



INTERNATIONAL
INTEGRALIZE
SCIENTIFIC

Fevereiro 2026

v. 6 n. 56

INTERNATIONAL INTEGRALIZE SCIENTIFIC ISSN/2675-520





INTERNATIONAL
INTEGRALIZE
SCIENTIFIC

Fevereiro 2026

v. 6 n. 56

INTERNATIONAL INTEGRALIZE SCIENTIFIC ISSN/2675-520



APRESENTAÇÃO

A International Integralize Scientific configura-se como um periódico científico mensal dedicado à difusão rigorosa e qualificada do conhecimento acadêmico. Com publicações predominantemente em língua portuguesa e contribuições consistentes em inglês e espanhol, a revista consolida-se como um espaço editorial multicultural, orientado ao diálogo científico internacional e ao fortalecimento da produção intelectual brasileira no cenário global.

Alinhada a elevados critérios de avaliação acadêmica, a revista privilegia a publicação de artigos inéditos de discentes e docentes provenientes de distintas áreas do saber, reconhecendo a ciência como campo plural e interdisciplinar. Cada manuscrito submetido passa por criteriosa análise técnico-científica em regime de avaliação por pares, assegurando integridade metodológica, consistência teórica e relevância social dos resultados apresentados. Dessa forma, a International Integralize Scientific reafirma seu compromisso institucional com a circulação responsável do conhecimento e com o fortalecimento da cultura de pesquisa.

Sua missão institucional consiste em promover a publicação e a disseminação de pesquisas inovadoras que contribuam efetivamente para o avanço científico e tecnológico, estimulando a reflexão crítica e o desenvolvimento de novas abordagens investigativas. A revista persegue a visão de consolidar-se como referência de credibilidade e excelência acadêmica no contexto internacional, valorizando a produção científica que se ancora em evidências sólidas, metodologias reconhecidas e padrões éticos elevados.

A governança editorial do periódico opera em plataforma Open Journal Systems (OJS), garantindo transparência processual, rastreabilidade, interoperabilidade com bases internacionais e aderência às melhores práticas em editoração científica. A revista possui registro ISSN nas versões impressa e digital e atribui Digital Object Identifier (DOI) a todas as publicações, mediante associação ativa à Crossref, assegurando autenticidade, persistência e ampla citabilidade internacional. Sua atuação editorial mantém alinhamento às boas práticas recomendadas por organizações científicas de referência e aos princípios éticos, técnicos e normativos que orientam a gestão de periódicos acadêmicos qualificados, incluindo diretrizes consolidadas no âmbito da normalização internacional.



Os valores que regem sua atuação editorial fundamentam-se no rigor científico, na ética acadêmica e na promoção de um ecossistema plural de saberes. A diversidade disciplinar, a integridade intelectual, a inovação, o impacto social da ciência e a construção de redes colaborativas entre pesquisadores de diferentes nacionalidades constituem pilares estruturantes do periódico. Ao incentivar a interlocução entre centros de pesquisa, universidades e comunidades científicas, a International Integralize Scientific contribui para o desenvolvimento de uma ciência aberta ao diálogo, orientada à melhoria contínua e sensível às demandas contemporâneas.

Sua periodicidade regular, o compromisso com padrões editoriais elevados e a interlocução permanente com autores e avaliadores qualificados reforçam a credibilidade da revista como veículo legítimo de disseminação científica. Trata-se, assim, de um espaço editorial que acolhe a investigação acadêmica com seriedade, estimulando trajetórias de produção intelectual consistente, ética e socialmente relevante.

Ao posicionar-se como ponte entre diferentes culturas, idiomas e tradições científicas, a International Integralize Scientific reafirma o papel estratégico dos periódicos acadêmicos no fortalecimento da ciência global e na promoção de um conhecimento capaz de transformar realidades, ampliar horizontes e projetar pesquisadores brasileiros e internacionais em um ambiente científico de excelência.



Expediente Editorial

A Revista International Integralize Scientific é um periódico científico mensal dedicado à promoção e disseminação de conhecimento acadêmico de alta qualidade, orientado por rigor metodológico e compromisso ético. Seu propósito central consiste em oferecer um espaço de visibilidade qualificada para pesquisas inéditas, contribuindo para o fortalecimento do debate científico e para o desenvolvimento contínuo das diversas áreas do saber. Ao assegurar processos criteriosos de avaliação e seleção editorial, o periódico reafirma sua vocação institucional de fomentar o pensamento crítico, incentivar o intercâmbio intelectual e apoiar a formação de novas gerações de pesquisadores.

Diretor Geral

Dr. Luan Trindade

Responsável pela direção estratégica do periódico, conduz a governança institucional da revista, assegurando o alinhamento entre política editorial, expansão científica e fortalecimento das relações acadêmicas nacionais e internacionais.

Diretora Administrativa

Profa. PhD Vanessa Sales

Docente e pesquisadora, com trajetória consolidada na área acadêmica, coordena os processos organizacionais e de gestão editorial, contribuindo diretamente para a qualidade científica, ética e institucional das publicações.

Editor de Design Gráfico e Diagramação

Balbino Júnior

Profissional responsável pela curadoria visual, normatização gráfica e composição editorial, assegurando harmonia estética, legibilidade acadêmica e conformidade técnica das edições.

Características do Periódico

Periodicidade:

Mensal

Idiomas de Publicação:

Português, Inglês e Espanhol

Plataforma Editorial:

Open Journal Systems (OJS)

Registro Internacional:

SSN 3085-654X

Identificação Digital:

DOI registrado e associado à Crossref

Contato Editorial

Para esclarecimentos, submissões, parcerias institucionais ou orientações relacionadas ao processo editorial, a equipe técnica encontra-se à disposição através do e-mail:

publicacao@iiscientific.com

Endereço Institucional

Florianópolis – Santa Catarina – Brasil
Rodovia SC-401, Bairro Saco Grande
CEP 88032-005

A International Integralize Scientific mantém atuação editorial orientada pelas boas práticas científicas internacionais, alinhada aos princípios de integridade acadêmica, transparência editorial e responsabilidade social do conhecimento. Seu corpo diretivo e técnico atua de maneira integrada para assegurar excelência, continuidade e relevância científica em cada edição publicada.

Corpo Editorial e Conselho de Revisores por Pares

A revista adota um rigoroso processo de avaliação científica por pares (peer review), conduzido preferencialmente no modelo doubleblind, garantindo anonimato entre autores e revisores durante o processo avaliativo, imparcialidade na emissão dos pareceres e excelência acadêmica na seleção dos manuscritos publicados.

A divulgação institucional do corpo editorial e dos revisores por pares não estabelece qualquer vinculação entre avaliadores e artigos específicos, preservando integralmente a confidencialidade e a integridade ética do processo de revisão.

Editora-Chefe

Profa. PhD Vanessa Sales

Equipe Editorial

Prof. PhD Hélio Sales Rios
Prof. Dr. Rafael Ferreira da Silva
Prof. Dr. Francisco Rogério Gomes da Silva
Prof. PhD Manoel Coracy Dias Saboia
Prof. Dr. Daniel LaiberBonadiman

Declaração de Transparência Editorial

O periódico mantém registro formal de todas as etapas do processo de avaliação científica, assegurando confidencialidade, ética, independência acadêmica e conformidade com o modelo doubleblindpeer review, no qual autores e revisores permanecem mutuamente anônimos durante o processo avaliativo.

Conselho de Revisores por Pares (Peer Review Board)

O Conselho de Revisores por Pares é composto por pesquisadores com sólida formação acadêmica e reconhecida atuação científica. Os pareceres técnicos emitidos avaliam critérios de relevância científica, originalidade, consistência metodológica, contribuição teórica e adequação ética, fortalecendo o rigor e a credibilidade do periódico.

Pareceristas

Ciências da Educação

Dr. Carlos Mendonça
Dr. Marcelo Pertussatti
Dr. Ederson Renan Pacheco de Farias

Ciência da Saúde

Dr. Daniel Laiber
Dra. Luisa Bonadiman

Ciências Jurídicas

Dr. Avelino Thiago
Dr. James Melo de Sousa
Dr. Manoel Coracy

Educação Inclusiva

Dra. Fábila Roseana Souza Oliveira da Silva
Dra. Karla Roberta Melo de Vasconcellos

Tecnologia

Dr. Flávio Lopes
Dr. Geraldo Lúcio

Editor Gerente

Rayane Priscila Santos de Souza

Editores de Seção

Karolayne Luana de Oliveira Silva

Eloisa Bárbara Rodrigues Lima

Equipe de Produção Editorial

Reviane Francy Silva da Silveira

Priscila de Fátima Lima Schio
Lucas Teotônio Vieira

Editor Técnico

Balbino Júnior

Administrador do Sistema OJS

Vitor Santos

**COMPORTAMENTO DE CORROSÃO DE TITÂNIO SOLDADO POR TIG
AUTÓGENO E CONVENCIONAL, EM ÁCIDO SULFÚRICO CONCENTRADO
(H₂SO₄) E SODA CÁUSTICA 30 % (30%NAOH)**

CORROSION BEHAVIOR OF AUTOGENOUS AND CONVENTIONALLY
TIG-WELDED TITANIUM IN CONCENTRATED SULFURIC ACID (H₂SO₄) AND 30%
CAUSTIC SODA (30% NAOH)

COMPORTAMIENTO ANTE LA CORROSIÓN DEL TITANIO SOLDADO MEDIANTE
SOLDADURA TIG AUTÓGENA Y CONVENCIONAL EN ÁCIDO SULFÚRICO
CONCENTRADO (H₂SO₄) Y SOSA CÁUSTICA AL 30% (NAOH AL 30%)

Thiago Henrique Bezerra de Santana

RESUMO

Este estudo investiga a integridade e o comportamento corrosivo de juntas tubo-espelho de titânio (ASTM Gr. 2 e Gr. 7) utilizadas em trocadores de calor da indústria química. Foi realizada uma análise comparativa entre os processos de soldagem TIG Convencional (com adição de vareta ER-Ti-02) e TIG Orbital Autógeno. As amostras foram submetidas a ensaios de imersão por 21 dias (ASTM G31) em meios agressivos: ácido sulfúrico (H₂SO₄) e soda cáustica (NaOH 30%). Os resultados indicaram que o processo TIG Convencional, apesar da diluição de paládio na zona fundida (ZF), apresentou maior resistência à corrosão em ácido sulfúrico e maior estabilidade mecânica (dureza média de 154 HV), devido ao refinamento de grão promovido pelo material de adição. O processo Orbital Autógeno, embora superior em repetibilidade e acabamento, demonstrou maior suscetibilidade em meios redutores devido à microestrutura de grãos grosseiros (126 HV). Conclui-se que o TIG Convencional é preferencial para meios ácidos críticos, enquanto o TIG orbital autógeno é viável para ambientes oxidantes ou alcalinos.

Palavras-chave: Titânio; soldagem TIG; ácido sulfúrico; soda cáustica; ASTM G31.

ABSTRACT

This study investigates the integrity and corrosive behavior of titanium tube-sheet joints (ASTM Gr. 2 and Gr. 7) used in heat exchangers in the chemical industry. A comparative analysis was performed between the Conventional TIG welding process (with the addition of ER-Ti-02 rod) and Autogenous Orbital TIG. The samples were subjected to immersion tests for 21 days (ASTM G31) in aggressive media: sulfuric acid (H₂SO₄) and caustic soda (NaOH 30%). The results indicated that the Conventional TIG process, despite the dilution of palladium in the weld zone (WZ), showed greater corrosion resistance in sulfuric acid and greater mechanical stability (average hardness of 154 HV), due to the grain refinement promoted by the filler material. The Autogenous Orbital process, although superior in repeatability and finish, demonstrated greater susceptibility in reducing media due to the coarse grain microstructure (126 HV). It is concluded that Conventional TIG is preferable for

critical acidic media, while Autogenous Orbital TIG is viable for oxidizing or alkaline environments.

Keywords: Titanium; TIG welding; sulfuric acid; caustic soda; ASTM G31.

RESUMEN

Este estudio investiga la integridad y el comportamiento corrosivo de las uniones de tubos y placas de titanio (ASTM Gr. 2 y Gr. 7) utilizadas en intercambiadores de calor en la industria química. Se realizó un análisis comparativo entre el proceso de soldadura TIG convencional (con adición de varilla ER-Ti-02) y TIG orbital autógeno. Las muestras se sometieron a pruebas de inmersión durante 21 días (ASTM G31) en medios agresivos: ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sosa cáustica (NaOH 30%). Los resultados indicaron que el proceso TIG convencional, a pesar de la dilución de paladio en la zona de soldadura (WZ), mostró mayor resistencia a la corrosión en ácido sulfúrico y mayor estabilidad mecánica (dureza promedio de 154 HV), debido al refinamiento de grano promovido por el material de aporte. El proceso orbital autógeno, si bien superior en repetibilidad y acabado, demostró mayor susceptibilidad en medios reductores debido a la microestructura de grano grueso (126 HV). Se concluye que el TIG convencional es preferible para medios ácidos críticos, mientras que el TIG orbital autógeno es viable para entornos oxidantes o alcalinos.

Palabras clave: Titanio; soldadura TIG; ácido sulfúrico; sosa cáustica; ASTM G31.

1 INTRODUÇÃO

O Titânio e suas ligas ocupam posição de destaque entre os materiais de engenharia devido à sua excelente resistência específica, estabilidade térmica e elevada resistência à corrosão, características que permitem sua aplicação em setores estratégicos como aeroespacial, petroquímico e geração de energia. A combinação dessas propriedades decorre essencialmente da formação espontânea de uma película passiva de Dióxido de Titânio (TiO_2), a qual é fina, aderente e termodinamicamente estável, proporcionando notável proteção contra ataques químicos em ampla variedade de meios agressivos (Donachie, 2000; Lütjering; Williams, 2003). Essa película, entretanto, pode sofrer degradação ou dissolução em ambientes fortemente reductores, como ácido sulfúrico concentrado, ou apresentar comportamento diferenciado sob influência de variáveis metalúrgicas e condições de processamento.

No contexto industrial, componentes fabricados em titânio frequentemente passam por processos de soldagem, sobretudo quando empregados em trocadores de calor, tubulações para fluidos corrosivos e estruturas pressurizadas. A soldagem, no entanto, modifica a microestrutura do material, afetando propriedades mecânicas e eletroquímicas.

O processo TIG destaca-se na soldagem do titânio pela boa estabilidade de arco e baixa contaminação, embora apresente diferenças relevantes entre a execução manual e o TIG orbital autógeno. O método convencional tende a gerar maior variabilidade térmica e microestrutural, enquanto o orbital, operado em atmosfera rigorosamente controlada, produz juntas mais homogêneas e de melhor repetibilidade (Marques et al., 2009; Modenesi *et al.*, 2012; Waimer *et al.*, 2019). Essa distinção influencia diretamente o desempenho em meios agressivos, como o Ácido Sulfúrico concentrado (H_2SO_4), que promove intensa dissolução da película passiva e acentua a corrosão generalizada e localizada (Twi Global, 2026; Górká *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2023), ao passo que soluções fortemente alcalinas, como NaOH a 30%, favorecem a estabilidade do filme passivo e melhor resistência à corrosão (Li; Zhang, 2017; Zhang et al., 2021).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo comparar o comportamento à corrosão de juntas soldadas por TIG convencional e TIG orbital autógeno em dois meios contrastantes, ácido sulfúrico concentrado e solução de NaOH a 30%. A investigação baseia-se em ensaios normativos, análises de superfície e revisão crítica da literatura, buscando compreender como diferenças microestruturais decorrentes dos processos de soldagem influenciam a resistência à corrosão. Os resultados encontrados contribuem para o estabelecimento de diretrizes técnicas para seleção de processos de soldagem em aplicações industriais que envolvam titânio submetido a ambientes severamente corrosivos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Propriedades fundamentais do titânio e mecanismos de corrosão

O titânio é amplamente reconhecido por sua elevada resistência à corrosão em ambientes oxidantes e moderadamente agressivos, característica atribuída à formação espontânea de uma película passiva de dióxido de titânio (TiO_2), estável, aderente e regenerável (Donachie, 2000). A Zona Fundida (ZF) e a Zona Termicamente Afetada (ZTA) apresentam alterações morfológicas e químicas relevantes, podendo incluir formação de martensita α' , crescimento de grão, segregações e tensões residuais, fatores reconhecidamente associados à maior suscetibilidade à corrosão (Zhang; Frankel, 2018; Boyer *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2023).

A soldagem modifica substancialmente a microestrutura do titânio, especialmente na ZTA. Essas alterações influenciam diretamente a resistência à corrosão, pois estruturas desbalanceadas e tensões internas podem acelerar mecanismos de dissolução, facilitar nucleação de pites ou retardar a repassivação em ambientes severos (Donachie, 2000). A Zona Fundida (ZF), por sua vez, apresenta solidificação com morfologia característica, podendo incluir acículas de α' e regiões de β retida. Dependendo da taxa de resfriamento e da proteção gasosa, essas fases podem apresentar diferentes potenciais eletroquímicos, gerando microcelas corrosivas dentro da própria junta.

A literatura demonstra que a integridade da atmosfera protetora durante a soldagem é crucial. O titânio apresenta elevada afinidade por oxigênio, nitrogênio e hidrogênio quando aquecido. A absorção excessiva de O, N ou H pode resultar em fragilização, aumento de dureza e redução da resistência à corrosão (Marques *et al.*, 2009). Por isso, processos automáticos como TIG orbital autógeno tendem a proporcionar maior uniformidade e menor contaminação, garantindo soldas mais homogêneas e resistentes a ambientes agressivos.

2.2 Processos de soldagem TIG: Fundamentos e diferenças operacionais

O processo TIG é amplamente utilizado para soldagem de titânio devido ao seu alto controle do arco, baixa introdução de contaminantes e capacidade de produzir juntas de alta qualidade. Ele utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível e atmosfera inerte, geralmente argônio de alta pureza (Marques *et al.*, 2009).

2.2.1 TIG convencional

A execução manual apresenta elevada sensibilidade à habilidade do soldador. Pequenas variações de distância eletrodo-peça (*stick out*), velocidade de soldagem, aporte térmico, qualidade da purga gasosa, podem resultar em heterogeneidades significativas (Donachie, 2000). Essas variações impactam diretamente a formação da ZTA e da ZF, aumentando a possibilidade de oxidação superficial, formação excessiva de α' e variação de dureza ao longo da junta. Além disso, a dependência do operador amplia a probabilidade de instabilidade térmica, o que afeta a performance anticorrosiva da junta em ambientes extremos como ácido sulfúrico.

2.2.2 TIG orbital autógeno

O TIG orbital autógeno é um processo automatizado que promove precisão no controle do aporte térmico, proteção gasosa integral, uniformidade de penetração, ausência de metal de adição e repetibilidade elevada (Donachie, 2000). A automatização permite reduzir defeitos típicos da soldagem manual, como porosidade, inclusões superficiais, microtrincas e assimetria da poça de fusão. Esses fatores resultam em melhores propriedades metalúrgicas e maior resistência à corrosão, especialmente em ambientes severos ou de grande exigência industrial, como trocadores de calor, sistemas de refrigeração química e tubulações de transporte de fluidos corrosivos.

2.3 Ensaios de corrosão: Fundamentos da ASTM G31

A corrosão é um fenômeno eletroquímico complexo que depende não apenas das propriedades intrínsecas do material metálico, mas também da agressividade do meio em que ele se encontra. A noção de agressividade de ambiente está relacionada à capacidade do meio em provocar ou acelerar o processo corrosivo, considerando variáveis como pH, concentração de íons, temperatura, aeração e presença de contaminantes (ISO, 2022; ASTM, 2023).

Nos casos de trocadores de calor fabricados em titânio, utilizados em indústrias química, petroquímica e de dessalinização, a correta avaliação da agressividade ambiental é crucial, pois tais equipamentos frequentemente operam em meios severos contendo cloretos, ácidos e soluções oxidantes. Estudos recentes reforçam que ensaios laboratoriais padronizados permitem não apenas comparar processos de soldagem, mas também prever a durabilidade em serviço (Zhang *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2023).

A ASTM G31 é a principal referência internacional para ensaios gravimétricos de corrosão por imersão. Ela estabelece o preparo de corpos de prova, os tempos de exposição, a limpeza química pós-ensaio e o cálculo da taxa de corrosão em mm/ano.

A taxa de corrosão (CR) é calculada pela equação:

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} [mm/ano]$$

onde:

W = perda de massa (g),

A = área exposta (cm²),

T = tempo de exposição (h),

D = densidade do material (g/cm³), para o titânio, usou-se a densidade de D=4,51 g/cm³.

K = 8,76×10⁴, constante para conversão para mm/ano.

Em H_2SO_4 concentrado, a taxa de dissolução da película tende a superar a taxa de repassivação, expondo a superfície ao ataque contínuo. Em NaOH 30%, ocorre o efeito inverso: o filme tende a se espessar e estabilizar, reduzindo a dissolução metálica.

A escolha por ensaios de imersão e exposição acelerada decorre de três fatores principais: Reprodutibilidade e comparabilidade, onde as normas ASTM e ISO definem parâmetros experimentais bem estabelecidos, garantindo confiabilidade estatística; Representatividade dos ambientes industriais, em que soluções como H_2SO_4 simula cenário corrosivo típico; e, Aplicabilidade para juntas soldadas, onde a soldagem pode introduzir heterogeneidades (ZF, ZTA, MB), que respondem de modo distinto ao mesmo meio agressivo. Assim, a avaliação sistemática desses ambientes fornece dados consistentes para subsidiar a seleção do processo de soldagem TIG mais adequado.

3 METODOLOGIA

O delineamento metodológico foi organizado para garantir rastreabilidade, reprodutibilidade e comparabilidade entre todos os corpos de prova. Para isso, adotaram-se parâmetros padronizados de soldagem, ensaios conduzidos sob as mesmas condições ambientais e protocolos rigorosos de limpeza, manipulação e registro, permitindo a análise isolada dos efeitos metalúrgicos e eletroquímicos inerentes a cada processo.

A metodologia empregada integra etapas complementares e interdependentes, que incluem: preparação e soldagem das amostras; caracterização preliminar das juntas (inspeção visual, análise macroscópica e avaliação da coloração da ZF/ZTA); execução dos ensaios de imersão segundo a ASTM G31; limpeza e avaliação das superfícies conforme a ASTM G1; determinação da taxa de corrosão por perda de massa; medição da dureza Vickers nas regiões MB e ZF ao longo dos intervalos D0, D+7, D+14 e D+21; e documentação fotográfica sistemática da evolução superficial.

3.1 Preparação das amostras

O estudo baseou-se em ensaios experimentais controlados com amostras de titânio Grau 2 e Grau 7, selecionadas por sua elevada resistência à corrosão e ampla aplicação em trocadores de calor. As juntas foram produzidas por soldagem TIG convencional com adição metálica e TIG orbital autógeno automatizado, ambos amplamente empregados em equipamentos do tipo casco e tubo. Os corpos de prova foram padronizados dimensionalmente e submetidos à limpeza química conforme a ASTM G1 (ASTM International, 2017), sendo a soldagem conduzida sob parâmetros controlados de acordo com a AWS D10.6 (2000). As soldagens foram executadas por meio de dois processos distintos de soldagem TIG:

1. **TIG manual**, no qual o operador controla simultaneamente a tocha e a alimentação do material de adição. Utilizando eletrodo de Tungstênio 2% tório, gás de proteção Argônio com pureza de 99,99%, metal de adição AWS A5.16 – ER-Ti02 e fluxo variável, dependente da habilidade do operador.

2. **TIG orbital autógeno**, realizada em sistema automatizado, com cabeçote orbital fechado, com eletrodo de tungstênio 2% tório, atmosfera altamente controlada, ausência de metal de adição, parametrização digital do arco e repetibilidade elevada.

Após a execução da soldagem, os corpos de prova foram seccionados transversalmente às juntas soldadas, de modo a possibilitar a análise das três regiões típicas da solda:

1. **Zona Fundida (ZF)**: região de completa fusão, que pode apresentar microestruturas distintas em função da taxa de resfriamento e da proteção gasosa;

2. **Zona Termicamente Afetada (ZTA)**: área adjacente à ZF, submetida a ciclos térmicos intensos que alteram a microestrutura original, mas sem fusão completa;

3. **Metal de Base (MB)**: material original não afetado pelo ciclo térmico, utilizado como parâmetro de referência para comparação.

A escolha desse método de preparação visa assegurar que os resultados obtidos em análises subsequentes (ensaios não destrutivos, metalográficos, mecânicos e químicos) possam ser comparados de maneira padronizada e consistente, permitindo uma avaliação criteriosa das diferenças entre os processos de soldagem investigados.

3.2 Ensaios de caracterização

3.2.1 Inspeção visual e líquido penetrante

A inspeção visual dos cordões de soldas, seguiu parâmetros da NBR NM 315 (ABNT, 2017) enquanto a verificação de descontinuidades superficiais utilizou líquido penetrante conforme NBR 16450 (ABNT, 2021).

O ensaio não destrutivo por líquido penetrante (LP), foi aplicado antes do seccionamento dos corpos de prova, com o objetivo de identificar descontinuidades superficiais como trincas, poros ou falta de fusão. Para tal, utilizou-se o conjunto de produtos da linha Metal Check, em conformidade com a NBR 16450 (ABNT, 2021). O procedimento consistiu em três etapas principais:

1. Aplicação do penetrante Metal Check VP 30 sobre a região soldada, permanecendo por 15 minutos para permitir a penetração em possíveis descontinuidades;
2. Remoção do excesso de penetrante com o removedor Metal Check E-59, assegurando que apenas as falhas superficiais retivessem o líquido;
3. Aplicação do revelador Metal Check D-70, que permaneceu em contato por 20 minutos, promovendo contraste e evidenciando potenciais indicações de descontinuidades.

3.2.2 Ensaio de dureza

A medição de dureza foi utilizada como uma ferramenta indireta para avaliação da qualidade das soldas, visando comparar o comportamento mecânico local das juntas, identificar possíveis indícios de contaminação atmosférica nas regiões fundidas e correlacionar os resultados com análises microestruturais e ensaios não destrutivos. O ensaio Vickers (HV) foi aplicado no MB e na ZF, em intervalos de sete dias, sendo variações interpretadas como indicativas de formação de martensita α' e tensões residuais (Donachie, 2000).

Foram realizadas três medições por amostra em ambos os processos de soldagem, de modo a reduzir a variabilidade experimental e aumentar a confiabilidade dos dados. Assim, o ensaio de dureza contribuiu tanto para a verificação da qualidade das soldas quanto para a interpretação dos efeitos metalúrgicos associados à escolha do processo.

3.2.3 Ensaio de corrosão por imersão

Após a execução da soldagem, cada tubo soldado foi seccionado de modo a gerar múltiplos corpos de prova, os quais foram utilizados nos ensaios de corrosão. A análise da suscetibilidade à corrosão das juntas soldadas foi conduzida por meio de ensaios de imersão, metodologia amplamente empregada para a avaliação do desempenho de ligas de titânio em ambientes agressivos (Zhang *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2023).

O teste principal seguiu rigorosamente a ASTM G31-21, norma internacional para ensaios gravimétricos de corrosão por imersão. As amostras foram imersas nos dois meios agressivos: H_2SO_4 concentrado ($\approx 98\%$) e NaOH 30%.

Para a medição da perda de massa (ensaio gravimétrico) as amostras foram limpas conforme ASTM G1, secas em estufa, pesadas em balança analítica antes e após a imersão. Essas medições foram repetidas em tempos predefinidos de 7, 14 e 21 dias, para acompanhamento da cinética de corrosão. A variação de massa permitiu determinar a taxa média de corrosão em cada condição de exposição, calculada pela equação padrão da ASTM G31, expressa em mm/ano. Após cada

período de exposição, as superfícies foram inspecionadas visualmente, registrando características associadas ao ataque corrosivo, como descoloração, formação de *pitting*, depósitos superficiais e uniformidade do ataque. As observações morfológicas foram correlacionadas às regiões típicas da solda (ZF, ZTA e MB).

As medições foram conduzidas em replicatas, garantindo reprodutibilidade e robustez estatística. A análise dos resultados permitiu identificar as regiões mais suscetíveis à corrosão e comparar o desempenho entre os dois processos de soldagem investigados (TIG convencional e TIG orbital autógeno). Os dados gravimétricos e visuais foram complementados por ensaios mecânicos de dureza, permitindo uma avaliação integrada dos efeitos da soldagem sobre o comportamento frente à corrosão.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados considerou parâmetros como taxa de corrosão, variação temporal da dureza, formação e estabilidade de filmes passivos espontâneos, mecanismos de repassivação, aparência superficial e heterogeneidades metalúrgicas induzidas pela soldagem. Esses elementos foram interpretados à luz das normas técnicas internacionais (ASTM G31, ASTM G1, ASTM A967) e de referências científicas contemporâneas sobre corrosão em titânio (Yang *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024).

O uso da inspeção visual combinada com o ensaio por líquidos penetrantes contribuiu para estabelecer um primeiro filtro de qualidade, identificando tanto defeitos de superfície (como poros, trincas e descontinuidades lineares) quanto possíveis indícios de contaminação atmosférica durante a soldagem, frequentemente evidenciada por alteração da coloração da zona fundida.

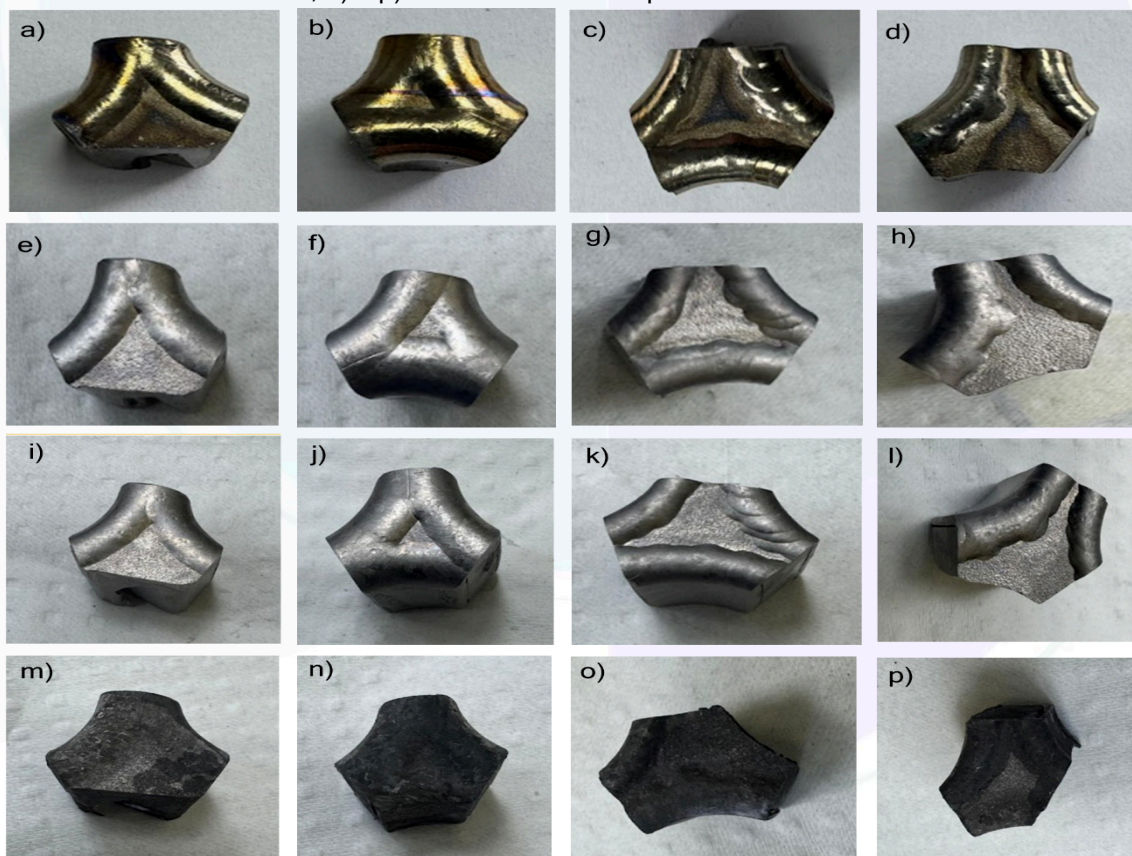
4.1 Avaliação macroscópica pós-corrosão

A evolução temporal das taxas de corrosão ao longo dos períodos de 7, 14 e 21 dias demonstra que tanto as juntas soldadas por TIG autógeno quanto por TIG convencional exibiram escurecimento progressivo da superfície, característico da atuação do meio ácido. Não foram observadas diferenças visuais marcantes entre

os dois processos, tais como formação distinta de produtos de corrosão, áreas de ataque localizado claramente identificáveis ou degradações morfológicas contrastantes.

Embora o ácido sulfúrico seja o meio mais agressivo do estudo, os registros fotográficos mostram que as superfícies de ambas as soldas se alteraram de forma semelhante (Fig. 1). As modificações morfológicas constatadas consistiram em escurecimento, leve rugosidade e alterações superficiais de coloração, sem manifestação de perda de material em magnitude relevante ou de mecanismos agressivos de ataque localizado. Adicionalmente, a avaliação visual não revelou diferenças que permitissem atribuir maior severidade de degradação a qualquer um dos processos de soldagem analisados. Assim, a avaliação macroscópica isolada não permite afirmar maior suscetibilidade de um processo em relação ao outro.

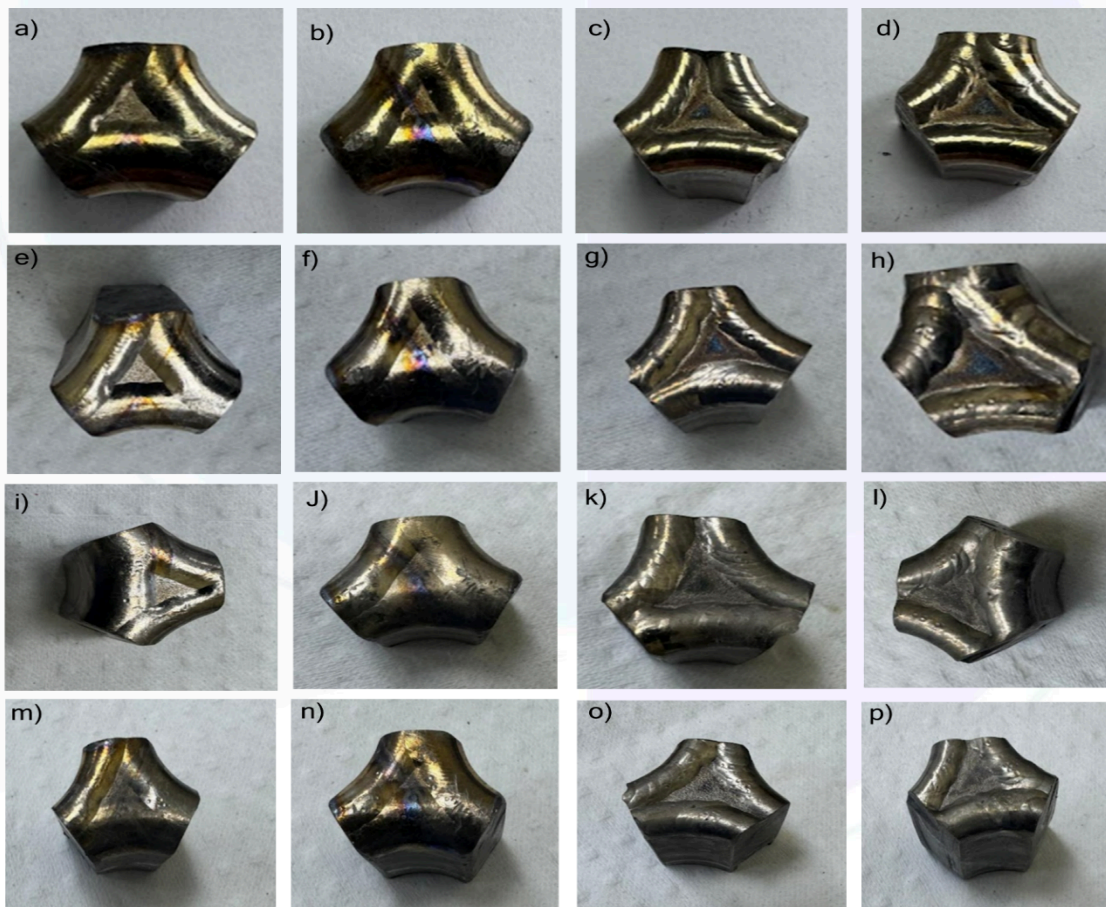
Figura 1 - Corpos de provas, imersos em ácido sulfúrico, após os 21 dias de ensaio. a) e b): TIG autógeno antes do ensaio; c) e d): TIG convencional antes do ensaio; e) e f): TIG autógeno após 7 dias de ensaio; g) e h): TIG convencional após 7 dias de ensaio; i) e j): TIG autógeno após 14 dias de ensaio; k) e l): TIG convencional após 14 dias de ensaio; m) e n): TIG autógeno após 21 dias de ensaio; o) e p): TIG convencional após 21 dias de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

No meio alcalino, as superfícies permaneceram praticamente inalteradas (Fig. 2). Não se observam depósitos significativos, descoloração pronunciada ou ataque localizado. Esse desempenho visual está de acordo com o comportamento amplamente esperado para titânio em meio fortemente alcalino, no qual ocorre estabilização e espessamento da película passiva. Portanto, os resultados experimentais demonstram que o comportamento corrosivo do titânio é fortemente condicionado pela microestrutura gerada durante a soldagem, pelo tipo de meio e pelo equilíbrio entre as reações de passivação e dissolução. Já em meios redutores (H_2SO_4), a passividade é suprimida, evidenciando o limite de estabilidade termodinâmica do filme TiO_2 .

Figura 2 - Corpos de provas, imersos em Soda cáustica (NaOH), após os 21 dias de ensaio. a) e b): TIG autógeno antes do ensaio; c) e d): TIG convencional antes do ensaio; e) e f): TIG autógeno após 7 dias de ensaio; g) e h): TIG convencional após 7 dias de ensaio; i) e j): TIG autógeno após 14 dias de ensaio; k) e l): TIG convencional após 14 dias de ensaio; m) e n): TIG autógeno após 21 dias de ensaio; o) e p): TIG convencional após 21 dias de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.2 Perda de massa e taxa de corrosão gravimétrica

4.2.1 Ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄)

A taxa de corrosão (CR) das amostras soldadas por TIG orbital autógeno foi sistematicamente superior à observada nas amostras soldadas por TIG convencional. Os valores típicos obtidos seguiram a tendência:

$$CR_{\text{Orbital autógeno}} > Cr_{\text{convencional}}$$

O processo TIG convencional apresentou maior estabilidade microestrutural e melhor desempenho frente à corrosão ao longo dos ensaios. Essa superioridade está diretamente relacionada ao uso do material de adição ER-Ti-02, cuja diluição com o metal de base da chapa de Ti-Gr.7, favorece a homogeneização da zona fundida (ZF) e contribui para a formação de um filme passivo de TiO₂ mais estável. O paládio presente no metal de base da chapa, mesmo após parcialmente diluído na ZF, atua como catalisador na repassivação do titânio, ampliando a faixa de estabilidade passiva e reduzindo a suscetibilidade ao ataque ácido, especialmente em meios redutores como o ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Tais resultados evidenciam não apenas a progressão das taxas em cada meio, mas também as diferenças entre os dois processos de soldagem, em termos de estabilidade, sensibilidade ao ambiente e persistência da película passiva (Tab. 1), contribuindo para uma interpretação mais consistente dos mecanismos de corrosão predominantes em cada sistema.

Tabela 1 - Taxa de corrosão acumulada dos corpos de prova (CP) ao longo do ensaio longitudinal.

CP	Meio	Processo	Taxa de corrosão (mm/ano)		
			Até 7 dias	Até 14 dias	Até 21 dias
1	Ácido sulfúrico	TIG Convencional	4,29	27,31	48,26
2			9,14	30,31	66,34
1		TIG Autógeno	9,15	32,73	67,63
2			16,97	25,48	51,08
5	Soda cáustica	TIG Convencional	~0	~0	~0
6			~0	~0	0,36
5		TIG Autógeno	~0	~0	~0
6			~0	0,31	~0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Apesar da proximidade entre os resultados, foi identificada uma tendência sistemática:

1) O processo TIG convencional apresentou menores taxas de corrosão em ácido sulfúrico, resultado associado não apenas ao efeito catalítico do paládio proveniente do metal de adição, mas, sobretudo, ao refinamento microestrutural promovido pela adição metálica. A combinação entre maior homogeneidade química e microestrutura mais fina favoreceu a formação e a regeneração do filme passivo, justificando o melhor desempenho em meio redutor, em conformidade com o comportamento descrito para ligas Ti-Pd.

2) O processo TIG orbital autógeno, mesmo sem adição metálica, apresentou desempenho estável ao longo dos ensaios, sem evidência de regiões de ataque preferencial na ZF, MB ou ZTA. Esse comportamento indica elevada eficácia da proteção gasosa e adequado controle térmico, assegurando uniformidade superficial e ausência de mecanismos localizados de degradação, ainda que a resistência global à corrosão tenha sido inferior à do processo convencional em meio ácido.

4.2.2 Solução de NaOH 30%

O comportamento em NaOH 30% foi nitidamente distinto. As perdas de massa foram praticamente desprezíveis, tanto para TIG convencional quanto para TIG orbital. A literatura confirma que ambientes fortemente alcalinos promovem espessamento e estabilização da película de TiO_2 , reduzindo drasticamente a taxa de corrosão (Zhang *et al.*, 2021).

O desempenho superior nesses meios é consistente com o comportamento conhecido do titânio e de suas ligas, cuja resistência em soluções alcalinas e oxidantes está associada à formação espontânea e à estabilidade termodinâmica da película passiva de TiO_2 (ASM International, 2023; Yang *et al.*, 2023).

No caso da soda cáustica, a ausência de ataque visível e a quase nula variação de massa evidenciam o caráter protetor do óxido, uma vez que em pH elevado o TiO_2 encontra-se em sua forma mais estável, apresentando solubilidade

mínima e comportamento catódico frente ao ambiente (Zhang *et al.*, 2024). O mecanismo predominante é o da passivação completa, em que a densidade de corrente de corrosão é reduzida a níveis muito baixos, tornando o processo praticamente inerte. A leve elevação da rugosidade superficial observada em algumas amostras é atribuída à reação de hidratação superficial do TiO_2 , sem perda efetiva de material metálico.

Apesar da baixa agressividade do meio alcalino, observou-se leve diferença: o TIG orbital autógeno apresentou taxa de corrosão menor, coerente com sua maior homogeneidade microestrutural. Contudo, a magnitude absoluta desses valores é tão reduzida que ambos os processos podem ser considerados adequados para aplicação em ambientes alcalinos severos. Em termos práticos, não há diferença significativa entre os processos quando expostos a NaOH, e ambos são plenamente adequados para operação em ambientes alcalinos severos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstram de forma clara que o processo de soldagem exerce influência decisiva sobre o comportamento à corrosão do titânio em ambientes severos. A comparação entre as juntas soldadas por TIG convencional e TIG orbital autógeno evidenciou diferenças significativas na integridade superficial, microestrutura, estabilidade da película passiva e resistência global à corrosão, especialmente quando expostas ao ácido sulfúrico concentrado.

O processo TIG convencional apresentou menor taxa de corrosão em H_2SO_4 , resultado associado ao refinamento microestrutural promovido pela adição metálica, à menor predominância de martensita α' e à redução de heterogeneidades na ZF. A presença de Pd proveniente do metal de base, mesmo após diluição, contribuiu para acelerar a repassivação do TiO_2 , enquanto a geometria, mais uniforme, do cordão e as menores tensões residuais reduziram a tendência ao ataque seletivo. Esses achados confirmam que microestruturas mais finas e termicamente estáveis apresentam menor vulnerabilidade à dissolução anódica em meios altamente redutores.

Em contraste, o TIG orbital autógeno apresentou maior suscetibilidade ao ataque em H_2SO_4 , refletida por taxas de corrosão superiores e menor estabilidade superficial. A ausência de material de adição resultou em microestrutura mais grosseira na ZF, maior extensão da ZTA e sensibilidade aumentada às condições térmicas do processo, fatores que limitaram a capacidade de repassivação da película de TiO_2 sob ambiente altamente redutor. Apesar da eficiente proteção gasosa, a combinação de grãos maiores e heterogeneidades metalúrgicas favoreceu a dissolução preferencial em condições severas, em concordância com a literatura que destaca a influência dominante da microestrutura sobre o comportamento corrosivo do titânio em meios ácidos fortes

Nos ensaios realizados em NaOH 30%, ambos os processos apresentaram desempenho excelente, com perda de massa mínima e ausência de ataques localizados. A solução alcalina, ao estabilizar e espessar a película de TiO_2 , conferiu proteção eficiente independentemente do processo de soldagem. Ainda assim, o TIG orbital manteve desempenho levemente superior em termos de uniformidade superficial, embora sem relevância prática para aplicações rotineiras.

A compreensão dos mecanismos de degradação observados e sua relação com os processos de soldagem oferece base sólida para decisões de engenharia e aprimoramento de práticas industriais envolvendo titânio. Dessa forma, a estratégia aplicada neste estudo permitiu não apenas validar a qualidade imediata dos cordões de solda, mas também fornecer uma base de referência para as análises subsequentes, garantindo que os resultados obtidos nos ensaios metalográficos e mecânicos fossem interpretados à luz de uma avaliação preliminar já consolidada da integridade superficial.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 315:2017. Ensaio não destrutivo - Ensaio Visual. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16450:2021. Ensaio não destrutivo - Líquidos Penetrantes. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ASTM International. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens - G0001-03R17E01. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017. DOI: 10.1520/G0001-03R17E01. Disponível em: <https://store.astm.org/g0001-03r17e01.html>. Acesso em: 05 jan. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. Handbook - Volume 13C: Corrosion: Environments and Industries. 3rd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2023.

AWS D10.6 - Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Piping Tubing - American Welding Society. 2000.

BOYER, R; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International; 2019.

CHEN, Q; LI, Y.; ZHANG, X. et al. Passivation and repassivation behavior of pure Ti in acidic and chloride media. Electrochim Acta. 451:142072, 2023.

DONACHIE, M. J. Titanium: A Technical Guide. 2 ed. ASM International; 2000.

GÓRKA, J. et al. Qualifying the TIG orbital welding technology of titanium pipes with a perforated bottom. Welding Technology Review, v. 92, 2020.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9223:2022 - Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification. Geneva: ISO, 2022.

LI, X.; ZHANG, W. Localized corrosion of titanium in marine and acidic environments. Corrosion Science.122:1-22. 2017.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. Titanium. 2nd ed. Springer, Berlin. 2003.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3rd ed. UFMG; 2009.

MODENESI, P. J; MARQUES, P. V; SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem. UFMG; 2012.

TWI Global. TWI - Technical Excellence | Engineering Consultancy | Materials Joining. Disponível em: <https://www.twi-global.com/>. Acesso em: 05 jan. 2026.

WAIMER, F. M.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Processos de Soldagem TIG: fundamentos e aplicações. 3rd ed. Blucher; 2019.

WANG, Lei *et al.* Current Status Review of Corrosion Resistance Applications of Titanium Alloys in the Petroleum Industry. *Coatings*, v. 14, n. 8, p. 941, 2024.

YANG, J; LIU, S., WANG, Z. *et al.* Research progress on the corrosion behavior of titanium alloys. *Corrosion Reviews*. 41(1):1–21, 2023.

ZHANG, J; FRANKEL, G. S. Pitting and crevice corrosion of titanium: critical factors and mechanisms. *J Electrochem Soc*.165(13):C807–29, 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Corrosion resistance of titanium alloys in chloride solutions. *Mater Today Commun*.26:101–12, 2021.

