

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SOLDAGEM**

Luiz José de Paiva Lima Marinho

**ESTUDO DE CASO DE FALHA EM EQUIPAMENTO PRESSURIZADO POR
CORROSÃO SOB ISOLAMENTO (CUI)**

Belo Horizonte

2025

Luiz José de Paiva Lima Marinho

**ESTUDO DE CASO DE FALHA EM EQUIPAMENTO PRESSURIZADO POR
CORROSÃO SOB ISOLAMENTO (CUI)**

Monografia de especialização apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador: Prof. Ariel Rodrigues Arias

Belo Horizonte

2025

M338e

Marinho, Luiz José de Paiva Lima.

Estudo de caso de falha em equipamento pressurizado por corrosão sob isolamento (CUI) [recurso eletrônico] / Luiz José de Paiva Lima Marinho. – 2025.

1 recurso online (42 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”

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Soldagem. 2. Corrosão .3. Vasos de pressão . I. Rodríguez Arias, Ariel. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ângela Cristina Silva CRB/6 2361

Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE TECNOLOGIA E QUALIFICAÇÃO EM SOLDAGEM

UFMG

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO LUIZ JOSÉ DE PAIVA LIMA MARINHO

Realizou-se, no dia 05 de setembro de 2025, às 14:00 horas, Online, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Estudo de caso de falha em equipamento pressurizado por corrosão sob isolamento (CUI)*, apresentada por LUIZ JOSÉ DE PAIVA LIMA MARINHO, número de registro 2024672129, graduado no curso de ENGENHARIA MECÂNICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em TECNOLOGIA E QUALIFICAÇÃO EM SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Ariel Rodriguez Arias - Orientador (UFMG), Prof(a). Eduardo Anacleto Barcelos (UFMG), Prof(a). Reginaldo Matias Nunes (DELP ENGENHARIA).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada (85) Nota

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 05 de setembro de 2025.

Prof(a). Ariel Rodriguez Arias (Doutor)

Prof(a). Eduardo Anacleto Barcelos (Especialista)

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO ANACLETO BARCELOS
Data: 08/09/2025 05:58:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof(a). Reginaldo Matias Nunes (Especialista)

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO MATIAS NUNES
Data: 05/09/2025 15:13:55-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

RESUMO

A soldagem e a corrosão representam desafios consideráveis em equipamentos pressurizados, como os vasos de pressão, que demandam um alto nível de confiabilidade e segurança. A corrosão sob isolamento (CUI) é uma questão significativa que pode comprometer a integridade dos equipamentos, independentemente da idade da instalação. A reparação de componentes de pressão é fundamental e requer técnicas específicas, como a soldagem de placas de inserção. O presente trabalho tem o objetivo de projetar um reparo e verificar a qualidade e integridade das soldas e garantir a integridade do equipamento, após o mesmo sofrer com mecanismo de dano por corrosão sob isolamento. Durante uma parada programada para inspeção e manutenção de um trocador de calor, foi detectada CUI devido à falha na vedação do isolamento térmico, resultando em danos consideráveis. Foi realizado um reparo estrutural com placas de inserção soldadas a topo, de acordo com as normas ASME PCC-2 e ASME BPVC Section VIII Division 1. Após a execução do reparo, foram realizados ensaios não destrutivos e teste hidrostático, que indicaram condições satisfatórias. O equipamento foi inspecionado, considerado seguro para operar e aprovado para retorno às operações, garantindo a qualidade e segurança do processo de soldagem e inspeção.

Palavras-chave: vasos de pressão; corrosão sob isolamento; soldagem; ASME PCC-2; placas de inserção soldadas a topo.

ABSTRACT

Welding and corrosion present considerable challenges in pressurized equipment, such as pressure vessels, which require a high level of reliability and safety. Corrosion under insulation (CUI) is a significant issue that can compromise the integrity of equipment, regardless of the installation's age. The repair of pressure components is fundamental and requires specific techniques, such as the welding of insert plates. The objective of this work is to design a repair and verify the quality and integrity of the welds, as well as to ensure the integrity of the equipment after it has suffered damage due to corrosion under insulation. During a scheduled shutdown for inspection and maintenance of a heat exchanger, CUI was detected due to the failure of the thermal insulation seal, resulting in considerable damage. A structural repair was carried out with insert plates welded butt-to-butt, in accordance with ASME PCC-2 and ASME BPVC Section VIII Division 1 standards. After the repair was completed, non-destructive testing and a hydrostatic test were performed, which indicated satisfactory conditions. The equipment was inspected, considered safe to operate, and approved for return to service, ensuring the quality and safety of the welding and inspection process.

Keywords: pressure vessel; corrosion under insulation; welding; ASME PCC-2; butt welded insert plates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da reação eletroquímica CUI para aço carbono	18
Figura 2 - Duas linhas defensivas montadas para a proteção contra o CUI.....	20
Figura 3 - Inserção embutida em tubos.....	25
Figura 4 - Placa de inserção nivelada (com ou sem bico/bueiro) com sua solda de topo cruzando a solda de topo existente em cascos ou cabeças.....	27
Figura 5 - Solda de topo de placa de inserção tipo "casinha de cachorro" com intersecção (com ou sem bico/passador) com solda de topo de casco em cascos e cabeças de embarcações.....	27
Figura 6 – Fluxograma do processo de reparo por CUI.....	31
Figura 7 - Vaso de pressão/Trocador de Calor com isolamento térmico.....	32
Figura 8 - Condição do equipamento após remoção do isolamento térmico.....	32
Figura 9 - Superfície do equipamento após tratamento de superfície.....	33
Figura 10 - Condição do equipamento após remoção do isolamento térmico.....	33
Figura 11 - Grid de varredura.....	34
Figura 12 - Projeto de alteração e reparo.....	38
Figura 13 - Corte do equipamento.....	39
Figura 14 - Placa de inserção na posição para soldagem.....	39
Figura 15 - Soldagem e ensaio da placa de inserção.....	40
Figura 16 - Teste Hidrostático.....	40
Figura 17 - Finalização do reparo e pintura do equipamento.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grid de varredura planejado.....	34
---	----

LISTA DE SIGLAS

Alumínio Termicamente Pulverizado - TSA

Consequências De Uma Falha - COF

Corrosão Sob Isolamento - CUI

Especificação De Procedimento De Soldagem - EPS/WPS

Líquido Penetrante - PT

Norma Regulamentadora 13 - NR-13

Partículas Magnéticas - MT

Probabilidade De Falha - LOF

Profissional Legalmente Habilitado - PLH

Proteção Catódica - CP

Radiografia Total - RT

Tratamento Térmico Pós-Soldagem - PWHT

Ultrassom - UT

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 VASOS DE PRESSÃO.....	12
2.2 CORROSÃO SOB ISOLAMENTO (CUI).....	14
2.2.1 Fatores Importantes na Corrosão Sob Isolamento (CUI).....	16
2.3 NORMAS E REGULAMENTAÇÃO.....	19
2.4 ASME PCC-2.....	20
2.4.1 Placas de inserção soldadas a topo em componentes de pressão.....	21
2.4.1.1 Descrição e Limitações.....	21
2.4.1.2 Projeto de Reparo com Placas de Inserção.....	22
2.4.1.3 Fabricação.....	25
2.4.1.4 Exame de Soldas.....	27
2.4.1.5 Testes de Pressão.....	27
3. METODOLOGIA.....	28
3.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	30
3.2 MATERIAIS APLICADOS.....	34
3.3 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO.....	34
3.3.1 Técnica geral de soldagem do reparo por butt-welded insert plates e weld filler.....	35
4 DESENVOLVIMENTO.....	36
5 CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo industrial fundamental para a produção e reparo de componentes metálicos, sendo essencial em diversas indústrias. Embora seja uma técnica versátil e eficaz, a soldagem pode ser complexa devido à alta densidade energética envolvida, o que pode levar a mudanças estruturais e de propriedades nos materiais. A falta de compreensão dessas nuances pode resultar em problemas graves, como atrasos, custos adicionais e riscos à segurança. No contexto de equipamentos pressurizados, como vasos de pressão, a soldagem desempenha um papel crítico na garantia da integridade estrutural e segurança operacional. Em situações emergenciais, o engenheiro de soldagem enfrenta desafios significativos para restaurar a funcionalidade e segurança desses equipamentos, exigindo expertise e conhecimento especializado (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

A corrosão é uma agressão danosa aos materiais provocada pelo meio ambiente, resultando em paralisações de produção, desperdício de recursos, contaminação de produtos, diminuição da eficiência, manutenção cara e superdimensionamento. Também prejudica a segurança e obstaculiza o avanço tecnológico. A complexidade dos problemas de corrosão decorre da sua natureza multidisciplinar e da distribuição de responsabilidades. O controle é obtido através do entendimento dos processos de corrosão, da aplicação de materiais resistentes e de sistemas de proteção. Grandes empresas, indústrias e entidades governamentais estabeleceram grupos para tratar de assuntos ligados à corrosão. No entanto, muitas vezes as obrigações são repartidas entre os fabricantes e os usuários, resultando em negligência e em consequências onerosas (ROBERGE et al., 2000).

O isolamento térmico é fundamental para a retenção de energia e eficiência térmica. No entanto, um problema associado a essa prática é a corrosão sob isolamento (CUI), que é amplamente reconhecida como uma questão crítica. A primeira norma para lidar com esse problema foi estabelecida há cerca de 40 anos, sendo comum presumir que a CUI seja mais grave em instalações mais antigas, e alguns especialistas alertam que a situação tende a se agravar se o equipamento ultrapassar os 5 anos de uso. Contudo, é necessário levar em conta o efeito das condições laborais e da exposição ao meio ambiente. Os profissionais de engenharia de corrosão e integridade devem fundamentar suas suposições no fato de que a CUI é uma questão relevante, independentemente da antiguidade ou da recente

instalação. O ambiente pode influenciar a complexidade dos elementos envolvidos na CUI e suas interações (JAVAHERDASHTI, 2014).

Os equipamentos pressurizados são fundamentais nos processos industriais, desde a produção do insumo até a finalização do produto final. Exigem alta confiabilidade e disponibilidade devido ao funcionamento constante e à interligação dos processos. A proteção das válvulas de prensa é crucial devido a situações de risco, como a presença de fluidos tóxicos e inflamáveis, pressões elevadas e temperaturas elevadas, que podem resultar na falha do equipamento (BOILER, 1998; DE ARAUJO; TEODÓSIO; CAMPOS, 2019).

Os vasos de pressão que não são produzidos em larga escala, mas sim desenhadas e produzidas para satisfazer as demandas particulares de cada projeto, seja para armazenamento ou processamento. Cada projeto requer especificações detalhadas de materiais, métodos de produção e suprimentos de solda apropriados para assegurar que as características finais do equipamento estejam em conformidade com o processo (BOILER, 1998).

O reparo de componentes de pressão envolve a substituição de material danificado por uma placa de inserção soldada a topo com soldas de penetração total. Este procedimento se aplica a elementos cilíndricos, elípticos e cilíndricos, além de componentes planos. É aplicável a cascos simples e duplos, além de outros itens de prensagem, como tampas de cabeçote moldadas. Não é restringido pelo tamanho da peça, exceto em tubos de diâmetro reduzido. É necessário tomar precauções especiais para assegurar um encaixe perfeito e a aderência ao código de construção pertinente (ASME PCC-2, 2022).

A demanda cada vez maior por produtividade e retorno rápido à operação após incidentes de danos requer engenheiros mais capacitados para gerir essas circunstâncias críticas de maneira eficaz. Este estudo tratará das propriedades dos equipamentos pressurizados, normas e regulamentos pertinentes, além de estratégias para apoiar os engenheiros na tomada de decisões precisas e eficientes.

Diante disso, o presente trabalho de conclusão de curso realizou o estudo sobre a falha em equipamento pressurizado por corrosão sob isolamento, bem como sua aplicação de reparo por soldagem de insert plate.

Além disso, foi abordado os processos de soldagem por meio de uma análise bibliográfica e um estudo de caso sobre a implementação do processo mecanizado, analisando a produtividade de cada processo. Além disso, enfatizou a importância do

engenheiro de soldagem em reparos emergenciais, destacando a necessidade de habilidades técnicas sólidas, conhecimento normativo e capacidade de tomar decisões fundamentadas em cenários de pressão e urgência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VASOS DE PRESSÃO

Os equipamentos de pressão são dispositivos projetados para reter fluidos sob pressão, abrangendo uma ampla gama de aparelhos, incluindo vasos, canos, acessórios de segurança e acessórios de pressão. Esses equipamentos são frequentemente utilizados em indústrias para realizar processos como aquecimento, resfriamento e movimentação de líquidos ou gases. Sua concepção visa resistir à pressão interna, garantindo um funcionamento seguro dentro dos limites definidos (DUTRA et al., 2006; CHEN et al., 2011).

No entanto, é fundamental que esses equipamentos sejam projetados, construídos e mantidos com meticulosidade para prevenir acidentes ou defeitos. A falta de cuidado pode resultar em consequências graves, incluindo vazamentos, explosões e outros incidentes perigosos. Portanto, é essencial que os equipamentos de pressão sejam submetidos a inspeções regulares e manutenções preventivas para garantir sua integridade e funcionamento seguro (DUTRA et al., 2006; DOS SANTOS, 2018; DEBIASI, 2020).

Os equipamentos pressurizados são utilizados em diversos setores e aplicações. Alguns exemplos incluem caldeiras a vapor, vasos de reação química, caldeiras de água quente pressurizada, compressores de ar, reservatórios de ar, autoclaves e tanques de armazenamento de gás. Cada um desses equipamentos tem uma função específica e é projetado para atender às necessidades de diferentes processos industriais (TELLES, 1996; DUTRA et al., 2006; ABENDI, 2023).

Caldeiras a vapor são utilizadas para gerar vapor para aquecimento, geração de energia e esterilização. Vasos de reação química são projetados para realizar reações químicas sob condições controladas. Caldeiras de água quente pressurizada aquecem água para sistemas de aquecimento e abastecimento de água quente sanitária. Compressores de ar comprimem o ar para aumentar a pressão em diversas aplicações, enquanto reservatórios de ar armazenam ar comprimido para distribuição.

Autoclaves são utilizadas para esterilizar equipamentos e materiais, e tanques de armazenamento de gás armazenam gases comprimidos para diversas aplicações (TELLES, 1996; DEBIASI, 2020; ABENDI, 2023).

Diante disso, os equipamentos de pressão são fundamentais para diversas aplicações industriais e são projetados para operar sob condições específicas de pressão e temperatura. Sua utilização segura e eficiente depende de um projeto, construção e manutenção adequados, além de inspeções regulares para garantir sua integridade e funcionamento correto.

Os vasos de pressão são recipientes projetados para conter fluidos sob pressão significativa, seja em forma líquida ou gasosa. Abrange genericamente todos os recipientes estanques capazes de conter um fluido pressurizado, independentemente do tipo, dimensão, formato ou finalidade. São amplamente utilizados em diversas indústrias, como petroquímica, farmacêutica e alimentícia, devido à sua capacidade de armazenar e transportar substâncias de maneira segura e eficiente. Esses equipamentos são essenciais na operação de processos industriais, garantindo a eficiência e a segurança nas operações (TELLES, 1996; SPENCE; TOOTH, 2012).

Os vasos de pressão geralmente não são itens produzidos em massa, mas sim projetados e fabricados sob encomenda para atender às necessidades específicas de cada projeto, seja para armazenamento, processamento ou outras aplicações. Cada projeto requer uma especificação precisa de materiais, determinação dos processos de fabricação e uso de consumíveis de soldagem adequados. Isso assegura que as características finais do equipamento estejam alinhadas com as exigências do processo em que será utilizado, garantindo desempenho e segurança adequados (MOSS, 2004; SPENCE; TOOTH, 2012).

A pressão interna nos vasos é geralmente muito superior à atmosférica, o que requer uma construção robusta e específica para evitar falhas. A manutenção adequada é fundamental para prevenir vazamentos ou explosões, que podem resultar em acidentes graves, prejuízos financeiros e impactos ambientais. Portanto, a manutenção regular é crucial para garantir o funcionamento eficiente e seguro desses equipamentos (MOSS, 2004).

Além de garantir a segurança, a manutenção regular em vasos de pressão aumenta a vida útil do equipamento e reduz custos operacionais a longo prazo. A detecção precoce de falhas potenciais pode evitar paradas não programadas e reparos dispendiosos, contribuindo para a eficiência e rentabilidade dos processos

industriais. Com uma manutenção adequada, é possível minimizar riscos e maximizar a produtividade (MOSS, 2004; GOLWALKAR; KUMAR, 2022).

Os vasos de pressão não sujeitos à chama são compostos principalmente pelo corpo cilíndrico, conhecido como casco ou costado, e os tampos, que podem variar em formato. A maioria dos vasos de pressão é fabricada a partir de chapas de aço soldadas, com formato cilíndrico como referência. O processo de seleção de materiais considera fatores como fluido contido, parâmetros de processo (temperatura e pressão), níveis de tensão, custo, segurança e facilidade de fabricação (BOILER, 1998).

Os vasos de pressão podem ser fabricados com uma ampla variedade de materiais, incluindo aço carbono, materiais metálicos não ferrosos (como alumínio) e materiais não metálicos (compósitos). O aço carbono é o material mais comumente empregado devido à sua resistência e custo adequado (BOILER, 1998).

A Norma Regulamentadora 13 (NR-13) categoriza os vasos de pressão com base na classe dos fluidos armazenados e no grupo potencial de risco, determinado pelo produto entre pressão máxima de operação e volume. Essa categorização define os prazos para inspeções de segurança periódicas e as tratativas necessárias para os equipamentos mais críticos (DUTRA et al., 2006).

2.2 CORROSÃO SOB ISOLAMENTO (CUI)

A corrosão sob isolamento é um problema significativo na indústria, cuja importância vem sendo cada vez mais reconhecida. Trata-se de uma reação eletroquímica que ocorre quando a água é retida sob o isolamento, criando um ambiente propício para a corrosão. A CUI é particularmente desafiadora porque permanece oculta até que seja tarde demais para buscar uma solução sustentável, resultando em custos elevados para reparo e substituição de equipamentos (JAVAHERDASHTI, 2014).

A corrosão sob isolamento depende da presença de água líquida para ocorrer e o isolamento pode atuar como um “fator cataplasma”, aumentando a concentração local de espécies corrosivas. Isso torna fundamental a identificação precoce e a prevenção da CUI para evitar danos estruturais e garantir a integridade dos equipamentos industriais. O uso de revestimentos hidrofóbicos e outras tecnologias de proteção pode ser eficaz na prevenção da CUI. A implementação de estratégias de

manutenção preventiva e inspeção regular também é crucial para detectar e mitigar a CUI antes que cause danos significativos (JAVAHERDASHTI, 2014).

Os isolamentos, embora importantes para proteger os materiais subjacentes de efeitos ambientais adversos, podem ocultar a CUI, tornando-a difícil de detectar até que cause danos graves. A CUI pode resultar em vazamentos, incêndios e falhas catastróficas, com custos elevados para reparo e substituição de equipamentos (KIM; OH; CHANG, 2008; STANDARD, 2010; JAVAHERDASHTI, 2014).

Estudos mostram que a CUI é responsável por uma grande parcela dos custos de manutenção em tubulações e equipamentos industriais. Por exemplo, um estudo da ExxonMobil estima que entre 40% e 60% dos custos de manutenção de tubulações estão relacionados à CUI. Além disso, a CUI pode ter consequências graves para a segurança, especialmente quando envolve materiais tóxicos ou inflamáveis (AMER et al., 2019; JAVAHERDASHTI, 2014).

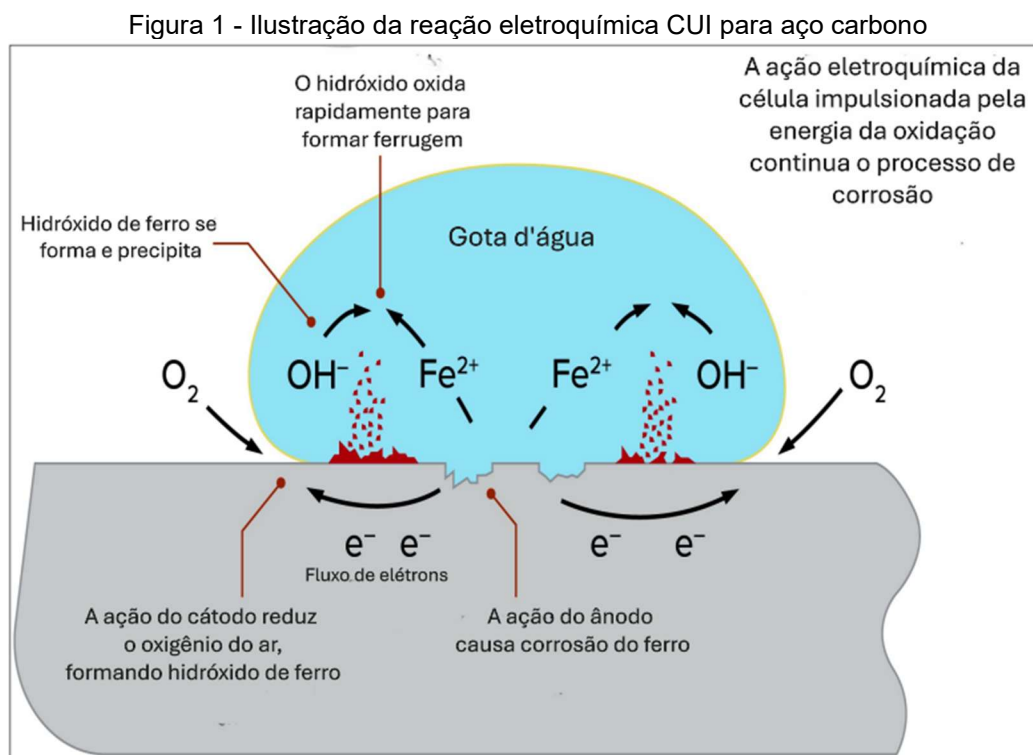
A probabilidade de falha (POF) e as consequências de uma falha (COF) são altas no caso da CUI. A idade do equipamento não é o único fator determinante; as condições de trabalho e a atmosfera exposta também desempenham um papel crucial. A CUI pode ocorrer em instalações novas ou antigas, e sua complexidade pode variar dependendo do ambiente, como em ambientes marinhos, onde múltiplos mecanismos de falha podem estar envolvidos (CAINES; KHAN; SHIROKOFF, 2013; JAVAHERDASHTI, 2014).

O processo de CUI é intensificado por problemas de vedação, juntas mal projetadas, materiais isolantes que absorvem água e contaminantes agressivos, como cloretos. A faixa de temperatura mais crítica para a ocorrência da CUI varia de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma vez que a água pode permanecer em estado líquido ao entrar em contato com o metal. Nos aços inoxidáveis, além da corrosão localizada, existe o perigo de trincamento por corrosão sob tensão (Cl^- SCC), o que agrava ainda mais o mecanismo. O principal desafio é que os danos costumam ser ocultos, tornando-se visíveis apenas quando o isolamento começa a mostrar sinais externos de deterioração, como manchas, deformações ou ferrugem em áreas de drenagem.

A corrosão sob isolamento só acontece quando há água ou umidade no substrato de aço, condição que normalmente se verifica em decorrência de falhas no sistema de isolamento ou danos durante a execução do serviço. A água pode entrar no sistema por diversas origens, como precipitação, sistemas de deluge, vazamentos

de rastreamento de vapor ou condensação na superfície do metal em condições de alta umidade (PRUETER, 2021).

A corrosão sob isolamento é uma reação eletroquímica que requer quatro componentes: anodo, cátodo, eletrólito e circuito elétrico ou caminho. A água oxigenada é normalmente utilizada como eletrólito, podendo apresentar contaminantes que aumentam a velocidade de corrosão. A Figura 1 apresenta um esquema dessa reação eletroquímica aplicada ao aço carbono, em que a corrosão pode ser afetada por elementos como a absorção de água pelo isolamento térmico, a temperatura de operação e a integridade do sistema de isolamento. Logo, sistemas de isolamento que absorvem menos água e secam mais rapidamente geralmente apresentam maior resistência à corrosão (PRUETER, 2021).



Fonte: Prueter (2021)

2.2.1 Fatores Importantes na Corrosão Sob Isolamento (CUI)

Existem cinco fatores cruciais que influenciam a CUI: o material de isolamento, o material de revestimento, o material metálico do substrato do equipamento, a atmosfera e o design. Cada um desses fatores desempenha um papel significativo na

determinação da probabilidade e gravidade da CUI, tornando essencial considerá-los na prevenção e mitigação desse problema (SOUZA et al., 2023).

Os materiais de isolamento comumente utilizados incluem silicato de cálcio, perlita expandida, fibras minerais artificiais, vidro celular, espumas orgânicas, fibras cerâmicas, amianto e materiais à base de magnésio. Alguns desses materiais, como o amianto, podem conter cloretos, que podem contaminar a água acumulada sob o isolamento e contribuir para a corrosão. É fundamental selecionar materiais de isolamento adequados para prevenir a CUI. Além disso, revestimentos específicos, como alumínio termicamente pulverizado (TSA), invólucro de folha de alumínio e epóxi fenólico, podem ser utilizados para proteger substratos de aço carbono e aço inoxidável (JAVAHERDASHTI, 2014).

O material de revestimento é fundamental na prevenção da CUI e deve ser aplicado sob o isolamento. Revestimentos protetores de grau de imersão são altamente recomendados para substratos de aço carbono e aço inoxidável austenítico/duplex. Além disso, em casos de altas temperaturas, a proteção catódica (CP) pode ser utilizada, mas é importante notar que temperaturas elevadas podem alterar os critérios de proteção, exigindo potenciais mais negativos para alcançar proteção adequada (NACE, 2004; JAVAHERDASHTI, 2014).

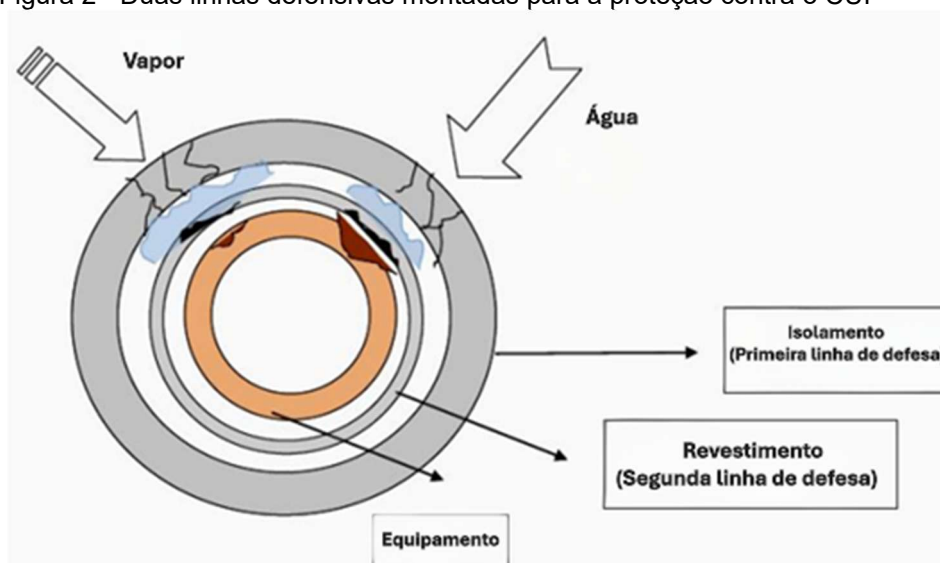
Os materiais metálicos mais comuns utilizados na indústria são aço carbono, aço inoxidável austenítico e aço inoxidável duplex. A CUI nesses materiais é influenciada pela estrutura cristalina e composição química de cada um. O aço carbono é mais suscetível à corrosão generalizada e localizada, enquanto os aços inoxidáveis austeníticos e duplex são mais propensos à corrosão por pitting e fissuração por corrosão sob tensão. A faixa de temperatura crítica para CUI varia entre 48°C e 93°C, independentemente do material ferroso. A presença de espécies corrosivas, como cloretos e sulfatos, pode acelerar a corrosão em todos esses materiais. Além disso, os limites de temperatura para fissuração por corrosão sob tensão dependem do tipo de liga, variando de 50°C a 120°C para diferentes tipos de aços inoxidáveis (BROSSIA, 2007).

A atmosfera desempenha um papel crucial na criação e manutenção da CUI. Ela fornece água externa, seja na forma líquida ou vapor, que se acumula sob o isolamento e fornece o eletrólito necessário para a corrosão eletroquímica. As fontes de água externa incluem chuva, spray de água do mar, água subterrânea, além de fontes industriais como derivações de torres de resfriamento e condensação em

superfícies frias. Além disso, a atmosfera pode conter espécies corrosivas como cloretos e sulfatos, especialmente em ambientes marinhos ou industriais, que podem contaminar a água acumulada e intensificar a corrosão. A combinação de água e espécies corrosivas pode levar a falhas catastróficas, especialmente em plantas industriais localizadas perto do mar, onde a concentração de poluentes corrosivos é alta. Além disso, espécies corrosivas já presentes no isolamento podem ser lixiviadas para a água acumulada, tornando-a corrosiva (STANDARD, 2010; HADZIHAFIZOVIC, 2023).

O projeto é um fator crucial na prevenção da CUI, podendo ser tão importante quanto os outros quatro fatores combinados. O projeto inclui tanto o design do equipamento quanto o layout da planta industrial. Para que a CUI ocorra, três etapas essenciais devem ser atendidas: entrada de água, acúmulo de água sob o isolamento e dissolução de espécies corrosivas. Se alguma dessas etapas for evitada, a CUI pode ser prevenida. Existem três possibilidades principais: equipamento sem isolamento, equipamento com isolamento e equipamento com revestimento. A escolha do projeto adequado depende de fatores como temperatura de operação, risco de exposição e economia de combustível. A presença de um revestimento denso pode fornecer uma segunda linha de defesa contra a CUI, mas se o revestimento for danificado, a água pode se acumular e se tornar corrosiva, levando à corrosão do equipamento, como mostrado na Figura 2 (JAVAHERDASHTI, 2014; HADZIHAFIZOVIC, 2023).

Figura 2 - Duas linhas defensivas montadas para a proteção contra o CUI



Fonte: Javaherdashti (2014)

A inspeção é um elemento-chave para a detecção precoce e tratamento da CUI. Existem muitos métodos e técnicas que podem ser aplicados e ser classificados em inspeção destrutiva e inspeção não destrutiva. A inspeção visual com remoção total do isolamento é considerada a melhor opção, pois permite ao inspetor ver diretamente as áreas afetadas pela CUI, mas é também a mais cara e demorada. Já as técnicas não destrutivas, como a tecnologia de corrente pulsada (Pulsed Eddy Current) e micro-ondas para detecção de água sob o isolamento, permitem obter dados sobre a CUI sem remover o material de isolamento. Uma técnica promissora é a "Dispersão de Nêutrons", que utiliza a capacidade da água de desacelerar nêutrons de alta velocidade. Essa técnica é rápida, precisa e pode ser usada para identificar áreas potencialmente afetadas pela CUI, mesmo em locais de difícil acesso. No entanto, é importante notar que essa técnica apenas registra áreas com água acumulada sob o isolamento e não mede taxas de corrosão ou detecta corrosão diretamente (STANDARD, 2010; JONES et al., 2012; JAVAHERDASHTI, 2014).

Diante disso, a CUI é um problema crítico que requer atenção especial dos engenheiros de corrosão e integridade. A detecção precoce e a prevenção são fundamentais para evitar danos estruturais e garantir a segurança e eficiência dos equipamentos industriais.

2.3 NORMAS E REGULAMENTAÇÃO

As normas e regulamentações desempenham um papel fundamental na garantia da segurança e integridade de equipamentos pressurizados. No Brasil, as Normas Regulamentadoras (NR) do Ministério do Trabalho e Emprego estabelecem diretrizes para assegurar um ambiente de trabalho seguro e saudável. A NR-13, em particular, é voltada para a segurança na operação de caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Essa norma estabelece requisitos mínimos para inspeção, documentação técnica, treinamento, procedimentos de segurança e registro de ocorrências. A responsabilidade técnica é atribuída a um Profissional Legalmente Habilitado (PLH), que deve garantir a elaboração e aprovação de documentos necessários para a gestão de reparos. Embora a NR-13 não forneça detalhes técnicos aprofundados, ela enfatiza a importância da segurança e integridade das instalações (DUTRA et al., 2006; DE ARAUJO; TEODÓSIO; CAMPOS, 2019; BRASIL, 2022).

A NR-13 aborda vários aspectos importantes para a segurança em equipamentos pressurizados, incluindo:

- **Inspeção de Segurança:** A norma determina a realização de inspeções periódicas para verificar a conformidade das instalações e identificar possíveis danos. Essas inspeções são fundamentais para garantir a segurança operacional e prevenir acidentes.
- **Documentação Técnica:** As empresas devem manter documentação técnica atualizada das instalações, incluindo projetos, especificações, registros de inspeções e laudos. Essa documentação é essencial para garantir a rastreabilidade e a conformidade com as normas.
- **Treinamento e Qualificação:** A NR-13 enfatiza a importância de treinamento e qualificação adequados para os profissionais envolvidos na operação e manutenção de equipamentos pressurizados. Isso garante que os trabalhadores tenham o conhecimento necessário para lidar com situações de risco.
- **Procedimentos de Segurança:** A norma estabelece a necessidade de elaboração e implementação de procedimentos operacionais e de segurança. Esses procedimentos devem garantir que as atividades relacionadas a equipamentos pressurizados sejam realizadas de forma segura.
- **Registro de Segurança:** A NR-13 exige o registro de todas as ocorrências relevantes, como acidentes, incidentes e falhas operacionais. Esses registros são fundamentais para analisar e prevenir a repetição de eventos indesejados.

Enfim, a NR-13 é uma norma fundamental para garantir a segurança em equipamentos pressurizados no Brasil. A conformidade com essa norma é essencial para prevenir acidentes e garantir a integridade física dos trabalhadores. As empresas e profissionais envolvidos na operação e manutenção de equipamentos pressurizados devem estar cientes das exigências e responsabilidades estabelecidas pela NR-13, garantindo assim a segurança e a eficiência das operações (DUTRA et al., 2006; DE ARAUJO; TEODÓSIO; CAMPOS, 2019; BRASIL, 2022).

2.4 ASME PCC-2

A norma ASME PCC-2 estabelece procedimentos para a reparação de equipamentos, tubulações e acessórios em uso, abrangendo práticas de projeto, fabricação, inspeção e teste, podendo ser temporárias ou permanentes. Além disso, a norma trata da reparação de componentes quando necessário, fundamentada em inspeção e avaliação de falhas, mas não abrange os métodos de inspeção e avaliação de falhas. Sendo assim, a norma ASME PCC-2 é fundamental para assegurar a segurança e a integridade de equipamentos e tubulações em operação, oferecendo diretrizes técnicas para reparos eficientes (ASME PCC-2, 2022).

2.4.1 Placas de inserção soldadas a topo em componentes de pressão

2.4.1.1 Descrição e Limitações

O reparo de componentes de pressão utilizando placas de inserção soldadas por butt-weld envolve a substituição de material da fronteira de pressão em um componente de pressão por uma placa de inserção fixada por soldas de penetração total. Esse método é aplicável a cascas cilíndricas, esféricas e cônicas, bem como a componentes de pressão planos. Pode ser utilizado para cascas de curvatura simples e dupla, além de outros componentes de pressão, como cabeças formadas, desde que a curvatura da seção substituída corresponda à curvatura da peça de pressão original (ASME PCC-2, 2022, p. 4).

Esse método de reparo destina-se a substituir porções de cascas de vasos de pressão ou paredes de tubos que foram danificadas por trincas, desgaste local devido à erosão, corrosão e outros mecanismos de dano. A placa de inserção pode conter um ou mais bocais ou bocas de visita (ASME PCC-2, 2022, p. 4-5).

Dentre as limitações, destacam-se:

- **Substituição de Componente Inteiro:** A substituição de um componente inteiro, placa de casca ou curso completo de casca cilíndrica, segmento circular completo de uma esfera, cabeça completa ou seção de tubo não é considerada nesse método de reparo.
- **Requisitos Adicionais:** Além das orientações gerais, é necessário considerar os requisitos adicionais e limitações especificados na Parte 1 do padrão.

- Considerações Adicionais: Ao aplicar esse método de reparo, é fundamental considerar a compatibilidade de materiais, condições operacionais para a vida útil pretendida do componente, ajuste e soldagem para minimizar tensões residuais e distorções, além de limitações em exames não destrutivos e testes de pressão.
- Cargas: Esse método pode ser utilizado para equipamentos sujeitos a pressão interna ou externa. No entanto, para componentes sujeitos a pressão externa, é necessário considerar qualquer perda de resistência à flambagem devido a distorções permanentes ou desalinhamento no componente reparado. Para componentes sujeitos a carregamento cíclico, é necessário avaliar o efeito de distorções permanentes na vida útil à fadiga do componente reparado.
- Revestimento ou Camada de Proteção contra Corrosão: Esse método de reparo também pode ser utilizado em vasos que possuem revestimento ou camada de proteção contra corrosão. A placa de inserção deve ser compatível com os materiais existentes e adequada para o serviço pretendido.
- Metais Dissimilares: O uso de materiais dissimilares não é proibido, mas os materiais devem atender às propriedades mecânicas mínimas exigidas para o componente de pressão e ser cuidadosamente avaliados quanto à compatibilidade entre os materiais dissimilares e o ambiente de serviço. Se houver possibilidade de fadiga térmica, é necessário considerar o potencial de fissuração acelerada na combinação de metais dissimilares.

2.4.1.2 Projeto de Reparo com Placas de Inserção

A espessura da placa de inserção, material e soldas devem atender aos requisitos de projeto do código de construção aplicável ao componente de pressão existente no qual está sendo instalado e ser consistente com a eficiência da junta ou fatores de qualidade da junta utilizados no projeto original, exceto conforme permitido no parágrafo 201-3.3. As tensões admissíveis devem ser as mesmas do código de construção aplicável ao componente existente (ASME PCC-2, 2022, p. 5).

As placas de inserção e soldas devem ser do mesmo material do componente de pressão existente ou de outro material que tenha pelo menos a mesma tenacidade à trinca e tensão admissível, conforme os requisitos do código de construção aplicável e adequado para o serviço pretendido. Onde materiais ASME são utilizados, o material

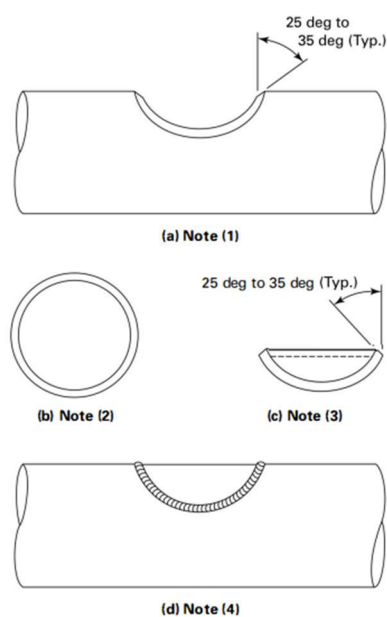
de substituição deve ter a mesma designação ASME P-Number do material do componente de pressão no qual a inserção está sendo instalada.

A **espessura da placa de inserção** não deve ser inferior à espessura nominal do material ao qual se solda. Se uma placa de inserção mais fina do que a espessura nominal do material ao qual se solda precisar ser utilizada, ela deve ser avaliada para o serviço pretendido utilizando as regras do código de construção aplicável ao componente de pressão ou o código de pós-construção aplicável (ASME PCC-2, 2022, p. 5).

As **placas de inserção retangulares e quadradas** devem ter cantos arredondados com um raio, exceto quando toda a placa de casca for substituída. Placas de inserção retangulares e quadradas com espessura entre 13 mm e 25 mm devem ter um raio de canto de 75 mm ou maior. Placas de inserção com espessura inferior a 13 mm podem ter raios de canto menores. Placas de inserção com espessura superior a 25 mm devem ter um raio de canto de 150 mm ou maior (ASME PCC-2, 2022, p. 5).

As **inserções afixadas** em tubos podem ser recortes redondos ou oblongos, conforme mostrado na Figura 3, ou recortes retangulares com cantos arredondados (ASME PCC-2, 2022, p. 5-6).

Figura 3 - Inserção embutida em tubos



Fonte: ASME PCC-2 (2022, p. 6)

Note que na figura 2 mostram detalhes de juntas e chanfros de borda para inserções soldadas em tubos, incluindo vista lateral do corte com chanfros de borda de 25° a 35°, vista plana da inserção com detalhe de junta de um lado e vista lateral da inserção soldada no tubo, sendo que outros detalhes de junta e chanfros podem ser utilizados conforme apropriado para cada tipo de junta soldada.

O **tamanho da placa de inserção** deve ser suficiente para substituir toda a área do componente de pressão existente que foi avaliada como não estando apta para operação contínua e garantir que todas as soldas estejam em material sólido (ASME PCC-2, 2022, p. 5-6).

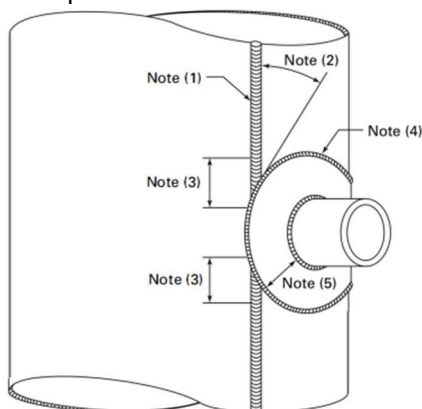
Quanto a **estabilidade estrutural em cortes**, ao realizar cortes em cascas de vasos de pressão para substituição de seções danificadas por placas de inserção, é fundamental considerar a estabilidade estrutural das bordas não suportadas das aberturas resultantes. Uma avaliação detalhada deve ser realizada para determinar a necessidade de instalação de suportes temporários ao redor das bordas não suportadas, garantindo assim a estabilidade e prevenindo deformações indesejadas durante a remoção da seção danificada e a subsequente substituição pela placa de inserção (ASME PCC-2, 2022, p. 5-6).

Para as **placas de Inserção com Bocais**, deve-se levar em consideração o reforço do bocal/boca de visita em placas de inserção com bocais deve atender aos requisitos de projeto e detalhes de solda do código de construção aplicável ao componente de pressão. O diâmetro mínimo da placa de inserção com um bocal deve ser o maior dos seguintes: (a) para todas as montagens de bocal/boca de visita, o diâmetro da penetração do bocal/boca de visita mais a largura necessária para reforço do bocal e quaisquer chanfros de borda; (b) para montagens de bocal/boca de visita de aço carbono e baixa liga para as quais a solda do bocal para a placa de reforço (casca) não é tratada termicamente após a soldagem, o diâmetro da placa de inserção necessário para manter uma distância mínima de 150 mm entre a solda de fixação do bocal e a borda mais próxima da solda de topo da placa de inserção (ASME PCC-2, 2022, p. 5-6).

A figura 4 ilustra uma solda de topo existente na casca ou cabeça do vaso, com uma solda de topo da placa de inserção adjacente, destacando a necessidade de ensaios não destrutivos, como radiografia total (RT) ou ultrassom (UT), ou partículas magnéticas (MT) ou líquido penetrante (PT), tanto na solda existente quanto na solda

da placa de inserção, com uma distância mínima de 100 mm de cada lado da interseção com a placa de inserção (ASME PCC-2, 2022, p. 6).

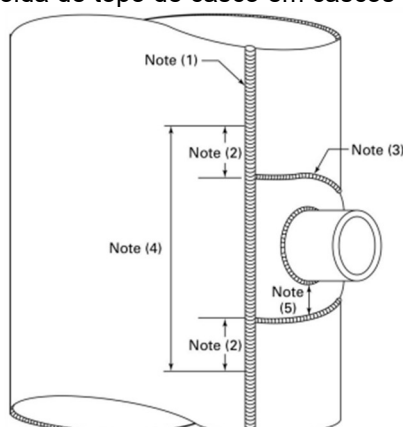
Figura 4 - Placa de inserção nivelada (com ou sem bico/bueiro) com sua solda de topo cruzando a solda de topo existente em cascos ou cabeças



Fonte: ASME PCC-2 (2022, p. 6)

Já na figura 5 detalha o procedimento para reparo de solda de topo em casca cilíndrica, envolvendo corte da solda existente com comprimento mínimo de 150 mm de cada lado da solda de topo da placa de inserção, chanframento das bordas e posterior soldagem após a conclusão da solda da placa de inserção, seguida de ensaios não destrutivos, como radiografia total (RT) ou ultrassom (UT), ou partículas magnéticas (MT) ou líquido penetrante (PT), em ambos os lados da nova solda (ASME PCC-2, 2022, p. 7).

Figura 5 - Solda de topo de placa de inserção tipo "casinha de cachorro" com intersecção (com ou sem bico/passador) com solda de topo de casco em cascos e cabeças de embarcações



Fonte: ASME PCC-2 (2022, p. 7)

2.4.1.3 Fabricação

A fabricação de placas de inserção envolve corte e conformação, onde os chanfros de borda são preparados por métodos como corte térmico, goivagem a arco, usinagem ou retificação, seguidos de exame e reparo de indicações inaceitáveis. A conformação pode ser realizada por qualquer processo que não prejudique as propriedades do material, incluindo enrolamento ou prensagem para ajuste à curvatura da casca do vaso. Placas de aço carbono e baixa liga devem ser tratadas termicamente após conformação a frio se a deformação exceder 5%, enquanto outros materiais devem seguir os limites do código de construção aplicável. Além disso, o alinhamento das bordas da solda de topo deve estar dentro dos limites do código de construção, com transição cônica se necessário (ASME PCC-2, 2022, p. 7).

A soldagem entre a placa de inserção e o componente de pressão existente deve ser uma solda de topo de penetração total, com juntas soldadas que atendam aos requisitos mínimos de resistência e tenacidade do código de construção aplicável. Procedimentos de soldagem, soldadores e operadores devem ser qualificados, incluindo testes de impacto, e materiais e processos de soldagem devem ser permitidos pelo código aplicável. As soldas devem ser realizadas em material não ou em áreas danificadas avaliadas como aceitáveis, com limpeza adequada das áreas adjacentes. O ajuste das placas de inserção é crucial para a integridade do reparo, e soldas de um lado devem utilizar processos que forneçam uma solda aceitável no lado oposto. Finalmente, as superfícies acessíveis das soldas de topo devem ser retificadas para um contorno suave, com redução de espessura controlada (ASME PCC-2, 2022, p. 7).

O espaçamento de soldas entre juntas de topo adjacentes não intersectantes em componentes de pressão de aço carbono e baixa liga deve seguir critérios específicos: para soldas de topo não tratadas termicamente, o espaçamento mínimo é determinado pela espessura da solda mais espessa, mas pode ser reduzido se as soldas forem retificadas e examinadas por radiografia, ultrassom, partículas magnéticas ou líquido penetrante. Se a primeira solda de topo for aliviada de tensão antes da segunda, o espaçamento mínimo deve ser de pelo menos duas vezes a espessura da solda mais espessa (ASME PCC-2, 2022, p. 8).

As soldas de topo intersectantes em componentes de pressão de aço carbono e baixa liga devem ser evitadas sempre que possível. Quando inevitável, a solda de topo da placa de inserção deve intersectar a solda existente em um ângulo mínimo de 30 graus ou ser projetada para intersectar em um ângulo de 90 graus. Além disso, a

solda de topo da placa de inserção e 100 mm da solda de topo existente devem ser examinadas por partículas magnéticas ou líquido penetrante após a conclusão de ambas as soldas (ASME PCC-2, 2022, p. 8).

O tratamento térmico pós-soldagem (PWHT) deve ser realizado nas soldas entre a placa de inserção e o componente de pressão existente, bem como nas soldas entre o bocal ou registro e a placa de inserção, sempre que exigido pelo código de construção original ou pelo código de pós-construção aplicável, ou por razões de processo. Previsões adequadas devem ser tomadas para evitar distorções durante o PWHT. Além disso, reparos que exigem PWHT devido a condições de serviço devem ser tratados termicamente, a menos que outros meios sejam fornecidos para garantir a adequação das juntas soldadas às condições de serviço. O PWHT deve ser realizado de acordo com o código de construção aplicável, a menos que o proprietário exija condições mais rigorosas (ASME PCC-2, 2022, p. 9).

2.4.1.4 Exame de Soldas

Todas as soldas de placas de inserção em componentes de pressão devem ser examinadas por métodos de radiografia (RT) ou ultrassom (UT), conforme exigido pelo código de construção ou pós-construção aplicável. Além disso, recomenda-se a exame do passe raiz por métodos de partículas magnéticas (MT) ou líquido penetrante (PT) quando UT for utilizado (ASME PCC-2, 2022, p. 9).

Todas as superfícies soldadas finalizadas devem ser examinadas por métodos MT e PT, a menos que seja exigido exame de 100% RT ou UT. Não são permitidas indicações de trincas, fusão incompleta ou penetração incompleta. Para tubulações, todos os requisitos de exame não destrutivo devem estar em conformidade com o código de construção ou pós-construção aplicável. Para placas de inserção retangulares ou quadradas, as soldas ao redor dos cantos arredondados devem ser examinadas por RT ou UT. Alternativamente, a passe raiz, a solda após metade do chanfro ser preenchida e a solda concluída podem ser examinadas por MT ou PT. Além disso, soldas próximas e intersectantes têm requisitos adicionais de exame específicos (ASME PCC-2, 2022, p. 9).

2.4.1.5 Testes de Pressão

Se possível, as soldas de placas de inserção devem ser submetidas a testes de pressão conforme exigido pelo código de pós-construção aplicável. Alternativamente, exames não destrutivos podem ser realizados em vez de testes de pressão se permitido pelo código aplicável (ASME PCC-2, 2022, p. 9).

Antes de realizar testes de pressão, deve-se considerar o efeito da deterioração e fragilização devido às condições de serviço anteriores nas características de tenacidade à fratura do componente de pressão. Além disso, devem ser tomadas precauções adicionais em caso de teste pneumático para reduzir o risco de fratura frágil (ASME PCC-2, 2022, p. 9).

Um teste de vazamento separado pode ser desejável para verificar vazamentos antes de pressurizar o componente à pressão máxima de teste. Esse teste deve ser realizado a uma pressão segura substancialmente menor que a pressão máxima de teste. Todos os testes e inspeções devem ser realizados antes da aplicação de isolamento ou revestimentos (ASME PCC-2, 2022, p. 10).

3 METODOLOGIA

A finalidade desta seção é detalhar as medidas tomadas durante uma parada programada para inspeção e manutenção de um vaso de pressão, do tipo trocador de calor. Durante essa parada, foram identificadas descontinuidades em um de seus componentes, exigindo um conserto emergencial para restaurar a operação dentro do prazo definido.

Nesta inspeção, notou-se uma anormalidade na estrutura do costado causada por corrosão sob isolamento por falha na vedação do isolamento térmico, comprometendo a integridade física e operacional do equipamento. O equipamento foi temporariamente parado para manutenção, reparado e, em seguida, liberado para uso.

Foi realizada uma inspeção de segurança extraordinária parcial externa no trocador de calor para avaliar sua integridade física e operacional, conforme exigido pela NR-13.

Após a remoção do isolamento térmico, foi observada uma região com perda de espessura e rasgo no costado do equipamento devido à corrosão sob isolamento acentuada, causada por falha no esquema de pintura. Foi realizado tratamento da

superfície utilizando agulheiro pneumático e máquina monti para desincrustação da corrosão.

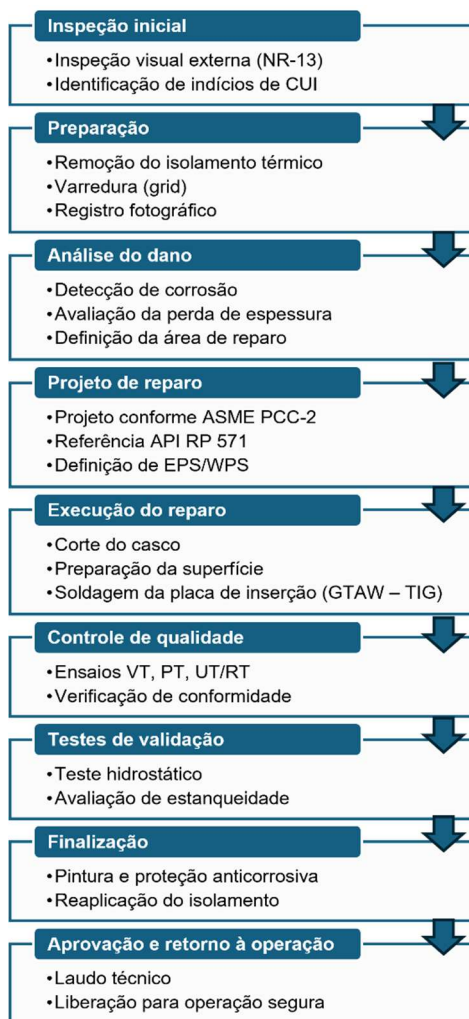
Além disso, elaborou-se um Projeto de Alteração e Reparo, seguindo a norma ASME PCC-2, de um reparo por Placas de inserção soldadas a topo em componentes de pressão (Artigo 201 do ASME PCC-2), a fim de recuperar a integridade operacional do equipamento, onde foi definido o procedimento de execução com material, ensaios, controle de qualidade e qualificação de pessoal (ASME PCC-2, 2022).

Realizou-se um reparo com a finalidade de restabelecer a integridade estrutural do trocador de calor utilizando o método de reparo por Butt-Welded Insert Plates e Weld Filler.

Após a execução do reparo o equipamento foi inspecionado e aprovado para operar com segurança.

O fluxograma da figura 6 apresenta de forma lógica e organizada as etapas do processo de detecção, análise, reparo e validação de equipamentos afetados por CUI, sendo estruturado a partir da metodologia aplicada no presente estudo de caso.

Figura 6 – Fluxograma do processo de reparo por CUI



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

A ação executada para investigar um vazamento na parte traseira do equipamento (Figura 7). Depois de remover o revestimento, foi detectada uma área com corrosão intensa e generalizada, com perda significativa de espessura e rasgo devido à fragilidade do material (Figura 8).

Figura 7 - Vaso de pressão/Trocador de Calor com isolamento térmico



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Figura 8 - Condição do equipamento após remoção do isolamento térmico.



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Utilizou-se agulheiro pneumático e máquina monti para remover a corrosão (Figura 9).

Figura 9 - Superfície do equipamento após tratamento de superfície



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

O trocador de calor apresentou um dano significativo devido à CUI, resultando em um vazamento e comprometendo a integridade estrutural do equipamento. A análise do dano revelou que a corrosão sob isolamento foi a causa raiz do problema, levando a uma perda total de espessura na área afetada (Figura 10).

Figura 10 - Condição do equipamento após remoção do isolamento térmico



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Foi realizado uma varredura no equipamento, para verificar a extensão dos danos e delimitar a área da placa de inserção. Na Figura 11 é possível verificar a divisão do grid no equipamento e a tabela 1 contempla o grid de varredura planejado.

Figura 11 - Grid de varredura



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Tabela 1 - Grid de varredura planejado

GRID DE VARREDURA PLANIFICADO														
INSPEÇÃO LONGITUDINAL PLANA	INSPEÇÃO PLANA CIRCUNFERENCIAL													CIRCUNFERENCIAL PERFIL CRÍTICO DE ESPESSURA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
A	12,6	12,8	12,8	11,0	11,8	10,9	12,4	12,4	12,4	X	X	11,5	11,5	10,9
B	12,0	12,0	12,8	12,5	9,2	9,2	8,8	12,6	12,6	X	X	X	12,6	8,8
C	12,6	12,2	12,8	12,1	10,9	10,0	9,0	10,5	12,6	12,6	12,6	10,5	12,6	10,5
D	12,6	12,4	12,4	12,0	5,3	0,0	7,0	6,8	11,1	9,0	12,2	9,6	12,6	0,0
E	X	11,0	9,8	9,8	5,5	5,5	4,0	9,2	9,2	9,2	9,2	7,5	8,5	4,0
F	X	X	11,0	11,0	11,6	11,5	8,5	7,5	7,5	11,6	11,0	6,9	6,9	6,9
G	X	X	X	X	11,0	11,0	10,2	9,0	12,6	12,6	10,8	10,8	12,6	9,0
H	X	X	X	X	12,6	12,6	8,0	8,0	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	8,0
I	X	X	X	X	12,6	9,0	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	9,0
J	X	X	X	10,0	10,0	12,0	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	10,0
LONGITUDINAL PERFIL CRÍTICO DE ESPESSURA	12,0	11,0	9,8	9,8	5,3	0,0	4,0	6,8	7,5	9,0	9,2	6,9	6,9	X

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Para restaurar a integridade do equipamento, será realizado um reparo utilizando placas de inserção soldadas a topo (Butt-Welded Insert Plates) com dimensões de 900 mm x 300 mm. Esse método de reparo visa garantir a segurança e eficiência do equipamento, permitindo que ele volte a operar dentro dos padrões exigidos.

3.2 MATERIAIS APLICADOS

O vaso é projetado de acordo com código ASME seção VIII Divisão I. O costado do equipamento é feito de aço SA-516 Gr 70, uma escolha comum para aplicações de pressão devido à sua resistência e durabilidade. As especificações técnicas incluem uma tensão de tração de 70 ksi e uma tensão de escoamento mínima especificada de 38 ksi, garantindo que o material possa suportar as pressões e temperaturas exigidas. O lado tubo é feito de aço Duplex SA-789 WLD S32750.

As condições operacionais do lado casco do trocador de calor são bem definidas, com uma pressão de operação de 7,30 kgf/cm² e uma temperatura de operação de 145 °C. O fluido utilizado é água de aquecimento. O equipamento foi projetado para suportar pressões e temperaturas mais elevadas, com uma pressão de projeto de 13,05 kgf/cm² e uma temperatura de projeto de 175 °C. Essas especificações garantem que o equipamento possa operar de forma segura e eficiente, mesmo em condições adversas.

Especificações do equipamento:

- Material do costado ASTM A-516 Gr 70;
- Classe de pressão: #900;
- Tensile Strength (Tensão de Tração): 70 ksi;
- S.M.Y.S (Tensão de Escoamento Mínima Especificada): 38 ksi;
- Maximum Allowable Stress (Tensão máxima admissível): 23,2 ksi;
- Diâmetro: 19- ¼ IN (489 mm);
- Espessura nominal: 12,7 mm;
- Pressão de operação: 0,71500 MPa;
- Pressão de projeto: 1,28200 MPa;
- Pressão de teste hidrostático: 1,93100 MPa;
- Temperatura de operação: 145 °C;
- Temperatura de projeto: 175 °C;
- Fluido: Água de aquecimento.

3.3 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO

3.3.1 Técnica geral de soldagem do reparo por butt-welded insert plates e weld filler

Procedimentos de execução técnica é dado através do reparo do equipamento que será realizado utilizando a técnica de Butt-Welded Insert Plates e Weld Filler, seguindo os procedimentos técnicos gerais de soldagem. Os reparos e modificações de soldas devem estar em conformidade com o ASME BPVC Section VIII Division 1 e ASME PCC-2, garantindo a segurança e integridade do equipamento.

O Reparo por Insert Plate se dá através do mesmo que será instalado para cobrir toda a região mapeada e identificada no equipamento, com dimensões de 900 mm x 300 mm. A chapa do Insert Plate e as soldas devem ser do mesmo material do vaso de pressão existente ou de outro material que tenha a mesma resistência ao entalhe e tensão admissível.

A espessura da chapa do Insert Plate não deve ser menor do que a espessura nominal do material a ser soldado. Isso garante que o reparo seja realizado com a mesma resistência e durabilidade do material original.

Os biséis de borda da chapa do Insert Plate e do vaso de pressão devem ser preparados por corte térmico, usinagem ou esmerilhamento. Todas as bordas preparadas para soldagem devem ser examinadas por exame de líquido penetrante para detectar qualquer indicação inaceitável.

A solda entre a chapa do Insert Plate e o vaso de pressão existente deve ser de topo e penetração total. A montagem do Insert Plate é importante para a integridade do reparo, e os detalhes de solda e procedimentos de solda devem ser tais para facilitar a penetração total e minimizar a distorção e pontos planos devido ao encolhimento da solda.

As soldas executadas devem ser inspecionadas de acordo com requisitos mínimos, incluindo exame visual, líquido penetrante e ultrassom (UT) em 100% das juntas de topo. O objetivo é verificar a qualidade e integridade das soldas, detectar descontinuidades ou defeitos e garantir a integridade interna das soldas.

Os critérios para aceitação de descontinuidades de soldas de reparo devem seguir o padrão e código de construção ou pós-construção aplicável, especificamente o ASME VIII DIV 1 e ASME PCC-2. Isso garante que as soldas sejam realizadas com a mais alta qualidade e segurança, minimizando riscos e assegurando a confiabilidade do equipamento reparado.

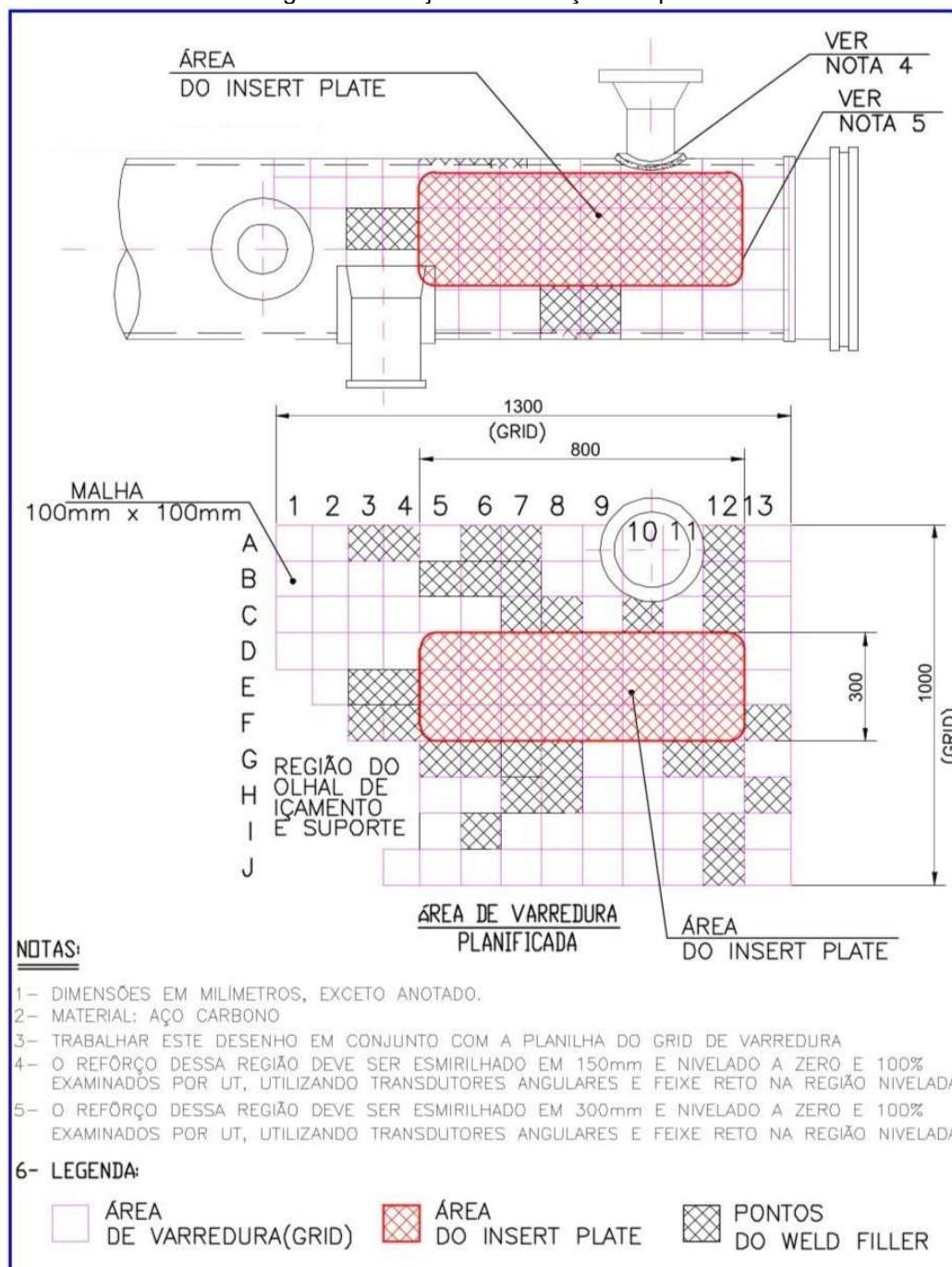
4 DESENVOLVIMENTO

Após a remoção do isolamento térmico foi observado um dano passante e perda de espessura causados por corrosão externa devido a saturação do material isolante e falha localizada no esquema de pintura associado a CUI afetando a integridade física e operacional do equipamento. Foram observadas falhas na vedação do isolamento, onde a umidade penetrou aliada ao tipo de isolamento (material higroscópico) e a característica operacional intermitente (não contínua) que favorece a faixa de temperatura ideal de CUI (entre -12 °C e 175 °C) levando ao molhamento do equipamento, causando o processo corrosivo.

De acordo com a prática recomendada API RP 571 (3ª Ed-2020) - Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry - a corrosão sob isolamento (3.22 Corrosion Under Insulation) é resultado de água retida sob isolamento. Vasos de pressão fabricados em aço carbono, com operação em faixa de temperatura entre -12 °C e 175 °C, com tempo de exposição a umidade (rica em cloretos), com isolamento do tipo higroscópico e operação intermitente, são fatores críticos mencionados no item 3.22.3 que o equipamento está sujeito. A corrosão sob isolamento ocorre em locais onde a água (umidade) ganha acesso através do isolamento ou tem locais de terminações como os flanges. A morfologia do dano por CUI em aço carbono é descrita como “tendo uma aparência áspera, irregular e um tanto esburacada, geralmente coberta por uma incrustação solta, escamosa e não protetora. A corrosão será localizada onde quer que o metal tenha sido mantido úmido pelo isolamento úmido”. Essa descrição de dano se assemelha ao dano evidenciado nas Figuras 8 e 9.

O Projeto de Alteração e Reparo (Figura 12) seguiu a norma ASME PCC-2, artigo 201, Placas de inserção soldadas a topo em componentes de pressão. O Insert Plate foi instalado de forma a cobrir toda a região mapeada e identificada no equipamento como: D-5, D-6, D-7, D8-, D-9, D-10, D-11, D-12, D-13, E-5, E-6, E-7, E-8, E-9, E-10, E-11, E-12, E-13, F-5, F -6, F -7, F -8, F -9, F -10, F -11, F -12, F -13. Butt-Welded Insert Plates (L= Comprimento, W= largura): L= 900 mm x W= 300 mm.

Figura 12 - Projeto de alteração e reparo



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

O material da chapa da placa de inserção foi de material semelhante do equipamento (ASTM A-106 Gr B), de mesmas propriedades e de mesma espessura nominal do material a ser soldado (12,7 mm). Os biséis de borda da chapa do Insert Plate e do vaso de pressão foram preparados por esmerilhamento, e a solda entre a chapa do Insert Plate e o vaso de pressão existente foram de topo e penetração total (Figuras 13 e 14).

Figura 13 - Corte do equipamento



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Figura 14 - Placa de inserção na posição para soldagem



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Foi desenvolvida uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS/WPS) especificamente para o serviço, utilizando o processo de soldagem TIG (GTAW), do tipo manual. O tipo da junta de topo e filete e chanfro V-Simples $75^\circ (+5^\circ)$. Espessura qualificada ≤ 20 mm, dentro da especificação da chapa a soldada. Metal de adição utilizado ER70S-3. Todas as posições de soldagem foram cobertas na EPS. Gás de proteção utilizado foi o Argônio, numa vazão de 10 a 20 L/min.

Para inspeção, foi realizado exame visual de solda em 100% das juntas, líquido penetrante na raiz e acabamento em 100% das juntas de topo, ensaio de ultrassom e teste hidrostático (Figura 15).

Figura 15 - Soldagem e ensaio da placa de inserção



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Após aprovação dos ensaios de visual de solda, líquido penetrante e ultrassom, o equipamento foi submetido a um teste hidrostático a uma pressão de 1,86 MPa a fim de garantir a qualidade do reparo e realizar o alívio de tensões (Figura 16).

Figura 16 - Teste Hidrostático



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Por fim, o equipamento foi aprovado e liberado para operação (Figura 17).

Figura 17 - Finalização do reparo e pintura do equipamento



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

5 CONCLUSÃO

A inspeção visual no equipamento revelou danos significativos causados por CUI devido à saturação do material isolante e falha no esquema de pintura. A análise detalhada do dano e a comparação com a prática recomendada API RP 571 confirmaram que o equipamento estava sujeito a fatores críticos que contribuíram para a corrosão.

Foi realizado um reparo estrutural através da instalação de placa de inserção soldadas a topo em componentes de pressão, conforme o Projeto de Alteração e Reparo, e ensaios não destrutivos foram conduzidos para avaliar a integridade do reparo. O teste hidrostático realizado apresentou condições físicas satisfatórias e o equipamento foi aprovado para retorno operacional.

A soldagem foi executada de acordo com a Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), que contém todas as informações relevantes para garantir a qualidade e segurança do processo. Isso assegura que as soldas sejam realizadas de forma consistente e confiável.

A inspeção das soldas e a interpretação de seus resultados foram realizadas de acordo com os requisitos da norma de projeto ASME BPVC Section VIII Division 1 e ASME PCC-2. Os ensaios não destrutivos requeridos foram conduzidos de acordo com procedimentos qualificados e normas aplicáveis, garantindo a detecção de possíveis defeitos.

Os soldadores foram qualificados de acordo com as normas de projeto aplicáveis, e o acompanhamento das atividades de soldagem foi realizado por inspetores certificados nível 1 e nível 2, conforme ABNT NBR 14842. Isso garante que as soldas tenham sido executadas com qualidade e segurança, atendendo aos padrões exigidos.

REFERÊNCIAS

ABENDI - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. **Inspeção Não Intrusiva em Vaso de Pressão: Prática Recomendada PRe-005**. Comissão Técnica de Inspeção Não Intrusiva, 2023. Disponível em: https://www1.abendi.org.br/wp-content/uploads/2023/09/PRe-005-Rev00_2023-INI.pdf. Acesso em: 20 de abril de 2025.

AMER, Ayman et al. A Prediction and Inspection Technology for Detecting Corrosion Under Insulation. In: **Materials Performance & Welding Technologies Conference & Exhibition.-Saudi Arabia**. 2019. p. 17.

API (American Petroleum Institute). **Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry**. ANSI/API RECOMMENDED PRACTICE 571, 3ª ed., 2020. Disponível em: < <https://pdfcoffee.com/api-571-2020-pdf-free.html>>. Acesso em: 3 out. 2025.

ASME PCC-2 (American Society of Mechanical Engineering). **Repair of pressure equipment and piping**. New York, USA, 2022. 1-10 p.

BOILER, A. S. M. E. **ASME boiler and pressure vessel code: an international code**. New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers, 1998.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Normas Regulamentadoras – NR. **Gov.br**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs>. Acesso em: 10 jan. 2024.

BROSSIA, S. Asm handbook, volume 13b, corrosion: Materials. **Corrosion**, v. 63, n. 10, p. 983, 2007.

CAINES, Susan; KHAN, Faisal; SHIROKOFF, John. Analysis of pitting corrosion on steel under insulation in marine environments. **Journal of Loss Prevention in the process Industries**, v. 26, n. 6, p. 1466-1483, 2013.

CHEN, Xuedong et al. Several failure analysis cases of pressure equipment under the conditions of complex medium environment. In: **Pressure Vessels and Piping Conference**. 2011. p. 739-747.

DE ARAUJO, Wildebran; TEODÓSIO, Felipe Liarte; CAMPOS, Paola Souto. Estudo da inspeção de uma caldeira flamotubular através dos códigos ASME e Nr-13. **ITEGAM-JETIA**, v. 5, n. 19, p. 90-97, 2019.

DEBIASI, Sivandro Fachin. **Inspeção de segurança nos vasos de pressão e seus equipamentos**. 2020. 31 f. Relatório de Estágio (Engenharia Mecânica) - Faculdade SATC, 2020.

DOS SANTOS, Sávio Ricardo. **Manutenção em vasos de pressão**. 2018. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Faculdade Pitágoras, 2018.

DUTRA, A. C. et al. NR-13: **Manual técnico de caldeiras e vasos de pressão**. Edição comemorativa 10 anos da NR-13. Brasília: MTE, 2006. 124 p.

GOLWALKAR, Kiran R.; KUMAR, Rashmi. Pressure Vessels. In: **Practical Guidelines for the Chemical Industry: Operation, Processes, and Sustainability in Modern Facilities**. Cham: Springer International Publishing, 2022. 55-80 p.

HADZIHAFIZOVIC, Dzevad. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. **Available at SSRN 4781875**, 2023.

JAVAHERDASHTI, Reza. Corrosion under Insulation (CUI): A review of essential knowledge and practice. **J. Mater. Sci. Surf. Eng**, v. 1, n. 2, p. 36-43, 2014.

JONES, Robin E. et al. Use of microwaves for the detection of water as a cause of corrosion under insulation. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 31, p. 65-76, 2012.

KIM, M. T.; OH, O. Y.; CHANG, S. Y. Analysis of degradation of a super-austenitic stainless steel for flue gas desulfurization system after a fire accident. **Engineering Failure Analysis**, v. 15, n. 5, p. 575-581, 2008.

MEGYESY, E. F.; BUTHOD, P. **Pressure Vessel Handbook**. Pv Pub Inc; 14^a edição, 2008.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte: UFMG**, 2012.

MOSS, Dennis R. **Pressure vessel design manual**. Elsevier, 2004.

NACE TM0404. **Standard Test Method for Evaluation of Pipeline Coating Systems Applied to Steel Pipeline**. NACE International, 2004. 12 p.

PRUETER, P. E. A Guide to Corrosion Under Insulation Management. **Inspectioning, Sep**, v. 30, 2021.

ROBERGE, Pierre R. et al. **Handbook of corrosion engineering**. New York: Mcgraw-hill, 2000.

SOUZA, Iago da Silva et al. Corrosion under insulation: a review. **Concilium**, v. 23, n. 15, p. 525-544, 2023.

SPENCE, John; TOOTH, Alwin S. **Pressure vessel design: concepts and principles**. CRC Press, 2012.

STANDARD, A. S. T. M. Standard Practice: The Control of Corrosion Under Thermal Insulation and Fireproofing Materials-A Systems Approach. **NACE Standard RP0198-2010, Item**, n. 21084, 2010.