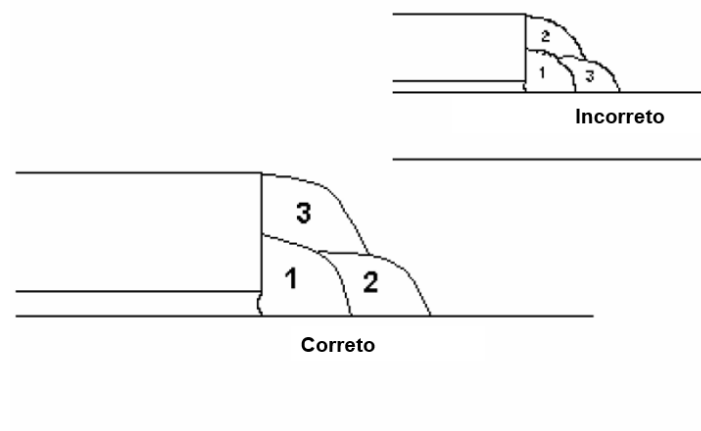
Figura 24 - Ilustração da execução da solda em ângulo.



Fonte: Croqui da peça de teste e qualificação EPS Anglo American (2023).

A sequência de soldagem é um dos fatores que necessitam ser avaliados para evitar a ocorrência de tensões residuais na peça e conseqüentemente trincas de hidrogênio. Além da necessidade de realizar a soldagem de ângulo completa em uma extremidade antes de prosseguir com a extremidade oposta, norma API 1104 (2021) recomenda uma correta deposição do material de adição conforme figura 25 abaixo:

Figura 25 - Sequência de deposição dos cordões da solda em ângulo.



Fonte: Pipeline Research Council International, PRCI (2006), adaptado.

Para a solda em ângulo, em ambas as extremidades foi aplicada o consumível E9018-D1-H4R com a faixa de corrente de 100 a 130A. A temperatura de pré-aquecimento aplicada foi de 80 a 100°C.

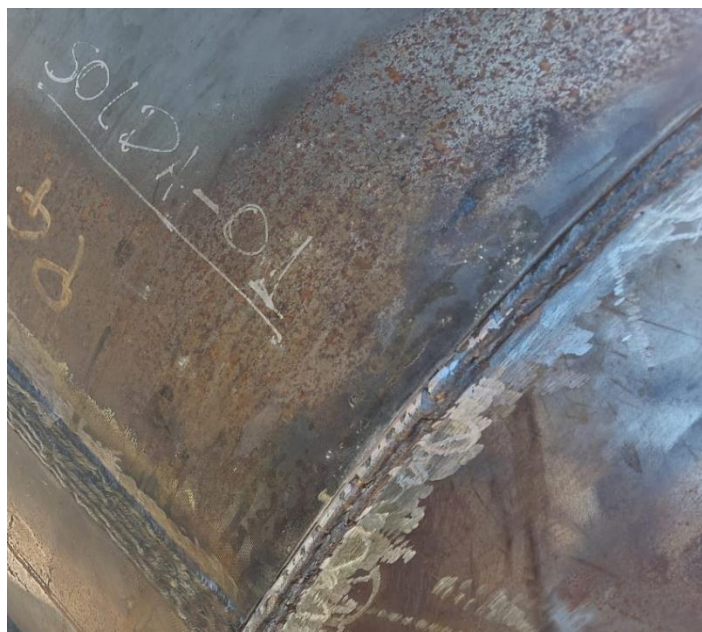
Figura 26 - Etapas de pré-aquecimento e soldagem em ângulo.



Fonte: Qualificação EPS Anglo American (2023).

O aspecto final da soldagem em ângulo pode ser verificado na figura 27.

Figura 27 - Aspecto final da solda em ângulo em uma das extremidades da luva bipartida.



Fonte: Qualificação EPS Anglo American (2023).

5.6 Preparação dos corpos de provas e ensaios

Finalizada todas as etapas de solda de chanfro e ângulo, os corpos de provas foram preparados para realização dos ensaios realizados pela norma API 1104 (2021). A quantidade de corpos de provas e ensaios recomendados estão descritos na tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Ensaios e quantidades de corpos de prova (procedimento de qualificação de teste – em serviço).

Espessura	Tipo de solda	Quantidade de corpos de prova ^a						
		Ensaio de tração / Tensile = T	Ensaio de fratura / Nick break = NB	Dobramento na raiz / Root bend = RB	Dobramento na face / Face bend = FB	Dobramento lateral / Side bend = SB	Macrografia / Macro test = MT	Total
≤ 0,5 in (12,7 mm)	Solda de chanfro longitudinal	2	2	2	2			8
	Solda de filete		4 ^b		4		4	12

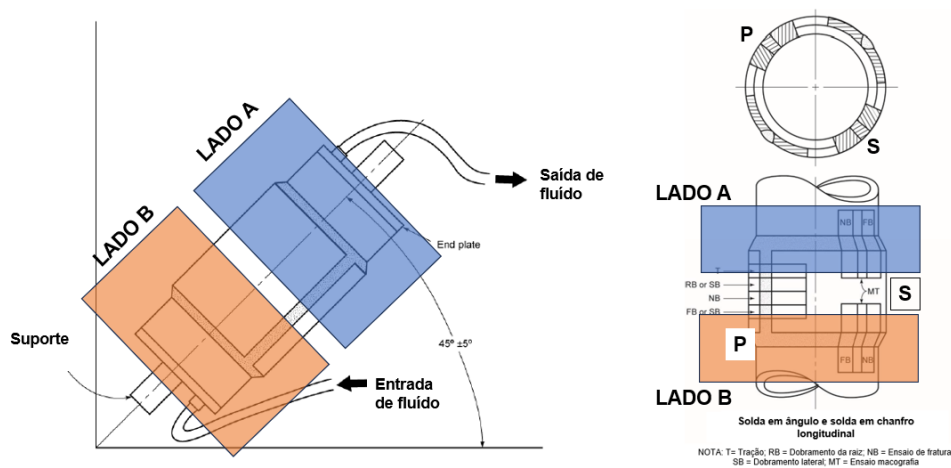
a Para diâmetro de tubulações ou ramais menores ou iguais a 4,5 in (114,3 mm), duas soldas são necessárias.

b A critério da empresa, a parte restante das amostras pode ser preparada e submetida ao teste de dobramento de face (consultar item 2.5.5 da norma API 1104) após serem submetidas ao ensaio de fratura.

Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

A preparação dos corpos de prova para avaliação da solda longitudinal e circunferencial da luva bipartida atendeu aos critérios da norma API 1104 (2021). Na figura 28 poderá ser verificado o esquemático adotado para identificação dos corpos de provas:

Figura 28 - Esquemático para identificação dos corpos de prova dos soldadores.



Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

Para as soldas de ângulo, os corpos de prova foram identificados com o seguinte critério de nomenclatura **YXSZ**, sendo:

Y – Posição de soldagem (Plana ou sobre cabeça)

X – Lado da luva bipartida (A ou B)

S – Inicial do nome do soldador (R ou A)

Z – Número do corpo de prova.

De forma resumida, os corpos de prova foram identificados conforme tabela 7.

Tabela 7 - Identificação dos corpos de prova - solda em ângulo.

C.P.	DESCRIÇÃO
PAR1	Região de transição entre vertical e plana, no lado A, soldador R
PBR1	Região de transição entre vertical e plana, no lado B, soldador R
SAA1	Região de transição entre vertical e sobrecabeça, no lado A, soldador A
SBA1	Região de transição entre vertical e sobrecabeça, no lado B, soldador A

Para as soldas de chanfro, os corpos de prova foram identificados com o seguinte critério de nomenclatura **SZ**, sendo:

S – Inicial do nome do soldador (R ou A)

Z – Número do corpo de prova

De forma resumida, os corpos de prova foram identificados conforme tabela 8.

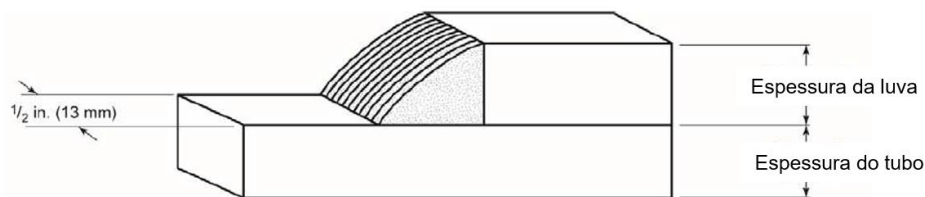
Tabela 8 - Identificação dos corpos de prova - Solda em chanfro.

C.P.	DESCRIÇÃO
R1	Solda longitudinal, soldador R
A1	Solda longitudinal, soldador A

5.7 Ensaios de metalográfico - macrografia

De acordo com a norma API 1104 (2021) – apêndice B, foram preparados 04 (quatro) corpos de provas conforme figura 29. Um dos lados da superfície teve acabamento polido com o acabamento superfino na lixa de grão #600.

Figura 29 - Corpo de prova para preparação do ensaio de macrografia.



Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

A avaliação da extensão da zona termicamente afetada foi avaliada, bem como a verificação de eventuais porosidades, trincas e inclusões na junta soldada. É importante ressaltar que o ensaio de macrografia têm como objetivo avaliar a soldagem de ângulo entre luva bipartida e tubo condutor.

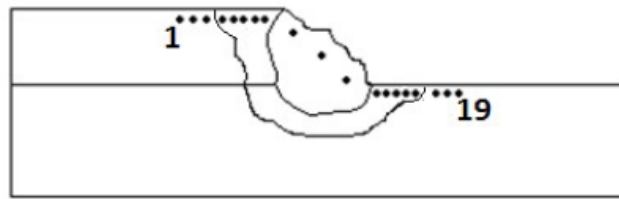
5.8 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza tem como objetivo avaliar alterações microestruturais na região da zona termicamente afetada devido a possíveis alterações da microestrutura do tubo condutor e luva bipartida causada pela soldagem. A norma API 1104 (2021) recomenda a execução de pelo menos 05 (cinco) indentações utilizando o modelo de ensaio Vickers com uma carga de 10 kg para determinar o valor de dureza dos grãos grosseiros da zona termicamente afetada.

Do total de 04 (quatro) corpos de provas utilizados na análise de macrografia, 02 (dois) corpos de provas deverão ser utilizados para realização dos ensaios de dureza da solda em ângulo.

Foram realizadas 19 (dezenove) indentações distribuídas em 03 (três) indentações no metal de base da luva, metal de solda e metal de base do tubo transportador e 05 (cinco) indentações nas zonas termicamente afetadas da luva e tubo transportador. Um desenho esquemático está indicado na figura 30.

Figura 30 - Corpo de prova para avaliação da dureza.



Fonte: Relatório de ensaio de laboratório de ensaios destrutivos da EPS Anglo American (2023).

5.9 Ensaio de dobramento de face – solda em ângulo

A norma API 1104 (2021) recomenda a avaliação de corpos de prova para dobramento de face da solda de chanfro e ângulo. Para a solda em ângulo, 04 (quatro) corpos de provas são necessários. Para a solda em chanfro, são necessários apenas 02 (dois) corpos de prova.

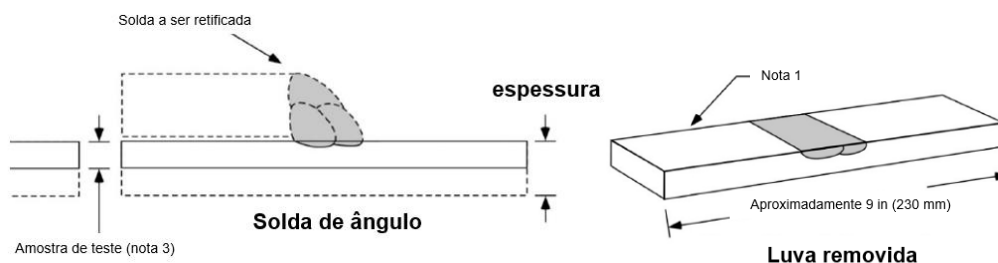
Através de uma prensa, o corpo de prova é flexionado apresentando um formato do tipo “U”.

Os requisitos de aceitação dos resultados do ensaio são:

- Não existam trincas ou outras imperfeições que excedam 1/8 in (3 mm) em qualquer direção presente no metal de solda ou zona termicamente afetada;
- Trincas originadas fora do raio de dobramento e que sejam inferiores a 1/4 in (6mm) devem ser desconsideradas.

O corpo de prova indicado para realização do ensaio de dobramento de face pode ser visualizado na figura 31.

Figura 31 - Corpos de prova - Dobramento de face.



Nota 1: A amostra indicada na figura é mostrada na direção axial. Amostras em outras direções são curvadas.

Nota 3: Onde a espessura é maior que 0,5 in (12,7 mm) pode ser reduzida para 0,5 in (12,7) através de usinagem da superfície interna.

Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

5.10 Ensaio de fratura “nick-break”

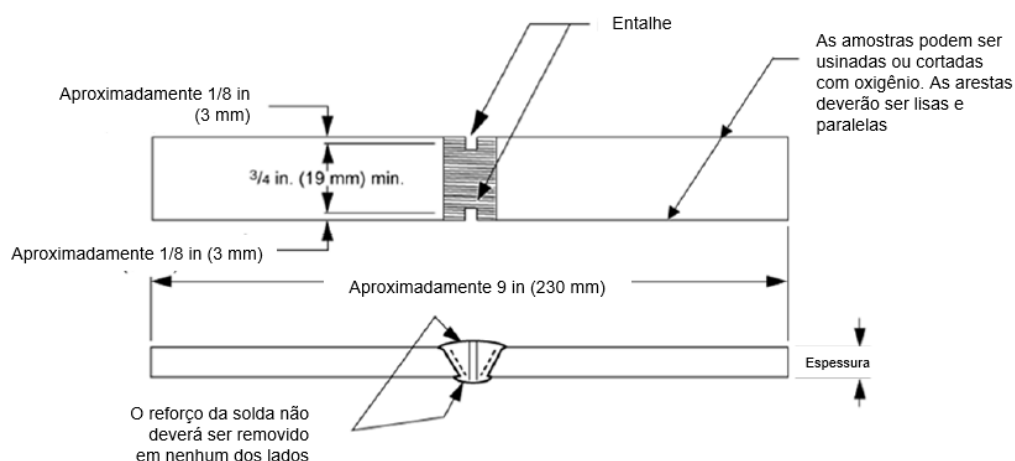
O ensaio de fratura “nick break” tem como objetivo avaliar a qualidade interna do metal de solda. Basicamente o corpo de prova sofrerá um esforço até romper na seção com o entalhe. A superfície fraturada deverá ser avaliada com o objetivo de identificar descontinuidades como porosidades, inclusões ou trincas.

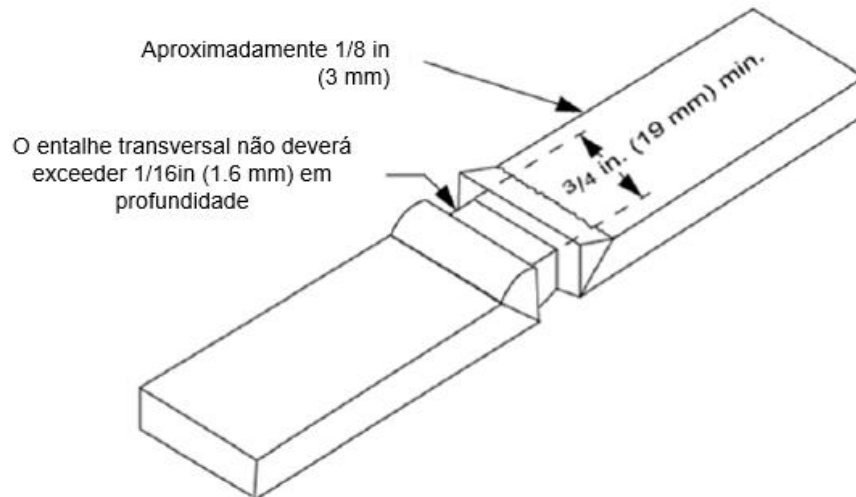
Os corpos de prova para realização do ensaio de fratura estão apresentados na figura 32.

De acordo com a norma API 1104 (2021), os critérios de aceitação dos ensaios são:

- As superfícies expostas de cada amostra do nick break deverão apresentar penetração e fusão completas;
- A maior dimensão de bolsões de ar não deve exceder 1/16 in (1,6mm) e a área combinada destes bolsões de gás não pode exceder 2% da área de superfície exposta;
- Inclusões de escória não deve ser maior que 1/32 in (0,8 in) em profundidade e não devem ser maior que 1/8 in (3 mm) em comprimento;
- Deve ter uma separação mínima de 1/2 in (13 mm) entre inclusões de escória adjacentes.

Figura 32 - Amostras para ensaio “nick break”.





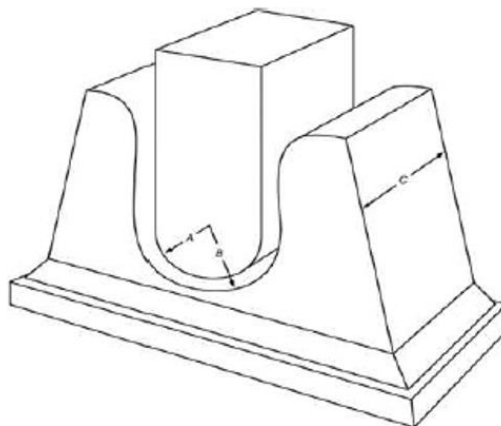
Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

5.11 Ensaio de dobramento de raiz, face e lateral – solda de chanfro

Assim como os ensaios de dobramento para a solda em ângulo, a API 1104 (2021) recomenda a realização de ensaios de dobramento de raiz, face e lateral para amostras da solda em chanfro da peça de teste. Este ensaio tem como característica avaliar defeitos e integridade da solda.

Os ensaios são realizados de forma guiada através de um cutelo como ilustrado na figura 33 abaixo:

Figura 33 - Dobramento guiado.

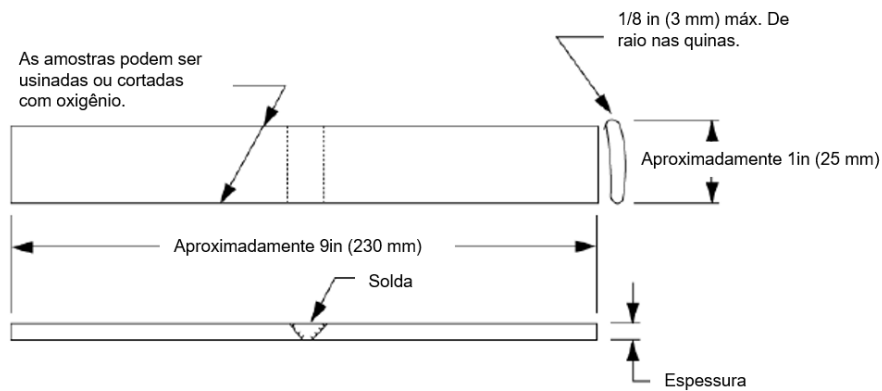


NOTAS: Raio do êmbolo A = 1 3/4 in (45 mm); Raio de dobramento, B = 2 5/6 in (60 mm) e Largura do dobramento, C = 2 in (50 mm)

Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

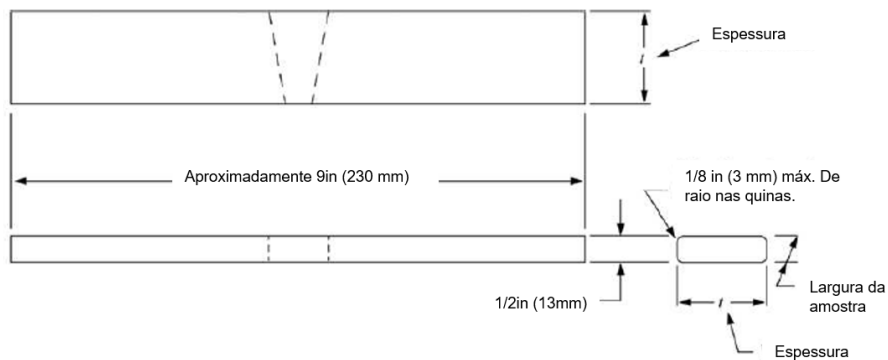
Os corpos de prova adotados para realização dos ensaios de dobramento de raiz, face e lateral são apresentados na figura 34.

Figura 34 - Corpo de prova de ensaios de dobramento de raiz e face – chanfro.



Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

Figura 35 - Corpo de prova para ensaios de dobramento lateral - chanfro.



Fonte: API 1104 (2021), adaptado.

5.12 Resultados

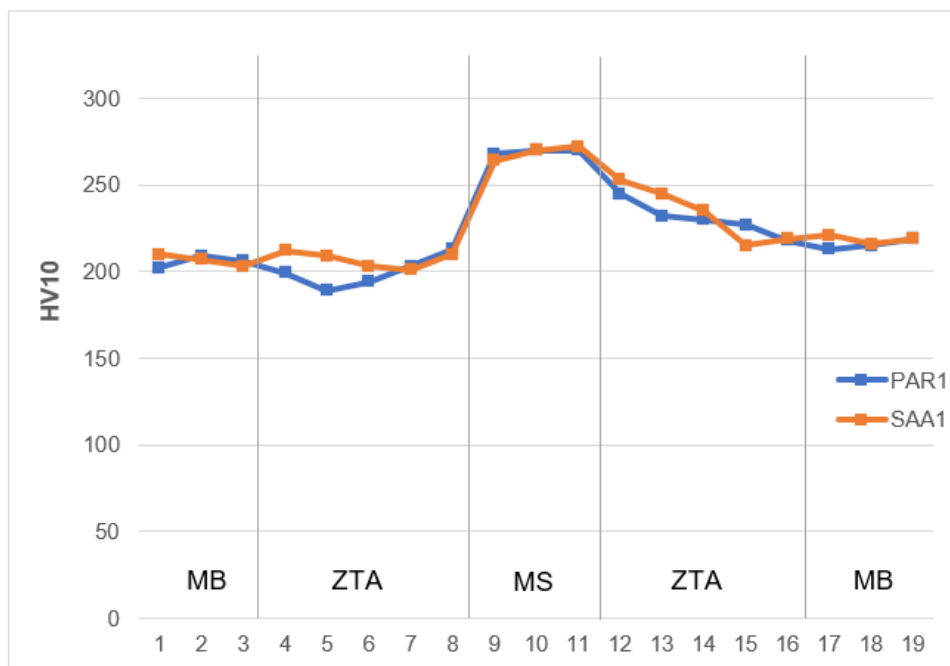
5.12.1 Ensaios de dureza

Foram realizadas 19 (dezenove) indentações e os resultados podem ser visualizados na tabela 9. Os resultados do perfil de dureza poderão ser visualizados na figura 36.

Tabela 9 - Resultados de dureza na ZTA

C.P.	Luva Bipartida									Metal de solda			Tubo Condutor								
	Metal de Base			ZTA									ZTA						Metal de base		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
PAR1	202	209	206	199	189	194	203	213	268	270	270	245	232	230	227	218	213	215	219		
SAA1	210	207	203	212	209	203	201	210	264	270	272	253	245	235	215	219	221	216	219		

Figura 36 - Perfil de dureza medido na solda em chanfro.



5.12.2 Ensaio de tração

Os resultados do ensaio de tração da solda de chanfro estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração da solda em chanfro.

C.P.	Dimensões (mm)	Seção (mm ²)	Resistência		Limite mínimo especificado (Mpa)	Loca de ruptura
			Carga (kgf)	Limite (MPa)		
A1	26,20 x 8,2	214,84	15114	690	570	Metal de base / Fora da solda
R1	25,10 x 8,40	210,84	14698	684	570	Metal de base / Fora da solda

O resultado do corpo de prova A1 apresentou melhores características mecânicas, entretanto os resultados são muito próximos.

O local de ruptura de ambos os corpos de prova foi fora da solda.

5.12.3 Ensaios de dobramento

Os resultados de dobramento dos corpos de prova da solda de chanfro e ângulo podem ser visualizados na tabela 11. Em todos os corpos de provas avaliados, não foram encontradas fissuras.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de dobramento.

C.P.	Dimensões (mm)	Cutelo \varnothing (mm)	Distância entre roletes (mm)	Ângulo de dobramento em graus	Resultados
SAA1	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
SBA1	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
PAR1	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
PBR1	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
A1-DF	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
A1-DR	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
R1-DF	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras
R1-DR	25,00 x 12,70	90	120	180	Não apresentou fissuras

5.12.4 Ensaios de fratura “Nick-Break”

Os resultados de ensaio de fratura estão apresentados na tabela 12. Não foram encontradas descontinuidades nos corpos de prova avaliados.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de fratura “Nick-break”.

C.P.	Resultados
SAA1	Não apresentou defeitos de soldagem
SBA1	Não apresentou defeitos de soldagem
PAR1	Não apresentou defeitos de soldagem
PBR1	Não apresentou defeitos de soldagem
A1	Não apresentou defeitos de soldagem
R1	Não apresentou defeitos de soldagem

6 CONCLUSÃO

Para execução do trabalho de qualificação de um procedimento de soldagem e emissão final de uma Especificação do Procedimento de Soldagem para execução de soldagem de tubulações em serviço, o planejamento das atividades é crucial para o sucesso do processo.

É necessário considerar, no mínimo, 03 (três) etapas principais, sendo:

A etapa inicial conta com o desenvolvimento de um plano de qualificação, que fornecerá todos os subsídios a equipe de soldagem quanto as normas e referências que serão aplicadas no processo, descritivos sobre a peça de teste e a respectiva montagem, instrumentos de medição que serão aplicadas para levantamento de dados durante a soldagem e como será realizado o registro de soldagem.

A etapa secundária apresentará o desenvolvimento de uma Pré Especificação de Procedimento de Soldagem. Este documento terá todos os parâmetros que serão aplicados na soldagem da peça de teste conforme requisitos normativos. Para a realização da soldagem da peça de teste, a Pré Especificação do Procedimento de Soldagem será o guia para os soldadores e, caso identificado alguma necessidade de ajuste, o documento poderá ser revisado a qualquer momento para atender critérios específicos verificados durante a execução prática da peça de teste.

A etapa final conta com a emissão do Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem que atestará que a Especificação do Procedimento de Soldagem estará apta para aplicação em campo a partir dos critérios e faixa normativas.

Conclui-se que é possível obter excelentes resultados de soldagem no processo de qualificação de uma EPS para aplicação de reparos de dutos em serviço API 5L X70 PSL2 atendendo o critério da norma API 1104, apêndice B. Alinhado aos critérios normativos, o planejamento das atividades é essencial para que todas as etapas descritas nos parágrafos anteriores sejam realizadas e analisadas a cada avanço da atividade.

REFERÊNCIAS

Anuário estatístico de transportes (2010-2018) – Ministério de Infraestrutura

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 1104 (2021): **Welding of pipeline and related facilities**, July 2021.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5L (2020): **Line Pipe**

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.4 (2019): **Pipeline transportation systems for liquids and slurries**.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS (2011): **Welding Handbook** – Volume 4 – Materials and applications, part 1.

Atlas socioeconômico Rio Grande do Sul, <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/aeroportos-e-dutovias>, acessado em 12 de Outubro de 2023.

CHAVES, A. P. (2002 a). **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios** - Volume 1. São Paulo: Signus Editora.

Engenharia de dutos (2009) – José Luiz de França Freire – ISBN 978-85-85769-44-4.

Introdução à metalurgia de soldagem (2012) – Paulo J. Modenesi, Paulo V. Marques, Dagoberto B. Santos.

Notas de aula da disciplina MFAB2 – Controle da qualidade durante a manufatura – Especialização em Soldagem – UFMG – 2022.

Plano decenal de expansão da malha de transporte dutoviário (2022) – PEMAT

ONTL – Observatório Nacional de Transporte e Logística - <https://ontl.infrasa.gov.br/paineis-analiticos/painel-do-anuario->

[estatistico/infraestrutura-em-operacao/por-modo-de-transporte/](#) acessado em 10 de Outubro de 2023.

TORRES, A. S. G. **Inertização de minerodutos pra mitigação de sua corrosão interna**, (2021) (Dissertação de Mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na Universidade Federal de Minas Gerais).

TORRES, A. S. G. **Soldagem de reparo em dutos pressurizados e em operação**, (2016) (Monografia de especialização em soldagem apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais).

SANTOS (2003). **Caracterização de Soldas em Aços API 5L Com Diferentes Arames Tubulares e Temperaturas de Pré-Aquecimento**, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Pipeline Research Council International (2006) – **Pipeline repair manual**

Soldagem – Fundamentos e Tecnologia – 3ª Edição atualizada