

Corrosão & Proteção

Revista da Associação Brasileira de Corrosão • ISSN 0100-1485 • Ciência e Tecnologia em Corrosão

Ano 22 | nº 84, agosto 2026

GALVANIZAÇÃO A QUENTE

Proteção contra a corrosão e
resistência à abrasão e aos impactos

A **Revista Corrosão & Proteção** é uma publicação oficial da ABRACO – Associação Brasileira de Corrosão, fundada em 17 de outubro de 1968.

ISSN 0100-1485

DIRETORIA EXECUTIVA ABRACO

Biênio 2025/2027

Presidente

Luiz Paulo Gomes

Vice-presidente

Carlos Alexandre Martins da Silva

Diretores

Carlos Roberto Patrício

Danilo Natalio Sanches

Emílio Duarte Lana Júnior

Juliane Carera Marin

Luiz Guilherme Araújo Prata

Conselho Editorial

Caroline Sousa – ABRACO

Laerce de Paula Nunes – IEC

REVISTA CORROSÃO & PROTEÇÃO

Revisão Técnica

Célia Aparecida Lino dos Santos

Neusvaldo Lira de Almeida

Zehbour Panossian

Jornalista Responsável

Luis Monteiro (Mtb 17055/RJ)

Redação e Publicidade

ABRACO – Associação Brasileira de Corrosão

Fotografias

Arquivo ABRACO, arquivos pessoais, Can Stock Photo, Depositphotos, Dollar Photo, Fotos Públicas, Pexels, Shutterstock e Stock Unlimited.

A **Revista Corrosão & Proteção** é um veículo eletrônico concebido, desenvolvido e editado pela ABRACO. O periódico é publicado trimestralmente no site da Associação (www.abraco.org.br/revistas). A ABRACO não se responsabiliza, nem de forma individual, nem de forma solidária, pelas opiniões, ideias e conceitos emitidos nos textos, por serem de inteira responsabilidade de seus autores.

03 Editorial

05 INTERCORR 2027 Aberta a chamada para trabalhos

07 Proteção anticorrosiva com uso de revestimentos por galvanização a quente *Laerce de Paula Nunes*

17 ARTIGO CIENTÍFICO Avaliação da influência do revestimento de nanozircônio depositado com tetraetoxisilano (TEOS) em aço galvanizado na proteção contra corrosão *Daniela Bertol, Jane Zoppas Ferreira*

24 ARTIGO CIENTÍFICO Eficiência de remoção iônica no processo de eletrodialise para soluções sintéticas contendo níquel *Eduardo A. Zanella, Lilian V. R. Beltrami, Camila Baldasso*

29 ARTIGO CIENTÍFICO Influence of concentration and pH of a Zr-based conversion coating on galvanized steel *Carolina Remedi de Menzes, Josiane S. Costa, Jane Zoppas Ferreira*

38 ARTIGO TÉCNICO Galvanização de estruturas de painéis fotovoltaicos *Igor Filipi Rezende Silva*

45 ESPAÇO DA EMPRESA ASSOCIADA galvanização por imersão a quente: uma tecnologia centenária diante dos desafios econômicos e ambientais do futuro *Rogério Nunes Bertocello*

50 Notícias ABRACO

54 Empresas associadas

Galvanização a quente: proteção, desempenho e confiabilidade

A corrosão continua sendo um dos grandes desafios relacionados à integridade e à durabilidade de estruturas e equipamentos. Nesse contexto, a escolha adequada de sistemas de proteção anticorrosiva desempenha papel fundamental na preservação dos ativos, na segurança das instalações e na busca por maior confiabilidade ao longo de sua vida útil.

É com esse olhar que a Corrosão & Proteção dedica esta edição à galvanização a quente, uma importante alternativa de proteção anticorrosiva aplicada a estruturas metálicas em diferentes setores e condições de serviço.

A galvanização a quente se destaca por seu mecanismo de proteção e pelas características do revestimento formado sobre o aço, proporcionando resistência à abrasão e aos impactos. Sua aplicação está presente em estruturas metálicas, equipamentos urbanos, sistemas elétricos e de telecomunicações, torres de transmissão, instalações de geração de energia solar e elementos utilizados na construção civil, entre outras aplicações.

Mais do que apresentar uma tecnologia de revestimento, esta edição busca chamar a atenção para a importância de uma abordagem integrada da proteção anticorrosiva. A eficiência de um sistema não depende apenas da escolha do revestimento, mas também de aspectos como projeto, preparação, execução, controle da qualidade, inspeção e manutenção.

Em determinadas condições de corrosividade, a galvanização a quente pode ainda ser associada à pintura anticorrosiva, formando um sistema de proteção complementar. Essa combinação é especialmente recomendada para ambientes de maior agressividade, nos quais a estratégia de proteção deve considerar as condições específicas de exposição e os requisitos de desempenho da estrutura.

Outro aspecto que merece destaque é a necessidade de critérios técnicos para avaliação da qualidade do revestimento. Aparência, aderência, uniformidade, massa por unidade de área e espessura estão entre os parâmetros considerados no processo de inspeção e aceitação, reforçando a importância da atuação de profissionais qualificados e de procedimentos de controle bem estabelecidos.

Como instituição dedicada à disseminação do conhecimento e ao desenvolvimento da área de corrosão e proteção anticorrosiva no Brasil, a ABRACO entende que ampliar o acesso à informação técnica de qualidade é também uma forma de contribuir para decisões mais conscientes e para o aprimoramento das práticas adotadas pelo setor.

Esperamos que esta edição contribua para ampliar o conhecimento sobre a galvanização a quente, seus mecanismos de proteção, suas aplicações e os cuidados necessários para assegurar seu desempenho. Mais uma vez, reafirmamos nosso compromisso com a valorização do conhecimento técnico e com a aproximação entre profissionais, empresas, instituições de ensino e pesquisa e todos aqueles que atuam na área de corrosão e proteção.

Boa leitura a todos.

Com estima e agradecimento,

Eng. Luiz Paulo Gomes

Presidente da ABRACO



Aberta a chamada para trabalhos

O 11º CONGRESSO
INTERNACIONAL DE
CORROSÃO SERÁ REALIZADO
DE 18 A 21 DE MAIO DE 2027,
EM FORTALEZA, BRASIL,
REUNINDO ESPECIALISTAS,
PESQUISADORES,
PROFISSIONAIS E EMPRESAS
DO BRASIL E DO EXTERIOR

A 11ª edição do INTERCORR – Congresso Internacional de Corrosão – está com chamada aberta para trabalhos técnico-científicos. O evento será realizado de 18 a 21 de maio de 2027, no Hotel Praia Centro, em Fortaleza (Ceará, Brasil), e reunirá especialistas, pesquisadores, profissionais, empresas e instituições que atuam em diferentes áreas relacionadas à corrosão, à proteção de materiais e à integridade de ativos.

O congresso é voltado a pesquisadores, profissionais e estudantes que desejem apresentar pesquisas, estudos de caso, experiências técnicas e desenvolvimentos relacionados aos desafios atuais da corrosão. Os artigos selecionados integrarão a programação técnico-científica do congresso e serão apresentados a um público especializado do Brasil e de outros países.

Temas em destaque

A programação técnica contempla áreas de pesquisa, desenvolvimento e aplicação relacionadas à corrosão, com destaque para questões diretamente ligadas à indústria e à integridade de ativos.

Entre os temas estão gerenciamento, inspeção e monitoramento da corrosão; corrosão na indústria de óleo e gás, refino e petroquímica; revestimentos; proteção catódica e anódica; corrosão em concreto e em dutos; corrosão

microbiológica; materiais de alta resistência à corrosão; e sustentabilidade e meio ambiente. A programação também inclui uma sessão especial dedicada à galvanização.

A diversidade das áreas temáticas reúne diferentes perspectivas sobre a corrosão, aproximando pesquisa, aplicações industriais, tecnologias e experiências desenvolvidas em vários setores.

Uma oportunidade para compartilhar conhecimento

A participação no InterCorr 2027 oferece aos autores a oportunidade de compartilhar resultados de pesquisas, experiências profissionais, estudos de caso e soluções técnicas com especialistas e profissionais de diferentes segmentos relacionados à corrosão.

A presença de contribuições nacionais e internacionais também amplia o intercâmbio técnico e científico, fortalecendo a troca de conhecimentos entre pesquisadores, indústria e instituições e estimulando a discussão sobre desafios, avanços e novas soluções para o setor.

Calendário

A Chamada de Trabalhos seguirá o seguinte cronograma:

- Recebimento de resumo: até 14/10/2026
- Notificação de aceite dos resumos: até 03/11/2026

Para enviar seu trabalho, acesse o site do InterCorr 2027 e consulte as orientações para submissão disponíveis no Sistema de Eventos da ABRACO.

InterCorr 2027

Realizado pela ABRACO, Associação Brasileira de Corrosão, o InterCorr chega à sua 11ª edição como um dos principais eventos internacionais de corrosão realizados no Brasil.

Além da programação técnico-científica, o congresso contará com a 40ª Exposição de Tecnologias para Prevenção e Controle da Corrosão e o 23º Concurso de Fotografia de Corrosão e Degradação de Materiais.

SERVIÇO

INTERCORR 2027

11º CONGRESSO INTERNACIONAL DE CORROSÃO

18 a 21 de maio de 2027

Hotel Praia Centro – Fortaleza, Brasil

Submissão de resumos:
até 14 de outubro de 2026

Site: intercorr2027.abraco.org.br

Proteção anticorrosiva com uso de revestimentos por galvanização a quente

Laerce de Paula Nunes

Texto adaptado do documento base da Recomendação Técnica ABRACO-RT-RAC-003, sobre o tema de revestimento por galvanização a quente a ser apreciado pelo grupo executor brevemente.

Introdução

O revestimento por galvanização a quente é extremamente importante na proteção anticorrosiva de estruturas aéreas, quer seja isoladamente ou de forma combinada com a pintura anticorrosiva.

Os principais tipos de estruturas onde ele se aplica, entre outras são:

- Estruturas metálicas nas mais diversas situações, como áreas industriais, galpões etc.
- Equipamentos urbanos e rodovias como postes, guarda-corpos, placas de sinalização.
- Equipamentos elétricos e telecomunicação (calhas, eletrodutos etc.).



Fig. 01 - Estrutura metálica tubular (pilares do Museu de Arte do Rio)

- Torres de linhas de transmissão.
- Seguidores solares (trackers) em usinas de geração de energia solar.
- Construção Civil (vergalhões, elementos estruturais etc.).

As figuras de 01 a 04 mostram exemplos de estruturas revestidas por galvanização a quente.

Documentos normativos de referência

Normas da ABNT

- ABNT NBR ISO 9223 - Corrosão de Metais e Ligas Metálicas - Corrosividade de Atmosferas - Classificação, Determinação e Estimativa.
- Norma ABNT NBR 6323 - Galvanização de Produtos de Aço - Especificação
- Norma ABNT NBR 7397 - Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente



Fig. 02 - Equipamentos públicos - guarda-corpo em rodovias



Fig. 03 - Seguidores solares (trackers) em usinas solares

- Determinação de Massa por Unidade de Área - Método de Ensaio
- Norma ABNT NBR 7398 - Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente - Verificação da Aderência - Método de Ensaio
- Norma ABNT NBR 7399 - Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente - Verificação da Espessura - Método de Ensaio
- Norma ABNT NBR 7400 - Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente - Verificação da Uniformidade - Método de Ensaio

Normas internacionais

- ISO 9224 - Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Guiding values for the corrosivity categories.
- ISO 12944-2 - Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 2: Classification of environments.

Recomendações técnicas - ABRACO

- ABRACO RT - COR - 001 - Avaliação do Nível de Corrosividade Previsto para Estruturas Aéreas, Enterradas, em Contato com a Água e com Fluidos Altamente Corrosivos.
- ABRACO RT - COR - 003 - Corrosão - Avaliação do Nível de Corrosividade



Fig. 04 - Linha de transmissão com elementos galvanizados

- Atmosférica para Estruturas Aéreas, com Base na Densidade de Compostos Solúveis.
- ABRACO RT - COR - 005 - Recomendações de Práticas que Aumentam o Desempenho à Corrosão no Projeto e na Manutenção.
- ABRACO RT - COR - 006 - Recomendações de Proteção Anticorrosiva para Sistemas, Instalações e Equipamentos.
- ABRACO RT - COR - 007 - Metodologia para Avaliação de Falhas por Corrosão.
- ABRACO RT - CAC - 001 - Corrosão de Armaduras em Estruturas de Concreto - Causas Recomendações de Avaliação, Diagnóstico, Prevenção e Controle.
- ABRACO - RT - PAC 001 - Recomendações de Preparo Superfície e Aplicação de Tintas - Controle do Processo e Inspeção.
- ABRACO - RT - PAC 002 - Pintura anticorrosiva - Recomendações para Seleção de Sistemas de Pintura Anticorrosiva.
- ABRACO - RT - PAC 003 - Pintura anticorrosiva - Tintas para pintura anticorrosiva.
- ABRACO RT - RAC - 001 - Proteção Anticorrosiva de Condições Críticas em Estruturas Aéreas Revestidas.

Considerações básicas

O revestimento por galvanização a quente, também popularmente chamados de galvanização, difere de outros revestimentos, como a

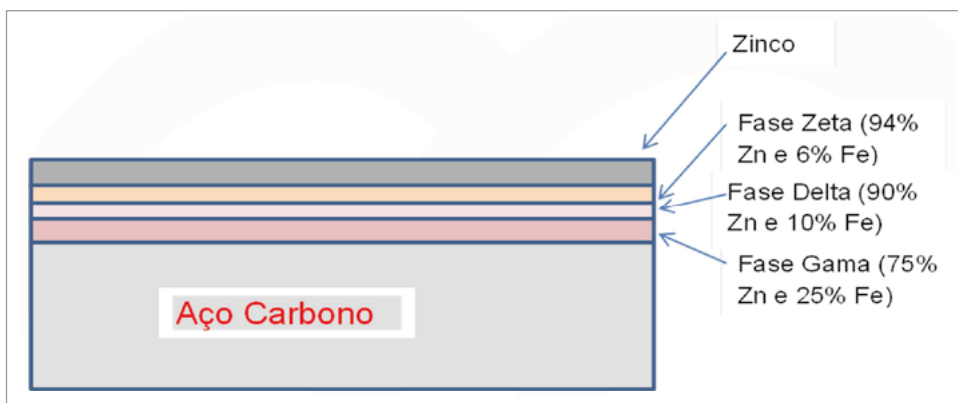


Fig. 05 - Fases intermetálicas formadas na galvanização a quente

eletrodeposição, a aspersão térmica com zinco e as tintas ricas em zinco pela formação de intermetálicos que aumentam a resistência à abrasão e a impactos, o que o recomenda para equipamentos urbanos e locais sujeitos a danos mecânicos.

É um revestimento que protege por barreira e por ação galvânica, podendo proteger falhas e danos mecânicos de até seis a oito mm².

Os intermetálicos formados podem ser vistos na figura 05.

O revestimento por galvanização pode ser complementado facilmente por pintura anticorrosiva em ambientes de alta agressividade, e, neste caso, deve-se evitar a passivação, para não prejudicar a aderência do esquema de pintura anticorrosiva.

Recomendações adicionais:

- A estrutura ou peça a ser galvanizada deve ser adequadamente projetada para não

reter zinco durante o processo de mergulho no tanque de galvanização.

- O galvanizador deve dispor de tanque que comporte as dimensões do material a galvanizar.
- O galvanizador deve ter um sistema de qualidade com adequado controle e rastreamento de todas as etapas do processo.

Execução do revestimento - Características

Para atender aos requisitos de adequada proteção anticorrosiva, o revestimento deve estar de acordo com a Norma ABNT NBR 6323 - Galvanização de Produtos de Aço, e apresentar no mínimo as seguintes características:

- Apresentar película com aparência lisa, boa formação, sem falhas nem defeitos visuais em toda a sua extensão, com especial atenção para soldas e cantos.

Tabela 01 - Espessura da camada de zinco de acordo com a corrosividade (NBR ISO 9223)

Nível Corrosividade	Perda Media de Zinco/Ano (mm)	Espessura Mínima p/20 anos	Observação
C1	≥ 0,1	20 µ	Ocorre a passivação do zinco formando carbonato básico de zinco
C2	0,3	20 µ	
C3	1,4	28 µ	
C4	3,3	66 µ	
C5 (ver nota)	6,3	120 µ	Usar em combinação com pintura
CX (ver nota)	17	Não recomendável	

Nota: nos níveis de corrosividade C5 e CX é recomendável utilizar a galvanização a quente em combinação com a pintura anticorrosiva, o que proporciona excelente resultado sinérgico.

- Ser aderente ao substrato, devendo ser ensaiado de acordo com a Norma ABNT NBR 7398 Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente – Verificação da Aderência.
- Apresentar película contínua com espessura mínima correspondente às condições de corrosividade da tabela 01; com massa por unidade de área correspondente, de acordo com a Norma ABNT NBR 6323, e devendo ser ensaiado de acordo com a Norma ABNT NBR 7397 Produto de Aço e Ferro Fundido Galvanizado por Imersão a Quente – Determinação da massa do revestimento por unidade de área, e também com a Norma ABNT NBR 7399– Produtos de Aço Galvanizado por Imersão a Quente – Verificação da Espessura.

Para atender a esses requisitos mencionados acima, o galvanizador deve preparar e, posteriormente, anexar ao Relatório de Certificação da Qualidade um procedimento de execução de acordo com a Norma ABNT NBR 6323 – Galvanização de Produtos de Aço explicitando os seguintes aspectos:

- Composição da liga de zinco do revestimento;
- Etapas da preparação de superfície;
- Tempo de imersão e esfriamento;
- Utilização de passivação;
- Procedimento de retoques;
- Cuidados no transporte e estocagem.

Inspeção da galvanização a quente

Deverá ser executado um plano de inspeção, de acordo com a Norma ABNT NBR 6323 – Galvanização de Produtos de Aço. Este plano de inspeção deve atender aos requisitos exigidos por ela.

A inspeção deve ser realizada por um Inspetor de Galvanização Certificado pela Associação Brasileira de Corrosão e ICZ (Instituto da Cadeia do Zinco), de acordo com o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação (SNQC).

Crítérios de aceitação e rejeição

O revestimento será aceito, se atender a Norma ABNT NBR 6323 quanto:

- Ao aspecto da superfície;
- À massa por unidade de área;
- À aderência;
- À uniformidade do revestimento;
- À espessura do revestimento, que deve ser determinada pelas Normas ABNT NBR 7399 e ABNT NBR 10443.

Certificação da qualidade

A qualidade do revestimento deve ser certificada pelo inspetor citado no item de inspeção e pelo galvanizador, por meio de Relatório de Certificação da Qualidade, contendo os laudos dos ensaios previstos neste procedimento.

Inspeção em serviço e manutenção

O controle do desempenho do revestimento deve ser realizado por inspeções visuais e fotográficas, pelo menos semestralmente, com resultados apresentados em relatórios que expressem o grau de proteção e auxiliem no planejamento de futuras intervenções, servindo também para avaliação em casos de garantia.

Especial atenção deve ser dispensada às condições críticas (condições especiais) geradoras de frestas tais como: apoios de estruturas, soldas interrompidas, ligações aparafusadas (talas de junção), apoios de estruturas, entre outras.

O usuário deverá estabelecer critérios com os níveis de deterioração adequados às suas necessidades, de acordo com os aspectos de Falhas (F) em serviço colocados na Recomendação Técnica – ABRACO – RT – COR 002. Recomenda-se que no Nível F1 aplique-se reforço com pintura anticorrosiva imediatamente.

As figuras 06 e 07 ilustram os aspectos F0 e F1 da Recomendação Técnica citada.



Fig. 06 – Galvanizado passivado e sem falha

Conclusões

O revestimento por galvanização a quente é uma excelente alternativa de proteção anticorrosiva com elevada resistência à abrasão e a impactos para estruturas aéreas, podendo inclusive ser associado à pintura anticorrosiva nos ambientes C5 e CX

Referências bibliográficas

(Disponíveis no portal do Instituto da Cadeia do Zinco - ICZ)

- FRAGATA, Fernando L. **Pintura anticorrosiva: falhas e alterações nos revestimentos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

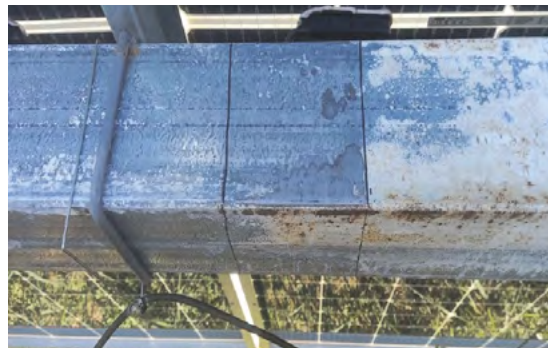


Fig. 07 – Galvanizado com início de falha

- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- NUNES, Laerce P. **Fundamentos de resistência à corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2025.
- NUNES, Laerce P. **Materiais: aplicações de engenharia: seleção e integridade**. Rio de Janeiro: Interciência, 2023.
- NUNES, Laerce P.; LOBO, Alfredo O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 5. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.



Esperamos você em Fortaleza

11º Congresso Internacional de Corrosão

O maior congresso internacional
de corrosão realizado no Brasil.



18 a 21 de maio
de 2027



Hotel Praia Centro
Fortaleza/CE



Chamada de Trabalhos

Compartilhe conhecimento
com pesquisadores,
profissionais e especialistas
do Brasil e do exterior.

Envie seu resumo até 14.10.26



Exponha sua marca!

Aproxime-se de profissionais
e organizações que influenciam
decisões, investimentos
e novos projetos.

Garanta sua presença



Para mais informações e contato:

intercorr2027.abraco.org.br
eventos@abraco.org.br



NEW
HARMONY
» NEW
SOLUTIONS™



GRANALHA SINTO

A base para um revestimento
de alta performance.



A qualidade do revestimento começa
na **preparação da superfície.**

Com as granalhas Sinto, você obtém o
perfil de rugosidade ideal para promover
a aderência dos revestimentos, garantindo
desempenho e confiabilidade para aplicações
na indústria de **Oil & Gas.**

Esperamos por você no

**3º SEMINÁRIO BRASILEIRO
DE REVESTIMENTOS EM DUTOS**



13 de agosto



Rio de Janeiro

➤ Conheça nossas soluções para **preparação de superfícies e fundição.**

sinto.com.br

MONTTOWER
Ultimate Surface Preparation

TERCOO®
+
BRISTLE BLASTER®

**PARCERIA
IDEAL PARA
TRATAMENTO
DE TUBOVIAS**




ALLTER®
ULTIMATE
CORROSION
PREVENTION
& SEALING

**WE COAT
THE ALTERNATE
WAY**



ALLTER.COM
allterpreventiongroup.com

ANA CLAUDIA BRAGA
Mob./WhatsApp: (22) 9983 66061
claudia.braga@allter.com

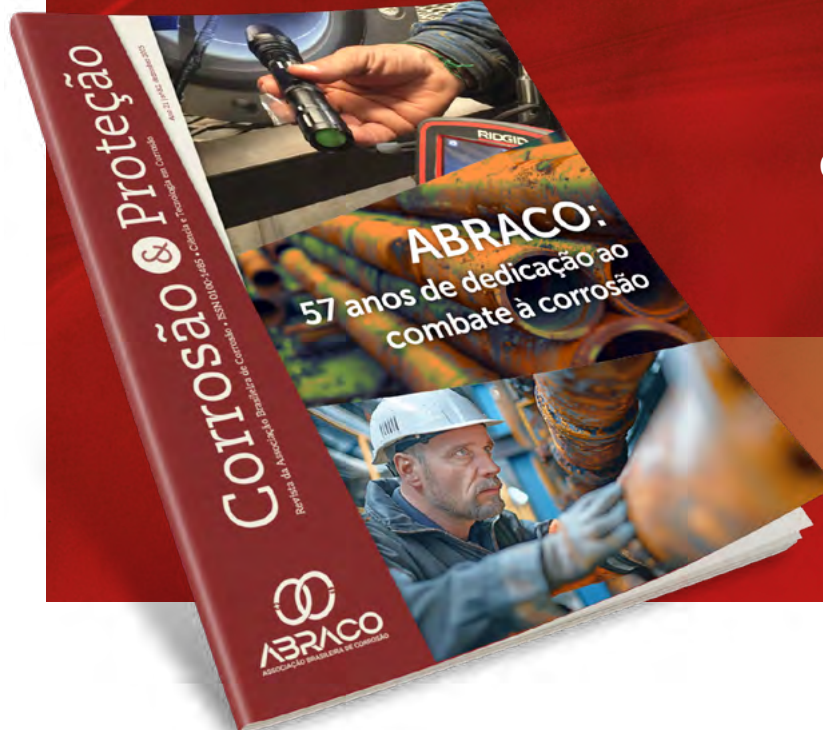
cleanio **STRONGPIPE** **ALLTER** **DUTCH WERK**

ABRACO

**Anuncie na Revista
Corrosão & Proteção**

Um veículo que leva
seu anúncio ao alcance
de quem realmente tem
interesse na área.

INFORMAÇÕES:
marketing@abraco.org.br





Uma decisão voltada para o futuro. **SEALID® All-in-1**

Proteção anticorrosiva com redução de 50% nas emissões de CO₂.

Sem primer. Com uma única aplicação, sem proteção mecânica adicional:

SEALID® All-in-1 reduz pela metade a pegada de carbono na proteção anticorrosiva.*

Segurança sustentável para o futuro. sealid.com

* Em comparação com sistemas anticorrosivos viscoelásticos sem primer. Em comparação com sistemas de fitas com primer, mesmo com economia de >50% de CO₂. Para aplicação de acordo com as normas ISO 21809-3 e EN 12068.



SEALID® All-in-1 Wrap once. All done.



Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO DE NANOZIRCÔNIO DEPOSITADO COM TETRAETOXISILANO (TEOS) EM AÇO GALVANIZADO NA PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

Daniela Bertol^a, Jane Zoppas Ferreira^b

a. Mestranda, Engenharia de Materiais – LACOR, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

b. Prof^a. Dr^a. Orientadora, Química – LACOR, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Introdução

Dentre os diversos materiais disponíveis na atualidade, os materiais metálicos ainda abrangem grande fatia do mercado. Porém, dentre algumas desvantagens, estes materiais podem apresentar falhas quando expostos em alguns ambientes, o que requer tratamentos para promover resistência à corrosão. Os revestimentos de conversão, tanto empregados como pré-tratamento para pintura quanto como tratamento final, são amplamente utilizados com finalidade anticorrosiva sobre o aço galvanizado, principalmente na indústria automotiva e de linha branca, sendo um dos mais comuns a cromatização hexavalente. No entanto, tal processo envolve o uso de banhos

complexos, compostos tóxicos e gera efluentes de difícil tratamento e descarte, o que acarreta em um aumento de custos e em problemas ambientais. A cromatização a base de cromo trivalente, apesar de reduzidos danos ambientais, não atinge desempenho tão satisfatório como a de cromo hexavalente para que justifique seu uso. (1; 2). Neste contexto, algumas tecnologias apresentam-se como substitutos adequados aos cromatos, são eles os revestimentos nanocerâmicos e silanos. Estas novas alternativas além de possuírem bom desempenho anticorrosivo também são compatíveis com tintas, possibilitando pintura posterior. Os nanocerâmicos são revestimentos formados de uma solução precursora de

Conversion coatings such as chromates are widely used in metallic surfaces. However, this process causes environmental problems due to its compounds toxicity. Searching for the substitution of hexavalent chromium, cleaner technologies like nanoceramic coatings and silanes presents themselves with great potential. The present work evaluates the corrosion protection by using tetraethoxysilane (TEOS) coating combined with the nanoceramic conversion coating from hexafluorozirconium acid on galvanized steel. The coatings were evaluated when nanozirconium was deposited firstly followed by TEOS, in different immersion steps, and when both were deposited in one single step, with 24 h hydrolysis of the immersion solution. By the Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Potentiodynamic Polarization tests, the electrochemical behaviour of the samples was studied. In order to determine the best obtained coating, the surface was analysed by Scanning Electron Microscopy (SEM), associated with Energy Dispersion Spectroscopy (EDS). Results show a superior performance of the single step coated samples, especially after 48 h and 72 h of immersion in 0.1 M NaCl.

Keywords: galvanized steel, corrosion, nanozirconium, conversion coating, silane.

Revestimentos de conversão como cromatos são amplamente utilizados em substratos metálicos, porém, a cromatização causa problemas ambientais devido à toxicidade de seus compostos. Buscando a substituição do cromo hexavalente, tecnologias mais limpas como revestimentos nanocerâmicos e silanos apresentam-se como grande potencial. O presente trabalho avalia a influência do revestimento de tetraetoxissilano (TEOS) quando combinado com o revestimento de conversão nanocerâmico a partir do ácido hexafluorozircônio sobre aço galvanizado na proteção contra corrosão do substrato. Foram avaliados os revestimentos quando depositado primeiramente nanozircônio seguido de TEOS, em diferentes etapas de imersão, e quando ambos foram depositados em uma única etapa, com 24 h de hidrólise da solução de imersão. Através dos ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) e de Polarização Potenciodinâmica avaliou-se o comportamento eletroquímico das amostras, e a caracterização do depósito no substrato foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), para determinar o melhor revestimento obtido. Resultados apontam um desempenho superior das amostras revestidas em etapa única, especialmente após 48 h e 72 h em NaCl 0,1 M.

Palavras-chave: aço galvanizado, corrosão, nanozircônio, revestimento de conversão, silano.

flúor e zircônio ou titânio para produzir uma camada delgada de cerâmico sobre o substrato metálico. Já os revestimentos a base de silanos são moléculas híbridas orgânico-inorgânicas que atuam como uma ponte molecular entre a superfície metálica e o revestimento a ser aplicado sobre ela (3; 4; 5).

O presente trabalho visa estudar a influência dos revestimentos nanozircônio e tetraetoxissilano na propriedade anticorrosiva do aço galvanizado, quando depositados juntos, em etapas separadas e em etapa única, comparando os respectivos desempenhos com resultado obtido também do processo de cromatização, do nanozircônio apenas e do aço galvanizado não revestido. Para análise dos resultados foram feitos ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), Polarização Potenciodinâmica e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), associada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS).

Metodologia

O substrato utilizado foi uma chapa do aço galvanizado comercial, com espessura de 1 mm, que foi cortada nas dimensões 100 mm x 50 mm. O pré-tratamento da superfície é uma etapa crucial para obter um bom revestimento e foi realizada através de desengraxe, realizado com o desengraxante alcalino comercial Saloclean 667N, seguido de lavagem abundante com água destilada e deionizada. As amostras brancas (aço galvanizado) e cromatizadas (Cr³⁺) foram preparadas para efeito de comparação.

A solução de cromo trivalente utilizada foi a solução comercial Surtec 680, ajustando pH para 1,8 com ácido nítrico p.A. Para a solução de nanocerâmico foi feita uma solução aquosa com concentração equivalente a 3,5 mmol (0,3% de Zr) a partir do ácido hexafluorozircônio 50% comercial, utilizando

hidróxido de sódio para ajuste de pH em 4. Já a solução de silano foi preparada na proporção 2%/49%/49% de tetraetoxissilano (TEOS), água e álcool etílico P.A., respectivamente, com pH ajustado em 4 com ácido acético glacial 5% e 24 h de hidrólise com agitação.

Os parâmetros de deposição dos revestimentos foram escolhidos com base em trabalhos anteriores, ou seja, os revestimentos de nanocerâmico foram obtidos com 90 s e 120 s de imersão na solução de conversão e os revestimentos de silano entre 120 s a 900 s, mantendo o pH em 4, uma vez que se mostrou um valor satisfatório para deposição de ambas as soluções (6; 7). Para os experimentos, as amostras foram tratadas de acordo com o fluxograma da figura 1.

As peças foram revestidas por imersão através do método dip-coating com o equipamento Elevador de Disco MA765 da Marconi, com velocidade de imersão e de retirada de 7 mm.s⁻¹, variando-se os tempos de imersão nas soluções. Os ensaios eletroquímicos

foram realizados com o potenciostato Autolab PGSTAT 302 da marca Ecochemie, usando o programa NOVA, em uma célula de três eletrodos, contando com o eletrodo de referência de Ag/AgCl, contra-eletrodo de Pt e o eletrodo de trabalho, com uma área exposta ao eletrodo de 0,64 cm² dentro de uma gaiola de Faraday.

Depois de revestidas nos diferentes tempos de imersão, as peças foram imersas em solução NaCl 0,1 M e as medidas de EIE foram realizadas após 2 h, 24 h, 48 h e 72 h em contato com o eletrólito, aplicando uma varredura de frequências desde 100 KHz até 10 mHz. O ensaio de polarização potenciodinâmica foi feito após 30 min de imersão na solução de NaCl para estabilização do potencial. O intervalo de varredura foi de - 1,5 V até 0,1 V com velocidade de varredura de 1 mV/s. A avaliação dos revestimentos por MEV/EDS foi feita utilizando o microscópio modelo PW-100-017 da Phenon World, para caracterização morfológica e química, utilizando tensão de 5 kV para obter informações provenientes da superfície.

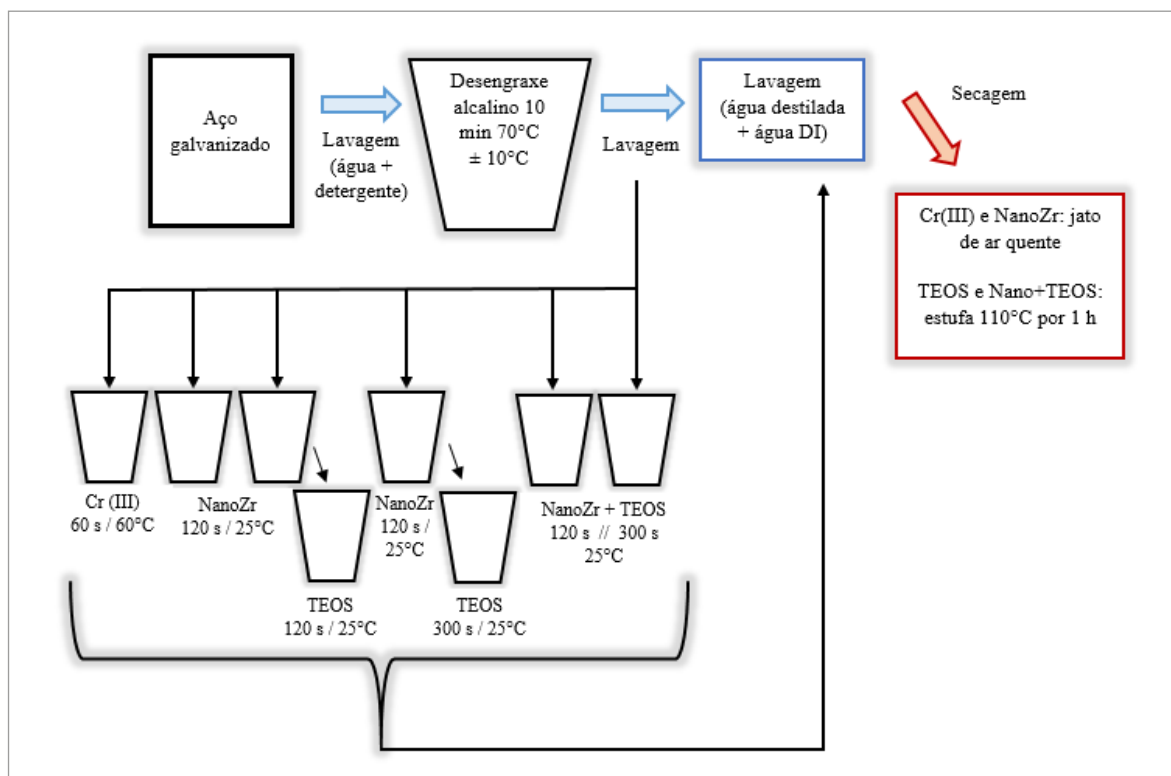


Figura 1 - Esquema do processo de preparação das amostras.

Resultados e discussão

Após serem tratadas e revestidas conforme o procedimento descrito anteriormente, as amostras foram nomeadas de acordo com a tabela 1.

Através dos resultados obtidos pelo ensaio de impedância eletroquímica pode-se observar o desempenho dos revestimentos, em comparação com a amostra branca e a cromatizada, após os diversos tempos de contato com a solução de NaCl 0,1 M, sendo apresentados aqui apenas os resultados mais relevantes, após 48 h e 72 h, conforme mostrado nas figuras 2 e 3.

O semicírculo capacitivo formado no ensaio de EIE representa aqui a resistência do revestimento protetivo, ou seja, quanto maior a impedância obtida melhor o desempenho do revestimento, podendo atribuir-se tal comportamento à maior espessura e/ou maior uniformidade de camada formada. Tratando-se de um revestimento em escala nanométrica como o do presente trabalho, tempos curtos de deposição podem acarretar em formação mais irregular de camada, iniciando preferencialmente nos sítios ativos e se espalhando ao longo do substrato conforme o passar do tempo de conversão. No entanto, tempos muito longos podem prejudicar o revestimento, pois, apesar de mais espessos, podem apresentar maior concentração de trincas na camada.

A análise mostra que todos os revestimentos possuem desempenho superior ao cromatizado trivalente, e nota-se que os melhores

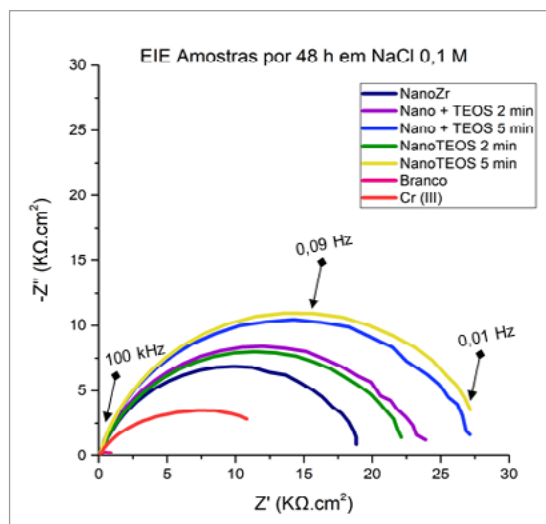


Figura 2 - Diagrama de Nyquist obtido das amostras revestidas imersas em NaCl por 48 h.

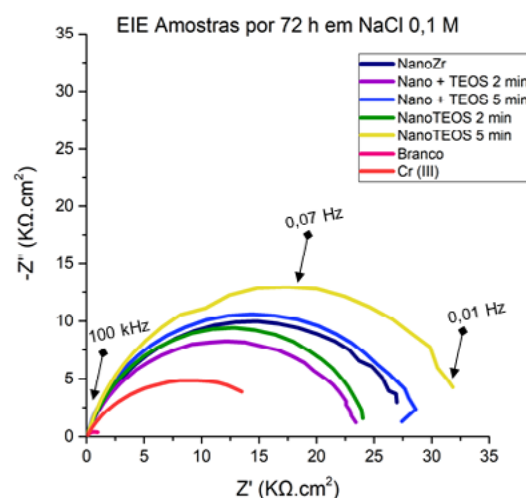


Figura 3 - Diagrama de Nyquist obtido das amostras revestidas imersas em NaCl por 72 h.

Tabela 1 - Nomenclatura das amostras.

Amostra	Tempo de imersão	Nomenclatura
Aço galvanizado	-	Branco
Cromatizado	60 s	Cr (III)
Nanozircônio	120 s	NanoZr
Nanozircônio // silano	120 s // 120 s	Nano + TEOS 2 min
Nanozircônio // silano	120 s // 300 s	Nano + TEOS 5 min
Nanozircônio com silano	120 s	NanoTEOS 2 min
Nanozircônio com silano	300 s	NanoTEOS 5 min

resultados obtidos foram para a amostra onde foi depositado silano junto com o nanocerâmico, em uma única etapa com 300 s de conversão e na amostra depositada primeiramente com nanocerâmico seguida de um depósito de silano, tanto em 48 h quanto em 72 h de contato com NaCl. Esse comportamento deve-se ao fato de que a presença do silano atua como uma proteção de barreira adicional ao revestimento de zircônio, além de proteger poros e pontos não uniformes da camada nanométrica.

Dos ensaios de impedância eletroquímica em 72 h de imersão em NaCl pode-se calcular as capacitâncias equivalentes dos revestimentos ($C = 1/(2 \pi f R_t)$), e os valores encontrados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Capacitância dos revestimentos após 72h de imersão em NaCl.

Amostra	C
Branco	470 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
Cr (III)	300 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
NanoZr	49 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
Nano + TEOS 2 min	27 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
Nano + TEOS 5 min	30 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
NanoTEOS 2 min	44 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
NanoTEOS 5 min	71 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$

O valor da capacitância é inversamente proporcional à resistência e, possivelmente, à espessura ou homogeneidade do filme e aumenta com a área exposta da liga e a rugosidade que ela apresenta. Os baixos valores de capacitância dos revestimentos nanocerâmicos indicam a maior inibição da superfície frente ao processo corrosivo. Para verificar e comparar o desempenho dos revestimentos, avaliando o potencial de corrosão (E_{corr}) e a densidade de corrente de corrosão (I_{corr}), foi realizado o ensaio de polarização como complemento à análise de impedância. As amostras foram condicionadas por 30 minutos no eletrólito. Na figura 4 é possível observar a diferença entre os potenciais de corrosão de cada amostra.

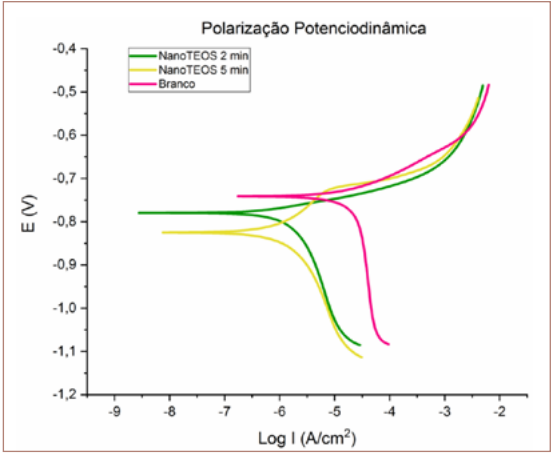


Figura 4 – Curvas de polarização das amostras revestidas.

De um modo geral, a densidade de corrente é um indicador da velocidade das reações de corrosão. Os revestimentos apresentaram densidade de corrente de corrosão similares, observando-se que as amostras NanoTEOS 2 min e NanoTEOS 5 min apresentaram densidade de corrente levemente inferior às demais. Quando comparadas com a amostra não revestida, pode-se notar claramente a redução da I_{corr} nas amostras revestidas (Tabela 3), o que reforça os resultados obtidos nos ensaios de impedância eletroquímica, apontando a efetividade dos revestimentos na proteção à corrosão.

Tabela 3 – Densidades de corrente de corrosão dos revestimentos.

Amostra	I_{corr}
Branco	15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
NanoTEOS 2 min	1,9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
NanoTEOS 5 min	2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

O resultado do ensaio de polarização deve ser observado com cautela, pois as correntes medidas podem ser uma mistura da contribuição do substrato e do revestimento, especialmente se este é poroso. A influência do substrato, sobretudo para revestimentos de baixa espessura como os estudados neste trabalho, pode interferir nos resultados. As baixas capacitâncias, entretanto, corroboram com os resultados das baixas taxas de corrosão.

Por fim, as microscopias eletrônicas de varredura associadas ao EDS confirmam a formação do revestimento na superfície do aço galvanizado, tanto no revestimento obtido em duas etapas quanto no de etapa única, conforme as Figuras 5, 6 e 7 e Tabelas 4, 5 e 6.

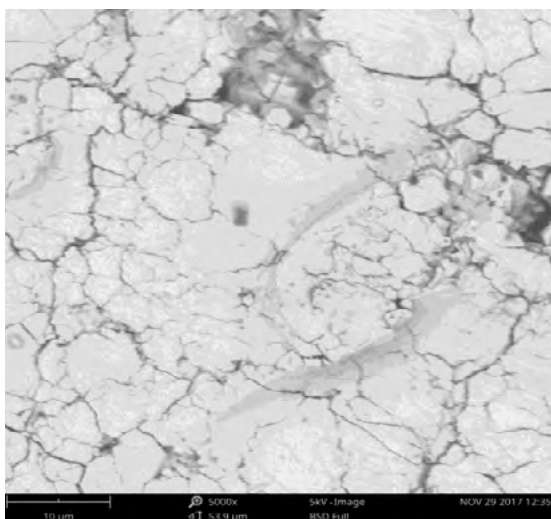


Figura 5 – MEV da amostra branco (5000x).

Tabela 4 – EDS da amostra branco.

Elemento	% atômica	% em peso
Zinco (Zn)	82.09	88.89
Ferro (Fe)	9.64	8.92
Oxigênio (O)	8.27	2.19

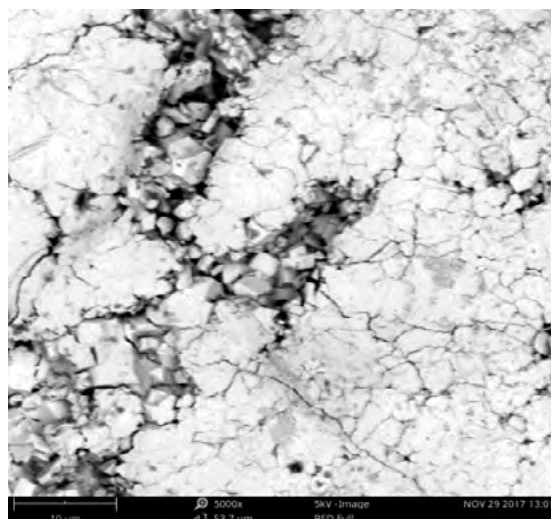


Figura 6 – MEV da amostra Nano + TEOS 2 min (5000x).

Tabela 5 – EDS da amostra Nano + TEOS 2 min.

Elemento	% atômica	% em peso
Zinco (Zn)	68.57	79.42
Oxigênio (O)	17.65	5.00
Ferro (Fe)	8.27	8.18
Zircônio (Zr)	4.16	6.72
Silício (Si)	1.36	0.68

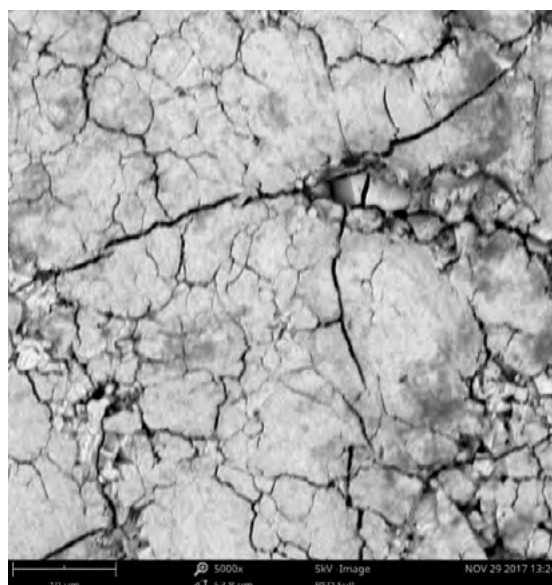


Figura 7 – MEV da amostra NanoTEOS 5 min (5000x).

Tabela 6 – EDS da amostra NanoTEOS 5 min.

Elemento	% atômica	% em peso
Zinco (Zn)	67.66	82.53
Oxigênio (O)	19.96	5.96
Ferro (Fe)	7.90	8.23
Silício (Si)	3.68	1.93
Zircônio (Zr)	0.80	1.36

Pela espectroscopia de dispersão de energia pode-se notar que o tetraetoxisilano encontra-se em maior quantidade quando depositado juntamente com o nanocerâmico em etapa única e com 5 minutos de conversão, indicando que a formação do revestimento silano é mais fácil diretamente sobre o aço galvanizado

do que sobre o nanocerâmico, como mostram as análises das amostras Nano + TEOS 2 min e NanoTEOS 5 min.

Conclusões

De acordo com os resultados gerados no presente trabalho, pode-se observar maior resistência à corrosão do substrato de aço galvanizado quando revestido com nanozircônio combinado com tetraetoxissilano, sendo esta resistência ligeiramente maior quando depositados em etapa única do que quando depositados em etapas distintas, conforme apontaram os ensaios de impedância eletroquímica e polarização potenciodinâmica.

Por microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia por dispersão de energia verifica-se maior quantidade de silano depositado no revestimento por etapa única, ao contrário do observado quando o revestimento é realizado em duas etapas, e pode-se ainda afirmar que tempos maiores de conversão favorecem a formação do revestimento quando este é feito em etapa única.

Referências bibliográficas

- ZARO, G.; ABREU, T. M.; FERREIRA, J. Z. **Uso de revestimento de conversão à base de zircônio em substituição ambientalmente correta aos processos de cromatização e fosfatização**. In: 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves, 2012, 8 p.
- MORAES, J. A. **Estudo do comportamento do revestimento de conversão à base de zircônio e zircônio/titânio sobre aço carbono**. 2010. 117 p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- ZARO, G. **Influência dos parâmetros de deposição do ácido hexafluorozircônio sobre aço galvanizado**. 2013. 184 p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- FRANCISCO, J. S. **Avaliação do pré-tratamento a base de sulfossiloxano sobre aço galvannealed combinado com tintas anticorrosivas**. 2013. 106 p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- PETRIE, E. M. Silanes as primers and adhesion promoters for metal substrates. **Metal Finishing**, v. 105, n. 7-8, p. 85-93, Aug. 2007.
- CAPELOSSI, V. R. **Filmes finos à base de polissilanos como pré-tratamentos protetores contra corrosão de aço “galvannealed”**. 2011. 347 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- MOHAMMADLOO, H. E.; et al. Nano-ceramic hexafluorozirconic acid based conversion thin film: Surface characterization and electrochemical study. **Surface & Coatings Technology**, vol. 206, n. 19-20, p. 4132-4139, Apr. 2012.

EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO IÔNICA NO PROCESSO DE ELETRODIÁLISE PARA SOLUÇÕES SINTÉTICAS CONTENDO NÍQUEL

Eduardo A. Zanella^a, Lílian V. R. Beltrami^b, Camila Baldasso^c

a. Master Student, Chemical Engineer – Universidade de Caxias do Sul

b. PhD, Chemical Engineer – Universidade de Caxias do Sul (UCS)

c. PhD, Chemical Engineer – Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Introdução

Revestimentos são películas aplicadas sobre a superfície de substratos com o objetivo principal de protegê-los contra agentes externos, atuando como uma barreira física entre o material e o meio agressivo [1]. A galvanização, que consiste na aplicação de revestimentos metálicos, surgiu no século XIX com o avanço da eletroquímica, combinando antigas técnicas de aplicação de metais com as descobertas de Volta, Faraday e Jacobi. Inicialmente voltada para fins decorativos, a galvanização se consolidou como um processo industrial de proteção metálica com a introdução dos dínamos no final do século [2].

Nas últimas décadas, a galvanização ganhou destaque significativo, sendo que a

eletrodeposição vem sendo amplamente utilizada em setores industriais, como decoração automotiva, revestimentos metálicos e aplicação de camadas funcionais e resistivas. Nos últimos anos, seu uso tem se expandido para revestimentos resistentes ao desgaste e à corrosão, desenvolvimento de superfícies superhidrofóbicas e deposição de nanomateriais, sendo esse, um processo de engenharia de superfícies capaz de alterar a composição química e a microestrutura, melhorando as propriedades do substrato. Além disso, a técnica é de baixo custo, fácil controle e aplicável a substratos de diferentes formas e tamanhos, sendo ideal para estruturas complexas e produção em lote [3].

Contudo, a galvanoplastia utiliza em seus processos grandes volumes de águas, e, como

A galvanização é um processo amplamente utilizado na proteção de superfícies metálicas, mas sua aplicação em escala industrial resulta na geração de grandes volumes de efluentes líquidos contendo metais pesados, como o níquel. Esses efluentes, se descartados inadequadamente, representam riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. Nesse cenário, tecnologias baseadas em membranas, como a eletrodialise, surgem como alternativas promissoras para o tratamento eficiente desses resíduos. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da eletrodialise na remoção de íons de níquel (Ni^{2+}) em soluções sintéticas com concentrações de 50 e 100 mg.L^{-1} de níquel. Os ensaios foram realizados em módulo de eletrodialise de bancada, utilizando um par de membranas aniônicas e catiônicas, sob condições controladas de agitação e temperatura. As análises das amostras foram realizadas por ICP-OES antes e após a eletrodialise, e a eficiência foi determinada pelo cálculo do percentual de remoção de níquel. Os resultados demonstraram valores de remoção superiores a 80%. Para soluções com 50 mg.L^{-1} , os níveis de níquel no permeado e no compartimento de alimentação mantiveram-se abaixo dos limites estabelecidos pelas legislações federal e estadual. Já nas soluções de 100 mg.L^{-1} , embora o permeado tenha atendido à legislação, o compartimento central ainda apresentou concentrações acima do limite em alguns testes, possivelmente devido à incrustação das membranas. Os resultados reforçam o potencial da eletrodialise como uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes metálicos diluídos.

Palavras-chave: contaminantes metálicos, separação por membranas, sustentabilidade industrial, tecnologias limpas.

consequência, resultam na geração de altos volumes de efluentes líquidos e lodos. Estudos indicam que, na China, existem cerca de 200.000 indústrias galvânicas, responsáveis pela geração anual de aproximadamente 5 bilhões de metros cúbicos de águas residuais e mais de 13 milhões de toneladas de lodo. Nos Estados Unidos, estima-se uma produção de 100.000 toneladas de lodo por ano, enquanto em outros países esse volume gira em torno de 1 milhão de toneladas [4].

Esses efluentes frequentemente contêm metais pesados, como o níquel, que, se não tratados adequadamente, podem causar sérios impactos ambientais e à saúde humana. A exposição ao níquel está associada a problemas respiratórios, dermatites e, em casos mais graves, a efeitos carcinogênicos. Portanto, o manejo e tratamento eficaz desses efluentes são essenciais para mitigar os riscos associados [5,6].

Tradicionalmente, o tratamento de efluentes galvânicos envolve métodos convencionais, como a precipitação química, coagulação seguida de floculação ou adsorção. A precipitação química utiliza reagentes para transformar os metais dissolvidos em formas insolúveis, facilitando sua remoção [7]. A coagulação seguida de floculação, é um processo no qual um coagulante é introduzido no efluente, com a finalidade de criar agregados maiores da partícula

de interesse, a fim de se realizar uma posterior filtração, obtendo-se assim um efluente menos concentrado [8]. Já a adsorção utiliza materiais porosos para fixar os contaminantes. Embora eficazes, esses métodos podem apresentar limitações em termos de eficiência, custo e geração de resíduos secundários [6].

Nesse contexto, tecnologias baseadas em processos de separação por membranas, como a osmose inversa e eletrodialise, emergem como soluções promissoras. A eletrodialise é um processo eletroquímico que utiliza membranas íon-seletivas e um potencial elétrico para separar íons de soluções aquosas. Durante o processo, os íons metálicos presentes na solução de alimentação migram através das membranas, resultando na formação de duas correntes: uma de concentrado, onde ficam retidos os íons metálicos e uma de permeado, praticamente livre deles. Simultaneamente, a solução de alimentação é purificada, reduzindo significativamente a concentração de contaminantes. Essa tecnologia oferece vantagens como alta eficiência de remoção, menor consumo de reagentes químicos e possibilidade de recuperação de metais valiosos [9,10,11].

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência da eletrodialise na remoção de íons metálicos, com foco no níquel, provenientes de efluentes gerados em

processos de galvanização. Busca-se analisar a capacidade do sistema em remover esses íons da solução de alimentação e a qualidade do permeado produzido, visando contribuir para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis e eficazes no tratamento de efluentes industriais.

Materiais e Métodos

As soluções de alimentação contendo íons de níquel foram preparadas nas concentrações de 50 e 100 mg.L⁻¹, utilizando sulfato de níquel (II) hepta-hidratado (NiSO₄.7H₂O, 98%, Carlo Erba®) dissolvido em água deionizada. Essas concentrações foram definidas por serem semelhantes à de efluentes galvânicos reais. Para os compartimentos anódico e catódico, foram preparadas soluções de cloreto de sódio (NaCl) nas mesmas concentrações das soluções de alimentação correspondentes. O ajuste da condutividade no compartimento central foi realizado com solução de ácido clorídrico (HCl) 0,1 mol.L⁻¹.

O sistema experimental foi composto por um módulo de eletrodiálise em escala laboratorial, contendo três compartimentos (anódico, catódico e central), cada um com volume de 125 mL. Foi utilizado um par de membranas íon-seletivas, sendo uma catiônica (HDX100) e uma aniônica (HDX200), ambas da HIDRODEX®. A aplicação da diferença de potencial se deu em eletrodos de platina posicionados nas extremidades do módulo, e foi realizada por meio de uma fonte de corrente contínua (300STD, GSR®), com valores determinados previamente por ensaios de corrente-limite. Os ensaios foram conduzidos sob temperatura controlada (23°C) e agitação constante, utilizando um agitador magnético (VELP Scientifica®) para evitar a polarização por concentração. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

A eficiência do processo foi determinada pelo percentual de remoção de níquel, calculado a partir das concentrações de íons no compartimento central antes e após a eletrodiálise. A concentração de níquel no permeado obtido

também foi avaliada. As concentrações foram determinadas no Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais (LAPAM) da UCS, seguindo metodologia do Standard Methods (SMEWW), por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), expressas em mg.L⁻¹. O percentual de remoção (R) foi calculado conforme a Equação 1:

$$R = \left(\frac{C_I - C_F}{C_I} \right) * 100\% \quad (1)$$

onde C_I representa a concentração inicial no compartimento de alimentação antes do teste de eletrodiálise e C_F a concentração final do mesmo compartimento após a eletrodiálise, ambas em mg.L⁻¹.

Resultados e Discussão

As soluções sintéticas de sulfato de níquel foram preparadas com concentrações nominais de 50 e 100 mg.L⁻¹ de níquel, sendo as concentrações efetivas determinadas, por meio de análise via ICP-OES, em 53,70 mg.L⁻¹ e 104,60 mg.L⁻¹, respectivamente. Nos compartimentos anódico e catódico foram empregadas soluções de cloreto de sódio em concentrações equivalentes às das soluções de alimentação. A fim de assegurar a ausência de contaminação por níquel nesses compartimentos, as soluções de NaCl também foram analisadas antes da eletrodiálise. Os resultados indicaram concentração de níquel inferior ao limite de detecção do equipamento (< 0,01 mg.L⁻¹) para a solução correspondente ao ensaio com 50 mg.L⁻¹, e concentração de 0,02 mg.L⁻¹ para a correspondente ao ensaio com 100 mg.L⁻¹.

Após a realização dos testes de eletrodiálise, as amostras do compartimento central (alimentação) e do anódico (permeado) foram coletadas para fazer a avaliação da quantidade de níquel presente em cada um dos testes, e, em seguida, avaliado o percentual de remoção do sistema. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de níquel obtidos para os compartimentos de central (alimentação) e anódico (permeado) após processo de eletrodialise

Teste	Concentração de Níquel compartimento central [mg.L ⁻¹]	Concentração de Níquel compartimento anódico [mg.L ⁻¹]	Remoção [%]
Teste 1 50 mg.L ⁻¹	0,04	0,13	99,93
Teste 2 50 mg.L ⁻¹	0,03	0,30	99,94
Teste 3 50 mg.L ⁻¹	0,04	0,88	99,93
Teste 1 100 mg.L ⁻¹	< ao limite	0,30	99,99
Teste 2 100 mg.L ⁻¹	16,93	0,44	83,81
Teste 3 100 mg.L ⁻¹	13,39	0,91	87,20

Os dados obtidos demonstram uma elevada eficiência do processo de eletrodialise, com percentuais de remoção de níquel superiores a 80 % em todas as condições testadas. Tal desempenho evidencia o potencial da técnica na remoção de íons metálicos em soluções diluídas, particularmente no caso do níquel. Para as soluções com concentração inicial de 50 mg.L⁻¹ de níquel, os valores obtidos tanto no compartimento de alimentação quanto no permeado permaneceram abaixo dos limites máximos estabelecidos pela legislação ambiental brasileira (CONAMA 430/2011, 2,0 mg.L⁻¹) e pela legislação do Estado do Rio Grande do Sul (CONSEMA 355/2017, 1,0 mg.L⁻¹), indicando a viabilidade do reuso ou descarte seguro desse efluente.

No entanto, para as soluções com concentração inicial de 100 mg.L⁻¹, embora os valores de níquel no permeado tenham atendido aos limites legais, observou-se que, nos dois últimos ensaios, as concentrações residuais de níquel no compartimento de alimentação ainda superavam os limites definidos pelas legislações. Essa tendência sugere uma possível perda de desempenho do sistema, possivelmente atribuída à formação de incrustações nas membranas ao longo do tempo. A deposição de sais ou precipitados metálicos sobre a superfície das membranas pode comprometer a eficiência da migração iônica, dificultando a remoção contínua de íons metálicos do compartimento de alimentação e, consequentemente, reduzindo a taxa de purificação.

Os resultados obtidos estão em consonância com a literatura técnica. Mulder (1996) destaca

que a eletrodialise é particularmente eficaz no tratamento de soluções contendo baixas concentrações de espécies iônicas, justamente pela maior seletividade e facilidade de separação em tais condições. Isso se confirma nos experimentos com 50 mg.L⁻¹ de níquel, nos quais se observou uma clara purificação da corrente de alimentação e a obtenção de um permeado com concentrações baixas de níquel, evidenciando a eficiência do processo em remover íons metálicos de soluções menos concentradas.

Conclusões

A investigação experimental conduzida demonstrou a aplicabilidade da eletrodialise como uma alternativa eficaz para o tratamento de soluções contendo níquel em baixas concentrações. A tecnologia mostrou-se particularmente eficiente na remoção de íons metálicos em condições menos concentradas, alcançando elevado desempenho de separação e promovendo a geração de correntes com teores residuais compatíveis com os parâmetros ambientais estabelecidos.

As análises evidenciaram que, em concentrações iniciais mais baixas, o sistema operou de forma mais eficaz, favorecendo tanto a purificação da corrente de alimentação quanto a obtenção de um permeado isento de contaminação metálica significativa. Tal comportamento ressalta o caráter seletivo do processo e sua adequação a fluxos residuais oriundos de processos industriais menos concentrados. Por outro lado, os desvios observados

em concentrações mais elevadas, ainda que pontuais, sinalizam a necessidade de monitoramento das condições operacionais e da integridade das membranas, com vistas à manutenção da eficiência ao longo do tempo.

Neste contexto, os resultados reforçam o papel da eletrodialise como uma ferramenta relevante para a gestão sustentável de efluentes industriais contendo metais, especialmente quando se busca não apenas o cumprimento das exigências legais, mas também a valorização de resíduos líquidos por meio da separação e possível recuperação de recursos metálicos. O estudo contribui, portanto, para a consolidação do uso de tecnologias eletroquímicas no tratamento de efluentes, alinhando-se aos princípios da química verde e da economia circular.

Referências Bibliográficas

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO. **Normas técnicas - Consolidação do conhecimento e da experiência na área de corrosão**. Rio de Janeiro: ABRACO, 2019.
2. BUDREYKO, Ekaterina. Creation of Galvanotechnics. A Historical Review. In: **2017 International Workshop on Engineering Technologies and Computer Science (EnT)**. IEEE, 2017. p. 19-22.
3. BISWAL, Hrudaya Jyoti et al. Recent advances in energy field assisted hybrid electrodeposition and electroforming processes. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 38, p. 518-546, 2022.
4. GUO, Song et al. Approaches for the treatment and resource utilization of electroplating sludge. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1707, 2024.
5. RAJIVGANDHI, G et al. Adsorption of nickel ions from electroplating effluent by graphene oxide and reduced graphene oxide. **Environmental Research**, v. 199, p. 111322, 2021.
6. WANG, C et al. Removal of low concentrations of nickel ions in electroplating wastewater by combination of electrodialysis and electrodeposition. **Chemosphere**, v. 263, p. 128208, 2021.
7. JIANG, T; GUAN, W; FU, M. Recovery of nickel from electroless nickel plating wastewater based on the synergy of electrocatalytic oxidation and electrodeposition technology. **Water Environment Research**, v. 94, n. 6, p. e10741, 2022.
8. ABDULLAH, N. et al. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 76, p. 17-38, 2019.
9. KLISHCHENKO, R.; CHEBOTAROVA, R. Removal of Nickel from Electroplating Wastewater by a Combination of Electrodialysis and Electrodeposition. **Journal of Water Chemistry and Technology**, v. 45, n. 4, p. 378-382, 2023.
10. SILVESTRE, W. P; BALDASSO, C. Treatment of Water Contaminated by Heavy Metal using Membrane Separation Processes. In: **Toxic Metals Contamination**. CRC Press, 2022. p. 117-145.
11. MULDER, Marcel. Basic principles of membrane technology.2. Ed. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 p.

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2025, em São Paulo, no mês de julho de 2025.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

INFLUENCE OF CONCENTRATION AND PH OF A ZR-BASED CONVERSION COATING ON GALVANIZED STEEL

Carolina Remedi de Menzes^a, Josiane S. Costa^b, Jane Zoppas Ferreira^c

a. Metallurgical Engineer - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil

b. PHD, Materials Engineer - Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil

c. PHD, Chemistry- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil

Introduction

Steel and its alloys are among the most widely used metallic materials in the industry due to their versatility and ability to perform multiple functions in different engineering applications. However, one of the main limitations of these materials is their generally low corrosion resistance. To improve their durability and reduce maintenance costs, protective surface treatments such as conversion coatings (CCs) are often applied.

Among traditional CCs, chromate and phosphate-based treatments have stood out for their effectiveness. Chromatization in particular, provides excellent corrosion resistance,

but the presence of hexavalent chromium (a highly carcinogenic and environmentally harmful substance) has led to increasing restrictions on its use [1,2] Similarly, the environmental impact of phosphate discharges, especially their contribution to eutrophication, has prompted regulatory actions to limit their use in various sectors [3]. As a result, the development of environmentally friendly alternatives to these conventional coatings is essential for sustainable industrial practices.

In this context, zirconium-based (Zr-based) conversion coatings have gained significant attention as a promising alternative. These coatings offer several advantages, such as low

Zr-based conversion coatings have emerged as an environmentally friendly process, promoting good corrosion properties as well, as an alternative to the chromization and phosphating techniques that presents hexavalent chromium and phosphates as a huge problem to the environment. In this work, two commercial solutions were used for conversion in a galvanized steel substrate: one containing only Zr and another containing Zr and Mo. Two different concentration values were used for each solution with all conditions made at pH 3.0 and 4.0. The surface was analyzed by scanning electron microscope and energy dispersive x-ray spectrum. The corrosion process was investigated by electrochemical impedance spectroscopy and accelerated corrosion test with painted selected samples. The presence of Mo in the coating was detected by EDS analysis and the electrochemical behavior confirm that the corrosion resistance of the conversion layers increased when molybdenum were present in the zirconium solution.

Keywords: corrosion, conversion coating, zirconium, galvanized steel .

toxicity, the ability to form uniform and thin protective films, and good compatibility with industrial painting systems [4,5]. In addition, Zr-based coatings have demonstrated excellent corrosion resistance even at thicknesses below 100 nm, making them suitable for automotive, electronics, and construction applications [6].

The protective effect of Zr-based coatings depends strongly on the morphology and density of the deposited film, which are influenced by key bath parameters such as pH and Zr^{4+} ion concentration. Studies have shown that these variables directly affect the film's stability and anticorrosive performance, with optimal results observed within specific operational ranges [4,6,7]. At very low pH values (below 3), excessive solubilization of zirconium species may hinder film nucleation, while higher pH levels can lead to uncontrolled precipitation and the formation of porous or poorly adhered layers [8,9]. An ideal range between pH 3,5 and pH 4,5 has been reported to favor the formation of more homogeneous and cohesive films with superior resistance to corrosion [7,8].

Similarly, the concentration of Zr^{4+} ions play a critical role. Insufficient concentrations may not provide enough material for continuous film formation, whereas excessively high concentrations can result in thick, unstable coatings [5,6]. Some studies suggest that the

addition of stabilizing agents (such as silanes or bicarbonates) can improve the mechanical and chemical properties of the coating [5,7,10]. When Zr-based coatings are applied to galvanized steel, additional challenges arise due to the high reactivity of zinc in acidic environments. Gas release (e.g., H_2) and the formation of zinc hydroxide may interfere with the adhesion and continuity of the film [11–13]. Precise control of bath composition and immersion time is therefore necessary to ensure coating uniformity and adhesion [12,14].

Despite notable progress, there is still a lack of systematic studies that explore the combined effects of pH and zirconium concentration on galvanized steel. Most investigations either focus on aluminum alloys or evaluate these parameters separately [10,14–16]. Therefore, the present work aims to assess how pH and Zr^{4+} ion concentration affects the morphology, corrosion resistance, and paint adhesion of zirconium-based conversion coatings on galvanized steel sheets, seeking to define optimal treatment conditions for industrial application.

Methodology

Galvanized steel samples were cleaned and degreased by immersion in SaloClean® for 10 min at (60 to 70) °C then washed with distilled water and air-dried. This procedure was carried out to prepare the metal surface to obtain

the coating. The conversion bath consists in two types of commercial solutions based on H_2ZrF_6 by KLINTEX®: ZR14 and ZR16. Both solutions have already been used in other studies and published research, the main difference between the two solutions is the presence of a large amount of Mo as an additive in ZR16 composition [7,11]. For each of the solutions, the concentration values used in this work were based on tests previously done with ZR14 and ZR16, being 2,5 % and 2,9 % for ZR16 and 3,5 % and 7 % for ZR14. To analyze the influence of pH, the values used were pH 3 and pH 4. To analyze the influence of pH, the values used were pH 3 and pH 4. After the immersion, the samples were rinsed in distilled water and air jet dried.

In this study, open circuit potential (OCP) was analyzed during the coating formation. Furthermore, Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectrum (EDS) analyses were performed to investigate the morphology and the composition of the conversion coatings. The electrochemical analysis of the coatings was performed by electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The EIS curves were performed in triplicate and acquired with the samples immersed in NaCl 0.5 mol/L solution at room temperature, using a potentiostat AUTOLAB PGSTAT302 and NOVA 2.1. In this work, the results will be analyzed after 1 h and 72 h of immersion.

Also, some of the coated samples passed through the process of painting through the dip coating for the adhesion and accelerated corrosion tests: ZR16 2,5 % (ZR25) and 2,9 % (ZR29) both at pH 4 and ZR14 7 % at pH 3 (ZR73) and pH 4 (ZR74). The accelerated corrosion test was performed by maintaining the temperature at (35 ± 2) °C with 5 % salt spray of NaCl. The evaluation was conducted in a visual way, according to the degree of oxidation of zinc (white oxidation). The adhesion test was performed according to the ASTM D4541-22 standard [17]. The measurements were obtained by the pull-off method, using PosiTest AT-A equipment, at 1 MPa/s.

Results and discussion

OCP during deposition

The OCP results provide insights into the process occurring during the formation of the coating layer while the sample is immersed in the bath solution. The Figure 1 shows the behavior of the two bath formulations – ZR14 and ZR16 – when applied to galvanized steel. In general, the curves exhibit a similar trend, regardless of the solution and/or pH value, with distinct phases of potential decrease followed by stabilization. During the formation of CCs, the OCP measurements typically reveal three characteristic phases, which correspond to the coating development process[13-15].

The first phase corresponds to the activation of the metal surface by the fluoride anions, which promotes partial dissolution. In this present study, this involves the dissolution of the zinc layer on galvanized steel surface, leading to the initial drop in potential. For ZR14 solutions, this phase lasted approximately 80 s, with the exception of the 3,5 % solution at pH 4, that showed a slightly longer potential drop, extending around 120 s. In the case of ZR16, the first phase generally ended around 60 s, although the 2,9 % solution at pH 3 showed modestly extend duration.

The second phase marks the onset of zirconium deposition on the surface. According to Cerezo et al. [14] reported that the conversion layer deposition depends on the chemistry of the metal substrate. One of the key factors driving the initiation of deposition is the local increase in pH near the metal surface. In fact, higher cathodic activity (due to the hydrogen evolution, oxygen reduction, and possible additive interactions), favors the appearance of a minimum in the potential curve. This behavior is particularly evident in Al-alloys where intermetallic particles act as cathodic sites that promote coating nucleation [16-18].

The OCP for samples treated with in ZR14 tend to stabilize within a narrow range, whereas those for ZR16 show greater variation. After stabilization the ZR14-treated samples

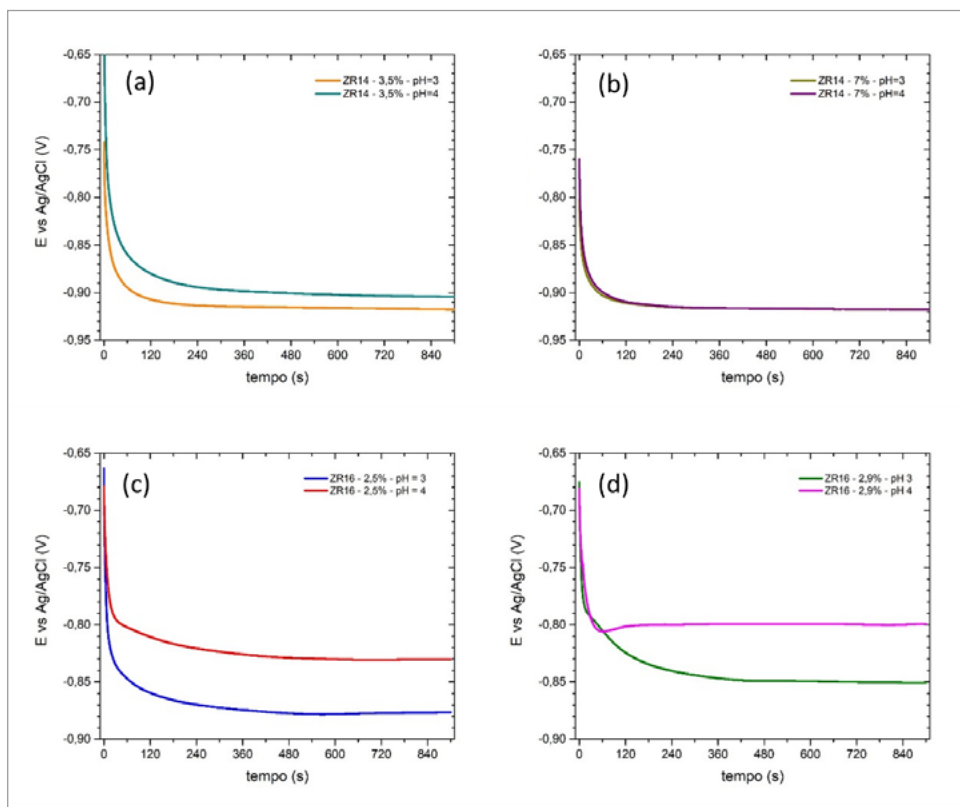


Figure 1 - OCP measurements of ZR14 (a) 3,5%, (b) 7% and ZR16 (c) 2,5%, (d) 2,9%.

exhibit potentials between -0.92 V vs. Ag/AgCl and -0.88 V vs. Ag/AgCl while the ZR16-treated samples ranged from -0.88 V vs. Ag/AgCl to -0.79 V vs. Ag/AgCl. Notably, ZR16-treated samples displayed active potentials following coating deposition. Samples processed at pH 4 exhibited a higher potential than those under identical conditions but at pH 3. According to the Pourbaix diagram [20] for zirconium and zinc, the observed potential ranges support the occurrence of precipitation reactions, confirming the formation of the conversion layer on the galvanized steel surface.

SEM results

Through the micrographs performed by SEM, shown in Figure 2, it can be observed that there is no preferential growth or localized deposition of the coating on the galvanized steel. In fact, the coatings appear morphologically similar in all conditions, with no eye-catching differences. The EDS analysis has shown the presence of Zr in coated samples, as expected,

shown in Table 1. Additionally, significant amounts of O were detected, due to the formation of zirconium oxides that precipitates during the coating process [4]. Molybdenum, detected only in the samples treated with ZR16 solution, corresponds to the presence of this element exclusively in that formulation, representing the main compositional difference between ZR14 and ZR16.

Samples treated with ZR14, a higher zirconium content was observed in coatings formed at pH 4 compared to pH 3. This result reinforces the role pH in promoting Zr deposition, as widely reported in literature. However, this trend was not consistent in ZR16 samples. The presence of Mo appears to influence the deposition behavior, suggesting that both pH and bath composition affect the final coating characteristics. Although the Zr content in ZR16 coated samples was generally lower than in those treated with ZR14, some trends were noted. The ZR16 solution 2,5 % concentration and pH 3 showed the highest Mo content detected on the surface, which

corresponded with an increased deposition compared to the same concentration at pH 4. When the concentration was slightly increased to 2,9 % this trend reversed-coatings formed at pH 4 exhibit higher Zr content than those at pH 3. Overall, among the ZR16 samples, those with greater Mo content also tended to show higher Zr deposition.

EIS analysis

The Bode diagrams for coated samples are exhibited in Figures 3 and 4. It can be observed that the curves related to samples coated

in H_2ZrF_6 display very similar behaviors, characterized by time constants at high and medium frequency ranges. The uncoated sample (bare) is plotted along with the coated samples for comparison. After 1 h immersion time, as shown in Figure 3 (a,b), at high frequencies the time constants are related to the coat over the galvanized steel, while the bare sample shows a single time constant. Due to the coating degradation with time and presence of corrosion products on the samples, after 72 h Figure 3 (c, d) the curves have moved to lower frequencies from the previous 1 h. At this point, the

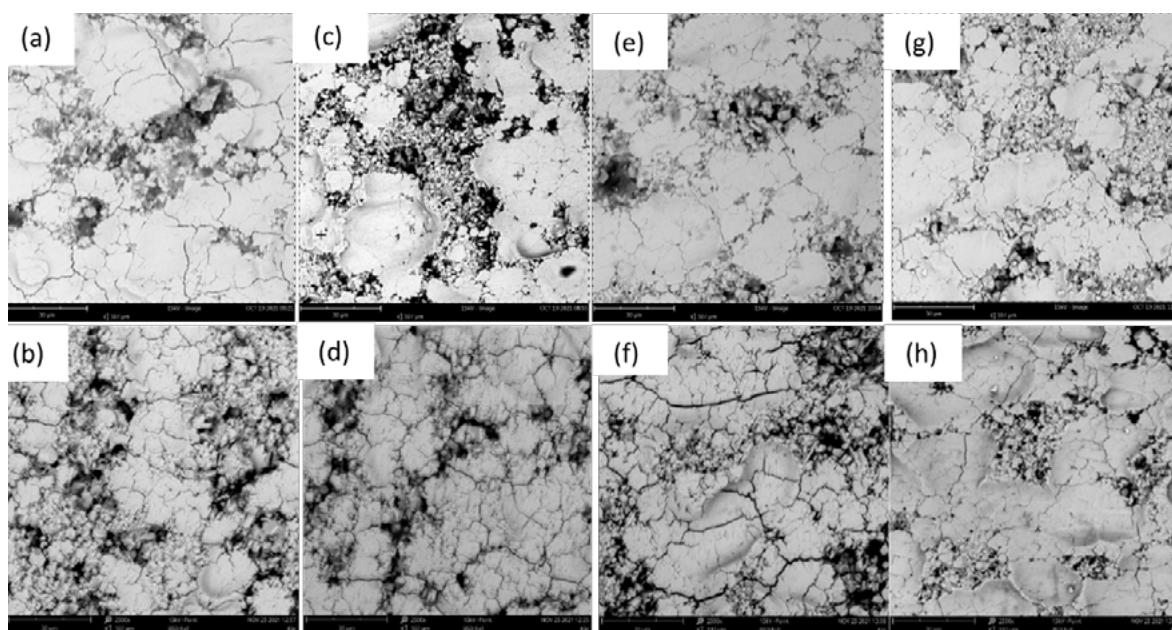


Figure 2 - SEM images of ZR14 3,5% (a) pH 3 and (b) pH 4; ZR14 7% (c) pH 3 and (d) pH 4; ZR16 2,5% (e) pH 3 and (f) pH 4; ZR16 2,9% (g) pH 3 e (h) pH 4

Table 1 - Composition of each coating by EDS

Coating and conditions	Elements (Weight concentration)						
	Zn	Fe	C	O	Zr	F	Mo
ZR14 - 3,5 % pH 3	77,32	2,77	7,63	8,24	4,05	-	-
ZR14 - 3,5 % pH 4	71,12	3,98	12,38	6,43	4,75	1,35	-
ZR14 - 7 % pH 3	86,31	2,52	5,11	3,54	2,52	-	-
ZR14 - 7 % pH 4	81,46	4,32	2,15	5,53	6,55	-	-
ZR16 - 2,5 % pH 3	73,53	2,68	11,83	6,14	3,19	-	2,63
ZR16 - 2,5 % pH 4	79,25	3,01	9,63	5,08	2,66	0,37	-
ZR16 - 2,9 % pH 3	80,49	-	7,18	6,88	3,10	1,82	0,52
ZR16 - 2,9 % pH 4	86,13	0,78	2,10	4,66	3,95	0,49	1,88

corrosive process on the samples is already happening. There is a decrease in corrosion protection evidenced by the impedance values related to high and medium frequencies that are lower when compared to the impedance after 1 h [21]. The samples coated with ZR16 solution after 1 h and 72 h of immersion in the corrosion solution are shown in Figure 4. In general, the curves related to the ZR16 coated are very similar to the ZR14 ones. All curves are shifted to frequencies lower than those recorded at the beginning.

The effect of pH on corrosion resistance is also evident. During the first hour of immersion in 0,5 mol/L NaCl, samples treated at pH 4 exhibited a higher impedance values than those treated at pH 3. For instance, at a frequency 0,1 Hz, the corrosion resistance values for ZR16 coatings were $4,1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and $2,8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ for 2,5% and 2,9% concentrations at pH 4, respectively. In contrast, the corresponding values for pH 3 were lower: $2,2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$

and $1,5 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Interestingly, the opposite trend was observed for ZR14 coated samples, where those treated at lower pH exhibited slightly higher corrosion resistance.

Adhesion test and accelerated corrosion test

In the following analysis, the uncoated galvanized steel samples is referred to as bare sample. Samples coated with the ZR14 at 7 % concentration are designed ZR7-3 and ZR7-4 for treatments at pH 3 and pH 4, respectively. The samples treated with ZR16 solution at pH 4 will be assigned ZR29 for the corresponding concentration 2,9 % and ZR25 for the corresponding concentration 2,5 %.

As illustrated in Figure 5, the painted bare sample exhibit the lowest adhesion strength when compared to the coating specimens. Analyzing the results between the coated samples, two important points are observed: (i) the differences in adhesion values are not

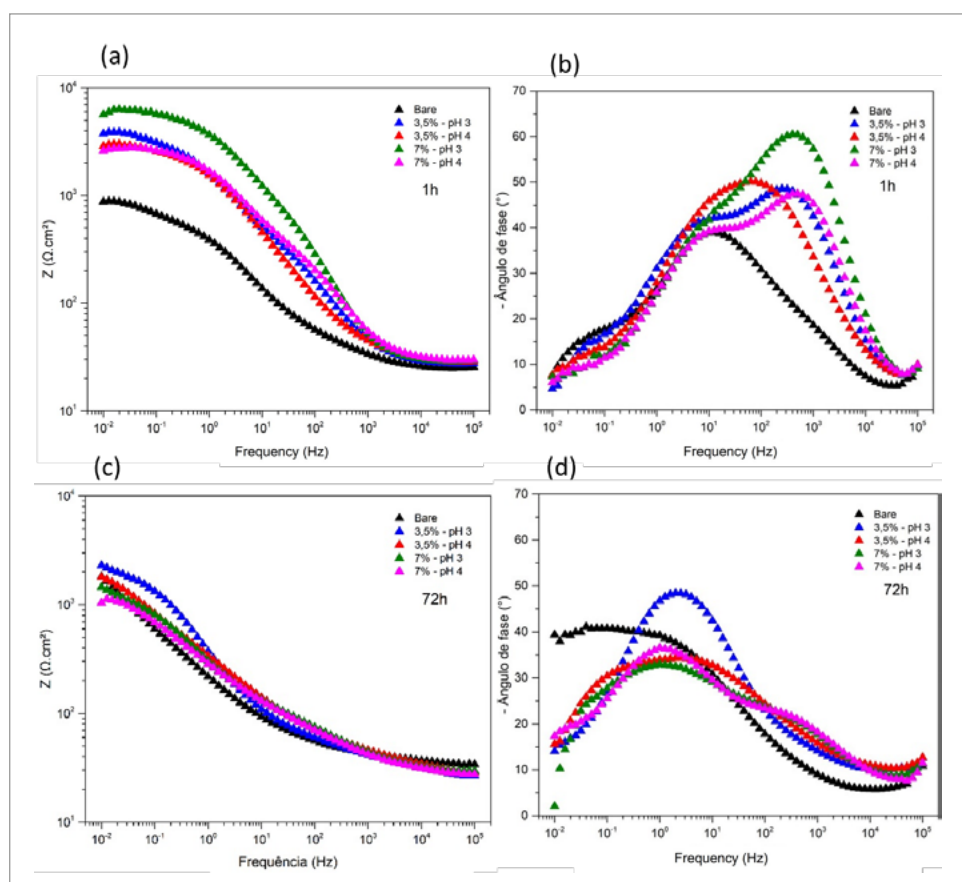


Figure 3 - Bode diagrams for bare sample and coated samples in ZR14 solution with different concentrations and pH obtained after 1h (a,b) and 72h (c,d)

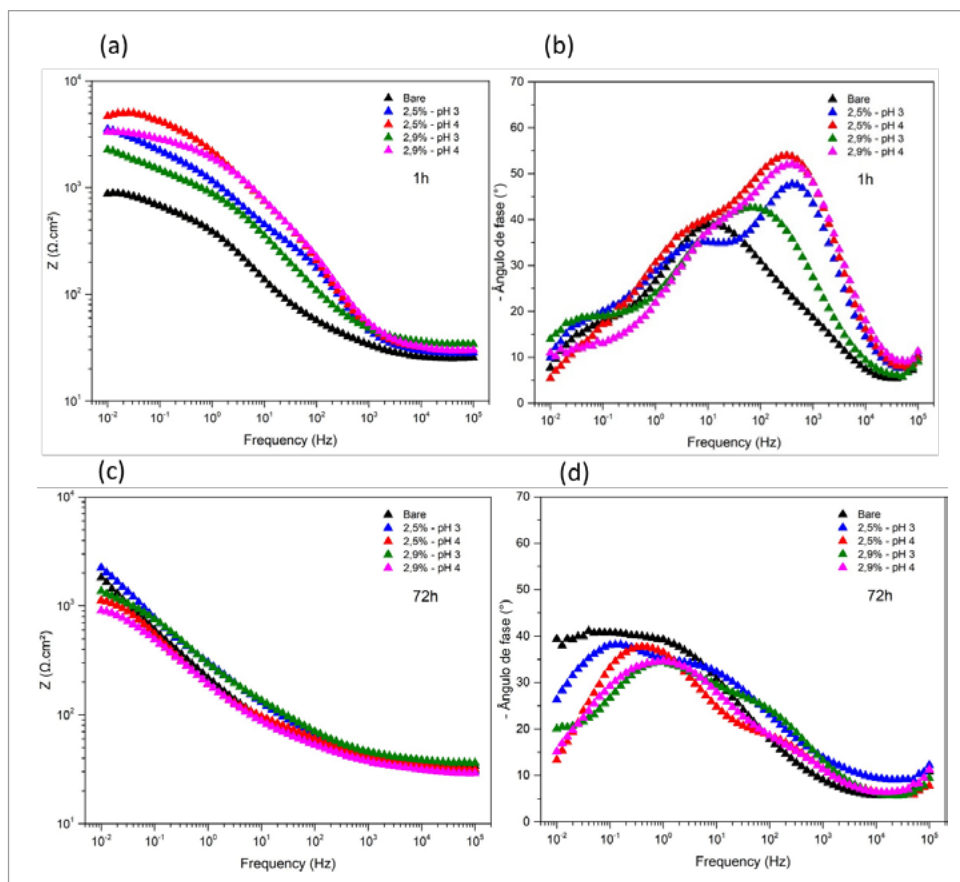


Figure 4 - Bode diagrams for bare sample and coated samples in ZR16 solution with different concentrations and pH obtained after 1h (a,b) and 72h (c,d)

substantially pronounced, and (ii) the ZR16 coated sample at 2.9 % concentration (ZR29) showed the highest adhesion value, reaching 7.97 MPa.

The accelerated corrosion test was performed for 576 h. During all these days, samples were analyzed according to NBR 5841 and NBR ISO 4628-3 standards, evaluating the corrosive behavior of paint and its substrate, respectively. Table 2 summarizes the standards and corresponding parameters used for evaluation, including presence of bubbles in the material, density of these bubbles and also the degree of corrosion, if there was any apparent corrosive process.

Table 2 - Standard used for analysis of accelerated corrosion results

Standard	Parameter	Level
NBR 5841	Bubble size	T0 → T5
	Bubbles density	D0 → D5

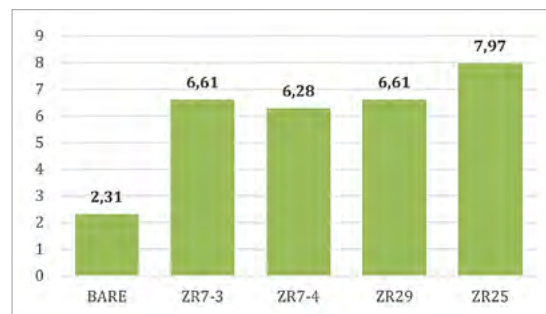


Figure 5 - Numerical results of a pull-off adhesion test

The accelerated corrosion results can be seen in Table 3. It can be observed that the bare sample showed differences in its surface soon after 48 h of experiment, while the coated ones took a few more days to present the first bubbles, after 408 h.

Conclusion

Based on the compositional analysis of the coatings, it can be possible to confirm that the Zr was successfully incorporated into the

Table 3 Accelerated corrosion results of bare and coating plus painting

Time / h	Samples				
	BARE	ZR25	ZR29	ZR7-3	ZR7-4
24	T0/D0	T0/D0	T0/D0	T0/D0	T0/D0
48	T2/D2	T0/D0	T0/D0	T0/D0	T0/D0
72	T2/D2	T0/D0	T0/D0	T0/D0	T0/D0
168	T2/D4	T0/D0	T0/D0	T0/D0	T0/D0
408	T3/D5	T0/D0	T2/D2	T2/D2	T2/D2
432	T3/D5	T0/D0	T2/D4	T2/D2	T2/D2
456	T3/D5	T0/D0	T2/D4	T2/D2	T2/D2
480	T3/D5	T0/D0	T2/D4	T2/D4	T2/D4
552	T3/D5	T1/D1	T2/D5	T2/D4	T2/D5

conversion layer under all tested conditions performed on this paper. The Mo detection also proves the presence in the ZR16 solution and its integration into the coating. By the SEM results there was no significant morphological differences among the coatings, all exhibiting comparable surface characteristics.

This work demonstrates that the coating process and corrosion protection of the conversion coatings are favored when an increase of pH of the conversion solution from pH 3 to pH 4 occurs. The presence of Mo in the ZR16 solution is shown to have an effect on the Zr deposition of the conversion layer and contributes to the formation of a protective layer against corrosion, since it has potential nobler than the ZR14 solution without the element and showed a higher corrosion resistance under these conditions.

The results from the accelerated corrosion test on painted samples confirmed the expected barrier effect of the coating, which effectively delayed the onset of substrate corrosion. Furthermore, the adhesion test indicated that the presence of the conversion coatings, both ZR14 and ZR16, significantly improved the paint adhesion in comparison to the untrated galvanized steel surface.

Bibliographical references

- [1] M. Tumolo *et al.*, "Chromium pollution in European water, sources, health risk, and remediation strategies: An overview," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 15, pp. 1–25, 2020, doi: 10.3390/ijerph17155438.
- [2] OSHA, "Hexavalent Chromium. Occupational Safety and Health Administration. 3373-10," 2009. <https://www.osha.gov/hexavalent-chromium> (accessed Feb. 02, 2024).
- [3] "European Commission (EC)," *European Commission proposes to ban phosphates in laundry detergents*, 2010. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_10_1465 (accessed Feb. 28, 2024).
- [4] H. R. P. Cardoso, C. Rapacki, and J. Z. Ferreira, "Monitoring of a Zr-based conversion coating on galvanized steel and its performance against corrosion," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 8, pp. 726–730, 2019, doi: 10.1080/1478422X.2019.1657703.
- [5] I. Milošev and G. S. Frankel, "Review—Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, no. 3, pp. C127–C144, 2018, doi: 10.1149/2.0371803jes.
- [6] J. dos Anjos-Moraes, A. Giacobbo, R. Sánchez-Tovar, R. L. García, J. García-Antón, and J. Z. Ferreira, "Electrochemical behavior during the zirconium conversion coating formation on AISI 1006 steel," *Mater. Res.*, vol. 22, no. 5, pp. 19–23, 2019, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0322.
- [7] J. S. Pinheiro, G. Regio, H. R. P. Cardoso, C. T. Oliveira, and J. Z. Ferreira, "Influence of Concentration and pH of Hexafluorozirconic Acid on Corrosion Resistance of Anodized AA7075-T6," *Mater. Res.*, vol. 22, no. suppl 1, 2019, doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0048>.
- [8] J. Z. Rosa, Germano C. Jéssica Salles Pinheiro; Ferreira., "Influence of pH and concentration on zirconium-based coating on T6-7075 aluminum alloy," *21st Int. Corros. Congr. 8th Int. Corros. Meet.*, 2021.

- [9] T. Zhang *et al.*, "Investigation of the microstructure, growth mechanism, and corrosion behavior of a new Zr-Ti conversion coating on 6016 aluminum alloy," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 30, no. May, pp. 7585-7596, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.05.138.
- [10] Y. Liu *et al.*, "Protection of AA5083 by a Zirconium-Based Conversion Coating," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 163, no. 9, pp. C576-C586, 2016, doi: 10.1149/2.1021609jes.
- [11] S. Verdier, N. Van Der Laak, F. Dalard, J. Metson, and S. Delalande, "An electrochemical and SEM study of the mechanism of formation, morphology, and composition of titanium or zirconium fluoride-based coatings," vol. 200, pp. 2955-2964, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.10.139.
- [12] V. B. Moreira, A. Puiggali-Jou, E. Jiménez-Piqué, C. Alemán, A. Meneguzzi, and E. Armelin, "Green nanocoatings based on the deposition of zirconium oxide: The role of the substrate," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 4, pp. 1-18, 2021, doi: 10.3390/ma14041043.
- [13] G. Zaro, T. M. De Abreu, and J. Z. Ferreira, "Influência do pH da solução à base de ácido hexafluorizircônio na formação do revestimento de conversão em aço galvanizado Gustavo Zaro, Tiago M. de Abreu, Jane Z. Ferreira," 2012.
- [14] J. Cerezo *et al.*, "Initiation and growth of modified Zr-based conversion coatings on multi-metal surfaces," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 236, pp. 284-289, 2013, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.09.059.
- [15] L. I. Fockaert, P. Taheri, S. T. Abrahams, B. Boelen, H. Terryn, and J. M. C. Mol, "Zirconium-based conversion film formation on zinc, aluminium and magnesium oxides and their interactions with functionalized molecules," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 423, pp. 817-828, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.06.174.
- [16] M. H. Shahini, H. Eivaz Mohammadloo, and B. Ramezanzadeh, "Recent advances in steel surface treatment via novel/green conversion coatings for anti-corrosion applications: a review study," *J. Coatings Technol. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 159-199, 2022, doi: 10.1007/s11998-021-00466-0.
- [17] "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers," p. 18.
- [18] H. Eivaz Mohammadloo, A. A. Sarabi, A. A. Sabbagh Alvani, H. Sameie, and R. Salimi, "Nano-ceramic hexafluorizirconic acid based conversion thin film: Surface characterization and electrochemical study," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 206, no. 19-20, pp. 4132-4139, 2012, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.04.009.
- [19] T. Lostak *et al.*, "Zr-based conversion layer on Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets: Insights into the formation mechanism," *Electrochim. Acta*, vol. 137, pp. 65-74, 2014, doi: 10.1016/j.electacta.2014.05.163.
- [20] M. Pourbaix, *Atlas of chemical and Electrochemical equilibria in the presence of a gaseous phase*. 1997.
- [21] M. A. Arenas and J. De Damborenea, "Use of electrochemical impedance spectroscopy to Study corrosion of galvanised steel in 0.6M NaCl solution," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 228-234, 2006, doi: 10.1179/174327806X132213.

GALVANIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Igor Filipi Rezende Silva

Engenheiro Mecânico – Engenheiro Sênior de Desenvolvimento de produto e qualidade NEXA RESOURCES

Introdução

O objetivo deste artigo é a explicação sobre como a Galvanização por Imersão a Quente se torna uma ótima alternativa de proteção contra corrosão de estruturas de painéis solares fotovoltaicos. Nesse contexto, serão consideradas as particularidades do ambiente nacional, relacionadas às características de corrosividade, exposição à radiação UV, locais de instalação e intempéries, além das características dos materiais utilizados no sistema fotovoltaico.

Metodologia

Geração fotovoltaica

O kit energia solar fotovoltaica possui alguns componentes básicos, agrupados em três diferentes blocos: o bloco gerador, o bloco de

condicionamento de potência e o bloco de armazenamento. Cada grupo é formado por componentes com funções específicas.

- Bloco gerador: painéis solares; cabos; estrutura de suporte.
- Bloco de condicionamento de potência: inversores; controladores de carga.
- Bloco de armazenamento: baterias.

O elemento principal para a geração fotovoltaica é a célula fotovoltaica, pertencente ao grupo gerador. Porém, o aproveitamento em escala comercial desse tipo de energia se faz com o auxílio de outros componentes. Primeiramente, as células são agrupadas e revestidas para formar os módulos fotovoltaicos (figura 1).

Resumo

A indústria de geração e transmissão de energia elétrica representa uma parcela significativa dos investimentos em infraestrutura. O segmento de energia solar fotovoltaica vem ganhando representatividade neste setor no Brasil. Diversos componentes desse segmento são feitos de aço, incluindo estruturas de sustentação de painéis e torres de transmissão. A manutenção dessas estruturas pode ser difícil e custosa em função do ambiente em que estão expostas ou das limitações de acesso, normalmente distantes dos grandes centros, ou pela necessidade de alta disponibilidade do sistema. Ainda, considerando uma vida útil média estimada para os painéis fotovoltaicos de 30 anos, a integridade das estruturas de sustentação destes no longo prazo é fator preocupante, já que estas podem estar expostas a ambientes extremamente agressivos, com alta incidência de raios UV, fortes ventos, além de elementos abrasivos. Devido a estes aspectos, um sistema de proteção contra corrosão de ótimo custo benefício, longa durabilidade, e livre de manutenção para o aço deve ser especificado. A galvanização por imersão a quente surge como alternativa, já que oferece proteção de longo prazo contra a corrosão e é resistente à abrasão ao aço.

Palavras-chave: Galvanização, Fotovoltaico, Solar, Corrosão, Transmissão, Energia

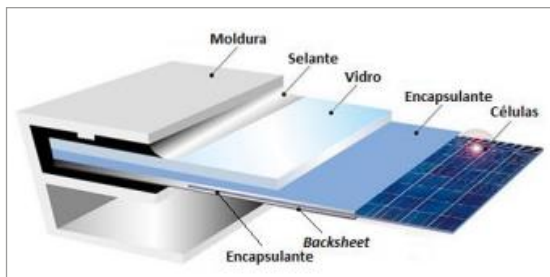


Figura 1 - Camadas de um módulo fotovoltaico típico.
Fonte: Adaptado de http://www.riteksolar.com.tw/eng/p2-solar_modules.asp.

Considerando o fator corrosão, é importante considerar o material da moldura, que é a parte externa estruturante do módulo, geralmente de alumínio. É através dela que é feita a fixação do módulo. Atualmente existem módulos com a tecnologia frameless, que dispensa a estrutura metálica. Assim como a estrutura de sustentação do módulo, essa deve resistir pelo menos ao ciclo de vida útil do conjunto, que é estimada em trinta anos.

A estrutura de sustentação é fator muito importante na eficiência do sistema, pois devido à fatores geográficos, para aproveitamento da energia solar, normalmente considera-se o recurso solar incidente na superfície terrestre, considerando um plano horizontal. Porém, o aproveitamento do recurso pode ser otimizado através da orientação dos painéis conforme figuras 2 e 3. O ângulo que usualmente é considerado como ótimo é igual à latitude do local, orientado ao norte, no hemisfério sul, de forma que a superfície

receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual, fazendo com que a variação da irradiação ao longo do ano seja atenuada, assim como maximizada a quantidade de energia incidente sobre tal superfície nesse período.



Figura 3 - Kayam Solar from Jaipur, Rajasthan, India

Se for desejado maximizar a irradiação em determinada estação ou mês, é possível orientar os coletores ao ângulo que favoreça a aplicação. Mesmo em regiões próximas à linha do equador, para estruturas fixas, é desejável que se empregue um ângulo mínimo de 10° nos projetos, de forma a evitar o acúmulo de sujeira sobre módulos, bem como para facilitar a limpeza natural por meio da chuva (PINHO; GALDINO, 2014). Outra maneira de maximizar a irradiação solar sobre uma superfície consiste em fazê-la seguir o movimento do Sol, através de mecanismos e

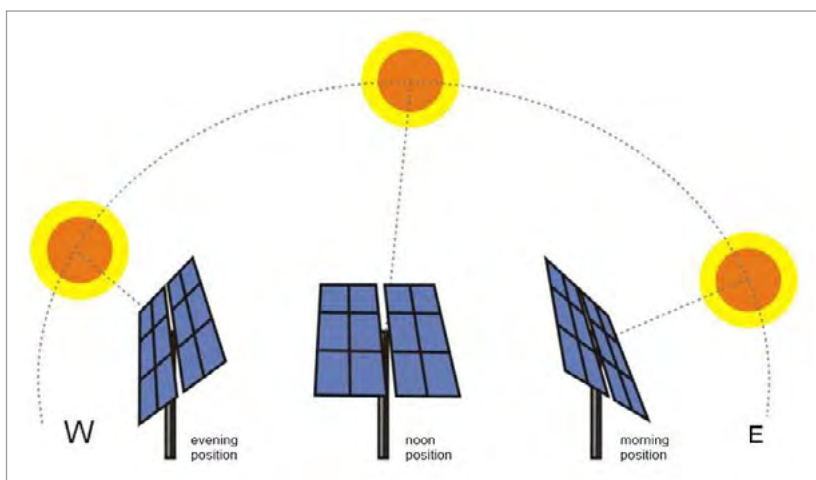


Figura 2 - Módulos variáveis para melhor aproveitamento da incidência solar

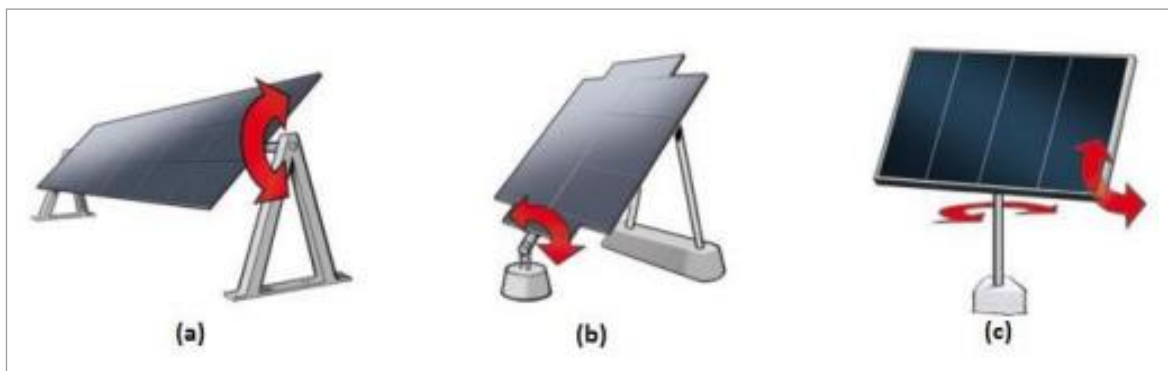


Figura 4 – Sistemas de seguimento solar de um (a,b) e dois (c) eixos

estruturas de seguimento de um ou dois eixos conforme figura 4. Essa alternativa mais usual em centrais fotovoltaicas, nas quais os módulos estão sobre o solo.

Além de promover o agrupamento dos módulos do painel solar, interligando-os de forma simples, as estruturas são aqueles itens instalados para dar sustentação aos demais. Há diversos tipos de estruturas, pois elas dependem de algumas variáveis, como modelo, inclinação, local da instalação e material do qual o painel é formado.

Geralmente essas estruturas são metálicas (aço galvanizado, inoxidável ou Alumínio), ou ainda de madeira.

Caso o suporte seja feito de um metal diferente daquele que constitui os pontos de fixação dos painéis, deve-se tomar o cuidado de isolá-los uns dos outros, impedindo a corrosão galvânica, que ocorre quando metais ou ligas com

potenciais eletroquímicos diferentes são acoplados um ao outro.

A maioria das estruturas de fixação para painéis fotovoltaicos são concebidas para aplicações universais, como: fixação direta sobre o solo, coberturas de telhas cerâmicas, lajes de concreto, telhado metálico e telha de fibrocimento.

Galvanização

A Galvanização por imersão a quente é um dos métodos já aprovados para proteção contra corrosão em estruturas de painéis fotovoltaicos.

A característica única da proteção por barreira da galvanização por imersão a quente, além da catódica do Zinco, é a reação metalúrgica que ocorre entre o aço e o Zinco.

Como o Zinco fundido encontra-se à uma temperatura em torno de 450°C, formam-se camadas

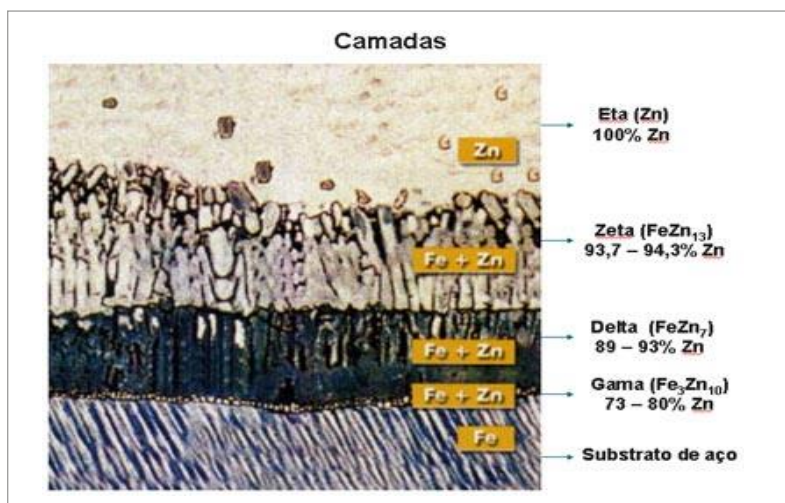


Figura 6 – Camadas de Zn e ZnFe obtidas na Galvanização por imersão a quente



Figura 7 - Etapas do processo de galvanização por imersão a quente

intermetálicas de Zinco, Zinco-Ferro no substrato aço, conforme figura 6 abaixo. Desta maneira o Zinco penetra na rede cristalina do aço, formando uma única estrutura, garantindo, assim, uma proteção contra a corrosão superior à uma por barreira convencional.

O processo de Galvanização geral por imersão a quente

Assim como outras técnicas de proteção contra a corrosão, pintura por exemplo, a preparação da superfície a receber o tratamento é uma etapa fundamental para a qualidade do produto final. A galvanização por imersão segue algumas etapas antes do banho com o Zinco fundido. Na figura 7 abaixo pode-se observar as etapas do processo de Galvanização por imersão a quente.

1. Desengraxe (NaOH);

- Remover todo resíduo de óleo e graxa do aço a ser galvanizado.
- Essa operação é de grande importância, pois um material mal desengraxado compromete as etapas seguintes, além de impossibilitar a molhabilidade pelo zinco líquido (fundido).

2. Lavagem (água);

- Retira o resíduo do banho de desengraxe, evitando a neutralização do banho de decapagem.

3. Decapagem (HCl);

- Tem a função de remover a carepa de laminação e remover a oxidação do material.

- Normalmente utiliza-se ácido clorídrico (HCl) – mais comum e a frio; ou ácido sulfúrico (H₂SO₄) – mais barato, porém tem que ser aquecido entre 60 e 65°C e é mais perigoso, nesse a decapagem é mais rápida.

4. Lavagem (água);

- Tem a finalidade de evitar a contaminação do fluxo com ácido e ferro no banho de fluxagem.

5. Fluxagem

- Triplo sal - Relação de 55% de Cloreto de amônio (NH₄Cl) e 45 % de Cloreto de zinco (ZnCl₂);
- Banho com o objetivo de diminuir tensão superficial, favorecendo a molhabilidade da peça;
- Tem a função de remover micro oxidação, óxidos, carepas e preparar o material para dar aderência ao zinco.
- Temperatura: > 35°C e < 80°C;
- Teor de FeCl₂: < 5g/litro (ideal 2,5g/litro);

6. Secagem;

- a. Função de reduzir a umidade da peça com o objetivo de evitar o choque térmico e o excesso da formação de cinza de zinco.
- b. Pode ser substituída pela fluxagem a quente com aditivos secantes.

7. Banho em zinco fundido (450°C);

- Imersão no zinco fundido normalmente entre 440°C a 460°C.

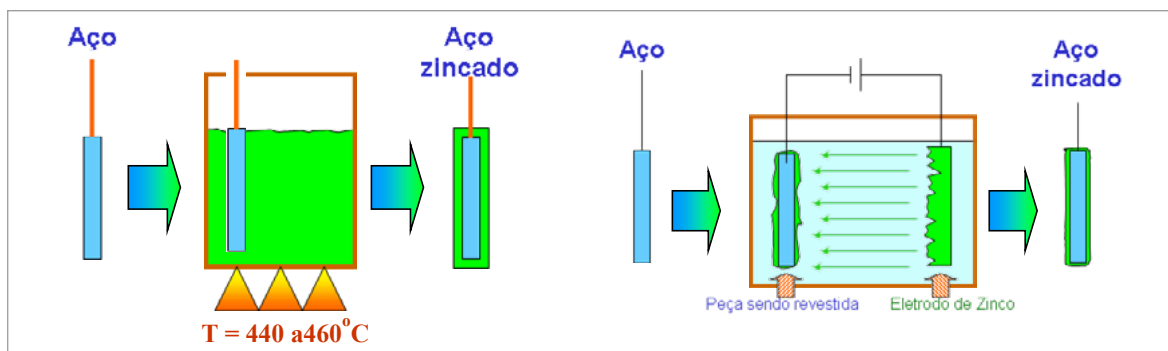


Figura 8 – Galvanização a fogo X Galvanização eletrolítica

- Processo onde ocorrerá a galvanização (revestimento por zinco) do ferro ou aço.

8. Resfriamento.

- Tanque com água, que tem a função de resfriar a peça, retardar o início da reação do zinco a altas temperaturas com o oxigênio da atmosfera e para evitar a degradação do banho de passivação.

9. Passivação

- Tanque com solução cromatizante que tem a função de proteção temporária da camada de zinco evitando a oxidação branca por um período após a galvanização.

Além da Galvanização por imersão a quente, há outras formas de proteção contra corrosão do aço ou ferro que utilizam o Zinco, dado seu potencial de eletronegatividade, que lhe impõe a característica de sacrificar-se em relação ao aço, ou ferro. Dentre as mais utilizadas destacam-se, Galvanização Eletrolítica, Aspersão Térmica (metalização) e a pintura com tinta rica em Zinco. É importante atentar-se às diferenças entre cada uma dessas técnicas. A Galvanização por imersão a quente é a única em que há a reação metalúrgica entre Fe e Zn, formando as camadas intermetálicas.

É comum e muito frequente confundir Galvanização por imersão a quente (a fogo) com Galvanização eletrolítica (Zincagem eletrolítica, Galvanoplastia). Esta confusão é grave, visto que, conforme a aplicação, poderá acarretar em produto com avançado processo de corrosão quando aplicado. A própria norma ABNT NBR 10476 /1988 de Galvanização eletrolítica alerta sobre

sua aplicação, recomendando a Galvanização por imersão a quente para solicitações de vida útil mais longa.

Na Galvanização por imersão a quente o Zinco fundido se difunde na rede cristalina da peça, formando ligas de Zinco Ferro na superfície, passando o Zinco a fazer parte da estrutura em sua superfície.

Na Galvanização eletrolítica, figura 8, a aderência do Zinco é apenas superficial, irregular e com uma camada 10 vezes menor que pelo processo a quente.

Entre as técnicas de proteção contra corrosão que utilizam o Zinco há muita diferença na espessura de camada depositada. Essa variável é diretamente proporcional à vida útil do revestimento. Na figura 9 abaixo exemplifica-se cada tipo de revestimento com sua respectiva espessura de Zinco em micrômetros.



Figura 9 – Comparativo de espessura de revestimentos de Zinco

A figura 10, ilustra o tempo de vida útil esperado do revestimento de acordo com sua espessura e o ambiente onde está inserido. A área hachurada representa as espessuras mínimas requeridas encontradas na norma ASTM NBR 6323:16.

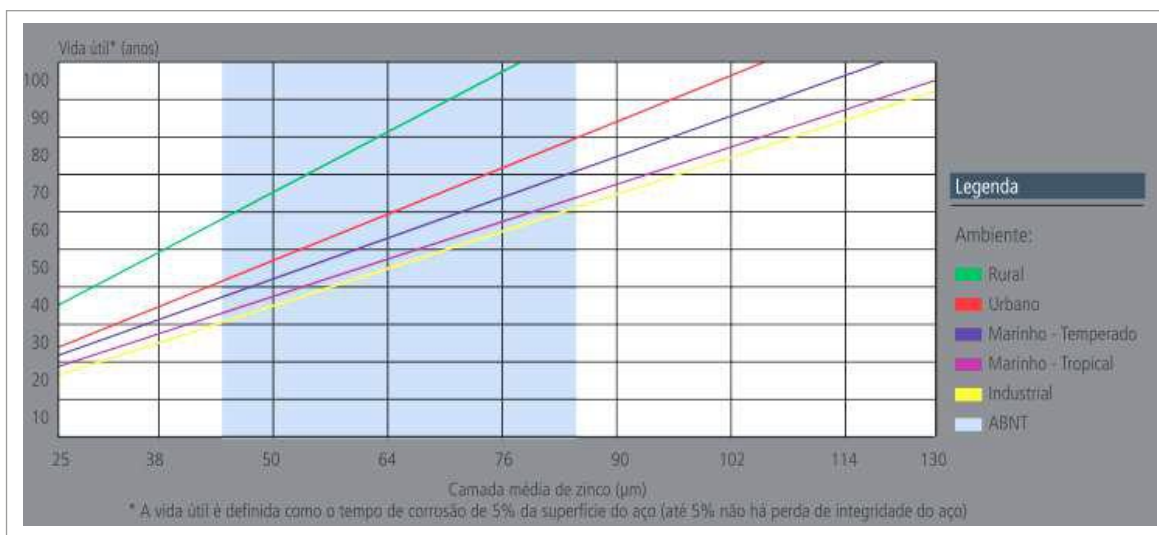


Figura 10 - Vida útil de acordo com o ambiente e espessura de camada de Zinco Na Galvanização de estruturas de painéis fotovoltaicos deve-se observar que:

Na Galvanização de estruturas de painéis fotovoltaicos deve-se observar que:

- A Galvanização por Imersão a Quente não afeta a resistência estrutural do aço. A temperatura de galvanização de 450°C está bem abaixo da temperatura de transformação do aço que é > 700°C.
- Caso uma estrutura, ou peça de aço galvanizado seja danificada em uso, a depender da extensão do dano, ocorre o processo conhecido como cicatrização, conforme observado na figura 11. Esse fenômeno ocorre pelo efeito catódico do da pátina de Zinco ($ZnCO_3$), que é aderente e insolúvel, atuando sobre a área danificada.

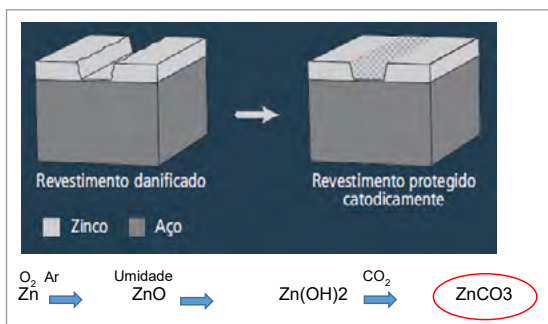


Figura 11- Proteção catódica do substrato pelo Zinco

Como o Zinco é mais anódico do que o elemento Ferro na série galvânica, é ele que se corrói,

originando a proteção catódica, ou seja, o Zinco se sacrifica para proteger o ferro, conforme figura 12.

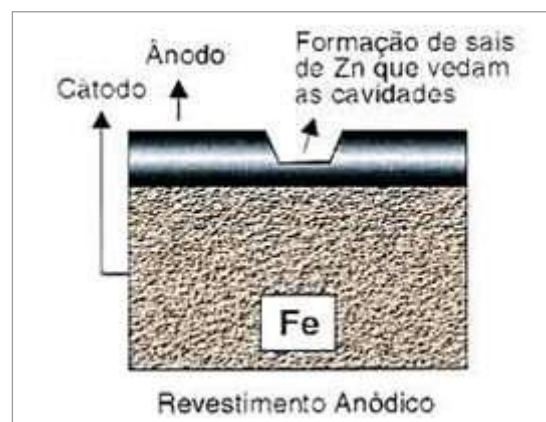


Figura 12 - esquema do fenômeno de proteção catódica

A “cicatrização” ocorre em áreas expostas com largura entre 1 mm e 5 mm, dependendo do eletrólito em contato com o revestimento galvanizado e a área exposta.

Resultados e discussão

Um erro clássico cometido no processo de especificação e compra das estruturas de fixação dos painéis fotovoltaicos é decidir apenas com base no custo das partes sem levar em consideração o custo total ao longo da vida útil da instalação. Achar que a estrutura de fixação dos painéis é a

parte menos importante do sistema pode comprometer todo um projeto de geração de energia solar fotovoltaica.

Uma boa estrutura de suporte para fixação de painéis fotovoltaicos deve ser fácil de instalar, feita com materiais de alta qualidade e com adequada proteção contra corrosão.

As estruturas de suporte devem ser instaladas de maneira a resistir a intempéries, como ventos e chuvas, porém sem prejudicar a estabilidade da edificação, além de resistirem ao próprio peso dos painéis solares.

Os parafusos, porcas e anilhas utilizados na instalação devem ser de material compatível com o restante da estrutura, considerando a resistência a corrosão e a formação de par galvânico.

Conclusões

A estrutura de fixação é a base do seu sistema de energia solar fotovoltaica. Uma boa base assegura a eficiência de todo sistema, além da segurança e o retorno do investimento.

O suporte para fixação do painel solar de qualidade instalado corretamente e protegido contra corrosão irá prover segurança contra ações de

intempéries, ventos ou tempestades, garantindo assim a integridade do sistema.

A galvanização prova-se como ótima alternativa para proteção contra corrosão de estruturas de painéis fotovoltaicos.

Referências bibliográficas

AAVV (2007): Levantamento do estado da arte: energia Solar. Projecto Tecnologias para construção habitacional mais sustentável (Projecto FINEP 2386/04).

ABNT NBR 10476:2016 Revestimentos de zinco eletrodepositados sobre ferro ou aço – Especificação

ABNT NBR 6323:16 - Galvanização por imersão a quente de produtos de aço e ferro fundido – Especificação.

AGA - American Galvanizers Association. <https://www.galvanizeit.org/>

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Atlas da Energia Elétrica do Brasil. Brasília - DF, 2005. 2ª Edição.

ASTM A123 / 17 Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products

Colle, S. (Coord.) (1998): Atlas de irradiação solar do Brasil: 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: INMET.

Filadélfia: Pergamon Press/Journal of the Franklin Institute, (html) (em inglês). Process for protecting articles made of Iron or Steel from oxidation 22-26.

ICZ - Instituto dos Metais Não Ferrosos. Fluxograma de um processo de galvanização a fogo. Ministério de Minas e Energia - Energia Solar no Brasil e no Mundo - 2015.

SILVA, R. M. Energia Solar: dos incentivos aos desafios. Texto para discussão nº 166. Brasília. Senado Federal, 2015.

GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE

UMA TECNOLOGIA CENTENÁRIA DIANTE DOS DESAFIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DO FUTURO

Rogério Nunes Bertocello

Diretor de Operações da bbosch Galvanização do Brasil

Introdução

“Quanto custa galvanizar?” é uma pergunta comum quando se avalia a proteção contra a corrosão. Mas talvez a pergunta mais importante seja outra: “Quanto custa não galvanizar?”

A resposta exige uma mudança de perspectiva. O custo de uma solução de proteção não está



limitado ao valor pago inicialmente pelo revestimento. É necessário considerar manutenção, inspeções, acessos, mobilização de equipes e equipamentos, interrupções operacionais, recuperação ou substituição de componentes, geração de resíduos e impactos associados às intervenções.

A galvanização por imersão a quente é uma tecnologia antiga, mas seu princípio permanece extremamente contemporâneo. O processo combina metalurgia, preparação superficial, controle de processo, características do aço, projeto, especificação e inspeção para produzir uma proteção de elevada durabilidade.

Resumo

A corrosão permanece como um dos principais desafios técnicos e econômicos para a durabilidade das estruturas de aço. A galvanização por imersão a quente combina proteção eletroquímica, efeito de barreira, elevada durabilidade e compatibilidade com os princípios da economia circular. Com quase dois séculos de história industrial, o processo continua atual porque responde a uma questão cada vez mais relevante: não apenas quanto custa proteger uma estrutura, mas quanto custa não protegê-la adequadamente. No Brasil, os requisitos do processo são estabelecidos principalmente pela ABNT NBR 6323:2025, enquanto a avaliação da corrosividade atmosférica pode ser apoiada pela ABNT NBR ISO 9223:2024. Este artigo discute desempenho, ciclo de vida, sustentabilidade, projeto e especificação, defendendo uma visão de valor total em vez de uma análise restrita ao custo inicial.

Palavras-chave: galvanização por imersão a quente; corrosão; aço; zinco; durabilidade; ciclo de vida; sustentabilidade.

Uma tecnologia com quase dois séculos de história

A história da galvanização por imersão a quente remonta ao século XVIII. Em 1742, o químico francês Paul Jacques Malouin descreveu a imersão de ferro em zinco fundido. Em 1836, Stanislas Sorel patenteou um processo de revestimento de ferro com zinco, e em 1837 William Crawford obteve patente britânica relacionada ao processo.

Desde então, a tecnologia evoluiu significativamente. Melhorias na preparação superficial, no controle dos banhos de zinco, na qualidade dos aços, na engenharia das peças, na logística e nos métodos de inspeção permitiram ampliar a confiabilidade e a previsibilidade do processo.

Quase dois séculos de aplicação constituem uma experiência industrial relevante. A galvanização não sobreviveu por ser apenas tradicional: ela continuou sendo aperfeiçoada porque apresenta características de desempenho que permanecem importantes para estruturas projetadas para longos períodos de serviço.

Não é apenas uma camada sobre o aço

Um dos diferenciais da galvanização por imersão a quente é a formação de uma ligação metalúrgica entre o revestimento e o aço. Durante a imersão, ocorrem reações entre o ferro e o zinco, formando camadas de ligas ferro-zinco, recobertas por uma camada externa de zinco.

Essa característica diferencia o revestimento de uma simples película aderida à superfície. A proteção resulta da combinação de dois mecanismos principais: o efeito de barreira, proporcionado pelo revestimento, e a proteção eletroquímica ou catódica, na qual o zinco atua preferencialmente em relação ao aço quando há exposição de áreas metálicas.

A proteção sacrificial é especialmente importante porque o desempenho do sistema não depende exclusivamente da manutenção de uma superfície absolutamente íntegra. O zinco possui capacidade de proteger

eletroquimicamente pequenas áreas do aço expostas.

Durabilidade: quando o tempo trabalha a favor do investimento

Não existe uma única vida útil universal para um revestimento galvanizado. A durabilidade depende da agressividade do ambiente, da taxa de corrosão do zinco, da espessura do revestimento, da geometria da peça, das condições de exposição e dos requisitos específicos do projeto.

Em condições adequadas, revestimentos galvanizados podem proporcionar muitas décadas de proteção, e há exemplos documentados de estruturas com mais de cem anos de serviço. Por isso, a análise econômica precisa considerar não apenas o custo inicial, mas o período durante o qual a proteção permanecerá desempenhando sua função.

Quanto maior a expectativa de vida de uma estrutura, maior tende a ser a importância de soluções que reduzam a necessidade de intervenções ao longo do tempo.

O verdadeiro custo está no ciclo de vida

Ao comparar alternativas de proteção, é comum concentrar a análise no preço inicial. Essa abordagem pode ser insuficiente.

O custo de ciclo de vida deve considerar inspeções, manutenção, preparação de superfícies, recuperação de revestimentos, acessos, equipamentos, mão de obra, paradas operacionais, substituições, descarte de materiais e custos administrativos associados às intervenções.

Em muitas estruturas, o custo indireto de acessar o local, interromper uma operação ou mobilizar recursos pode ser significativo. Assim, uma solução que apresenta custo inicial aparentemente maior pode representar menor custo total ao longo da vida útil.

A pergunta correta passa a ser: qual solução entrega o melhor equilíbrio entre investimento inicial, durabilidade, confiabilidade e custo total de propriedade?

Sustentabilidade não é apenas reciclagem

A sustentabilidade de uma solução de proteção contra a corrosão começa pela sua capacidade de prolongar a vida útil dos materiais.

Quanto maior a durabilidade de uma estrutura, menor tende a ser a necessidade de substituição de componentes, consumo adicional de matérias-primas, transporte, energia, mão de obra e geração de resíduos decorrentes de intervenções frequentes.

Nesse sentido, a galvanização oferece uma contribuição que vai além da reciclagem. Ao aumentar a vida útil do aço e reduzir a frequência de manutenção, o processo pode melhorar a eficiência no uso dos recursos durante todo o ciclo de vida do ativo.

Aço e zinco: materiais compatíveis com a economia circular

O aço e o zinco são materiais amplamente inseridos em cadeias de recuperação e reciclagem. Essa característica é relevante em um cenário no qual a economia circular procura reduzir perdas de materiais e aumentar o aproveitamento dos recursos.

Dependendo das condições do componente e do projeto, estruturas galvanizadas podem ser reutilizadas, recuperadas ou novamente protegidas. A vida útil prolongada também significa que o material permanece em uso por mais tempo antes de retornar ao ciclo de transformação.

A galvanização, portanto, deve ser analisada como parte de uma estratégia de uso eficiente dos materiais, e não apenas como uma etapa adicional de fabricação.

Um indicador importante: o custo da corrosão

A dimensão econômica da corrosão ajuda a compreender a importância da prevenção. O estudo IMPACT, da NACE International, estimou o custo global da corrosão em aproximadamente US\$

2,5 trilhões por ano, equivalente a cerca de 3,4% do PIB mundial, com base nos dados disponíveis à época do estudo.

Esse número não significa que toda perda possa ser evitada por uma única tecnologia. Ele demonstra, porém, a magnitude do problema e o potencial de redução de custos por meio de melhores práticas de projeto, seleção de materiais, especificação, proteção e manutenção.

Nesse contexto, vale repetir a pergunta: quanto custa não proteger adequadamente uma estrutura no momento em que ela é projetada?

E o Brasil?

O consumo de aço galvanizado no Brasil historicamente apresenta valores inferiores aos observados em alguns mercados nos quais a galvanização é mais amplamente especificada. Estimativas setoriais históricas apontam diferenças importantes de consumo per capita, embora esses números devam sempre ser interpretados considerando o ano, a metodologia e o segmento analisado.

Mais importante do que um número isolado é compreender o espaço existente para ampliar a utilização da tecnologia no país. Parte dessa diferença pode estar relacionada à cultura de especificação, à avaliação predominantemente pelo preço inicial e ao conhecimento ainda desigual sobre custos de ciclo de vida.

Ampliar o uso da galvanização não significa adotá-la indiscriminadamente. Significa avaliá-la tecnicamente sempre que a durabilidade, a redução de manutenção e o desempenho de longo prazo forem relevantes para o projeto.

Não é apenas uma questão de zinco

O desempenho de uma peça galvanizada começa antes de ela chegar ao banho. O projeto deve considerar composição e espessura do aço, geometria, cavidades, furos de ventilação e drenagem, possibilidade de entrada e saída do zinco, áreas de sobreposição, tensões residuais, risco de deformação, dimensões e acesso para preparação e inspeção.

Por isso, a galvanização deve ser considerada desde as primeiras etapas do projeto, e não apenas no final da fabricação.

O conceito de “projeto para galvanização” é fundamental para obter qualidade, segurança, produtividade e previsibilidade. Uma boa especificação evita problemas posteriores e permite aproveitar plenamente as características do processo.

A importância da norma brasileira

No Brasil, a referência principal para os requisitos da galvanização por imersão a quente de produtos de aço-carbono e ferro fundido é a ABNT NBR 6323:2025 – Galvanização por imersão a quente de produtos de aço-carbono e ferro fundido – Requisitos.

Para a avaliação da corrosividade atmosférica, a ABNT NBR ISO 9223:2024 – Corrosão de metais e ligas – Corrosividade de atmosferas – Classificação, determinação e estimativa pode ser utilizada como referência complementar.

O uso adequado das normas deve começar na especificação e no projeto. A norma não deve ser vista apenas como uma referência para a inspeção final: ela é uma ferramenta para estabelecer requisitos, responsabilidades, critérios de aceitação e condições de desempenho.

Uma tecnologia antiga para um desafio novo

Os desafios atuais são novos em escala e complexidade: redução de emissões, eficiência no uso de matérias-primas, economia circular, aumento da vida útil dos ativos, redução de manutenção e maior confiabilidade operacional.

A galvanização por imersão a quente dialoga diretamente com esses objetivos. Sua contribuição não está apenas na proteção contra a corrosão, mas na possibilidade de reduzir intervenções e prolongar o período de utilização dos recursos empregados em uma estrutura.

Uma tecnologia não precisa ser nova para ser inovadora. Em muitos casos, inovação significa

utilizar melhor uma solução comprovada, integrando-a às necessidades atuais.

Uma nova forma de tomar decisões

A mudança mais importante talvez seja cultural. Em vez de perguntar somente qual é a alternativa de menor preço inicial, projetistas, especificadores e gestores de ativos podem perguntar:

- Qual é a vida útil esperada da estrutura?
- Quantas intervenções serão necessárias?
- Qual será o custo dessas intervenções?
- Qual será o impacto operacional de uma manutenção?
- Quanto material e energia serão consumidos ao longo do ciclo de vida?
- Qual é o custo total de propriedade?

Essa abordagem desloca a decisão do preço para o valor. E, quando a vida útil de uma estrutura é medida em décadas, essa diferença pode ser decisiva.

Conclusão

A galvanização por imersão a quente não é uma tecnologia nova. Justamente por isso, merece ser avaliada com base na experiência acumulada ao longo de quase dois séculos.

Sua ligação metalúrgica com o aço, a combinação de efeito de barreira e proteção eletroquímica, a elevada durabilidade e a compatibilidade com os princípios da economia circular fazem da galvanização uma alternativa relevante para estruturas que precisam permanecer em serviço durante décadas.

No Brasil, a ABNT NBR 6323:2025 estabelece os requisitos fundamentais para o processo. A especificação adequada, associada à análise da corrosividade atmosférica e às características de cada projeto, é essencial para utilizar o zinco de maneira eficiente e obter o desempenho esperado.

O maior desafio talvez não seja tecnológico. Pode ser a forma como calculamos o custo das nossas decisões.

Não devemos perguntar apenas:

- “Quanto custa galvanizar?”

Devemos perguntar:

- “Quanto custa não galvanizar?”

Mudar essa pergunta pode mudar a maneira como projetamos, construímos e mantemos nossas estruturas.

Referências

ABNT NBR 6323:2025 – Galvanização por imersão a quente de produtos de aço-carbono e ferro fundido – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ABNT NBR ISO 9223:2024 – Corrosão de metais e ligas – Corrosividade de atmosferas – Classificação, determinação e estimativa. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

NACE INTERNATIONAL. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study – IMPACT. Houston: NACE International.

EUROPEAN GENERAL GALVANIZERS ASSOCIATION – EGGA. Galvanizing in Sustainable Construction. EGGA.

EUROPEAN GENERAL GALVANIZERS ASSOCIATION – EGGA. Durability of Hot Dip Galvanized Steel Products. EGGA.

GALVANIZERS ASSOCIATION – UNITED KINGDOM. History of Hot Dip Galvanizing. Galvanizers Association.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Publicações e estudos setoriais sobre consumo de aço galvanizado e proteção contra corrosão.

ISO – International Organization for Standardization. ISO 14713 – Zinc coatings – Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures. Geneva: ISO.

8º Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamentos

Vila Galé Rio – Salão Master | Rio de Janeiro

9 DE DEZEMBRO DE 2026 8H30 ÀS 18H

RÉALIZAÇÃO



PATROCÍNIO DIAMANTE



ABRACO
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO

ONLINE

Tintas Ricas em Zinco:

Fundamentos, Desempenho e Avanços Tecnológicos



PALESTRANTE

Zehbour Panossian
IPT – SP

25 DE NOVEMBRO DE 2026 18H30 ÀS 21H30

CONHECIMENTO TÉCNICO EM SALVADOR

HITA COMÉRCIO E SERVIÇOS RECEBEU A ABRACO PARA UMA PROGRAMAÇÃO QUE REUNIU CAPACITAÇÃO PROFISSIONAL, EXPERIÊNCIA DE CAMPO E ATUALIZAÇÃO SOBRE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA

A capital baiana recebeu, entre 17 e 28 de agosto, profissionais interessados em ampliar seus conhecimentos sobre inspeção de pintura industrial. Nesse período, a ABRACO promoveu uma nova edição do Curso de Inspeção de Pintura Industrial Nível 1, em uma inicia-

tiva que aproximou especialistas, profissionais do setor e conhecimento técnico.

A atividade contou com o apoio institucional da Hita Comércio e Serviços, empresa associada à ABRACO. Localizada no centro de Salvador, a Hita disponibilizou suas instalações para receber a turma e proporcionou uma estrutura de alto padrão, com ambientes adequados, confortáveis e preparados para o desenvolvimento das atividades.

A qualidade do espaço foi um dos pontos que marcaram a realização da programação. A infraestrutura oferecida pela Hita criou condições favoráveis para o trabalho de professores e alunos e contribuiu para que as atividades fossem desenvolvidas em um ambiente profissional, organizado e adequado à proposta do treinamento.



Ao longo da programação, os participantes aprofundaram conhecimentos relacionados à inspeção de pintura industrial. Preparação de superfícies, tintas, aplicação de revestimentos e procedimentos de inspeção estiveram entre os conteúdos trabalhados, compondo uma formação voltada às diferentes etapas envolvidas no controle da qualidade dos sistemas de proteção anticorrosiva.

A atividade também proporcionou momentos de troca de experiências. Os professores Washington Silva e Fábio Kränkel contribuíram para a formação da turma, compartilhando conhecimentos técnicos e situações relacionadas à prática profissional.

A presença de profissionais experientes em sala permite que conceitos e procedimentos sejam discutidos a partir de situações concretas encontradas na indústria. Para quem atua com inspeção, essa aproximação entre conhecimento técnico e experiência de campo é particularmente relevante, já que as condições de execução podem variar de acordo com o ativo, o ambiente e os requisitos de cada serviço.

Novas possibilidades para a proteção anticorrosiva

A programação reservou ainda espaço para discutir tecnologias que vêm ampliando as alternativas disponíveis para a proteção de

ativos industriais. O tema foi apresentado na palestra “Polímeros de alto desempenho para proteção anticorrosiva de ativos industriais”, conduzida por Pedro Hita.

A apresentação mostrou aplicações de polímeros de alto desempenho e abordou soluções como o encapsulamento flexível de flanges e revestimentos surface tolerant.

Essas alternativas ganham relevância em situações nas quais o preparo ideal das superfícies não pode ser realizado. Em condições desse tipo, soluções específicas podem complementar os sistemas convencionais de pintura e oferecer novas possibilidades para a proteção dos ativos.

A discussão permitiu aos participantes conhecer tecnologias desenvolvidas para responder a desafios encontrados na prática e compreender de que maneira diferentes soluções podem ser consideradas na definição de estratégias de proteção anticorrosiva.

A inclusão da palestra na programação ampliou o escopo da atividade e proporcionou à turma contato com uma abordagem voltada à inovação, aproximando a formação tradicional de tecnologias que já fazem parte das discussões atuais do setor.

A ABRACO agradece à Hita Comércio e Serviços pelo apoio institucional, pela receptividade e pela disponibilização de suas instalações para a realização do treinamento. A estrutura



oferecida pela empresa proporcionou condições adequadas para o desenvolvimento das atividades e contribuiu para a realização de mais uma edição do curso em Salvador.

A ABRACO registra também seu agradecimento aos professores Washington Silva e Fábio Kränkel e ao palestrante Pedro Hita, pela contribuição ao conteúdo e pela disposição em compartilhar conhecimento com a turma.

Trabalho que sustenta cada edição

Por trás da realização de cada curso da ABRACO há um trabalho contínuo de planejamento, organização e acompanhamento. À frente dessa área está Caroline Xavier, coordenadora de cursos da Associação, responsável pela coordenação das atividades de capacitação promovidas pela entidade.

Na realização da edição em Salvador, Caroline contou com o apoio de Diego Zaudenone Lui Cruz e integrantes da equipe de Cursos, na condução das atividades e no acompanhamento das diferentes etapas do treinamento, em conjunto com professores, participantes e a estrutura local.

Formação que se amplia

A realização da atividade em Salvador integra as ações da ABRACO voltadas à ampliação da capacitação técnica em diferentes regiões do

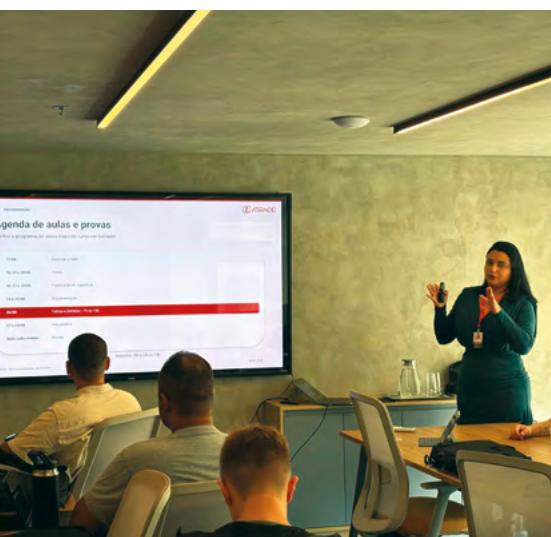
país. A presença da Associação na Bahia aproxima profissionais e empresas locais e contribui para a disseminação de conhecimentos em um setor que exige atualização constante.

A participação da Hita Comércio e Serviços, o conhecimento compartilhado pelos professores e especialistas e a apresentação de novas tecnologias enriqueceram a programação e proporcionaram aos participantes diferentes perspectivas sobre a proteção anticorrosiva.

Para a ABRACO, iniciativas como essa contribuem para a qualificação profissional e para o aprimoramento dos serviços relacionados à inspeção e à proteção de ativos industriais. Também reforçam a importância da aproximação entre a entidade, as empresas e os profissionais que atuam no setor.

A edição realizada em Salvador representa mais um capítulo do trabalho da ABRACO na disseminação do conhecimento e na formação de profissionais. Um trabalho construído com a participação de professores, especialistas, empresas associadas, alunos e da equipe responsável pela organização dos cursos.

E esse trabalho terá continuidade. A ABRACO já olha para 2027 com a expectativa de retornar à Bahia e dar sequência a essa trajetória de capacitação, troca de experiências e aproximação com os profissionais do setor.



ABRACO DISPONIBILIZA RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS GRATUITAMENTE PARA APOIAR A PRÁTICA PROFISSIONAL

Acervo contempla diferentes temas relacionados à corrosão e à proteção anticorrosiva

A busca por informação técnica confiável faz parte da rotina de profissionais que atuam com corrosão e proteção anticorrosiva. Para contribuir com a demanda desse público, a ABRACO dispõe de um conjunto de **Recomendações Técnicas** desenvolvidas por especialistas para oferecer orientações e subsídios à prática profissional, com acesso gratuito para consulta e download.

O acervo reúne conteúdos sobre diferentes temas e está organizado em cinco áreas técnicas: **Corrosão e Monitoração**; **Proteção de Armaduras de Concreto**; **Proteção Catódica**; **Revestimentos de Condições Críticas**; e **Pintura Anticorrosiva**.

Em **Corrosão e Monitoração**, estão reunidas recomendações relacionadas à avaliação da corrosividade e à monitoração da corrosão em diferentes condições de exposição. Já a recomendação **Proteção de Armaduras de Concreto** dedica-se à corrosão desse ambiente.

A área de **Proteção Catódica** reúne recomendações que contemplam diferentes etapas desses sistemas, incluindo levantamentos de

campo, instalação, pré-operação, inspeção e estruturas marítimas. Em **Revestimentos de Condições Críticas**, o conteúdo é voltado à proteção anticorrosiva de condições especiais.

Nas recomendações de **Pintura Anticorrosiva** são encontrados diferentes aspectos dessa forma de proteção, como preparo de superfície, aplicação, seleção de sistemas, especificação de tintas e avaliação de cloretos.

Além de reunir conteúdos técnicos, a iniciativa amplia o acesso a informações úteis para **consulta e apoio a profissionais do setor**, fortalecendo a disseminação do conhecimento especializado em corrosão e proteção anticorrosiva.

Para conhecer o acervo e encontrar o conteúdo de seu interesse, acesse, gratuitamente, a página de **Recomendações Técnicas** no site da Associação.





EMPRESAS E ENTIDADES ASSOCIADAS

A IDEAL SOLUÇÕES ANTICORROSIVAS EIRELI ME
www.aideal.com.br/site/

ADVANCE TINTAS E VERNIZES LTDA.
www.advancetintas.com.br

AKZO NOBEL LTDA - DIVISÃO COATINGS
www.akzonobel.com/international

BBOSCH GALVANIZAÇÃO DO BRASIL LTDA.
www.bbosch.com.br

CENTRO DE TECNOLOGIA EM DUTOS
www.ctdut.org.br

COVESTRO INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE POLÍMEROS LTDA.
www.covestro.com

CPL ENGENHARIA LTDA.
www.cplengenharia.com.br

DE NORA DO BRASIL LTDA.
www.denora.com

DEEPWATER
www.stoprust.com

G P NÍQUEL DURO LTDA.
www.grupogp.com.br

HITA COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA.
www.hita.com.br

HKM METAIS LTDA.
www.hkmmetais.ind.br

IEC INSTALAÇÕES E ENG^a DE CORROSÃO LTDA.
www.iecengenharia.com.br

INSTITUTO BRAS. DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS – IBP
www.ibp.org.br

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT
www.ipt.br

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA – INT
www.int.gov.br

JOTUN BRASIL IMP. EXP. E IND. DE TINTAS LTDA.
www.jotun.com

LGE COMERCIO E SERVIÇOS LTDA.
www.lgeserv.com.br

METAL SALES COMÉRCIO E INDÚSTRIA DE METAIS LTDA.
www.metalsales.ind.br

PETROBRAS - PETRÓLEO BRASILEIRO S/A
www.petrobras.com.br

PRESSERV DO BRASIL LTDA.

<https://presserv.com/brazil/>

PROMAR TRATAMENTO ANTICORROSIVO LTDA.

www.promarpintura.com.br

REFRAMAX ENGENHARIA LTDA.

www.reframax.com.br

RENNER COATINGS

www.rennercoatings.com

RJR SERVIÇOS E LOCAÇÕES

www.gruposervjato.com.br

SACOR SIDEROTÉCNICA S/A

www.sacor.com.br

SHERWIN-WILLIAMS DO BRASIL INDUSTRIA E COMERCIO LTDA.

www.https://sherwin.com.br/

SMARTCOAT - ENGENHARIA EM REVESTIMENTOS LTDA.

www.smartcoat.com.br

TBG - TRANSP. BRAS. GASODUTO BOLÍVIA – BRASIL

www.tbg.com.br

TECHNIQUES SURFACES DO BRASIL LTDA.

www.tsbrasil.srv.br

TECNOFINK LTDA.

www.tecnofink.com

TINÔCO ANTICORROSÃO LTDA.

www.tinocoanticorrosao.com.br

TRANSPETRO - PETROBRAS TRANSPORTE S/A

www.transpetro.com.br

WEG TINTAS LTDA.

www.weg.net

ZERUST PREVENÇÃO DE CORROSÃO LTDA.

www.zerust.com.br

ZINCOLIGAS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

www.zincoligas.com.br

ZINGA METALL BRASIL COMÉRCIO DE PRODUTOS E SERVIÇOS PARA
CORROSÃO LTDA.

www.zingabr.com



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO

Av. Venezuela, 27 • Sl. 412/418 • Centro • Rio de Janeiro • CEP 20081-311

www.abraco.org.br

Facebook: facebook.com/abraco.oficial

LinkedIn: linkedin.com/in/abraco

Instagram: [@abraco_br](https://instagram.com/abraco_br)

Youtube: Associação Brasileira de Corrosão

SETORES

Associados: secretaria@abraco.org.br

CB-43: cb43@abraco.org.br

Comunicação: marketing@abraco.org.br

Eventos: eventos@abraco.org.br

Financeiro: financeiro@abraco.org.br

Qualificação e Certificação: qualificacao@abraco.org.br

Treinamentos: cursos@abraco.org.br