

Corrosão & Proteção

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

Ano 21 | nº 82, dezembro 2025


ABRACO
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO



ABRACO:
57 anos de dedicação ao
combate à corrosão

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 CAPA

A missão na prática:
como a ABRACO transforma
conhecimento em integridade

09 ESPAÇO DA EMPRESA ASSOCIADA Priner entra em operações minerárias e apresenta identidade renovada

10 ARTIGO TÉCNICO Corrosão em Pontes e Estruturas: Como o Zinco Pode Proteger o Futuro

*Camile Paula Theodoro,
Daniel Ferraz*

20 ARTIGO TÉCNICO Anticorrosion Properties of Hierarchical Hydrophobic Surfaces Fabricated on Different Aluminum Alloys

*Rafaela R. Cunha, Eduarda M. Jose, Guilherme K.
Possani, Eduardo L. Schneider, Lisete C. Scienza*

26 ARTIGO TÉCNICO O uso de técnicas espectroscópicas e de caracterização de superfície para análise dos produtos de corrosão

*Mariana Botelho Barbosa, Eduardo Fagiani,
Jessika Thayanne da Silva, Lorena Almeida
Cadete Costa, Daniela Procópio Aguiar, Pamela
Vicente Martins*

32 ARTIGO TÉCNICO Desenvolvimento de melhor rota de tratamentos térmicos e termoquímicos de forma customizada para uso de aços em ambientes corrosivos e abrasivos

*Mariana Botelho Barbosa, Eduardo Fagiani, Tiago
Manoel de Oliveira Santos, Vanessa Pereira Silva,
Glaucio Sansonas*

38 ARTIGO TÉCNICO Study of hydrogen transportation through existing natural gas pipelines

*Pedro Castello Olm, Luiz Eduardo Moraes
Tavares, Rennan Leite, Levi Andrade Vieira,
Rebeca Maciel A. Gomes, Victor Hugo Marini,
Thiago Mesquita*

46 Notícias ABRACO

60 ESPAÇO DO INSPETOR Vinicius Salazar

62 Empresas associadas

ABRACO: 57 anos de compromisso com a integridade, o conhecimento e a excelência técnica

Desde a sua fundação, em 17 de outubro de 1968, a Associação Brasileira de Corrosão – ABRACO – tem exercido um papel essencial na integração entre ciência, indústria e sociedade. São 57 anos de atuação ininterrupta em prol da disseminação do conhecimento técnico e científico, da capacitação profissional e da promoção de práticas seguras e sustentáveis de proteção contra a corrosão.

Ao longo dessas décadas, a ABRACO consolidou-se como referência nacional e internacional em corrosão e proteção anticorrosiva, sempre fiel à sua missão: integrar pessoas, difundir conhecimento e proteger o meio ambiente e os ativos industriais. A história da Associação é marcada pela colaboração de empresas, universidades, centros de pesquisa e profissionais que, juntos, fortalecem o desenvolvimento tecnológico do país.

A formação profissional é uma das nossas principais contribuições para o setor. Por meio de um portfólio diversificado de cursos presenciais, online e in company, a ABRACO oferece capacitação nas áreas de corrosão, pintura industrial, inspeção, proteção catódica e revestimentos. A sede da Associação, no Rio de Janeiro, dispõe de salas modernas e equipadas para aulas práticas. Em paralelo, mantemos parcerias com centros credenciados em diversas regiões do Brasil, o que permite ampliar o acesso à qualificação técnica de qualidade e formar profissionais preparados para os desafios da indústria moderna.

Complementando essa atuação, o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação em Corrosão e Proteção (SNQC-CP) assegura o reconhecimento e a credibilidade dos profissionais certificados pela ABRACO. Nosso sistema segue os princípios da norma internacional ISO/IEC 17024:2012 e contempla certificações como Inspetor de Pintura Industrial (Níveis 1 e 2), Profissional de Proteção Catódica (Nível 1) e Inspetor de Galvanização por Imersão a Quente. A parceria com o Institute of Corrosion (ICorr), do Reino Unido, também reforça o caráter internacional da nossa certificação, ampliando o prestígio e a mobilidade dos profissionais brasileiros.

Outro pilar essencial é a normalização técnica, conduzida pelo Comitê Brasileiro de Corrosão (CB-43), coordenado pela ABRACO e vinculado à ABNT. O comitê desenvolve e revisa normas que abrangem temas como corrosão atmosférica, pintura industrial, proteção catódica, galvanização e interferência elétrica. Essas normas são resultado de um trabalho colaborativo e refletem o compromisso da Associação em promover segurança, confiabilidade e excelência nos processos industriais.

Além disso, a ABRACO atua ativamente na emissão de recomendações práticas, elaboradas por grupos de especialistas e comissões de estudo. Essas recomendações reúnem orientações técnicas, metodologias e boas práticas aplicáveis à inspeção, ao monitoramento e ao controle da corrosão em diferentes setores. São materiais de apoio valiosos que auxiliam engenheiros, técnicos e gestores na tomada de decisões mais seguras e eficientes no dia a dia de suas operações.

A difusão de conhecimento também se fortalece por meio dos eventos técnicos e científicos realizados pela ABRACO, que reúnem a comunidade da corrosão em torno da troca de experiências e do debate de inovações. Entre todos os encontros que promovemos, o INTERCORR – Congresso Internacional de Corrosão ocupa um lugar de destaque. Realizado de forma bienal, este é o maior evento do setor na América Latina, reunindo especialistas nacionais e estrangeiros em um ambiente de integração entre ciência, tecnologia e indústria. É neste congresso que lançamos tendências, apresentamos resultados de pesquisa, discutimos novos materiais e reforçamos a importância da cooperação técnica entre instituições.

Outros eventos igualmente relevantes, como o SBPA – Seminário Brasileiro de Pintura Anticorrosiva, o Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamentos, o Seminário Brasileiro de Revestimento em Dutos, e o Workshop de Galvanização a Fogo completam o nosso calendário anual, garantindo que o conhecimento circule e alcance toda a comunidade profissional.

A comunicação técnica é outro instrumento de integração. A revista Corrosão & Proteção, publicação oficial da ABRACO, é um espaço de registro, análise e divulgação dos principais avanços da área. Por meio dela, compartilhamos artigos técnicos, entrevistas e estudos que enriquecem a prática profissional e mantêm viva a cultura da prevenção da corrosão. Nossas plataformas digitais e redes sociais também desempenham papel importante, aproximando especialistas, empresas e instituições em um diálogo constante sobre inovação, sustentabilidade e boas práticas.

Ser associado à ABRACO é fazer parte de uma rede que conecta conhecimento, pessoas e oportunidades. Nossos associados têm acesso a conteúdos técnicos exclusivos, descontos em cursos e eventos, divulgação institucional e participação em fóruns e palestras técnicas. Mais do que benefícios, essa associação representa o fortalecimento coletivo do setor e o compromisso com a excelência profissional.

Ao celebrarmos 57 anos de história, reafirmo a convicção de que o verdadeiro progresso nasce da união entre conhecimento, ética e cooperação. A ABRACO seguirá investindo na formação de pessoas, na atualização tecnológica e na consolidação de parcerias estratégicas, sempre com o objetivo de proteger ativos, otimizar recursos e promover um futuro mais seguro e sustentável.

Integrar para proteger: essa é a essência da ABRACO.

Com estima e agradecimento,

Luiz Paulo Gomes

Presidente da ABRACO





A MISSÃO NA PRÁTICA: como a ABRACO transforma conhecimento em integridade

Ao longo de 57 anos, a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) vem consolidando um legado de excelência técnica e integração entre pessoas, ciência e indústria. Desde sua fundação, em 17 de outubro de 1968, a instituição tem mantido viva uma missão que vai muito além da difusão do conhecimento: promover o combate à corrosão e a integridade de ativos como forma de proteger o meio ambiente e o patrimônio industrial do país.

Mais do que um propósito declarado, essa missão se traduz em ações concretas que envolvem formação profissional, certificação, normalização técnica, eventos e parcerias estratégicas. Cada uma dessas frentes atua de maneira complementar, sustentando um ecossistema de conhecimento que beneficia milhares de profissionais e empresas em todo o Brasil.

Formar para transformar através da educação

A educação técnica é o alicerce da atuação da ABRACO. A instituição é hoje um dos principais centros de capacitação da América Latina nas áreas de corrosão, pintura industrial, proteção anticorrosiva e proteção catódica. Com cursos presenciais, online e nas empresas, a ABRACO oferece desde treinamentos introdutórios e cursos básicos até programas de especialização técnica, que preparam profissionais para atuar com segurança e competência em campo.

As aulas são ministradas na sede da Associação, em um ambiente estruturado para unir teoria e prática, mas a atuação da ABRACO vai muito além do Rio de Janeiro. A instituição leva seus treinamentos de formação para diversas regiões do país, ampliando o acesso à capacitação técnica e aproximando profissionais do conhecimento especializado.

Nos últimos anos, cursos presenciais e práticos foram realizados em estados como São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Paraná e Ceará, reforçando o compromisso da Associação com a difusão do ensino técnico de qualidade em todo o território nacional.

Entre os cursos mais reconhecidos estão o de Qualificação de Inspetor de Pintura Industrial (Níveis 1 e 2), o de Proteção Catódica Onshore (Nível 1) e o de Pintor Industrial (Nível 1). Cada programa é elaborado com foco em resultados práticos, estimulando o desenvolvimento técnico, a responsabilidade profissional e a valorização da mão de obra especializada.

A programação completa dos cursos pode ser consultada diretamente no Portal da ABRACO (www.abraco.org.br), que mantém atualizadas as informações sobre novas turmas, modalidades e locais de realização.

Essa atenção à formação contínua reflete o compromisso da ABRACO com a valorização das pessoas. Afinal, a integridade dos ativos começa na competência humana, e a Associação tem investido, há quase seis décadas, em oferecer o melhor conteúdo técnico e metodológico disponível.

Certificação que gera confiança e credibilidade

Complementando o trabalho educacional, a ABRACO é também responsável por um dos mais respeitados sistemas de certificação profissional do país. O Sistema Nacional de Qualificação e Certificação em Corrosão e Proteção (SNQC-CP) segue rigorosamente os princípios da norma internacional ISO/IEC 17024:2012, garantindo que cada profissional certificado tenha suas competências

reconhecidas com credibilidade no Brasil e no exterior.

O sistema abrange qualificações como Inspetor de Pintura Industrial, Profissional de Proteção Catódica de Estruturas Terrestres e Inspetor de Galvanização por Imersão a Quente. Em parceria com o Institute of Corrosion (ICorr), do Reino Unido, a ABRACO também concede equivalência internacional, permitindo que profissionais brasileiros ampliem suas oportunidades de atuação em diferentes mercados.

Mais do que um documento de reconhecimento, a certificação representa um compromisso com a ética e a segurança nas práticas de controle da corrosão, fortalecendo a confiança entre empresas, contratantes e especialistas.

Normalização e recomendações práticas que espelham competência técnica

Outra contribuição essencial da ABRACO está na produção de normas técnicas e recomendações práticas. Por meio da coordenação do Comitê Brasileiro de Corrosão (CB-43), vinculado à ABNT, a Associação conduz um trabalho contínuo de atualização e aprimoramento das normas nacionais.

As comissões de estudo que integram o CB-43 abordam temas como corrosão atmosférica,



pintura industrial, proteção catódica, galvanização e interferência elétrica. O resultado é um conjunto de referências que orienta engenheiros, técnicos e empresas na execução de projetos e na definição de parâmetros de desempenho.

Paralelamente, a ABRACO elabora recomendações técnicas próprias, voltadas à prática profissional. Esses documentos reúnem orientações objetivas, baseadas na experiência de especialistas e nas demandas da indústria, servindo de guia para a aplicação segura e eficaz dos princípios de prevenção da corrosão.

Temos recomendações nas áreas de avaliação de corrosividade, revestimentos, pintura anticorrosiva, proteção catódica, corrosão e proteção em concretos, corrosão interna e monitoração da corrosão disponíveis para os associados e à sociedade em geral.

Eventos que unem, inspiram e difundem o conhecimento

O compromisso da ABRACO com a disseminação do conhecimento também se reflete em seus eventos técnicos e científicos. Desde 1971, a Associação organiza encontros que se tornaram verdadeiras referências na área da corrosão, fortalecendo o diálogo entre profissionais, pesquisadores e a indústria.

Entre eles, destaca-se o INTERCORR – Congresso Internacional de Corrosão,

considerado o maior evento do setor na América Latina. Realizado de forma bienal, o INTERCORR reúne especialistas do Brasil e do exterior em um ambiente voltado ao intercâmbio técnico e à cooperação científica. É um espaço onde nascem parcerias, surgem novas ideias e se compartilham experiências que ajudam a definir o futuro da engenharia de materiais e da proteção anticorrosiva.

Como desdobramento de sua missão de difundir o conhecimento, a ABRACO disponibiliza gratuitamente, em seu site, todos os artigos técnicos apresentados no congresso. Esse acervo é uma importante fonte de pesquisa para estudantes, docentes, profissionais e pesquisadores, reunindo trabalhos de alto valor técnico e científico. Trata-se de uma das formas pelas quais a Associação fomenta a cultura da pesquisa, do estudo e da atualização contínua no campo da corrosão e da proteção de materiais.

Além do INTERCORR, a ABRACO promove anualmente eventos como o Seminário Brasileiro de Pintura Anticorrosiva (SBPA), o Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamentos, o Seminário Brasileiro de Revestimento em Dutos, e o Workshop de Galvanização a Fogo. Todos esses encontros têm em comum o propósito de construir pontes entre o conhecimento técnico e a aplicação prática, estimulando a inovação e a evolução permanente do setor.



A ABRACO investiu em novas instalações para melhor desempenhar sua missão

Outras ações importantes são os Minieventos e as Palestras técnicas em todas as áreas com expressiva participação da comunidade de corrosão.

Parcerias e cooperação técnica – unidos somos maiores

O fortalecimento institucional da ABRACO é sustentado por uma ampla rede de parcerias estratégicas com universidades, centros de pesquisa, entidades setoriais e empresas associadas. Essas alianças ampliam o alcance da Associação e tornam possível a atualização permanente de conteúdos, o desenvolvimento de projetos técnicos e a realização de eventos de grande relevância nacional.

Entre as instituições com as quais a ABRACO mantém cooperação ativa estão a Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção (ABENDI), a Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (FBTS), a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN), o Instituto Nacional de Tecnologia (INT), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) e o Instituto da Cadeia do Zinco (ICZ).

A Associação mantém também uma relação próxima com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da qual é associada mantenedora, contribuindo para o fortalecimento do sistema brasileiro de normalização e para a elaboração das normas técnicas que orientam o setor.

No campo industrial e acadêmico, a ABRACO conta ainda com o apoio e a parceria de empresas associadas, que colaboram com o desenvolvimento de suas atividades de ensino, certificação e pesquisa aplicada. Essas empresas reafirmam seu compromisso com a qualidade, a integridade de ativos e a inovação tecnológica, fortalecendo toda a cadeia de valor da corrosão e da proteção de materiais.

A ABRACO também mantém cooperação técnica com o Centro de Tecnologia em Dutos (CTDUT), especialmente em projetos voltados à qualificação profissional e certificação na

área de proteção catódica, promovendo o aprimoramento contínuo das práticas e dos profissionais que atuam na integridade de dutos e estruturas metálicas.

Em nível internacional, destaca-se a parceria com o Institute of Corrosion (ICorr), do Reino Unido, que consolida o reconhecimento global da ABRACO e amplia as oportunidades de intercâmbio técnico e profissional entre os dois países.

O futuro reserva novas possibilidades de cooperação. De acordo com as tratativas com a Secretaria de Estado de Energia e Economia do Mar (SEENEMAR) a participação da ABRACO no Programa Economia Azul: O Mar de Oportunidades terá início em 2026. Esta iniciativa tem foco na qualificação técnica de profissionais que atuam em setores marítimos e offshore e representa uma expansão natural da atuação da Associação, levando sua experiência em formação e certificação a novos campos estratégicos da economia.

Essas parcerias refletem o espírito colaborativo que orienta a trajetória da ABRACO: somar esforços, integrar conhecimentos e multiplicar resultados. É essa sinergia que permite à Associação avançar com solidez, apoiando o desenvolvimento tecnológico e a formação de uma cultura nacional voltada à integridade e à prevenção da corrosão.

Missão em movimento – no futuro seremos maiores e melhores

Ao longo de quase seis décadas, a ABRACO consolidou-se como referência nacional e internacional na difusão do conhecimento técnico e científico, mantendo o compromisso de unir profissionais, empresas e instituições em torno de um mesmo propósito: preservar, inovar e evoluir.

Aos que compartilham dessa missão, o convite é claro: aproxime-se da ABRACO, participe de suas ações e contribua com essa rede de conhecimento que transforma o setor e fortalece o país.

Priner entra em operações minerárias e apresenta identidade renovada

A Priner, referência em soluções de engenharia industrial e infraestrutura, inicia uma nova fase de crescimento e posicionamento no mercado. Após anunciar a aquisição de 60% da SEMEP Logística e Construção – empresa nacionalmente reconhecida em intralogística, movimentação de solo, operação e implantação de minas –, a companhia apresenta sua identidade renovada, que traduz o atual momento de expansão e diversificação.

Fundada em 1990, a SEMEP é símbolo de excelência no setor, com atuação marcada pelo foco em segurança, gestão de alto desempenho, equipamentos de última geração, canteiros impecáveis e lideranças inspiradoras. Com essa aquisição, a SEMEP passa a fazer parte da Priner como a nova Unidade de Negócio de Operações Minerárias, que será liderada por seu diretor e cofundador, Juliano Oliveira. A entrada em operações minerárias fortalece a tradição da Priner em investir em setores estratégicos e de alto impacto, ampliando sua atuação em serviços industriais, integridade e inspeção, reabilitação de estruturas, geotecnia e montagem eletromecânica.

O movimento de expansão é acompanhado pelo lançamento da nova marca da Priner, que foi apresentada oficialmente em 21 de outubro. Mais moderna, dinâmica e digital, a identidade traduz o novo momento da empresa, que se consolida como a mais completa em soluções em engenharia industrial e infraestrutura do Brasil.

“A nova marca é a expressão desse ciclo de crescimento e diversificação. Hoje, somos uma empresa única, integrada por 12 marcas de referência, com presença nacional e internacional, e agora também preparada para liderar esta frente de operações minerárias. É uma marca que olha para o futuro com solidez e com os mesmos valores de sempre: segurança, proximidade e excelência”, afirma Tulio Cintra, CEO da Priner.

Com atuação consolidada em diversos setores industriais e, agora, também na mineração, a Priner avança em sua estratégia de oferecer soluções de ponta a ponta, integrando talentos e tecnologias para entregar eficiência, qualidade e segurança. O movimento reforça o posicionamento da companhia em gerar valor agregado aos clientes e ampliar sua relevância no mercado.

A Priner é referência em soluções de engenharia industrial e infraestrutura, com mais de 40 anos de atuação no mercado. Listada na B3, desde 2020, e integrante do índice Small Cap, desde 2025, é formada por 12 empresas especializadas em serviços industriais, engenharia de integridade e inspeção, reabilitação de estruturas, geotecnia, montagem eletromecânica e operações minerárias. Com presença nacional e internacional, a Priner atende os principais setores da indústria e infraestrutura, com excelência, inovação e segurança.

CORROSÃO EM PONTES E ESTRUTURAS: COMO O ZINCO PODE PROTEGER O FUTURO

Camile Paula Theodoro, Daniel Ferraz

Resumo estendido

Nas últimas décadas o Brasil vem presenciando um colapso de pontes rodoviárias, com dados alarmantes de estruturas comprometidas e grande necessidade de manutenções.

Estudos apontam mais de 11 mil estruturas em condições inadequadas, enquanto foram identificadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) 736 pontes em estado crítico. Aproximadamente 42 mil pontes possuem mais de cinquenta anos, tornando a manutenção uma prioridade.^[1] Esse cenário evidencia a precariedade do monitoramento e da manutenção das pontes, o que compromete não apenas a segurança dos usuários, mas também a longevidade do patrimônio público construído.

A NBR 9452:2023 estabelece diretrizes para inspeções em pontes, viadutos e passarelas na infraestrutura rodoviária e ferroviária do Brasil. A norma classifica as manifestações patológicas identificadas durante as inspeções em seis níveis, de 0 a 5. Nessa escala, a nota 0 indica uma condição emergencial que requer intervenção imediata, enquanto a nota 5 representa uma condição excelente.^[2]

A classificação deve ser feita por um engenheiro estrutural qualificado e independente, evitando influências de contratantes que possam querer minimizar custos de manutenção. Neste artigo, consideramos apenas o item caracterização de classificação estrutural da norma.

A infraestrutura de pontes no Brasil enfrenta desafios críticos que demandam atenção imediata. A necessidade de manutenção aumenta conforme mais pontes passam dos cinquenta anos. Embora o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) tenha planejado um investimento considerável para obras de melhoria, a realidade é que a maior parte dessas estruturas ainda não foi inspecionada. O DNIT planeja investir R\$ 5,83 bilhões em 816 obras, mas até agora, apenas 12.142 das 113.168 pontes foram inspecionadas, destacando a necessidade de uma abordagem mais eficaz para garantir a segurança das infraestruturas de transporte.^[1]

Esses dados ressaltam a necessidade de um gerenciamento mais eficaz e de ações proativas para garantir a segurança e a durabilidade da rede de transporte do país.

O aço, amplamente utilizado na construção civil, exige proteção contra corrosão de acordo com o ambiente em que é exposto. A galvanização se destaca como a solução mais econômica, sustentável e durável, especialmente por não requerer manutenções frequentes. Na construção, a galvanização por imersão a quente aumenta a vida útil do vergalhão no interior do concreto. O colapso da ponte Juscelino Kubitschek é um exemplo que evidencia a falta de manutenção na infraestrutura de pontes em território nacional. A utilização de vergalhões galvanizados e práticas sustentáveis desde o projeto é essencial para garantir a segurança e durabilidade das obras.

Palavras-chaves: corrosão, aço, galvanização, zinco, vergalhão, manutenção, sustentável, segurança.

Tabela 1 – Classificação da condição estrutural da OAE ABNT NBR 9452:2023^[2]

Classificação (nota)	Condição	Caracterização estrutural
0	Emergencial	Há elementos estruturais principais colapsados, evoluindo para instabilidade da estrutura. É necessária a interdição total, até que haja avaliação e reclassificação por consultoria especializada ou intervenção.
1	Crítica	Há danos gerando grave insuficiência estrutural na OAE. Há elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural localizado. A OAE necessita de intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição parcial, escoramento provisório, instrumentação, associadas ou não.
2	Ruim	Há danos comprometendo a segurança estrutural da OAE sem aparente risco iminente de colapso. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A OAE necessita de intervenções significativas.

Figura 1 – Dados do gerenciamento DNIT^[3]



A vida útil de uma ponte pode ser prolongada desde a fase de projeto, considerando adequadas concepções estruturais, controlando

fissuras por elementos menos esbeltos e deformações controladas, no entanto, nem o melhor dos projetos resiste a ação do tempo.

A degradação acelerada das estruturas promove prejuízos e perdas de vidas. Em uma cultura de pouca preservação e manutenção, é fundamental considerar meios de prolongar a vida útil das construções desde sua concepção, através da seleção de materiais mais duráveis e técnicas que garantam a durabilidade em diferentes tipos de ambiente.

O colapso da ponte Juscelino Kubitschek

A ponte Juscelino Kubitschek atravessava o Rio Tocantins na fronteira entre os Estados do Tocantins e Maranhão, ligando as cidades de Aguiarnópolis-TO a Estreito-MA. Essa

ponte possuía comprimento total de 532,7m distribuídos em 17 vãos, delimitados por dois encontros e 16 apoios. A largura do tabuleiro é constante e igual a 12m. O trecho principal é composto por um vão central de 140m, que cruzava sobre o Rio Tocantins.^[4]

As diversas imagens da ponte antes do colapso em 2024 demonstravam diversas e severas patologias e instabilidades na Ponte. Desde 2020, já era de conhecimento as seguintes situações:

- Trincas e fissuras, com armaduras expostas e comprometidas por corrosão;
- Deformações e vibrações excessivas na superestrutura do tabuleiro;
- Uma deformação vertical no meio do vão na ordem de 75 cm;
- Perda da protensão original da obra de 1961, onde os cabos se encontravam inativos devida à relaxação do aço, rupturas e deformações;
- Baixa efetividade da protensão executada em 1998 para garantir a estabilidade da obra.^[4]

Este é um dos maiores exemplos de negligência em relação ao avanço que a corrosão pode fazer em armaduras de concreto armado, sejam vergalhões ou cordoalhas. A queda da Ponte vitimou 17 vidas.^[5]



Figura 2 - Ponte Juscelino Kubistchek após colapso da estrutura^[5]

O caso do Viaduto do Eixão em Brasília



Figura 3 - Viaduto do Eixão, Brasília^[6]

Em fevereiro de 2018, parte da estrutura de um viaduto, na Galeria dos Estados em Brasília, cedeu. Este colapso atingiu 4 carros, mas ninguém se feriu.

A principal causa do desabamento parcial do viaduto foi apontada como infiltração e perda de seção das armaduras ativas (cordoalhas) e passivas (vergalhões) do aço da estrutura, o que contribuiu para a perda de resistência e estabilidade.

Foi mais um caso emblemático onde a falta de manutenção permitiu o avanço da corrosão em elementos estruturais de Pontes e Viadutos levando ao colapso.^[6]

O aço, um dos materiais mais utilizados na construção de pontes e viadutos, apresenta características intrínsecas que exigem um sistema de proteção contra corrosão de acordo com o local onde é exposto.

A corrosão pode ser definida como a tendência de os materiais retornarem ao seu estado natural, de menor energia e maior estabilidade (Figura 4). No caso dos metais, ou ligas metálicas como o aço, a partir do fornecimento de energia o minério de ferro é transformado em aço e, ao perder parte dessa energia, o aço tende a retornar ao seu estado de maior estabilidade

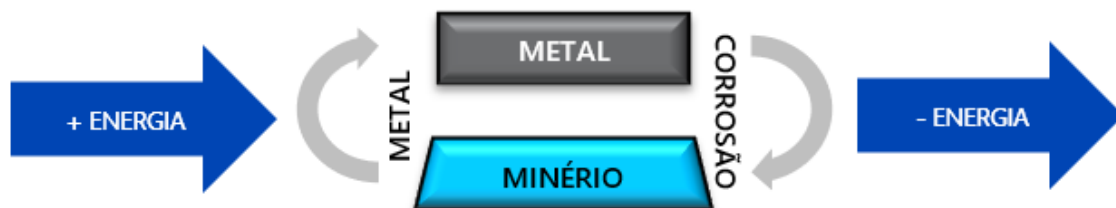


Figura 4 – Corrosão dos metais

(minério). Por ser um elemento termodinamicamente instável na presença de oxigênio, a presença de umidade eleva a agressividade do meio, acelerando o processo de corrosão.

A galvanização é um sistema de proteção do aço contra a corrosão, com menor consumo de energia e menor impacto ao meio ambiente quando comparada à pintura para proteção de estruturas [7], principalmente por não requerer manutenções durante a vida útil da estrutura e o zinco do revestimento galvanizado ser 100% reciclado ao fim da vida. No processo de galvanização por imersão à quente, durante a imersão da peça ou estrutura de aço no banho de zinco fundido a aproximadamente 450°C, são formadas camadas intermetálicas que isolam o substrato de aço, protegendo-o duplamente através da proteção por barreira e catódica. Na proteção por barreira, o zinco é difundido na rede cristalina do aço, formando camadas de zinco+ferro (Figura 5) que apresentam maior dureza se comparadas às camadas apenas de zinco ou ferro, e são responsáveis pela reação metalúrgica que garante a resistência à corrosão e evita o deslocamento das peças galvanizadas.

Na proteção catódica, o zinco atua como metal de sacrifício, pois devido ao potencial de redução menor que o potencial do ferro (mais eletronegativo), o zinco oxida-se preferencialmente ao aço protegendo-o contra corrosão. A dupla proteção conferida ao aço pelo processo de galvanização destaca-se quando comparada à outras tecnologias protetivas como a pintura, aumentando o ciclo de vida das estruturas e exigindo manutenções pouco frequentes ou nulas. [8]



Figura 5: Camadas intermetálicas de zinco com variação na concentração de zinco e ferro até a camada superior composta 100% de zinco [8]

O ciclo de vida das peças galvanizadas pode representar intervalos de até 35 anos sem a necessidade de manutenções e para garantir a durabilidade das estruturas é fundamental, além da determinação da espessura mínima de zinco requerida, conhecer o ambiente em que a estrutura estará exposta. O desempenho do aço galvanizado por imersão a quente exposto à atmosfera depende de cinco fatores principais: temperatura, umidade, precipitação, concentração de dióxido de enxofre (poluição) no ar e salinidade do ar. [8] A partir dessas informações, é possível estimar a vida útil do aço galvanizado conforme a Tabela 1 [9] e, de acordo com a figura 4 [9].

Além de ser aplicada em estruturas metálicas utilizadas na construção civil, bens de consumo e energia, a galvanização por imersão a quente se destaca por conferir benefícios e aumentar a durabilidade do vergalhão de aço, utilizado no interior do concreto.

Tabela 2 – Taxas indicativas de corrosão para ambientes diferentes (categorias de corrosividade conforme ABNT NBR 14643).^[10]

Categoria de Corrosividade	Taxa média anual de corrosão do zinco (µm/ano)	Taxa média anual de corrosão do aço carbono (µm/ano)
C1 – Muito Baixa (interior: seco)	≤ 0.1	≤ 1.3
C2 – Baixa (interior: condensação ocasional/ exterior environment: rural)	> 0.1 - 0.7	> 1.3 - 25
C3 – Média (interior: alta umidade, pouca poluição no ar / exterior: interior urbano ou costa urbana)	> 0.7 - 2.1	> 25 - 50
C4 – Alta (interior: piscinas, plantas químicas / exterior: áreas industriais e áreas costeiras com salinidade moderada)	> 2.1 - 4.2	> 50 - 80
C5 – Muito Alta (exterior: industrial com alta umidade ou alta salinidade costal)	> 4.2 - 8.4	> 80 - 200

O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados, possuindo uma boa relação custo-benefício, podendo ser facilmente disponibilizado, além de apresentar uma gama de propriedades e características que o tornam conveniente para diversas aplicações. Todavia, as estruturas de concreto armado apresentam uma certa porosidade e são expostas a diferentes condições ambientais, o que em muitos casos destaca uma de suas

principais deficiências: a suscetibilidade do vergalhão de aço sofrer corrosão, resultando em manchas e fissuras que podem ocasionar perdas das propriedades mecânicas.^[11]

Em condições ideais, o próprio concreto confere ao aço uma dupla proteção: Primeiramente, atua como uma barreira física que o separa do meio ambiente e, consequentemente, o ambiente altamente alcalino do cimento hidratado ($\text{pH} > 12,5$) forma uma película

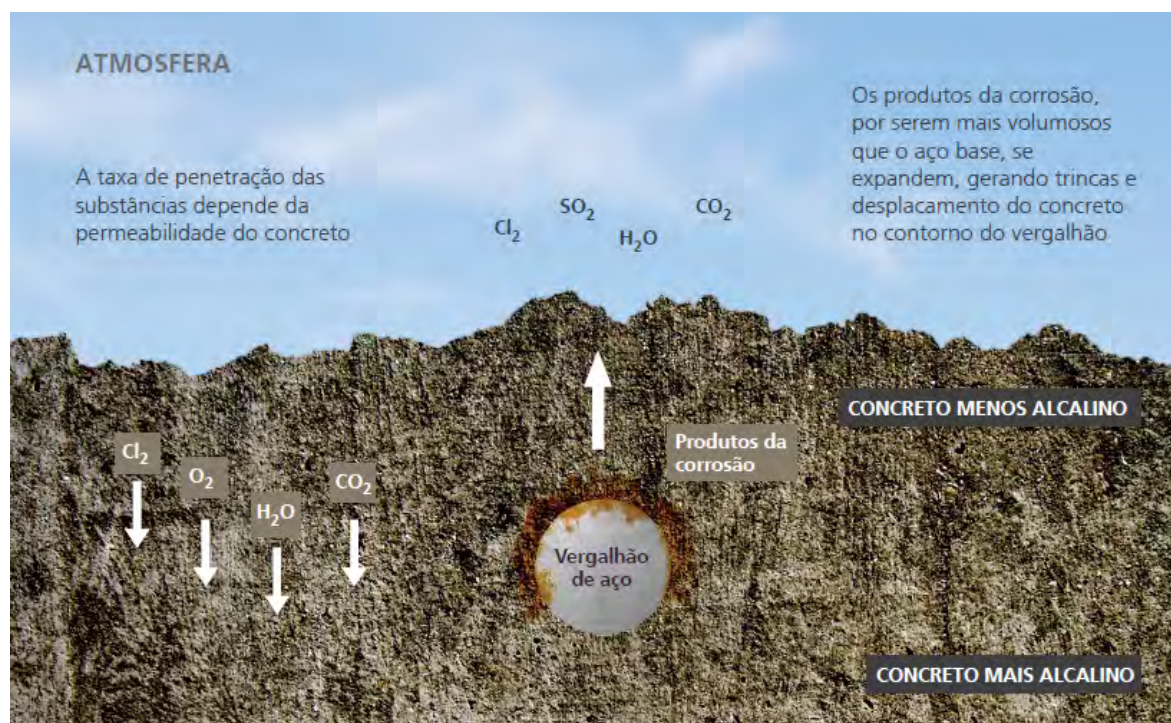


Figura 6 – Mecanismo de corrosão do concreto armado^[11]

protetora (passivação do aço) de caráter duradouro. Entretanto, as condições ambientais raras vezes são ideais. A corrosão do aço no concreto se inicia e se mantém devido a dois fenômenos principais:

1. Redução da alcalinidade devido à presença de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico e/ou outros elementos ácidos;
2. Ação de íons despassivantes, como cloretos (Cl^-) na presença de oxigênio, que afetam a armadura e intervêm na degradação do concreto, permitindo que a armadura seja exposta ao meio ambiente. ^[11]

No mecanismo de corrosão do concreto armado, a taxa de penetração de substâncias da atmosfera (Cl_2 , O_2 , H_2O , CO_2) depende da permeabilidade do concreto. A corrosão do vergalhão provoca a redução da seção do aço ou até mesmo sua completa conversão em óxido. Consequentemente, a aderência entre a armadura e o concreto diminui ou desaparece. (Figura 5) ^[11]

Os produtos da corrosão, como o óxido de ferro (FeO), tem efeito expansivo, resultando em tensões de tração no concreto que provocam fissuras e seu desprendimento da estrutura no contorno do vergalhão. Essas fissuras podem constituir um caminho rápido para a entrada de mais elementos agressivos, comprometendo a integridade e resistência da estrutura, conforme a Figura 6. ^[11]

Uma maneira econômica e eficaz de minimizar o risco de corrosão na armadura é garantir uma espessura de cobertura adequada e que o concreto em si seja denso e impermeável. Apesar desse conhecimento, a corrosão das

armaduras é uma patologia crônica observada nas estruturas em concreto armado, como, por exemplo, pontes, viadutos e reservatórios.

Para atenuar esses efeitos, uma série de abordagens estão disponíveis. Entre elas, o revestimento do aço com zinco tem sido amplamente utilizado, pois oferece diversas vantagens:

- O aço permanece protegido contra a corrosão antes de ser imerso no concreto;
- Retarda o início da corrosão do aço, reduzindo os riscos de fissuras, manchas de ferrugem e desagregação do concreto;
- Reduz a frequência e a magnitude dos reparos do concreto;
- Aumenta a vida útil da estrutura;
- Proporciona segurança e sustentabilidade a obra. ^[11]

Assim como em estruturas e postes, a galvanização por imersão a quente destaca-se entre os possíveis métodos de revestimento do vergalhão, conferindo as proteções por barreira e catódica e isolando o aço de agentes agressivos.

No caso do concreto armado, a galvanização oferece proteção contra as causas mais frequentes da corrosão:

- Carbonatação: Ao penetrar na estrutura do concreto, o CO_2 reduz o pH do meio, o que acelera rapidamente a corrosão do aço exposto, cuja perda de passivação se inicia com pH abaixo de 12. Em contrapartida, o aço galvanizado não sofrerá esses efeitos produzidos pela carbonatação à medida que o concreto envelhece, pois o zinco



Figura 7 – Mecanismo de formação dos produtos da corrosão gerando primeiros pontos e fissuras até desprendimento do concreto e exposição do vergalhão. ^[11]

tem uma faixa de pH de passivação muito maior que o aço (pH entre 4 e 12);

- Tolerância a cloretos: O aço galvanizado pode suportar exposição a concentrações superiores às suportadas pelo aço sem proteção. Quando utilizado o aço sem proteção, deve-se considerar 0,4% como limiar superior de íons de cloreto (Cl^-) por massa de cimento. Já para o aço galvanizado, esse limite se eleva a 1,0%. Adicionalmente, a galvanização mantém a integridade do concreto. O zinco sofre corrosão a taxas entre 10-30 vezes inferiores ao aço, dissolvendo-se gradualmente e formando produtos de corrosão que:
 - São menos volumosos que os óxidos de ferro equivalentes;
 - Não têm uma fase expansiva volumosa;
 - Migram, distanciando-se do contato com o vergalhão, e preenchem as fissuras e vazios no concreto;
 - Como resultado, o concreto não sofre deterioração. ^[11]

Durante a reação entre o zinco e o concreto úmido ocorre a formação de hidroxizincato de cálcio, sendo este um produto da corrosão

insolúvel, que protege a camada de zinco subjacente (sempre e quando o pH da mistura de concreto circundante estiver abaixo de 13,3). As análises de vergalhões galvanizados, recolhidos de estruturas em campo, indicam que o revestimento permanece nesse estado de passivação por períodos mais longos, mesmo estando expostos aos altos níveis de cloreto do concreto circundante. ^[11]

Uma boa aderência entre a armadura e o concreto é essencial para o desempenho confiável do concreto armado. O vergalhão galvanizado conforme norma ASTM A767 possui uma aderência similar à do concreto do vergalhão sem revestimento (Figura 7). Ensaios realizados mostram que a média do coeficiente de conformação superficial das faces do vergalhão galvanizado $h = 1,8$ atende aos requisitos da norma de ABNT NBR 7480 – Aço destinado a armaduras de concreto armado ($\text{min } h = 1,5$). ^[11]

Da mesma forma, a ductilidade e a resistência do vergalhão são determinantes para prevenir fraturas no concreto armado. Ensaios realizados confirmam que o processo de galvanização a quente não afeta as propriedades mecânicas do aço de reforço. (Figura 9) ^[11]

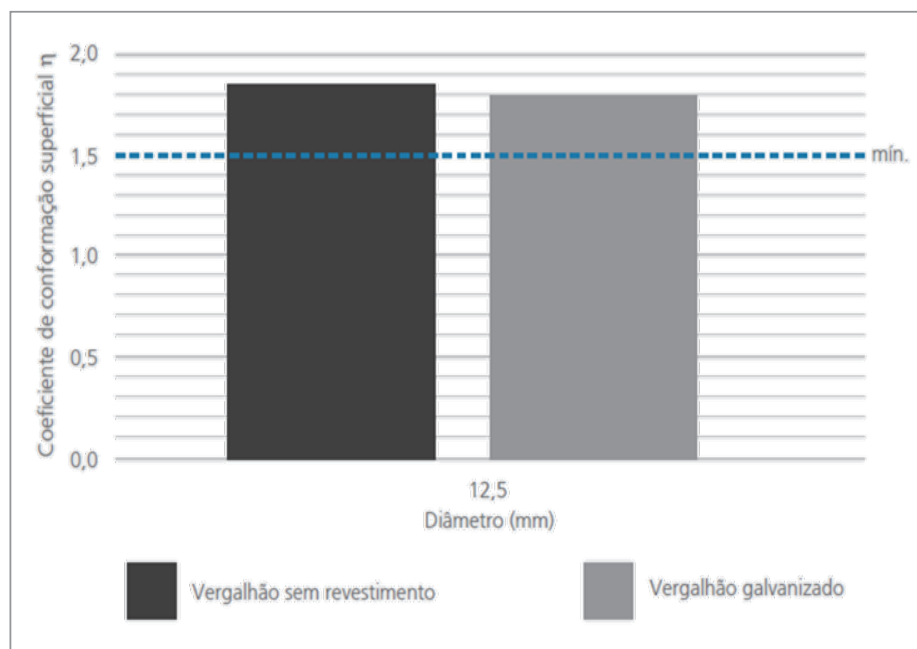


Figura 8 -
Determinação
do coeficiente
de conformação
superficial conforme
NBR 7477:1992 ^[11]

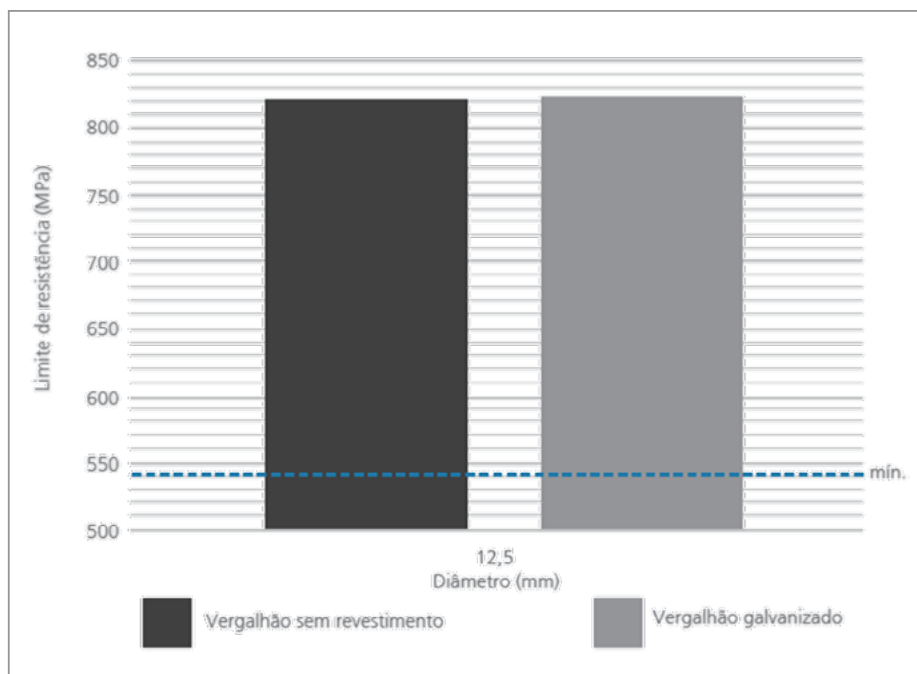


Figura 9 -
Determinação
do coeficiente
de conformação
superficial conforme
NBR 7477:1992 ^[11]

O uso dos vergalhões galvanizados e outros elementos (incluindo parafusos, amarras, âncoras, barracões móveis, barras de segurança e tubulações) está amplamente generalizado em diversas estruturas e elementos de concreto armado. Algumas aplicações do concreto armado tornam indispensável o uso de vergalhões galvanizados para garantir a integridade da estrutura, como:

- Estruturas para tratamento de água e esgoto;
- Estruturas costeiras, marinhas e industriais;
- Infraestrutura de transporte;
- Estruturas ou elementos submersos ou enterrados;
- Elementos estruturais com superfície exposta;
- Elementos pré-moldados arquitetônicos e de revestimento;
- Módulos de construção pré-fabricados;
- Marcos arquitetônicos. ^[11]

A utilização de vergalhões galvanizados nos Estados Unidos é bastante consolidada, especialmente em aplicações onde a durabilidade

das estruturas de concreto armado é essencial, como em ambientes agressivos ou obras de longa vida útil. A galvanização dos vergalhões é regulada pelas normas americanas: ASTM A767 - Standard Specification for Zinc-Coating (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement, ASTM 123 - Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products e ACI 222R - Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion. ^[12]

A AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) e a FHWA (Federal Highway Administration) desempenham papéis cruciais na definição de diretrizes para a durabilidade de pontes nos Estados Unidos, incluindo recomendações sobre o uso de vergalhões galvanizados. As AASHTO LRFD - Bridge Design Specifications estabelecem os critérios para o projeto, avaliação e reabilitação de pontes, utilizando a metodologia de projeto por fatores de carga e resistência (LRFD). Essas especificações consideram fatores de durabilidade, especialmente em ambientes agressivos, como regiões costeiras ou áreas sujeitas a uso de sais para degelo. ^[12]

O caso da Ponte LongBird em Tacker, Bermudas, EUA

A ponte Longbird, nas Bermudas, um vão de aço assimétrico e oscilante, foi construída sobre Castle Harbor pela Marinha dos EUA em 1953 para facilitar o transporte para a Ilha de St. David, perto da Estação Aérea Naval de Kindley (hoje Aeroporto Internacional LF Wade, das Bermudas). A Marinha dos EUA manteve presença militar nas Bermudas da década de 1940 a 1995 e construiu diversas estruturas como parte de suas operações, incluindo a Ponte Longbird. Devido ao ambiente com alto teor de cloreto, reforços de aço galvanizado a quente foram utilizados no acesso de concreto e no tabuleiro da ponte.^[13]

Ao longo das quase sete décadas de existência da Ponte Longbird, diversas inspeções e sondagens foram realizadas para avaliar o desempenho das barras de aço galvanizadas a quente (HDG) utilizadas no tabuleiro da ponte. Em cada um dos estudos, a espessura média do revestimento galvanizado foi medida e constatou-se que excedia os requisitos para barras de aço recém-galvanizadas, apesar da exposição ao ambiente marinho tropical altamente corrosivo das Bermudas. A ponte foi exposta a forte névoa salina proveniente de zonas de respingos de maré e foi construída muito próxima da água do oceano.^[13]



Figura 10 - Ponte LongBird em Tacker, Bermudas^[13]

Em 1995, quando a ponte tinha 42 anos, a espessura do revestimento de vergalhões HDG excedia a exigência para vergalhões galvanizados recentemente, embora os níveis de cloreto estivessem entre 1,35 e 4,5 kg/m³, bem acima do limite de 0,5 kg/m³ para vergalhões pretos. Em 2020, após a demolição da ponte, amostras de vergalhões analisadas também apresentaram espessura de revestimento de HDG superior à exigência para vergalhões galvanizados novos após 67 anos de serviço.^[13]

O desempenho da Ponte Longbird levou o Ministério de Obras e Engenharia (MW&E) das Bermudas a especificar exclusivamente reforço galvanizado a quente em futuros projetos de pontes por mais de 50 anos. Não fossem os danos causados por vários furacões ao longo dos anos, incluindo o golpe final devastador dado pelo Furacão Fabian em 2008, a Ponte Longbird teria servido por bem mais de 100 anos.^[13]

O caso da Ponte Rota 66, Pensilvânia, EUA

A ponte da Rota 66 ao sul de Kittanning, PA, foi construída em 1973 usando vergalhões galvanizados no tabuleiro e a reforma realizada em 2003 proporcionou uma oportunidade única para avaliar o desempenho do vergalhão galvanizado após 30 anos de serviço. O tabuleiro da ponte permanece em excelentes condições, mas o DOT da Pensilvânia queria substituir a barreira medial do poste e da viga por uma barreira de concreto mais segura. Isso exigiu a remoção de toda a seção intermediária do convés e a exposição do vergalhão galvanizado para inspeção. O teste descobriu que o teor de cloreto no concreto ao redor do vergalhão é de 5 lbs / yd 3, excedendo em muito o limite de cloreto para corrosão do vergalhão preto.

A inspeção do vergalhão mostrou que o revestimento estava em excelentes condições, com espessuras de revestimento ainda excedendo a especificação ASTM A767 para novos vergalhões galvanizados. Também foi observada durante a remoção do concreto a ligação tenaz



Figura 11 - Ponte Rota 66, Pensilvânia ^[14]

da parte traseira galvanizada ao concreto circundante, confirmando assim a excelente resistência de união obtida a partir de revestimentos galvanizados. Nenhuma reforma do deck de concreto foi necessária; o vergalhão original permaneceu no lugar quando a barreira de Jersey foi derramada.

Os recentes colapsos de pontes no Brasil evidenciam não apenas falhas estruturais, mas, sobretudo, a negligência com a manutenção preventiva e a durabilidade dos materiais utilizados. Em contraste, exemplos internacionais, como as pontes nos Estados Unidos que permanecem estruturadas por mais de cinco décadas sem intervenções significativas, demonstram que a escolha adequada de materiais pode ser decisiva para a longevidade das infraestruturas. Nesse contexto, o uso de vergalhões galvanizados se apresenta como uma solução técnica e economicamente viável, oferecendo proteção contra a corrosão e reduzindo substancialmente os custos e riscos associados à manutenção corretiva. Incorporar essa tecnologia nas obras de infraestrutura brasileiras não é apenas uma questão de inovação, mas uma necessidade urgente para garantir segurança, eficiência e sustentabilidade no longo prazo.

Referências

O GLOBO. Estudo calcula que 11 mil pontes no país podem ter acidentes como o do Rio Tocantins. 5 mar. 2025. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2025/03/05/estudo-calcula-que-11-mil-pontes-no-pais-podem-ter-acidentes-como-o-do-rio-tocantins.ghtml>. Acesso em: 26 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9452:2023 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

PANORAMA geral das pontes brasileiras.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Anteprojeto de recuperação, reforço e reabilitação de OAE sobre o Rio Tocantins, nas rodovias BR-226/TO e BR-230/TO. 23ª Unidade de Infraestrutura Terrestre: Ministério dos Transportes

REVISTA OESTE. Governo federal pagou R\$ 36 milhões pela manutenção da ponte que caiu no TO. R7, 27 dez. 2024. Disponível em: <https://noticias.r7.com/brasil/revista-oeste/governo-federal-pagou-r-36-milhoes-pela-manutencao-da-ponte-que-caiu-no-to-27122024/>. Acesso em: 26 maio 2025.

G1. Reforma do Eixão Sul será concluída no máximo até janeiro, diz governo do DF. 3 ago. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2018/08/03/reforma-do-eixao-sul-sera-concluida-no-maximo-ate-janeiro-diz-governo-do-df.ghtml>. Acesso em: 26 maio 2025.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Hot-dip galvanizing for sustainable design. 2015. Disponível em: <https://galvanizeit.org>. Acesso em: 26 maio 2025.

INSTITUTO DA CADEIA DO ZINCO. Guia de galvanização por imersão a quente.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION. Hot-dip galvanized steel bridges. 2023. Disponível em: <https://galvanizeit.org/galvanize-it-online-seminar/why-hot-dip-galvanizing/longevity>. Acesso em: 23 maio 2024.

NACE INTERNATIONAL. IMPACT - International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study. 2016. Disponível em: <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>. Acesso em: 23 out. 2023.

INSTITUTO DA CADEIA DO ZINCO. Vergalhão galvanizado - Durabilidade e segurança para sua obra.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. State DOT policies and practices on the use of corrosion-resistant reinforcing bars. Washington, DC: The National Academies Press, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/29045>. Acesso em: 26 maio 2025.

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION. Galvanized rebar: case studies Bermuda.

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION. Galvanized rebar: case Route 66 bridge deck.

ANTICORROSION PROPERTIES OF HIERARCHICAL HYDROPHOBIC SURFACES FABRICATED ON DIFFERENT ALUMINUM ALLOYS

Rafaela R. Cunha^a, Eduarda M. Jose^a,
Guilherme K. Possani^b, Eduardo L. Schneider^c, Lisete C. Scienza^d

^a Undergraduate student, UFRGS

^b MSc, Mechanical Engineer, UFRGS

^c DSc, Metallurgical Engineer, UFRGS

^d PhD, Chemical Engineer, UFRGS

Introduction

Atmospheric degradation of metallic components, driven by the accumulation of contaminants and moisture, significantly impairs the performance and longevity of many engineering systems. Superhydrophobic surfaces, developed over decades, have emerged as a promising strategy to prevent corrosion and thereby extend the service life of metals and alloys [1-5].

Superhydrophobic surfaces are defined by a water contact angle exceeding 150° and a sliding angle below 10°. This unique wetting behavior is effectively explained by the Cassie-Baxter model, which describes how surface roughness and low surface energy together influence liquid-solid interactions. According to the model, air is trapped within the micro- and nanoscale grooves of the textured surface, resulting in a composite interface

made up of air pockets and the tops of surface asperities [6-8].

Chemical etching is a technique commonly used to reveal the microstructural features of metallic substrates, as it selectively attacks regions based on differences in composition and crystal structure. Once a hierarchical micro/nanostructure is formed through surface texturing, the application of low-surface-energy coatings becomes essential to synergistically enhance water repellency. To achieve superhydrophobicity, low-surface-energy compounds such as fluoroalkylsilanes, fatty acids, and certain polymers are typically applied to the textured surface [1, 3].

Aluminum and its alloys are widely used in engineering applications due to their excellent thermal and electrical conductivity, low specific weight, high specific strength, wide availability, and relatively low cost. Their corrosion

Various surface modification techniques have been employed to create hydrophobic surfaces aimed at improving the corrosion protection of a variety of metals and alloys, including aluminum. In this study, a simple and cost-effective chemical method, comprising alkaline etching in KOH solution, boiling water immersion, and surface modification with lauric acid, was employed to fabricate superhydrophobic surfaces on several aluminum alloys (AA1100, AA3105, AA5052 and AA7475). The investigation involved contact angle measurements, field emission scanning electron microscopy, potentiodynamic polarization, and electrochemical impedance spectroscopy in a 3.5% NaCl electrolyte. The alkaline etching process led to the formation of a rough hierarchical micro/nano structure. The treated alloys exhibited distinct surface morphologies - spongy (AA1100 and AA3105), crater-like (AA5052), and flocked (AA7475) - which contributed to water contact angles exceeding 140°. The formation of a stable Cassie-Baxter state in these hierarchical structures resulted in superhydrophobic surfaces that significantly increased corrosion resistance compared to the respective untreated alloys. Electrochemical analysis demonstrated that the fabricated superhydrophobic surfaces significantly enhance the corrosion resistance in sodium chloride solution compared to untreated aluminum alloys.

Keywords: Aluminum alloys, Superhydrophobic surface, Chemical process, Lauric acid, Anticorrosion properties.

resistance primarily stems from the formation of a natural, compact, and strongly adherent passive layer of aluminum oxide. However, when exposed to aggressive environments - particularly acidic or alkaline solutions, and especially those containing chlorides - this oxide layer can degrade, leading to corrosion of the underlying metal. Given the widespread industrial use of aluminum and its alloys, corrosion prevention remains a major focus of research efforts [9-12].

In this context, a two-step chemical method was employed to fabricate superhydrophobic surfaces (SHS) on various aluminum alloys (AA1100, AA3105, AA5051, and AA7475), which were selected as substrates. Lauric acid (LA) was used as the low-surface-energy modifier. The corrosion resistance of the superhydrophobic samples was evaluated in a sodium chloride solution.

Methodology

Commercially available aluminum sheets (5 cm x 2 cm x 0.8mm) were used as substrates, namely: AA1100 H14, AA3105 H16, AA5052 H38, AA7475 T651.

Sample preparation

The sample preparation procedure was adapted from the method described by Varshney et al. [13] and summarized in Fig. 1. The aluminum substrates were initially sanded with 320#-grit sandpaper, then cleaned with deionized water and ethanol in an ultrasonic bath for 10 min each. Subsequently, the samples were subjected to alkaline etching by immersion in a 10 g/L KOH aqueous solution at 60°C for 20 min. After etching, the substrates were immersed in boiling water for 5 min, followed by immersion in a 20 g/L lauric acid ethanolic solution for 30 min. Finally, the samples were air-dried at room temperature for 20 h.

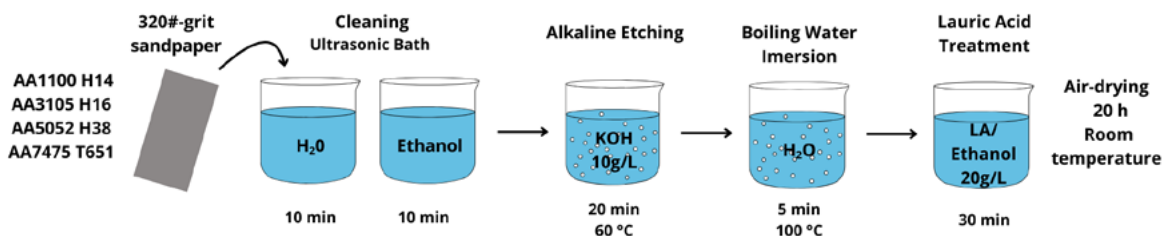


Figure 1 - Schematic diagram of the superhydrophobic surface preparation process.

Characterization

The static contact angle was measured using a homemade system with a 5 μL water droplet. Images were captured with a digital camera (Vedo model VD3035) and analyzed using a specific measurement software. The reported values represent the average of six measurements taken at three different locations on the surface, all performed at room temperature. The surface morphology of the samples was examined using a Zeiss Auriga field-emission scanning electron microscope (FE-SEM).

Electrochemical corrosion tests were conducted using a Metrohm $\mu\text{Stat-i}$ 400s potentiostat in a 3.5 wt.% NaCl solution. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements were carried out after 300 seconds of immersion to allow the system to reach a steady state. The perturbation amplitude was set to ± 5 mV relative to the open circuit potential (OCP), and measurements were performed over a frequency range from 0.1 Hz to 10 MHz. Potentiodynamic polarization curves were obtained by sweeping the potential from -0.20 V relative to OCP in the anodic direction at a scan rate of 10 mV/s. At least three samples were tested for each experiment to ensure reproducibility of the results.

Results and Discussion

Surface morphology and contact angle

For comparison purposes, Fig. 2 illustrates the surface morphology of untreated AA3105 (sanded only) and after the alkaline etching and boiling water treatments. The specimens were first subjected to sanding to clean and standardize the surface texture, resulting in parallel vertical lines visible on the surface of AA3105, as shown in Fig. 2(a). This provided an initial level of inherent roughness. The microroughness was significantly enhanced after pretreatment with KOH and boiling water, as depicted in Fig. 2(b).

Fig. 3 clearly shows that the treatment significantly altered the surface morphology of the alloys, primarily due to the KOH etching and subsequent boiling water immersion. This process led to the formation of a spongy-like micro/nanostructure on AA1100 and AA3105, a crater-like microstructure on AA5052, and a flocked-like microstructure on AA7475. In all cases, mixed features were observed, resulting in hierarchical structures. According to Varshney et al. [13], in a two-step process, microstructured pits are formed through chemical etching. The reaction between the KOH solution and aluminum causes

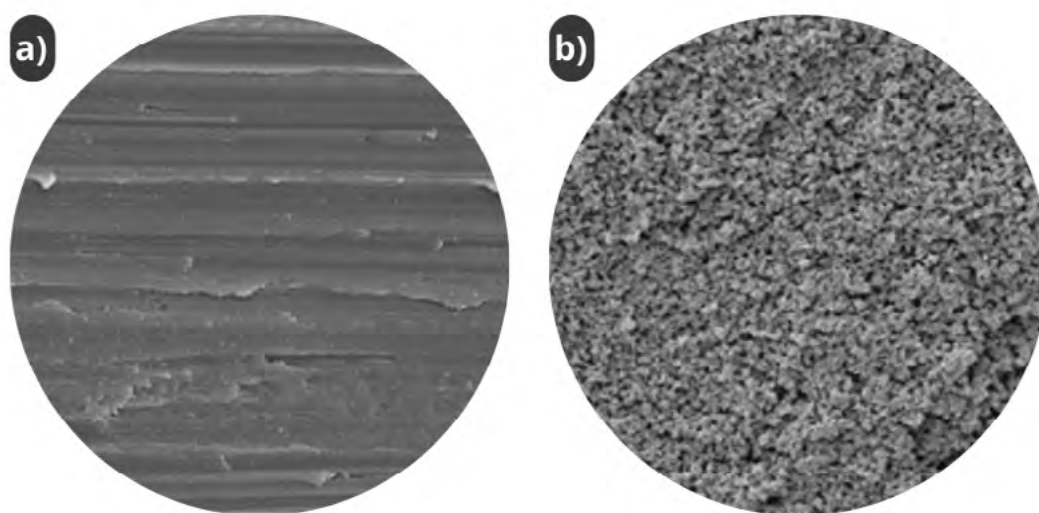


Figure 2 – FE-SEM images of the AA3105 surface: (a) freshly sanded, and (b) after alkaline etching and boiling water immersion. (5 kX magnification).

a dissolution process, which leads to the formation of a rough, microporous surface, as shown in the FE-SEM images. The hierarchical roughness at both nano- and microscale, combined with the low surface energy provided by the subsequent treatment with LA, resulted in excellent water repellency, with static contact angles exceeding 140° for all alloys. These structures are capable of trapping a significant amount of air. According to the Cassie-Baxter model, this air entrapment is crucial for forming a solid-liquid-air composite interface, which is necessary for achieving superhydrophobicity.

Corrosion performance

The potential of employing a superhydrophobic surface (SHS) to protect aluminum alloys from corrosion was evaluated through electrochemical experiments. Fig. 4 displays Nyquist

plots obtained from the EIS measurements. Qualitative analysis reveals a significant increase in the impedance arc diameter of all treated alloys (designated as AAXXX-SHS) compared to their respective untreated ones. This increase means the enhanced ability of the SHS to effectively block corrosion media from reaching the substrate. This behavior aligns with findings reported in the literature [1, 14, 15].

Potentiodynamic polarization curves for untreated and SHS-treated aluminum alloys are presented in Fig. 5(a) and (b), respectively. A noticeable reduction in current densities was observed, indicating suppression of both anodic and cathodic reactions, thereby slowing the overall corrosion kinetics. Compared to the untreated samples, the corrosion potential (E_{corr}) shifted toward more positive values, and the corrosion current density (i_{corr}) was

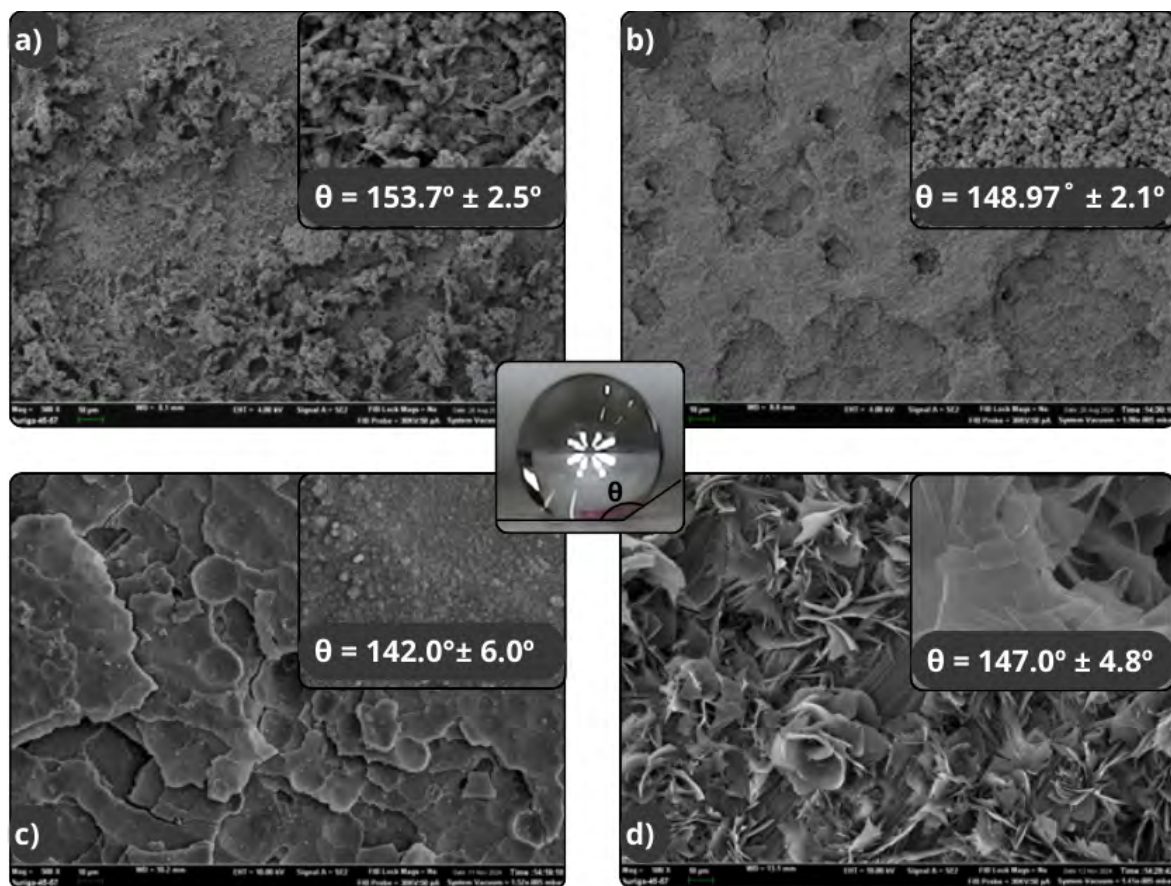


Figure 3 – FE-SEM images of the top surface of SHS alloys: (a) AA1100, (b) AA3105, (c) AA5052, and (d) AA7475 at 500X magnification, with inset showing higher magnification (5 kX).

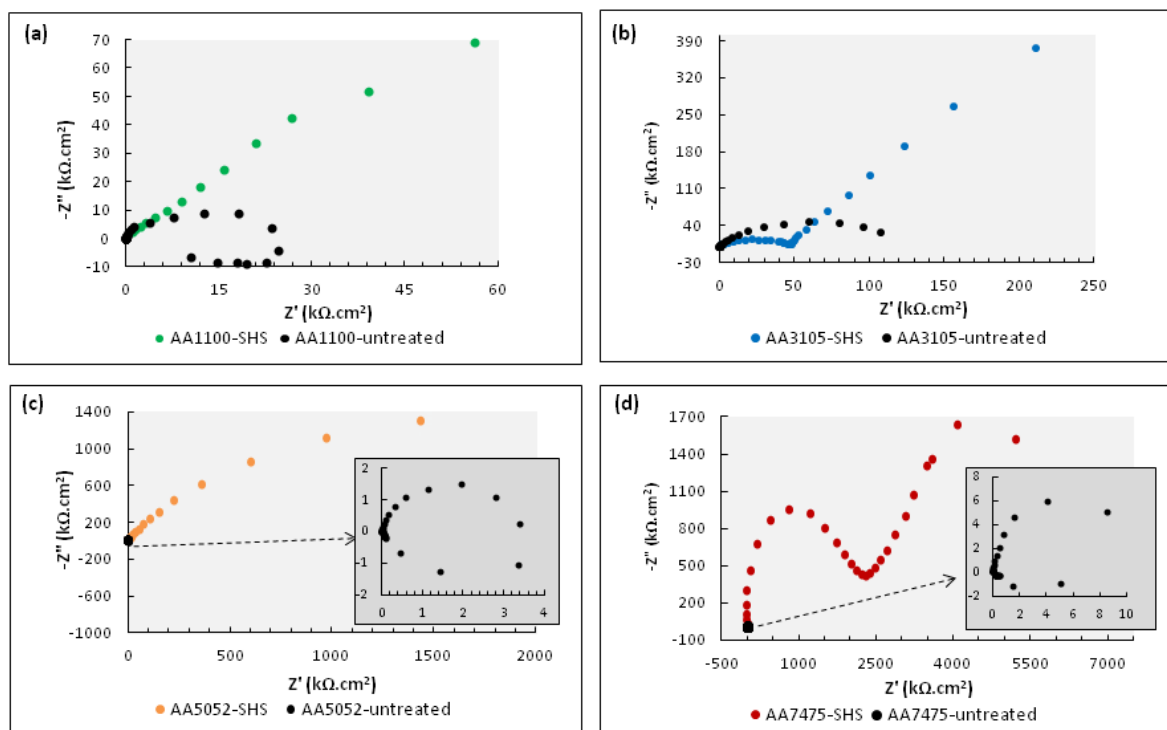


Figure 4 - Nyquist plots of untreated and SHS-treated aluminum alloys in 3,5% NaCl solution: (a) AA1100, (b) AA3105, (c) AA5052 and (d) AA7475.

Table 1 - Electrochemical polarization parameters obtained from Tafel extrapolation

Alloy	AA1100		AA3105		AA5052		AA7475	
	Untreated	SHS	Untreated	SHS	Untreated	SHS	Untreated	SHS
E_{corr} (V)	-0.872	-0.702	-0.932	-0.854	-1.380	-0.936	-1.372	-0.886
i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	1.8×10^{-1}	1.4×10^{-3}	2.6×10^{-1}	2.5×10^{-3}	11.0	1.8×10^{-3}	15.2	1.0×10^{-3}

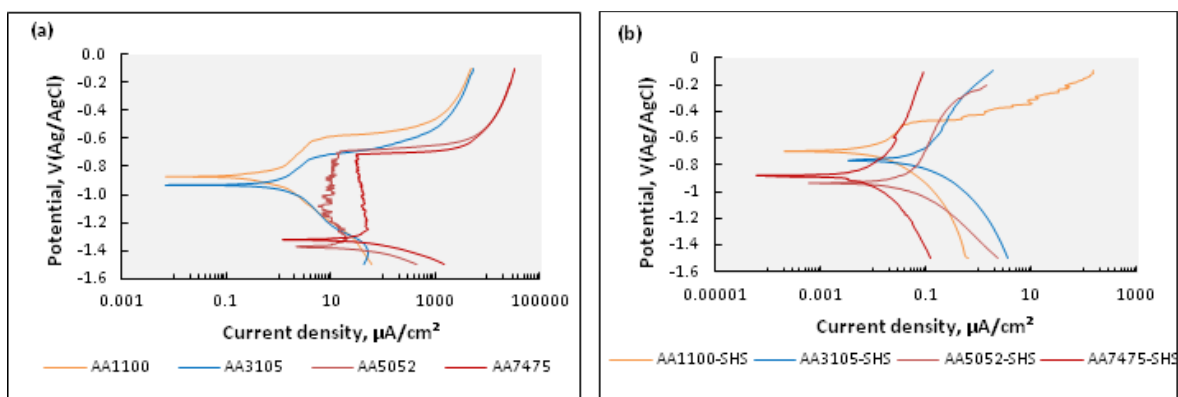


Figure 5 - Potentiodynamic polarization curves of aluminum alloys in 3.5% NaCl solution: (a) untreated samples and (b) superhydrophobic (SHS-treated) samples.

significantly reduced for the SHS-treated alloys. These values were obtained through Tafel extrapolation of the anodic and cathodic branches and are summarized in Table 1.

Conclusion

Superhydrophobic surfaces were successfully fabricated on various aluminum alloys using a simple, cost-effective, and non-toxic processing route, achieving water contact angles greater than 140°. A nano/micro-scale hierarchical roughness was developed, although the resulting surface morphology varied among the different alloys. The fabricated SHS-alloys exhibited significantly enhanced corrosion resistance compared to the untreated alloys. This enhanced corrosion resistance is mainly attributed to the nanostructured surface features, which trap air within the hierarchical roughness and sustain a stable Cassie-Baxter state. This trapped air layer acts as a barrier, significantly limiting the water and ion migration to the metal surface.

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support of CNPq, FAPERGS and CAPES/PROEX, and the support of Marcopolo S.A and Embraer S.A.

References

- [1] CHOBAMSUP, V., METZNER, M., BOONYONGMANEERAT Y., "Superhydrophobic surface modification for corrosion protection of metals and alloys", **Journal of Coatings Technology and Research**, v. 17, pp.583-925, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00327-2>
- [2] PANDA, P., "Corrosion resistant superhydrophobic aluminum alloy: a review", **Materials Science and Engineering**, v. 1017, n. 012008, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012008>
- [3] BARTH WAL, S., UNİYAL, S., BARTH WAL, S., "Nature-inspired superhydrophobic coating materials: drawing inspiration from nature for enhanced functionality", **Micromachines**, v. 15, n. 391, pp. 1-57, 2024. <https://doi.org/10.3390/mi15030391>
- [4] BAYER, I.S., "Superhydrophobic coatings from ecofriendly materials and processes: a review", **Advanced Materials Interfaces**, v.7, n.13, pp. 1-25, 2020. <https://doi.org/10.1002/admi.202000095>
- [5] DEVA, S., KUMAR, A., KUMAR, R., "Microstructure design for artificial superhydrophobic surfaces", **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, v. 9, n. 3, pp. 4023- 4028, 2020. <http://dx.doi.org/10.35940/ijeat.C6462.029320>
- [6] LOMGA, J., VARSHNEY, P., NANDA, D., SATAPATHY, M., MOHAPATRA, S.S., KUMAR, A., "Fabrication of durable and regenerable superhydrophobic coatings with excellent self-cleaning and anti-fogging properties for aluminium surfaces", **Journal of Alloys and Compounds**, v. 702, pp. 161-170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.243>
- [7] ATTAR, M. R., KHAJAVIAN, E., HOSSEINPOUR S., DAVOODI, A., "Fabrication of micro-nano-roughened surface with superhydrophobic character on an aluminium alloy surface by a facile chemical etching process", **Bulletin of Materials Science**, v. 43, n.31, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-1998-7>
- [8] MANDAL, P., PERUMAL, G., ARORA, H. S., GHOSH S. K., GREWAL, H. S., "Green manufacturing of nanostructured Al-based sustainable self-cleaning metallic surfaces", **Journal of Cleaner Production**, v. 278, n. 123373, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123373>
- [9] LAVANYA, M., GHOSAL, J., RAO, P., "A comprehensive review of corrosion inhibition of aluminium alloys by green inhibitors", **Canadian Metallurgical Quarterly**, v.63, n. 1, pp. 119-129, 2024. <https://doi.org/10.1080/00084433.2023.2190198>
- [10] SILVA, R.G.C., MALTA, M.I.C., CARVALHO, L.A.P., SILVA, J.J., SILVA FILHO, W.L.C., OLIVEIRA, S.H., ARAÚJO, E.G., URTIGA FILHO, S.L., VIEIRA, M.R.S., "Low-cost superhydrophobic coating on aluminum alloy with self-cleaning and repellency to water-based mixed liquids for anti-corrosive applications", **Surface and Coatings Technology**, v. 457, n. 129293, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129293>
- [11] GUO, F., DUAN, S., WU, D., MATSUDA, K., WANG, T., ZOU, Y., "Facile etching fabrication of superhydrophobic 7055 aluminum alloy surface towards chloride environment anticorrosion", **Corrosion Science**, v. 182, n. 109262, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109262>
- [12] CUI, C., CAO, Y., QI, B., WEI, J., YUAN, J., WANG, Y., "Convenient and large-scale fabrication of cost-effective superhydrophobic aluminum alloy surface with excellent reparability", **Langmuir**, v. 37, n. 25, pp.7810-7820, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c01123>
- [13] VARSHNEY, P., MOHAPATRA, S.S., KUMAR, A., "Superhydrophobic coatings for aluminium surfaces synthesized by chemical etching process", **International Journal of Smart and Nano Materials**, v. 7, n. 4, pp. 248-264, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/19475411.2016.1272502>
- [14] LI, J., LI, J., LIU, Y., WEN, Y., JIANG, J., SHANG, W., PENG, N., "Corrosion resistance and forming mechanism of the lauric acid/graphene composite films on aluminum alloy by electrodeposition", **Advancing Engineering Materials**, v. 23, n. 6, pp.1-10, 2021. <https://doi.org/10.1002/adem.202001540>
- [15] FARAG, A.A., MOHAMED E.A., TOGHAN, A., "The new trends in corrosion control using superhydrophobic surfaces: a review", **Corrosion Reviews**, v. 41, n. 101515, 2022. <http://dx.doi.org/10.1515/corrrev-2022-0020>

O USO DE TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS E DE CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE PARA ANÁLISE DOS PRODUTOS DE CORROSÃO

Mariana Botelho Barbosa^a, Eduardo Fagiani^a, Jessika Thayanne da Silva^a,
Lorena Almeida Cadete Costa^a, Daniela Procópio Aguiar^a, Pamela Vicente Martins^a

Introdução

A exposição contínua de estruturas metálicas a ambientes agressivos, caracterizados por elevada umidade relativa do ar, presença de íons cloreto, oxigênio dissolvido e variações térmicas significativas, favorece intensamente o desenvolvimento de processos corrosivos. Esses agentes atuam sinergicamente, acelerando reações eletroquímicas que comprometem a integridade estrutural dos materiais metálicos. Em especial, ambientes litorâneos apresentam condições críticas para a durabilidade de estruturas metálicas devido à elevada concentração de cloretos provenientes da névoa salina. Os íons cloreto são altamente penetrantes e têm a capacidade de romper as camadas passivadoras de metais como o aço inoxidável, promovendo corrosão localizada, como corrosão por pite e corrosão por frestas. Esses mecanismos são particularmente perigosos por

sua natureza insidiosa e difícil detecção em estágios iniciais. Além disso, a condensação de umidade e a variação térmica diária intensificam a formação de filmes eletrolíticos sobre as superfícies metálicas, criando condições ideais para a formação de células galvânicas e a propagação da corrosão. Portanto, em regiões costeiras, é essencial adotar estratégias de proteção específicas, como o uso de revestimentos anticorrosivos de alto desempenho, ligas metálicas resistentes a cloretos, e a implementação de planos de manutenção preventiva com inspeções periódicas e monitoramento da taxa de corrosão. A manutenção de estruturas metálicas constitui um fator essencial para assegurar a eficiência operacional e a sustentabilidade no setor industrial, especialmente em navios cuja vida útil estimada varia entre 20 e 25 anos [1]. A remoção eficiente dos produtos de corrosão e a criação de condições ideais

A caracterização dos produtos de corrosão é crucial para identificar os tipos de corrosão e direcionar medidas eficientes de preparo de superfície, além de propor formas de minimizar o desgaste por corrosão. Este estudo analisou produtos de corrosão em amostras de aço 1020 retiradas de estruturas metálicas expostas por longo período em ambiente marinho. Os produtos de corrosão estavam distribuídos de forma heterogênea na superfície das amostras, com diferentes características estruturais e morfológicas. A análise microscópica permitiu identificar qualitativamente o grau de corrosão, classificando as amostras como grau D, que indica um estágio de oxidação avançado apresentando óxidos volumosos e irregulares bem aderidos. Através das imagens foi possível identificar duas regiões distintas: “região escura” e “região clara”, representando diferentes óxidos. A Espectroscopia Raman mostrou que as regiões escuras apresentavam óxidos avançados como magnetita e hematita, típicos de ambientes com deficiência de oxigênio, enquanto nas regiões claras predominavam óxidos primários como lepidocrocita e akaganeíta. A análise de dureza variou entre 406 HV e 1172 HV, refletindo a heterogeneidade das camadas de óxidos, influenciada pelas condições de exposição e formação de diferentes fases e compactação dos óxidos. A aderência variou entre 5,25 MPa e 0,07 MPa, com predominância de falhas coesivas, indicando que os óxidos estão fortemente aderidos ao substrato metálico. Essas técnicas de caracterização mostraram-se eficientes para analisar produtos de corrosão, permitindo identificar tipos de óxidos, grau de dureza e adesão, informações fundamentais para escolher o tratamento de superfície adequado e propor metodologias de proteção das estruturas metálicas.

Palavras-chave: corrosão, espectroscopia, Raman, óxidos .

para a aderência de revestimentos protetores são fundamentais para garantir a eficácia dos tratamentos aplicados.

Nesse contexto, a caracterização dos produtos de corrosão permite identificar os mecanismos predominantes de degradação, como corrosão uniforme, localizada ou galvânica. Essa análise fornece subsídios técnicos para a escolha dos métodos de preparação de superfície mais adequados e para a formulação de estratégias mais eficazes para o preparo das superfícies e a proposição de medidas preventivas voltadas à mitigação do desgaste por corrosão. Além disso, contribui para a seleção de revestimentos com maior resistência ao ambiente operacional específico. Essa abordagem é determinante para prolongar a vida útil das estruturas metálicas e reduzir os custos operacionais ao longo do ciclo dos ativos industriais [2].

O presente trabalho teve como objetivo analisar os produtos de corrosão formados em amostras de aço carbono 1020 extraídas de estruturas metálicas expostas por longos períodos em ambiente marinho. Para isso, foram empregadas técnicas analíticas avançadas, incluindo Espectroscopia Raman, Microscopia

Eletrônica de Varredura (MEV), ensaios de dureza e testes de aderência, com o intuito de caracterizar a composição química, morfológicas e propriedades dos produtos de corrosão. A proposta central foi o desenvolvimento de uma metodologia sistemática e eficiente para a análise de produtos de corrosão, que subsidie a seleção criteriosa de tratamentos de superfície.

Materiais e Métodos

Foram utilizadas amostras de aço carbono AISI 1020 obtidas a partir de estruturas metálicas expostas em ambiente de estaleiro, caracterizado por elevada salinidade, umidade e presença constante de agentes agressivos típicos de atmosferas marinhas. As amostras foram fornecidas por uma empresa do setor de óleo e gás, com operações de extração e transporte localizadas no litoral do estado do Rio de Janeiro. Cada amostra possuía dimensões de 50 mm × 50 mm e apresentava evidentes sinais de degradação superficial, compatíveis com um estágio avançado de corrosão atmosférica, incluindo formação de produtos de corrosão, deslocamento de material e irregularidades topográficas. Essas características tornam as amostras representativas de

condições reais de deterioração em ambientes marinhos agressivos, sendo, portanto, adequadas para estudos de caracterização e avaliação de métodos de mitigação da corrosão.

O grau de corrosão foi analisado segundo a Norma ISO-8501-1 sendo que as amostras foram analisadas no Estereomicroscópio Estativa Fixa (Lupa), da marca Zeiss. A investigação morfológica das amostras foi realizada utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JEOL, modelo JSM - IT100, empregando-se elétrons secundários (SE) para o imageamento, com tensão de aceleração entre 10 kV e 15 kV.

A análise química dos produtos de corrosão foi realizada no Raman inVia Renishaw, utilizando laser de excitação centrado em $\lambda = 785$ nm, com a potência do laser em 1%, aproximadamente 2,04 mW e lente objetiva de 50x.

O ensaio de dureza foi realizado na seção transversal das amostras utilizando-se o ultramicrodurômetro da marca Shimadzu, modelo DUH-211S com indentador Berkovich. A carga de ensaio utilizada foi de 100 mN, os ensaios foram norteados pela Norma ISO 14577.

Para o ensaio de aderência foi realizada a técnica Pull-Off utilizando o equipamento Elcometer 510 Model S Automatic Adhesion Tester. O procedimento envolveu a administração de um pino (*dolly*) metálico sobre a superfície com produtos de corrosão, utilizando adesivo epóxi de alta resistência. Os ensaios foram norteados pela Norma ABNT NBR 15877.

Resultados e Discussão

A análise visual das amostras possibilitou a identificação de duas regiões morfológicamente distintas na superfície do material, denominadas “região escura” e “região clara”, conforme apresentadas na **Figura 1**.

As imagens obtidas das amostras (**Figura 1**), quando comparadas aos padrões fotográficos estabelecidos pela norma ISO 8501-1:2007, permitiram classificá-las no grau D de corrosão. Essa classificação corresponde a um estágio avançado de degradação superficial, caracterizado por comprometimento severo da integridade do material. As superfícies apresentavam elevada rugosidade, presença

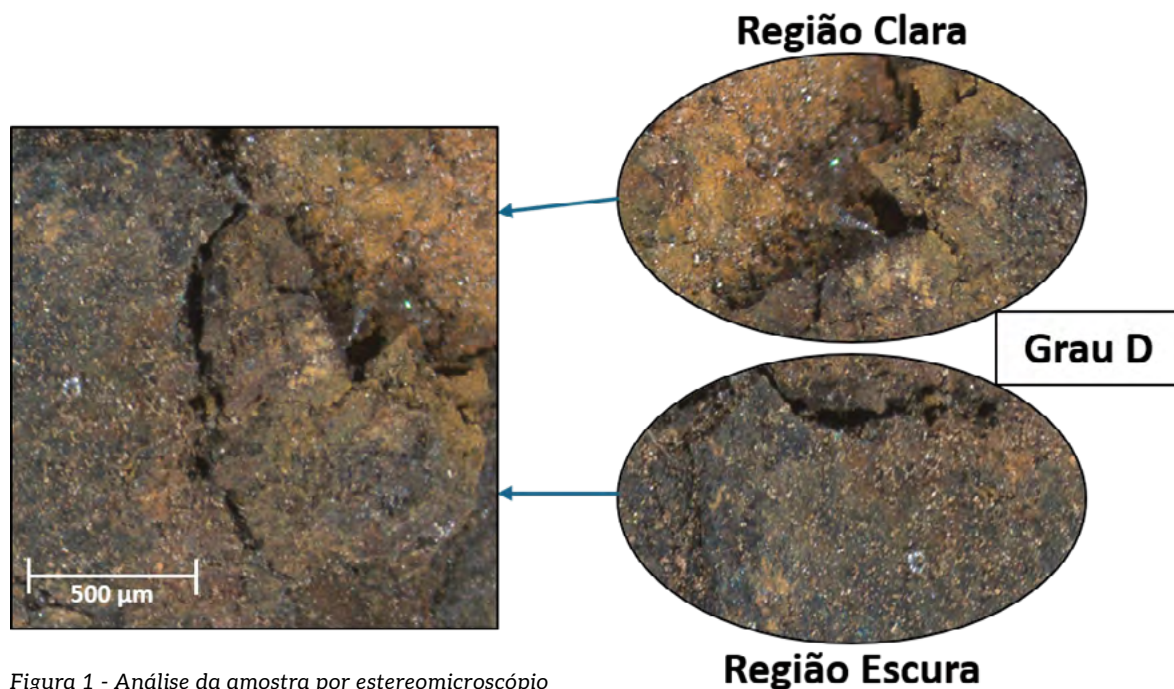


Figura 1 - Análise da amostra por estereomicroscópio de estativa fixa (lupa), destacando as diferenças entre as regiões escura e clara

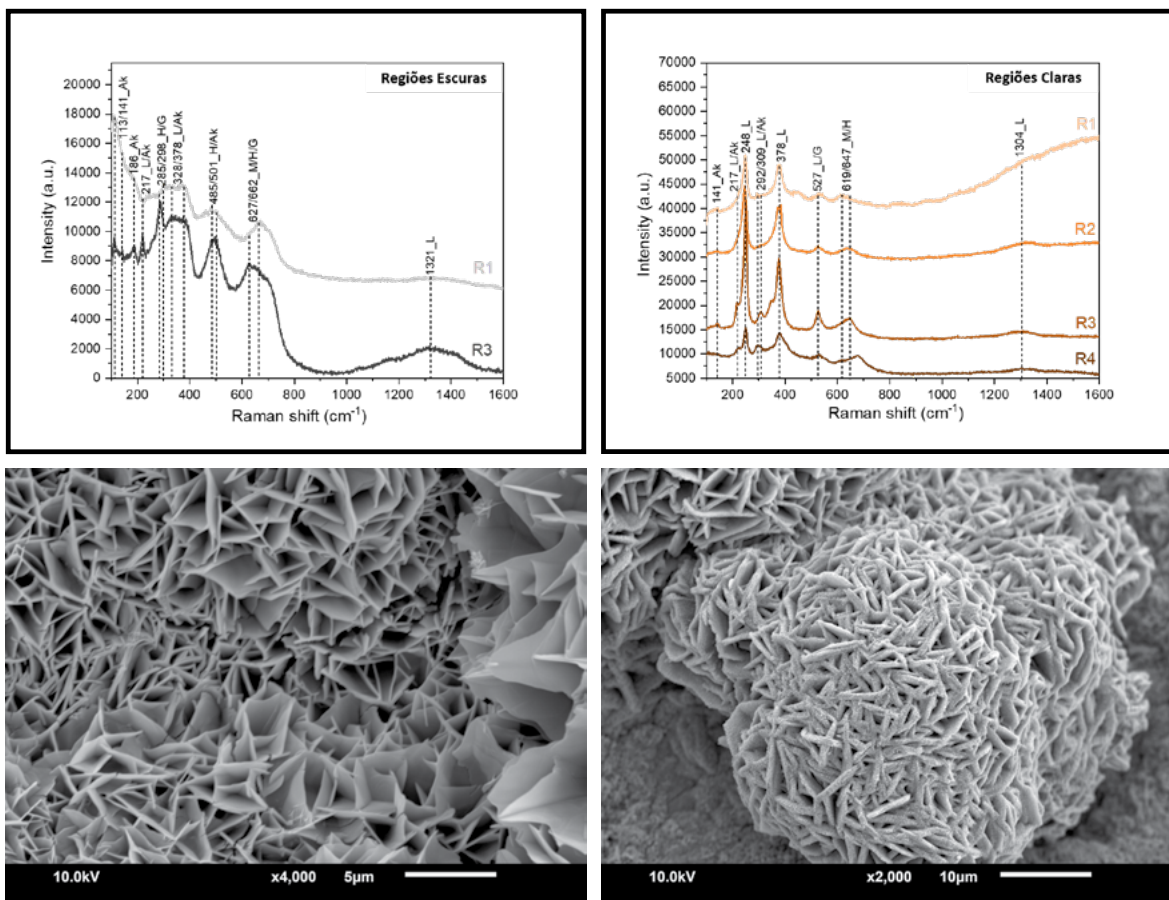


Figura 2 - Espectro Raman das regiões a) escura e b) clara; e micrografias das amostras: c) lepidocrocita; e d) akaganeíta.

de fissuras interconectadas, oxidação generalizada e formação de produtos de corrosão volumosos, irregulares e fortemente aderidos ao substrato metálico. Tais características são típicas de processos corrosivos prolongados em ambientes agressivos, como os encontrados em atmosferas marinhas e industriais [3, 4].

As análises espectroscópicas por Raman realizadas nas regiões escuras revelaram espectros com maior intensidade associada a óxidos de ferro em estágios mais avançados, como magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3), indicando uma progressão do processo corrosivo em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio (Figura 2). Em contraste, os espectros obtidos nas regiões claras evidenciaram predominância de fases mais instáveis e características de estágios iniciais da corrosão, como lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$) e akaganeíta ($\beta\text{-FeOOH}$),

geralmente formadas em condições com maior aeração (Figura 2). As micrografias eletrônicas permitiram a identificação morfológica dos produtos de corrosão, reforçando a interpretação da evolução heterogênea do processo corrosivo ao longo da superfície das amostras [5].

Os ensaios de dureza permitiram avaliar a variabilidade mecânica das camadas de óxidos formadas em ambiente marinho. Os resultados revelaram uma ampla faixa de dureza, variando entre 406 HV e 1172 HV, refletindo a heterogeneidade estrutural e composicional típica dessas camadas. Essa variação está associada a fatores como a natureza das fases formadas (óxidos e hidróxidos de ferro), cada uma com propriedades físico-químicas distintas. Fases como lepidocrocita e akaganeíta são estruturalmente frágeis, porosas e menos compactas, resultando em valores de dureza

mais baixos. Por outro lado, fases como magnetita e hematita, que se formam em condições de menor aeração e maior tempo de exposição, apresentam maior densidade, estabilidade termodinâmica e resistência mecânica, refletindo-se em valores de dureza mais elevados. A goethita, frequentemente observada em estágios intermediários, possui dureza e estabilidade intermediárias, contribuindo para a transição entre as fases iniciais e avançadas do processo corrosivo. Além disso, a morfologia e a compactação desigual dos produtos de corrosão, influenciadas por fatores ambientais como salinidade, umidade relativa e ciclos de molhamento e secagem, também desempenham papel crucial na variabilidade dos resultados de dureza observados.

Os ensaios de aderência revelaram falhas predominantemente coesivas na camada externa, com tensões de ruptura variando significativamente entre 5,25 MPa e 0,07 MPa. Essa ampla variação reflete a heterogeneidade estrutural das camadas de corrosão, nas quais regiões mais densas e compactas contrastam com áreas porosas e menos estruturadas. Os valores mais elevados de tensão indicam a presença de óxidos fortemente aderidos ao substrato metálico, enquanto os valores mais baixos sugerem a ocorrência de produtos de corrosão mais frágeis ou degradados. A predominância de falhas coesivas indica que a ruptura ocorreu no interior da camada de óxido, sem comprometimento da interface com o substrato, evidenciando uma boa adesão ao aço base. Na camada interna, os valores de tensão variaram entre 1,93 MPa e 4,17 MPa, indicando uma resistência moderada na maioria dos casos. Ainda assim, a predominância de falhas coesivas nessa região reforça a conclusão de que os produtos de corrosão estão, em grande parte, fortemente

aderidos ao substrato metálico. Essa aderência é atribuída à exposição prolongada das amostras em ambiente marinho agressivo, o que favoreceu a formação sucessiva de camadas de óxidos e a compactação progressiva dos produtos de corrosão, resultando em maior coesão e aderência à material base.

As técnicas aplicadas apresentaram desempenhos distintos e complementares na caracterização dos produtos de corrosão. A análise visual permitiu uma avaliação inicial do grau de degradação superficial, enquanto a espectroscopia Raman e as micrografias eletrônicas forneceram dados químicos e morfológicos detalhados sobre as fases corrosivas presentes. Os ensaios de dureza e aderência, por sua vez, revelaram a variabilidade mecânica das camadas de óxidos, refletindo a heterogeneidade estrutural resultante das diferentes condições ambientais de exposição. A consistência entre os resultados obtidos reforça a eficácia do uso integrado dessas técnicas, que se mostraram sinérgicas na compreensão da evolução do processo corrosivo.

Com base nessa integração, definiu-se uma metodologia sistemática composta por etapas sequenciais de análise visual, espectroscopia, microscopia e ensaios mecânicos, capaz de fornecer uma caracterização abrangente das superfícies corroídas. Essa abordagem é indicada especialmente para ambientes agressivos, como atmosferas marinhas, onde o monitoramento preciso da corrosão é essencial para a definição de estratégias de mitigação. Além disso, os dados obtidos orientam de forma objetiva a seleção de tratamentos de superfície, ao fornecer parâmetros técnicos que consideram a natureza, aderência e resistência dos produtos de corrosão, contribuindo diretamente para o aumento da durabilidade e da confiabilidade de estruturas metálicas.

Conclusões

A metodologia proposta demonstrou-se eficaz na caracterização sistemática de produtos de corrosão, permitindo a identificação de diferentes tipos de óxidos, bem como a avaliação de suas propriedades mecânicas, como dureza e adesão à superfície metálica. Esses resultados fornecem subsídios técnicos relevantes para a seleção criteriosa de tratamentos de superfície, contribuindo para o aprimoramento de estratégias de proteção anticorrosiva. Dessa forma, a abordagem desenvolvida representa um avanço significativo na compreensão dos mecanismos de corrosão e na definição de metodologias mais eficientes para a preservação de estruturas metálicas em ambientes agressivos.

Referências Bibliográficas

- [1] IVOŠEVIĆ, Š.; BAUK, S. The use of information technology in the assessment of the corrosion damage on ship hull. In: 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT), 2018, p. 1-4. IEEE.
- [2] GARBATOV, Y.; SISCI, F.; VENTURA, M. Risk-based framework for ship and structural design accounting for maintenance planning. *Ocean Engineering*, v. 166, p. 12-25, 2018.
- [3] ISO, E. N. 8501-1: 2007. Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness. Edition, v. 2, p. 74, 2007.
- [4] PINHEIRO R. S.; MALHEIRO, C. T. Avaliação do grau de corrosão de chapas de aço carbono por corrente elétrica. In: 10º Congresso Internacional de Corrosão. Búzio, RJ, 2016.
- [5] ALCÁNTARA, J. *et al.* An attempt to classify the morphologies presented by different rust phases formed during the exposure of carbon steel to marine atmospheres. *Materials Characterization*, vol. 118, pp. 65-78, 2016.

DESENVOLVIMENTO DE MELHOR ROTA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOQUÍMICOS DE FORMA CUSTOMIZADA PARA USO DE AÇOS EM AMBIENTES CORROSIVOS E ABRASIVOS

Mariana Botelho Barbosa^a, Eduardo Fagiani^a,
Tiago Manoel de Oliveira Santos^a, Vanessa Pereira Silva^a, Glaucio Sansonas^b

Introdução

Na fabricação de moldes de injeção de polímeros, há diversos critérios para seleção de aços normatizados e listados na literatura como adequados, mas, de um modo geral, considera-se que devam ser analisadas todas as etapas do processo de fabricação e as propriedades físico-químico-mecânicas necessárias para o bom desempenho da ferramenta^[2,3]. O conhecimento das condições de aplicação também é imprescindível, pois somente assim pode-se conhecer as solicitações a qual a ferramenta estará sujeita, permitindo a seleção adequada dos aços. Além disso, o planejamento e estudo de todas as etapas de fabricação, também é muito importante, pois estas etapas podem introduzir modificações importantes

nas propriedades do aço interferindo no seu desempenho.

O aumento de produção ou alterações nos parâmetros do processo de produção podem tornar necessário a construção de uma ferramenta customizada ao processo da empresa. Para esse desenvolvimento podem ser considerados o uso de diferentes aços e tratamentos térmicos, termoquímicos e revestimentos, com objetivo de melhorar a vida útil e o desempenho. Para moldes de injeção de polímeros, as condições do processo causam o desgaste do tipo adesivo de tais ferramentas e podem também desencadear fenômenos corrosivos, principalmente na injeção de organoclorados. Portanto, ao se avaliar o aço AISI 420, que é amplamente utilizado para moldes de injeção,

Na injeção de polímeros, as superfícies dos moldes em contato com o material fundido operam em condições severas, incluindo corrosão, abrasão, erosão e tensões, isoladamente ou combinadas. Sob estas condições se faz necessário realizar alterações nas superfícies desses moldes de aço para que sejam resistentes ao desgaste abrasivo, erosivo, e possuam adequada resistência à corrosão^[1,2]. Estas alterações podem ser obtidas por meio de tratamentos térmicos, termoquímicos, tratamentos mecânicos, revestimentos, etc^[3,4]. Outra alternativa importante reside na seleção de materiais inerentemente mais resistentes à corrosão^[2]. Nesse contexto, o presente estudo investigou os aços AISI 420 e AISI H13, com o objetivo de identificar os tratamentos térmicos e termoquímicos mais eficazes para alcançar alta resistência à corrosão, preservando suas propriedades mecânicas^[5]. Para isso, aplicaram-se tratamentos térmicos distintos em faixas de temperatura variadas para cada aço, buscando otimizar a resistência mecânica sem prejudicar a resistência à corrosão, como observado no aço AISI 420 tratado termicamente abaixo da temperatura normativa ($\approx 500^{\circ}\text{C}$). Além dos tratamentos térmicos, foram realizados tratamentos termoquímicos de nitretação a plasma, visando ganhos de resistência à corrosão, como é o esperado para os aços AISI H13. Sendo assim, os aços foram caracterizados micro estruturalmente por microscopia ótica. Para verificar o impacto dessas alterações nos comportamentos de corrosão, foram empregadas técnicas de polarização linear e teste de corrosão por névoa salina. Essas metodologias, aliadas às caracterizações realizadas, permitiram propor um tratamento adequado para cada aço, possibilitando seu uso em condições antes consideradas proibitivas.

Palavras-chave: corrosão, desgaste, tratamentos térmicos, termoquímicos, microestrutura, moldes de injeção

temos: boa resistência à corrosão, mas a resistência ao desgaste não é tão boa. Por outro lado, quando avaliamos as características de um aço de alto desempenho ao desgaste, como o AISI H13, temos excelente resistência ao desgaste, mas baixa resistência à corrosão.

Diante deste cenário, a busca por soluções efetivas depende de múltiplos conhecimentos técnicos e científicos que passam pela seleção dos materiais, manipulação de suas microestruturas e superfícies por meio de tratamentos térmicos e termoquímicos podendo haver a necessidade de revestimentos combinado com propriedades adequadas de dureza, resistência a corrosão e abrasão. Essas propriedades devem ser avaliadas em ambiente relevante que simule as condições de trabalho destes moldes buscando o desenvolvimento customizado da ferramenta com melhor desempenho.

Esse trabalho visa o desenvolvimento de receitas para os tratamentos térmicos, termoquímicos e

revestimentos que atendam aos requisitos do processo de injeção de polímeros, que hoje procuram soluções em tratamentos superficiais que visam a melhoria de desempenho de suas matrizes de injeção.

Materiais e Métodos

Composição Química dos aços

Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas elementares dos aços AISI 420 e AISI H13, fornecidas pela Bohler Uddeholm.

Os aços AISI 420, foco deste trabalho, possuem alto teor de cromo, o que torna estes inoxidáveis, além disso possuem teor de carbono mais alto em relação aos outros aços inoxidáveis, o que permite o endurecimento por tratamento térmico^[6]. Os aços AISI H13 estão ligados ao cromo, molibdênio e vanádio, estes elementos são bons formadores de carbonetos. O cromo aumenta a resistência à corrosão e a oxidação em altas temperaturas. O molibdênio confere retenção

Tabela 1 – Composição química elementar dos aços AISI H13 e AISI 420.

Elemento (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
420	0,38000	0,97000	0,46000	0,02100	0,00060	13,70000	-	0,28000
H13	0,40000	1,00000	0,39000	0,01300	0,00030	5,17000	1,47000	0,93000

de resistência mecânica a quente (amolecimento pelo calor) e aumenta a temperabilidade. E o vanádio atribui ao aço maior resistência mecânica, maior tenacidade e temperabilidade e ainda resistência à fadiga e à abrasão.

Tratamentos térmicos e termoquímicos

Tratamentos térmicos

Os aços utilizados nesta pesquisa foram tratados termicamente (têmpera e revenimento) na empresa ISOFLAMA. Os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 2.

Tratamentos termoquímicos

Para realizar tratamento termoquímico de nitretação as amostras foram tratadas termicamente e em seguida foi realizado a nitretação a plasma. Os parâmetros utilizados pela Isoflama estão descritos na Tabela 3.

Metalografia

As análises metalográficas foram realizadas nas amostras a fim de caracterizar a microestrutura dos aços. Para isso os corpos de prova foram cortados, embutidos com baquelite, e em seguida foram lixados com lixas de 220, 320, 400, 600, 800, 1000 mesh e polidos em discos de pano, com pasta diamantada com a granulometria de 3 µm e 1 µm. Após o polimento, procedeu-se com o ataque químico. Os corpos de prova de aço inox AISI 420 foram

atacados quimicamente utilizando a solução de Kalling (2g de CuCl₂, 40mL de HCl e 40mL de álcool etílico) por 10 segundos, já os corpos de prova de aço AISI H13 foi utilizado Nital 2% por 60 segundos. Em seguida, as amostras foram analisadas no microscópio ótico Olympus modelo BX 51M com sistema de captação de imagens. A Figura 1 apresenta as micrografias dos aços AISI 420 tratados termicamente por têmpera e revenimento.

Como pode-se observar as micrografias são constituídas de matriz martensítica em ripas, com carbonetos não dissolvidos. É possível observar que a aço revenido com ciclo de revenimento em baixa temperatura possui menor quantidade de carbonetos dispersos na matriz.

Nos aços H13 tratados termicamente, as microestruturas são constituídas de matriz martensítica, fase branca, com carbonetos não dissolvidos dispersos na matriz. A Figura 2 ilustra as micrografias dos aços AISI H13 tratados termicamente nas duas condições de tratamento.

É possível observar que as amostras possuem microestruturas semelhantes, evidenciando que o aumento na temperatura durante o segundo ciclo de revenimento não causou diferenças microestruturais.

Na Figura 3 são mostradas as análises micrográficas das amostras tratadas termoquimicamente por nitretação. É visível uma camada mais densa

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no tratamento térmico.

	Têmpera	Revenimento 1	Revenimento 2	Revenimento 3
AISI 420 – 1	1030 °C	Ciclo ISOTENAZ*		
AISI 420 – 2	1030 °C	500 °C	505 °C	480 °C
AISI H13 – 1	1030 °C	560 °C	595 °C	560 °C
AISI H13 – 2	1030 °C	560 °C	580 °C	560 °C

*Ciclo desenvolvido pela ISOFLAMA, objetivando maior equilíbrio de propriedades.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no tratamento térmico antes da nitretação.

	Têmpera	Revenimento 1	Revenimento 2	Revenimento 3
AISI 420	1030 °C	500 °C	480 °C	505 °C
AISI H13	1030 °C	585 °C	580 °C	560 °C

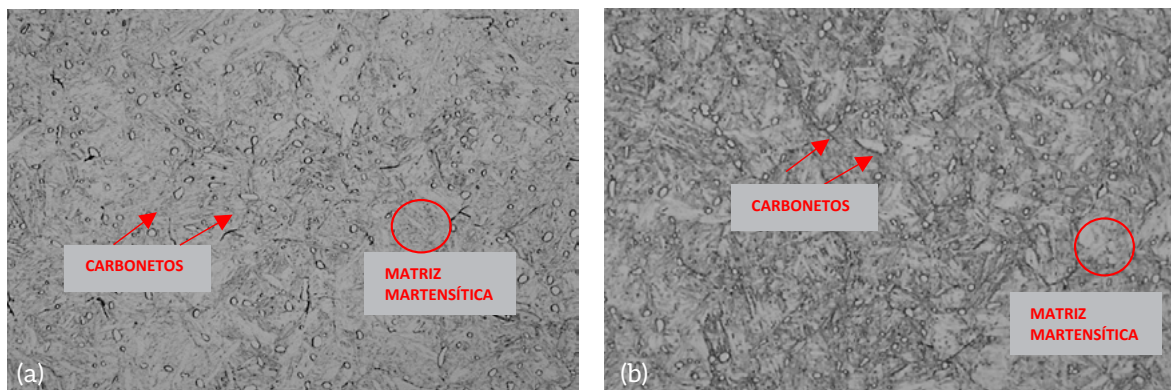


Figura 1 - Micrografias dos aços AISI 420 tratados termicamente - (a) 420-1. (b) 420-2.

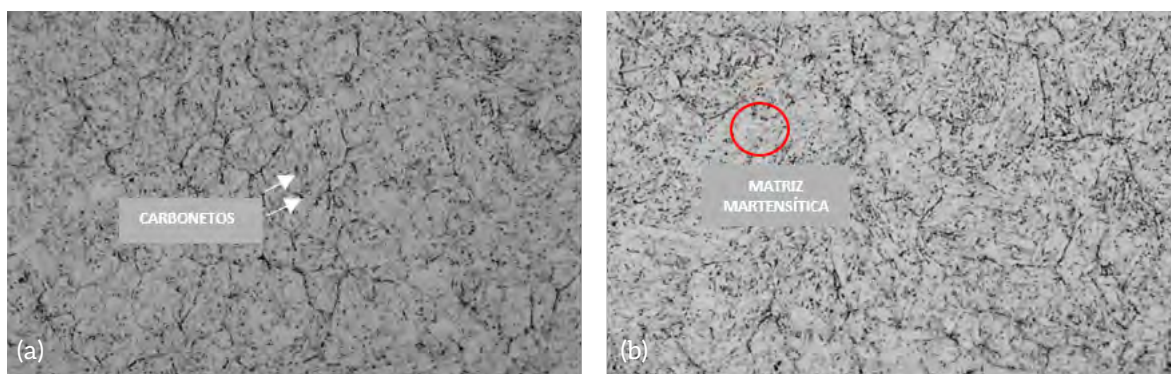


Figura 2 - Micrografias dos aços AISI H13 tratados termicamente - (a) H13-1 (b) H13-2.

formada após o tratamento, essa camada possivelmente é zona de difusão de nitrogênio

O aço AISI 420 exibiu uma zona de difusão de nitrogênio em torno de 45 μm de espessura. Esse aço contém uma quantidade significativa de cromo (13,7%), formando uma camada passiva de óxido na superfície do material, o que dificulta a difusão do nitrogênio durante o processo de nitretação.

Já o aço AISI H13 apresentou uma camada branca em torno de 5 μm de espessura. Esse aço possui menor quantidade de cromo em sua composição química (5,17%) em relação ao aço AISI 420, não formando camada passiva em sua superfície, facilitando assim a difusão do nitrogênio no aço.

Corrosão eletroquímica

A célula eletroquímica utilizada para realização desse ensaio foi composta por três eletrodos. Sendo um eletrodo de trabalho com o material a ser estudado, com área útil de 1,0

cm^2 . Um eletrodo de prata/cloreto de prata (Ag/AgCl 3,0M) como referência e um eletrodo de platina como eletrodo auxiliar, sendo o NaCl 3,5% em volume a solução eletrolítica utilizada nos ensaios. O equipamento utilizado nos ensaios foi o potenciostato-galvanostato da marca Autolab, modelo PGSTAT-302.

A Tabela 4 apresenta os valores médios de resistência a polarização (R_p) e desvio padrão obtidos no ensaio de corrosão eletroquímica por polarização linear para cada aço, sendo os ensaios realizados em triplicata.

O aço AISI 420 recozido apresentou um valor de R_p maior do que o aço AISI H13 recozido. Por ser um aço inoxidável, o aço AISI 420 possui alto teor de cromo (13,7%), elemento químico que confere resistência a corrosão química. Já o aço AISI H13, é um aço com baixo teor de cromo (5,17%), logo não possui boa resistência a corrosão, uma vez que não possui cromo suficiente para gerar a camada passiva.

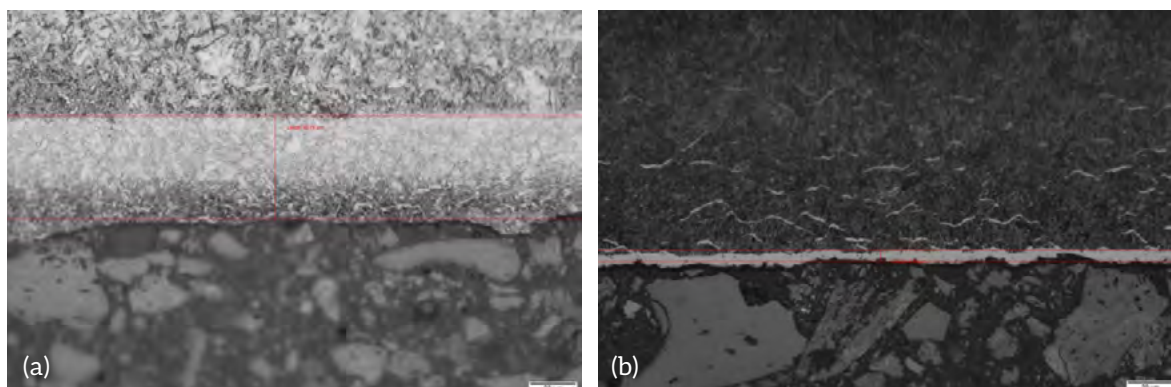


Figura 3 – Micrografias transversais das superfícies após nitretação – (a) aço AISI 420 (b) aço AISI H13.

Após o tratamento térmico, o aço AISI 420-1 aumentou sua resistência a polarização de modo considerável e o aço 420-2 reduziu drasticamente sua resistência a polarização.

A temperatura de revenimento é um fator que influencia no processo de degradação do material por corrosão. Quanto maior a temperatura de revenimento, maior a quantidade de re-precipitação de carbonetos, ou seja, menor a resistência a corrosão

Ensaio Salt Spray

Os ensaios realizados foram baseados na norma ASTM B117, assim as amostras foram pulverizadas com uma névoa salina (Salt Spray) de solução de 5% NaCl durante 96 horas, a temperatura da câmara (modelo BASS-CCT-GS-STD-02/2014) manteve-se em $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Na Tabela 5 são mostradas as perdas de massa encontradas para cada material ao final do ensaio, e a Figuras 4 mostra as amostras antes e após o processo de salt spray.

O ensaio de névoa salina é um teste acelerado de corrosão, não oferecendo análise detalhada do comportamento da corrosão no nível microestrutural ou eletroquímico. Porém por meio desse foi possível observar a alta resistência a corrosão do aço AISI 420-1 tratado termicamente, validando a efetividade do tratamento térmico realizado pela Isoflama

Conclusões

Os aços AISI 420 e AISI H13 após os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento apresentaram matriz martensítica com carbonetos dispersos, o que foi comprovado pelas imagens realizadas no MEV e pela identificação de fases realizada no DRX. Após o tratamento termoquímico, o aço AISI 420 apresentou uma zona de difusão de nitrogênio menor em comparação ao aço AISI H13.

A resistência a corrosão do aço AISI 420, como esperado, diminuiu drasticamente, enquanto do aço AISI H13 aumentou após o tratamento de

Tabela 5 – Perda de massa das amostras após decaapagem química.

	Amostras	Perda de massa total (g)	Desvio padrão
Tratados termicamente	420-1	0,0059	0,0008
	420-2	0,0264	0,0023
	H13-1	0,0657	0,0375
	H13-2	0,1037	0,0140
Nitretado	420	0,1122	0,0270
	H13	0,1262	0,0242

Tabela 4 - Valores médios de resistência a polarização (Rp) obtidos para cada aço após ensaio de corrosão eletroquímica.

	Amostra	Resistência a polarização (Ω)	Desvio padrão
Tratados Termicamente	420-1	104516	42068
	420-2	7221	753
Nitretado	420	6008	780
Recozido	H13	1028	117
Tratados Termicamente	H13-1	2047	143
	H13-2	1223	561
Nitretado	H13	4186	1097

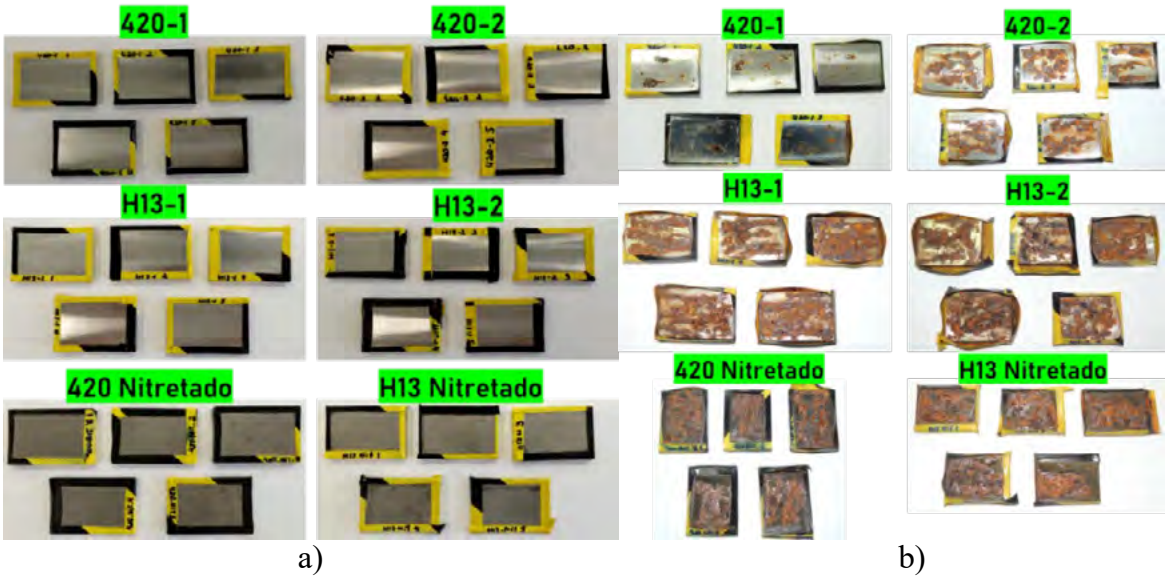


Figura 4 - Amostras antes do processo de salt spray, antes (a) e após ensaio (b).

nitretação. Os resultados de corrosão obtidos pela técnica Salt Spray demonstraram a efetividade do tratamento térmico realizado pela Isoflama no aço AISI 420-1. Tratamento que visa trabalhar o endurecimento do aço em regiões de temperatura ligeiramente menores que as convencionais, privilegiando o ganho de dureza sem comprometer a resistência à corrosão.

Referências Bibliográficas

[1] Biopdi. Nitretação: Tratamento Térmico. Biopdi, 2023. Disponível em: . Acesso em: 11 Mar 2024.

[2] PINEDO, C. E., Tratamento térmico e superficial do aço inoxidável martensítico aisi 420 destinado a moldes para injeção de polímeros parte II – Tratamento superficial 1, p. 13-21. In: 2º Encontro de Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, 2004.

[3] CELESTINO, P. A. P.; FELIPE, R. C. T. S.; MACHADO, T. G., Análise comparativa entre o tratamento térmico (têmpera) e o tratamento termoquímico (cementação) realizado em aço 1040. HOLOS, vol. 3, 2007, pp. 223-232 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal, Brasil

[4] GOUVÊA, E. S., Estudo da influência de tratamentos térmicos sobre a microestrutura de aços H13. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá. Maringá, p. 90, 2014.

[5] VENDRAMIM, J. C., Seleção de materiais para nitretação. CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: . Acesso em 27 Nov. 2024.

[6] ALCÂNTARA, C. M., Relação estrutura-propriedades-processamento de aços inoxidáveis martensíticos. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 94. 2021.

STUDY OF HYDROGEN TRANSPORTATION THROUGH EXISTING NATURAL GAS PIPELINES

Pedro Castello Olm^a, Luiz Eduardo Moraes Tavares^b, Rennan Leite^c,
Levi Andrade Vieira^d, Rebeca Maciel A. Gomes^e, Victor Hugo Marini^f, Thiago Mesquita^g

^a NTS - Estudante de Engenharia Ambiental e Sanitária - pedro.olm@ntsbrasil.com

^b UFRJ - Engenheiro Mecânico - luizeduardomoraestavares@poli.ufrj.br

^c TRANSPETRO - Engenheiro Mecânico - rennanleite@poli.ufrj.br

^d PipelineBrazil - Engenheiro Mecânico - levi.andrade156@gmail.com

^e ENGIE - Engenheira Mecânica - rebecagomes@engie.com

^f UFF - Engenheiro de Petróleo - victormarini@gmail.com

^g CTDUT - Engenheiro de Produção - thiago.mesquita@ctdut.org.br

1. Introduction

In Brazil, the transportation of natural gas through pipelines is already a well-established activity. The need to transport hydrogen gas, in mixtures with natural gas, places us face to face with some issues that need to be thoroughly evaluated. The big question is can we use existing pipelines to transport hydrogen and gas mixtures.

The global imperative to transition toward sustainable energy vectors necessitates the comprehensive integration of hydrogen (H₂) into existing energy infrastructure. As a clean-burning fuel and a versatile energy carrier, hydrogen presents a significant opportunity for decarbonizing high-demand industrial sectors. A critical bottleneck in this transition is the establishment of safe, efficient, and economically viable long-distance transportation methods. Utilizing existing natural gas pipeline infrastructure for H₂ blending and transport is broadly acknowledged as the most capital-efficient pathway.

In this context, was organized an event, in a workshop format, that originated this paper also featured the participation of members of

YPP-BR (Young Pipeline Professionals Brazil), who have presented technical summaries of a group of 17 selected articles. The event was held at Technological Center for Pipeline and Terminal (CTDUT) facilities, as part of the research and development roadmap of Hydrogen transportation by pipelines.

2. Technical Topics

From the selected papers we prioritized five technical topics highlighted above were related from data and information obtained from a Workshop held in May 2024 among ATGas, CTDUT, PipelineBrazil, Natran R&I and stakeholders from the hydrogen market. With effort, the mapping of 13 major topics was obtained, after being prioritized in five main topics, considered the most important and challenging points to be studied in relation to the transportation of H₂ in pipelines in Brazil. These points were considered the crucial points to ensure that the main problems and opportunities identified are adequately aligned with the results recorded and prioritized during the Stakeholder Workshop.

This study reviews recent technical literature regarding the feasibility of repurposing natural gas pipeline infrastructure for methane-hydrogen blends. While leveraging current pipelines is vital for decarbonization, significant critical technological gaps remain. Key issues include metallurgical risks, specifically the difficulty of detecting hydrogen embrittlement mechanisms at the atomic and microstructural scales before structural failure occurs. Furthermore, differences in hydrogen compressibility, and diffusivity hinders the ability of inline inspection tools to accurately identify defects and degradation processes. These factors increase maintenance requirements and repair frequency. The analysis also highlights a significant lack of technical standards and specific regulations. Consequently, the study concludes that strategic R&D investment is essential to refine operation, inspection, monitoring and maintenance technologies and safely capitalize on hydrogen-driven decarbonization.

Some of the selected articles were presented as technical summaries during an event held on January 17, 2025. The subsequent debate addressed the challenges and opportunities related to the transition to a hydrogen-based economy and is summarized below under the five previously listed topics.

2.1 Integrity Monitoring

Transporting pure hydrogen (H_2) or blended with natural gas in existing pipelines presents technical and safety challenges due to the unique characteristics of hydrogen. Continuous monitoring of pipeline integrity is essential to prevent leaks, structural failures and explosion risks.

On the subject, professionals Rafael Almeida and Oscar Ruiz from the company Rosen [1], focused their presentation on the context of decarbonization, linked to the Paris Agreement and the RePower EU project, and warned about the risks of damage from inspection tools in PIG runs on pipelines containing H_2 . However, they highlighted the economic opportunity of using existing pipelines, which can represent a cost of at least 30%, compared to the cost of new pipelines.

Another completed project, also undertaken by Rosen and Enbridge [17], explored the effects of hydrogen on pipeline system integrity in the face of limited data, using an approach centered around an extensive sensitivity study assessing fracture and fatigue. The approach also used an asset classification model based on the sensitivity study findings to support effective targeting of inspection and testing to maximize the value of the data collected. This was achieved by using deterministic approaches, QRA (Quantitative Risk

Assessment), to assess and ultimately accept the levels of risk associated with reuse, including the impacts of hydrogen on failure acceptance.

In [15], a sensor fusion system for in-situ measurement of H_2 mixture concentration was presented, combining ultrasonic and thermal conductivity (TC) sensors. To test this system, the sensors were installed in a pipeline together with pressure, temperature and humidity sensors to compensate for environmental factors, while mass flow controllers regulated the gas composition. Calibration across the entire range of H_2 concentrations confirmed the suitability of the ultrasonic and TC sensors for H_2 measurement. Using the system in the field will allow us to validate it and increase the data set, making the system even more accurate.

For the state of the art in the integrity assessment of H_2 pipelines [8], the YPP Vitor Hugo Marini cited the SafeH2Pipe project (JIP), funded by the Research Fund for Coal and Steel, which aims to understand the effect of mechanical damage and certain types of corrosion in hydrogen pipelines. With a direct focus on the combination of H_2 damage and regular pipeline damage, such as dents, grooves and third-party actions. It was highlighted that standards such as ASME B31.12 and API RP 1183 do not address H_2 damage, and there is a need for validation with tests in a real environment.

Furthermore, Engineer Mario Monteiro, summarizing 150 years of research on hydrogen embrittlement [5], highlights a significant deficiency in early detection of intrinsic interactions between hydrogen and materials at nano atomic

scales and under in situ conditions. Focusing on the destructive methodology, at the nanometric scale, ATP (Atom Probe Tomography) that functions as a mass spectrometer to evaluate H₂ damage. The study points out the need to develop multimodal experimental techniques to comprehensively study hydrogen in materials.

Therefore, the main and most important challenges in the transportation of H₂ through pipelines found in the evaluated articles are:

- Hydrogen Embrittlement (HE): H₂ can penetrate the metal structure of pipelines, making them brittle and susceptible to cracking.
- Greater Permeability and Leaks: Since hydrogen has small molecules, it can escape through micro-cracks and inadequate connections.
- High Flammability and Explosivity: H₂ has a wide range of flammability in air (4% to 75%), increasing the risks in case of leaks.
- Differentiated Pressure and Flow Velocity: Hydrogen has a lower density than natural gas, requiring adjustments in pipeline pressure and flow to maintain transportation efficiency.

2.2 Risk and Change Management

Hydrogen (H₂) is considered a promising alternative for the energy transition, as it is a clean and abundant fuel. However, its use in infrastructures originally designed for other gases or fuels presents significant challenges and risks. One of the main problems is hydrogen embrittlement, a chemical phenomenon in which hydrogen penetrates metallic materials, such as carbon steel, making them brittle and susceptible to cracking. This can compromise the safety of gas pipelines, storage tanks and other industrial equipment. In addition, hydrogen has extremely small molecules, which makes it easy for it to diffuse and leak.

For the hydrogen transportation risk assessment in natural gas pipelines [9], YPP Rebecca Maciel presented the Analysis of the existing QRA (Quantitative Risk Assessment) methodology used for natural gas pipelines. The methodology aims to assess its suitability for use in pipelines transporting hydrogen and mixtures. By assessing

risk management and prioritizing the quantitative methodology, it is observed that areas impacted by the leak are increased with the presence of H₂.

Modelling using probabilistic reliability, which systematically accounts for uncertainties, and provides a quantitative basis for reducing uncertainties as research progresses [13]. These were developed based on the most recent research on the adverse effects of hydrogen on pipeline material performance (i.e. hydrogen embrittlement). This was accomplished using empirical models that reflect the effects of hydrogen embrittlement on fracture toughness and fatigue crack growth rates. A demonstration analysis was conducted with the model to predict failure rates of a single crack type in a hypothetical pipeline.

Large-scale pipelines repurposing poses major challenges for operators in terms of safe change management. In the reference [16], repurposing was carried out through specific and in-depth asset analyses, considering operational, inspection, integrity and material aspects. For the conversion of the entire network, this means that these specific asset assessments must be carried out, which can be extremely time-consuming and expensive. The development of robust and simplified Management of Change (MoC) guidelines for identifying existing gaps and safe operational management during repurposing. Applicable in onshore transmission and distribution and in the offshore pipeline network.

For operational pipelines with 100% Hydrogen [10], the YPP Renan Leite presented the paper with operational simulation demonstrating graphs of better performance of PIGs for different operational conditions, and with speeds above 10m/s.

In summary, we can highlight that the main risks in adapting existing infrastructures are:

- Hydrogen Embrittlement - H₂ can penetrate metallic materials (such as carbon steel), making them brittle and increasing the risk of structural failure.
- Leakage and Diffusion - Due to its small molecular size, hydrogen can escape

through microcracks and connections, requiring enhanced sealing and monitoring.

- High Flammability and Explosivity – H_2 has a wide flammability range in air, making strict control essential to avoid ignition risks.
- Storage and Pressure – H_2 typically needs to be stored under high pressure or in a liquid state (-253°C), requiring strong tanks and piping.

And the main risk mitigation measures related in this study are:

- Material Integrity Analysis – Assessment of the compatibility of pipes, tanks and valves with hydrogen. If necessary, replacement with resistant alloys.
- Monitoring and Sensing – Implementation of specific sensors to detect leaks and monitor structural integrity.
- Safety Training and Procedures – Training teams to deal with the risks of H_2 and updating emergency protocols.
- Leak Control – Use of more resistant seals and frequent inspections to prevent undetectable dispersion of the gas.
- Operational Tests and Risk Modeling – Conducting simulations and small-scale tests before the full implementation of hydrogen.

About the Management of Change for the use of existing infrastructure for H_2 [3], YPP Pedro Olm highlighted the effects of H_2 on the materials of the current system, the operational conditions and the impacts of H_2 on the inspection and maintenance of pipelines. In this presentation, it was emphasized that damage to the PIG due to the corrosive attack of H_2 should increase defects and, consequently, the repairs of these pigs.

In addition to what is mentioned in [3], the following points must be observed for the necessary operational changes:

- Infrastructure Modifications – Updating pipelines, compressors and storage systems to support H_2 without compromising safety.
- Gradual Blending with Natural Gas – Strategy to gradually adapt the existing network, minimizing risks and assessing impacts.

- Planning Transportation Routes – If H_2 is distributed through pipelines, it is necessary to review the route and reinforce safety at critical points.
- Creation of Specific Standards and Regulations – Implementation of technical and legal standards to ensure the safe and efficient use of hydrogen.

2.3 Corrosion protection

Measuring the proportions of hydrogen and its mixtures in pipelines requires specific sensors and devices to ensure accuracy and safety. As previously mentioned, hydrogen can cause embrittlement of metallic materials, making it essential to implement anti-corrosion protection measures in pipelines. Techniques such as high-performance internal coatings, the use of resistant materials such as stainless-steel alloys and polymers, and the application of diffusion barriers can minimize the effects of corrosion. In addition, continuous monitoring and preventive maintenance methods are essential to ensure the safety and durability of H_2 transport infrastructure.

On the topic of corrosion measurement and monitoring, when we thought about modernization plans during the transition to Hydrogen [4], YPP Levi Andrade raised the issue of impurities in Hydrogen and their potential impact. Hydrogen stored in depleted gas reservoirs can be contaminated with water, biological contaminants, H_2S and other impurities present on site. The article [4] cited the corrosion and embrittlement aspects. Considering the impurity aspect, it is technically preferable to use green hydrogen (produced through water electrolysis), as it typically contains fewer contaminants than blue hydrogen (produced via steam methane reforming with carbon capture), thereby reducing the risk of corrosion and material degradation in retrofitted pipelines. However, underground storage, even of green H_2 , can reintroduce impurities.

Regarding the measurement and verification of the “internal linings” of the pipeline, YPP Luiz Eduardo Moraes mentioned the

knowledge gaps regarding internal linings, based on polymers, ceramics, metals and composites [7]. The methodology presented included a comparative analysis of materials regarding hydrogen permeability, mechanical resistance and flow efficiency. There is no standardization and qualification for the topic of internal lining. Therefore, there is a real need to adapt the qualification methods for linings to include specific hydrogen parameters. In addition, the great importance of developing standards is evident. This point can be considered economically unviable because there is a lack of full-scale tests.

According to reference [13] the National Gas Transmission (NGT) presents its responsibility to develop the green energy system for the future, while meeting the. Due to its low ignition energy, wide flammability limits, and high diffusivity, H_2 poses unique risks compared to natural gas. Leak detection becomes more complex, as hydrogen is colorless, odorless, and flames are nearly invisible. Existing odorants used in natural gas may not perform effectively with H_2 , requiring the development of new odorization standards. Regulatory bodies in the EU, UK, and US are updating codes to define acceptable blending ratios, testing protocols, and safety guidelines. Compliance with pressure vessel codes, pipeline integrity management, and occupational safety standards will be crucial before scaling up H_2 injection in national grids.

2.4 Limiting Factors for mixtures with H_2/CH_4

The mixture of methane (CH_4) and hydrogen (H_2) has gained prominence in the energy transition due to its potential to reduce carbon emissions and optimize the use of existing natural gas infrastructure. However, the incorporation of hydrogen into methane presents technical limiting factors of great importance that will be listed below.

2.4.1 Compatibility with Existing Infrastructure

One of the main limiting factors is the compatibility of CH_4 - H_2 mixtures with natural gas transmission pipelines and equipment. Hydrogen has

high diffusivity and can cause embrittlement in some metals, leading to cracks and leaks in carbon steel pipelines. Beyond pipelines, critical components such as valves, compressors, flanges, joints, and flow meters are directly affected by the presence of H_2 , often requiring replacement with resistant alloys (e.g., austenitic stainless steels, nickel-based alloys, or high-performance polymers). Embrittlement is even more severe in welded joints and regions with residual stress. In some cases, the application of internal coatings or diffusion barriers may be necessary to reduce H_2 permeability.

2.4.2 Impact on Combustion Quality

The presence of hydrogen alters the combustion properties of natural gas. Hydrogen has a higher flame speed and lower ignition energy, which can cause combustion instability, increasing the risk of detonation in engines and turbines. Additionally, the H_2 flame is nearly invisible to the naked eye, which increases operational risks in industrial environments. The calorific value per unit volume is lower, requiring modifications to injectors and combustion chambers. Safety systems such as flame sensors and relief valves must be recalibrated to cope with the higher reactivity and the wider flammability range of H_2 . Adaptations may also involve changes in combustion control software and post-combustion technologies to mitigate NOx emissions, which tend to increase at higher temperatures when hydrogen is used.

2.4.3 Mixture Limits and Calorific Value

The calorific value of hydrogen is significantly lower than that of methane, which can impact the energy efficiency of the mixture. The introduction of hydrogen reduces the energy density of the transported gas, requiring a larger volume for the same amount of energy. Studies indicate that mixtures with up to 20% hydrogen can be used in the current infrastructure without major modifications, but higher concentrations may require new technological adaptations.

2.4.4 Challenges in Measurement and Control

Measuring the flow rate and composition of CH_4 - H_2 mixtures requires more sensitive and

accurate equipment, since hydrogen has a lower molecular mass and different flow behavior compared to methane. Ultrasonic flow meters and specific sensors are required to ensure correct readings and avoid operational errors.

For the investigation of In-Line Inspection (ILI) tools, with the aim of achieving better quality of inspection data, in the article [12] the main elements to be considered in the inspection of hydrogen pipelines were presented, and the possible technological options to address problems such as internal and/or external corrosion, hydrogen embrittlement fatigue, geological risk, damage to third parties, material properties and morphology/appearance. The response of the ILI tool was defined and discussed in detail considering the compatibility of the materials of the inspection tool components. In addition to operational safety considerations, options to achieve better quality of inspection data were analyzed and developed.

2.4.5 Safety and Regulatory Standards

Hydrogen has a higher risk of leakage due to its low viscosity and high permeability, in addition to having a wide range of flammability in air. Regulations for CH_4 - H_2 mixtures are still under development in several countries, seeking to ensure safety standards in operation, storage and transportation.

Within this context of regulatory standards, in reference [11], the author presents a Consensus of Engineering Requirements - CERs for hydrogen pipelines with the main objective of updating to ASME B31.12, especially in relation to the technical standards for conversion and operation of hydrogen pipelines and hydrogen blending. The CERs will be processed through ASME for approval, and inclusion in the 2026 version of ASME B31.8. And thus become the international standard for hydrogen transmission and distribution pipelines.

When we refer to the topic of mixing, the author of the reference [6] mentions the mixing of H_2 and NG, by the direct introduction of hydrogen into large diameter and high-pressure gas transmission pipelines [6]. In this article, the author presented a computational analysis,

using Computational Fluid Dynamics (CFD) for a hydrogen mixing target of 4.8–20% volume fraction, a limit supported by the UK government, in the national gas distribution network. The study addresses direct and indirect mixing in the pipeline, and their limitations, but suggests new tests with changing the position of injector nozzles, for CFD simulation.

2.5 Economic aspects for repurposing pipelines

There are several economic aspects related to the use of H_2 in existing pipeline networks designed to transport natural gas. As in reference [2], the Engineer Alexandre Figueiredo presented the economic aspects of using H_2 . At that time, the number of citations of the topic H_2 in the annual reports of oil companies around the world was highlighted, indicating a growing interest and investment in the topic. The company with the most citations was the French company Total Energies.

The main economic aspects related to this mixture are highlighted below:

2.5.1 Infrastructure and Adaptation Costs

The use of H_2 and CH_4 mixtures requires adaptations to existing infrastructure. Although natural gas distribution networks can transport small percentages of hydrogen (typically up to 20%), larger concentrations may require significant modifications to pipelines, compressors. End-user appliances such as burners, boilers, and turbines may also need redesign or replacement to handle higher H_2 concentrations safely. The cost of adaptation depends not only on the hydrogen percentage but also on factors such as material compatibility, geographic extension of networks, and safety compliance requirements. In some regions, retrofitting may be more expensive than building dedicated hydrogen pipelines. The cost of these adaptations depends on the percentage of H_2 mixed and the extent of the infrastructure required.

2.5.2 Production Cost and Competitiveness

The cost of producing hydrogen varies depending on the method used. "Grey" H_2 , produced by steam reforming of methane, is cheaper but

generates CO₂ emissions. “Green” H₂, obtained via electrolysis with renewable electricity, is more expensive but environmentally sustainable. However, as technology advances and renewable energy costs fall, the competitiveness of green hydrogen is likely to increase.

2.5.3 Impact on Natural Gas Prices

The integration of hydrogen into natural gas systems may influence final energy prices. In scenarios where hydrogen production is subsidized or benefits from fiscal incentives, blending could lower consumer costs. However, in most current contexts, the higher cost of hydrogen compared to natural gas leads to an overall increase in blended gas prices when subsidies are absent. Price impacts also depend on regional energy markets: in liberalized markets, costs are often transferred directly to consumers, while in regulated systems, governments may buffer increases through policy instruments. Additionally, price volatility of renewable electricity and carbon credits will affect the competitiveness of hydrogen-enriched gas.

2.5.4 Sustainability and Government Incentives

Governments around the world have created incentives for the adoption of low-carbon fuels, such as subsidies, carbon credits and funding for research and development. Examples include the European Union’s Hydrogen Strategy, the U.S. Inflation Reduction Act with production tax credits, and Japan’s and South Korea’s hydrogen roadmaps. Incentives not only aim to reduce costs but also to de-risk investment, support pilot projects, and create market demand through quotas and mandatory blending targets. The long-term sustainability of these measures depends on consistent policy frameworks and international cooperation. Without stable regulation, investors may hesitate to finance large-scale hydrogen projects.

2.5.5 Potential Emissions Reduction and Benefits for Industry

Adding hydrogen to methane reduces the carbon footprint of the final fuel, allowing industries that rely on natural gas to reduce

their emissions without drastic changes to their processes. Blending hydrogen provides a transitional pathway for hard-to-abate sectors such as steel, cement, and chemicals, where electrification is not yet viable. Industries adopting hydrogen-enriched natural gas may gain access to green financing, preferential trade agreements, and enhanced corporate reputation in ESG (Environmental, Social, and Governance) reporting. Moreover, the reduction in direct CO₂ emissions can help meet international decarbonization commitments (e.g., Paris Agreement) and prevent exposure to carbon border adjustment mechanisms.

3. Conclusion

This research presented clearly delineates the critical technical and operational challenges inherent in the transition to hydrogen (H₂) as a major energy vector, particularly within existing pipeline infrastructure.

Our findings underscore three fundamental hurdles that require immediate and concerted R&D focus:

- **Material Integrity and Compatibility:** The paramount challenge remains the effective management of hydrogen-induced degradation, requiring the development and qualification of materials resistant to H₂ embrittlement under high-pressure pipeline conditions.
- **Operational Assurance:** A comprehensive transition necessitates the creation of novel inspection and maintenance techniques specifically adapted to H₂ service, including enhanced leak detection and integrity management protocols.
- **Regulatory Framework:** The current lack of specific standards, regulations, and certification pathways constitutes a significant non-technical barrier that must be addressed through collaborative industry and government action.

Crucially, the successful and secure deployment of H₂ blending and transport relies on the robust integration of advanced risk

management methodologies coupled with a strategic evaluation of necessary operational and design modifications. These measures are indispensable for ensuring a safe and efficient migration toward this new energy matrix.

The long-term economic viability of H₂ blending is intrinsically linked to two external drivers: the accelerating demand for sustainable energy solutions, often propelled by government incentives and favorable policy, and the evolution and cost reduction of H₂ production technologies. Ultimately, overcoming the identified technical gaps—supported by a proactive regulatory landscape—will determine the timeline and scale of Hydrogen's successful global integration.

References

- [1] - Gallon, N., Andrews, R. M., Huising, O. J. C., & Lam-Thanh, L. (2020). Hydrogen pipelines—design and materials challenges and mitigations. *ERPG Project 221/2020*.
- [2] - Magazines - TN. <https://tnpetroleo.com.br/revistas/is-su/2024-novembro-dezembro/>. Accessed on January 30, 2025
- [3] - Shaw, H., Gallon, N., Kamwela, C., Needham, T., & Conder, B. (2024). *Management of change when repurposing existing infrastructure to hydrogen*. In *Proceedings of the 2024 Pipeline Technology Conference*. EITEP Institute. <https://www.pipeline-conference.com/conferences>
- [4] - Esmaeely, S. N., Sonke, J., Brown, M. J., & Finneran, S. (2024, September). Hydrogen Impurities and Their Potential Impact on Retrofitting Plans When Transitioning to Hydrogen-Natural Gas Blends. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A006). American Society of Mechanical Engineers.
- [5] - Tunes, M. A., Uggowitz, P. J., Dumitraschkewitz, P., Willenshofer, P., Samberger, S., da Silva, F. C., Schön, C. G., Kremmer, T. M., Antrekowitsch, H., Djukic, M. B., & Pogatscher, S. (2024). *Limitations of hydrogen detection after 150 years of research on hydrogen embrittlement*. *Advanced Engineering Materials*, 26(7), 2400776. <https://doi.org/10.1002/adem.202400776>
- [6] - Curson, N., & Chancellor-Weale, T. (2024). *The blending of hydrogen and natural gas by direct introduction of hydrogen into high-pressure large-diameter gas transmission pipelines*. In *Proceedings of the 2024 Pipeline Technology Conference*. EITEP Institute. <https://www.pipeline-conference.com/conferences>
- [7] - Li, Y., Huard, M., Wong, K., Wang, X., & Adane, K. F. (2024, September). Gap Analysis of Coating and Liner for Hydrogen Pipeline. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88568, p. V003T05A025). American Society of Mechanical Engineers.
- [8] - Naib, S., Martinez, O. R., Ribbert, G., Mannucci, G., & Erdelen-Peppler, M. (2024). State of the art of the integrity assessments in Hydrogen pipelines.
- [9] - Rowell, J. (2024). *Risk assessment of hydrogen and natural gas pipelines*. In *Proceedings of the 2024 Pipeline Technology Conference*. EITEP Institute. <https://www.pipeline-conference.com/conferences>
- [10] - Gallon, N., Vages, S., Tewes, M., & van Elteren, R. (2024). *Moving from talking to doing; how to manage integrity during re-purposing and hydrogen future operations*. In *Proceedings of the 2024 Pipeline Technology Conference*. EITEP Institute. <https://www.pipeline-conference.com/conferences>
- [11] - Slater, S., Shie, T., Noecker, F. F., Gallon, N., & Sandana, D. (2024, September). Consensus Engineering Requirements for Hydrogen Pipelines. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A027). American Society of Mechanical Engineers.
- [12] - Van de Camp, P., Fernandez, C., Koops, S., Klein, S., Roovers, P., Lewis, C., & Santamaria, W. (2024, September). Pipeline Operators Forum (POF) White Paper on In-Line Inspection Tool Readiness for Hydrogen Pipelines. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A014). American Society of Mechanical Engineers.
- [13] - Senior, G., Johnstone, S., Haswell, J., & Jones, C. (2024, September). An Operators Experience in Developing a Technical Strategy for Repurposing the UK National Transmission System (NTS) to Transport Hydrogen. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A025). American Society of Mechanical Engineers.
- [14] - McAllister, L., Wright, C., & Bussiere, M. (2024, September). Development of Probabilistic Reliability Models for Pure and Blended Hydrogen Pipelines. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A005). American Society of Mechanical Engineers.
- [15] - Costa, M., Lee, H., Kim, S., Hugo, R., & Park, S. S. (2024, September). In-Situ Concentration Measurement of Blended Hydrogen Gas Using Sensor Fusion Enhanced by Machine Learning Model. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A001). American Society of Mechanical Engineers.
- [16] - Shaw, H., Gallon, N., Kamwela, C., Needham, T., & Conder, B. (2024). *Management of change when repurposing existing infrastructure to hydrogen*. In *Proceedings of the 2024 Pipeline Technology Conference*. EITEP Institute. <https://www.pipeline-conference.com/conferences>
- [17] - Landschoot, D., Gomez, J., Burkinshaw, O., Baby, B., & Shanks, D. (2024, September). Technical Challenges and Strategies for the Repurposing of Existing Gas Distribution Pipeline Networks for Hydrogen Transport. In *International Pipeline Conference* (Vol. 88582, p. V005T09A030). American Society of Mechanical Engineers.

ABRACO PROMOVE CAPACITAÇÃO DE INSPETORES DE PINTURA INDUSTRIAL PARA A BAKER HUGHES

Entre os meses de outubro e novembro, a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) promoveu o treinamento para qualificação de Inspetor de Pintura Industrial Nível 1, em formato *in company*, para a equipe da Baker Hughes, na cidade de Niterói (RJ).

A iniciativa reforça o compromisso da ABRACO em levar conhecimento técnico e capacitação especializada às empresas que atuam na área de proteção anticorrosiva e integridade de ativos.

A ABRACO agradece a confiança e a parceria da Baker Hughes nesta ação de desenvolvimento profissional. Ficamos muito felizes por contribuir com a formação de novos inspetores e desejamos sucesso a todos os participantes nesta nova etapa de suas trajetórias.

Empresas interessadas em capacitar suas equipes, assim como a Baker Hughes, podem entrar em contato com a Coordenação de Cursos da ABRACO pelo e-mail cursos@abraco.org.br.

A ABRACO está sempre de portas abertas para apoiar a formação e atualização técnica de profissionais em todo o país.





ABRACO DESTACA A LIDERANÇA BRASILEIRA NA COMUNIDADE INTERNACIONAL DE CORROSÃO

A Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) tem a honra de compartilhar uma notícia de grande relevância para a comunidade técnico-científica nacional e internacional. A dra. Zehbour Panossian, ex-presidente da ABRACO e participante ativa das ações da Associação, representará o Brasil na oficialização do International Corrosion Council (ICC), que ocorrerá em Praga, na primeira semana de dezembro.

O ICC, fundado na década de 1960 por alguns dos mais renomados pesquisadores da área, é uma das entidades internacionais mais tradicionais dedicadas ao avanço do conhecimento em corrosão. A instituição promove congressos trienais que reúnem especialistas de diversos países. O Brasil já sediou o evento duas vezes, sendo a mais recente organizada pela própria dra. Zehbour, durante o período da pandemia, em formato virtual, com apoio da FAPESP, do CNPq e do CAPES.

A dra. Zehbour Panossian ocupa, atualmente, o cargo de vice-presidente do ICC - é a primeira

mulher neste posto, na história da entidade -, e está prevista para assumir a presidência na próxima gestão, feito que representa um marco importante para o país e para a ABRACO. Sua atuação no Conselho também inclui participação direta na revisão do estatuto da entidade.

A viagem a Praga tem um propósito institucional de grande relevância: a assinatura, em cartório, da oficialização do ICC como organização internacional sem fins lucrativos, o que permitirá ao Conselho operar com maior segurança jurídica e administrativa, especialmente no que diz respeito à movimentação bancária internacional. A assinatura será realizada por três autoridades: o tesoureiro, o ex-presidente e o futuro presidente. Por impossibilidade de presença do atual presidente, a dra. Zehbour foi oficialmente designada para representar o Conselho.

A ABRACO parabeniza a dra. Zehbour Panossian por sua trajetória, dedicação e por este importante passo que reforça o papel do Brasil no ICC. Sua participação na oficialização da entidade é motivo de orgulho para todos nós.

ABRACO E HM RUBBER PROMOVEM PRIMEIRA TURMA DO CURSO DE INSPETOR DE PINTURA INDUSTRIAL NÍVEL 1 NO PARANÁ

Parceria leva capacitação técnica da ABRACO ao estado e reforça o compromisso com a formação de profissionais qualificados em pintura industrial.

Entre os dias 20 e 31 de outubro, a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), em parceria com a HM Rubber, realizou a primeira turma do Curso de Inspetor de Pintura Industrial Nível 1 no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba (PR).

O treinamento, ministrado nas instalações administrativas da HM Rubber, reuniu profissionais e representantes de diversas empresas do setor, consolidando mais um importante passo no processo de interiorização e expansão das atividades de capacitação técnica da ABRACO pelo território nacional.

Com aulas teóricas e práticas, o curso teve como foco a formação e o aperfeiçoamento de

inspetores de pintura, reforçando o compromisso da Associação com a qualificação profissional e a disseminação do conhecimento técnico na área de proteção anticorrosiva.

A ABRACO registra seus agradecimentos à HM Rubber pela parceria e pela disponibilização do espaço, e de forma especial à senhora Alanna Rodrigues e ao senhor Élcio Machado, pelo apoio e acolhimento durante todas as etapas do curso. A Associação também estende seus agradecimentos aos professores Fábio Kränkel e Washington Silva, pela dedicação e excelência na condução das atividades.

Diante do êxito alcançado, a expectativa é de que uma nova turma seja promovida em fevereiro de 2026, reafirmando a parceria entre as instituições.

As inscrições já estão abertas e podem ser realizadas por meio do site oficial da ABRACO.

Na imagem, registro da turma durante as atividades em Pinhais (PR).



ABRACO RECEBE O ICZ E ALUNOS DO CURSO DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE EM SUAS INSTALAÇÕES NO RIO DE JANEIRO

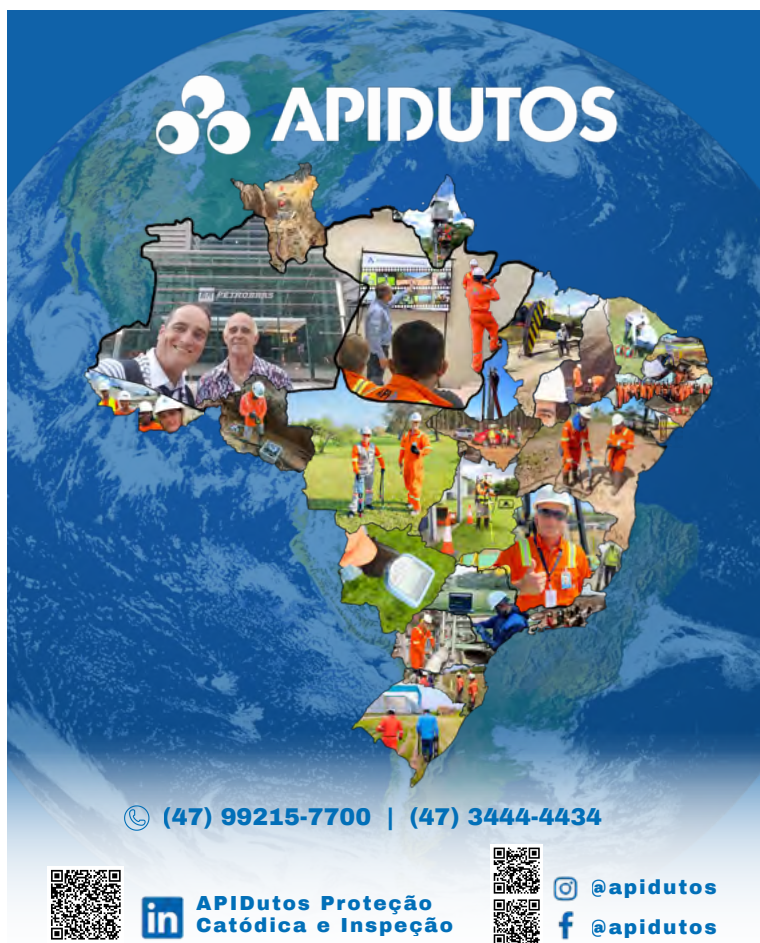
A Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO) recebeu, com grande satisfação, o engenheiro Ricardo Suplicy Goes e os alunos do curso de Galvanização por Imersão a Quente, promovido pelo ICZ - Instituto Cadeia do Zinco, em suas instalações, no Rio de Janeiro (RJ).

A visita marcou a realização da primeira aula prática do curso na capital fluminense, resultado da parceria entre a ABRACO e o ICZ, que

vem fortalecendo a qualificação profissional e o intercâmbio técnico entre as instituições.

A ABRACO manifesta seu agradecimento ao ICZ pela parceria e deseja sucesso aos futuros inspetores de galvanização, reafirmando que está sempre de portas abertas para receber iniciativas que promovam o desenvolvimento e a difusão do conhecimento técnico no setor de proteção anticorrosiva.





APIDUTOS

(47) 99215-7700 | (47) 3444-4434

APIDutos Proteção Catódica e Inspeção

@apidutos

@apidutos



LGE

REVESTIMENTOS

PLATE-GUARD

PROTEÇÃO DE INFRAESTRUTURA ENTERRADA



O SEGURO DE VIDA DO AÇO!

A Galvânica Beretta é sinônimo de excelência no mercado de Galvanização a Fogo. Com moderna planta localizada em Nova Santa Rita, Região Metropolitana de Porto Alegre/RS, possui a maior capacidade produtiva da Região Sul do Brasil, atendendo até 150 t de aço galvanizado por dia! Qualidade e comprometimento a serviço do cliente!



@berettagalvanica
beretta.com.br



MICROCOR - O controle dos dados em suas mãos!

Por conta de sua alta resolução e sensibilidade, esse sistema mostra-se ideal para ajustes no processo, devido à quantidade e confiabilidade de dados gerados contribuindo com as novas tecnologias aplicadas à integridade dos dutos, como por exemplo, na otimização de inibidores de corrosão.

Disponibilizando diferentes tipos de comunicação online para acompanhamento em tempo real, entre eles, rede digital RS485, Wireless Hart 7, Wireless ISA 100 ou até mesmo sistemas off-line com uso de registradores (dataloggers).

Traga sua aplicação e nossa equipe técnica indicará a melhor solução e produtos para atendimento às suas necessidades.



(11) 3017-3131 - www.aselco.com.br - vendas@aselco.com.br



ZINGA®
Asset integrity for eternity.


AMBIENTES EXTREMAMENTE AGRESSIVOS EXIGEM ZINGA®

O produto ideal para reparos de galvanização a fogo!



Galvanização antiga-antes Galvanização antiga-depois (reparada) Peça galvanizada Peça galvanizada com reparo de produção


Para saber mais, entre em contato conosco:
☎ +55 (11) 96587-1029
vendas@zingabr.com
zingabr.com



ZINCO SHG

LIGAS METÁLICAS	ZAMAC	ÓXIDO DE ZINCO
<p>NA OXY, CADA ENTREGA REFLETE COMPROMISSO, QUALIDADE E AGILIDADE. SOMOS REFERÊNCIA NACIONAL NO FORNECIMENTO DE ZINCO SHG DE ALTA PUREZA E LIGAS METÁLICAS, COM CAPACIDADE PARA GRANDES VOLUMES, COM LOGÍSTICA PRÓPRIA E EFICIENTE EM TODO O BRASIL.</p> <p>COM FILIAIS ESTRATEGICAMENTE LOCALIZADAS EM SC, RS, PE, RJ E MG, GARANTIMOS ATENDIMENTO RÁPIDO, DEDICADO E PERSONALIZADO.</p> <p>MAIS QUE UM FORNECEDOR, SOMOS UMA SOLUÇÃO COMPLETA PARA O INÍCIO DA PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DO SEU NEGÓCIO.</p> <p>OXY METAIS, CONFIANÇA QUE PROTEGE O SEU FUTURO.</p>		

FALE CONOSCO www.oxymetals.com.br
contato@grupooxy.com.br
+55 11 97574-7319




Produção própria com elevado padrão de qualidade.

Ligas de ZAMAC 3, 5 e 8, Anodos de Zinco (placa, esfera, 1/2 esfera e gotão) e uma variedade de outros metais não ferrosos.

Matriz SP 11 2500-3190
Filiais MG, PR, RJ, RS e SC
tratho.com.br



Uma empresa cuidada por todos!

bbosch
Infraestrutura para o futuro

A RESISTÊNCIA DO AÇO PODE SER AINDA MAIOR

A galvanização a fogo é mais do que um processo, é a **defesa que garante décadas de durabilidade** às estruturas que sustentam o Brasil.

Na **bbosch**, transformamos a galvanização em uma proteção real, com tecnologia, experiência e compromisso com quem constrói o futuro.

**PROTEGEMOS O AÇO.
FORTALECEMOS O FUTURO.**

bbosch

O grande defensor
das estruturas contra
a corrosão

Contate-nos

11 21527900
contato@bbosch.com.br

bbosch.com.br





PRODUTOS PARA PRÉ-TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE METÁLICA

Desenvolvimento de soluções específicas para atender a necessidade de sua empresa.

Decapantes	Óleo Lubrificantes, Protetivos e Estampagem
Desengraxantes	
Alcalinos e Ácidos	Oxidantes, Neutralizantes e Aditivos
Fosfatizantes	
Fluxantes	Passivadores e Protetivos
Inibidores de Corrosão	Removedor de Tinta

11 4290-0720
11 94188-9672
comercial@oxiprana.com.br
Matriz: Jaboatão dos Guararapes | PE
Filial: Itupeva | SP

OxiPrana
Química

Soluções que nos conectam com a vida



SAE TOWERS DO PROJETO À EXECUÇÃO,
MUITO MAIS QUE **ENERGIA**,
TRANSMITINDO VIDA.



Com 70 anos de história, a SAE Towers é referência global em engenharia, fabricação de torres treliçadas e ferragens para transmissão de energia.

Com um sistema automatizado de galvanização por imersão a quente, garantimos durabilidade, proteção anticorrosiva e alta performance em cada componente produzido.

R. Moacyr Gonçalves Costa, nº 15
Jardim Piemont Sul - Betim / MG
32669-722 - Tel.: (31) 3399-2700



Escaneie o QR Code e conheça mais sobre a SAE Towers.

RPG **KEC** **SAE TOWERS**

Protection upgraded

Sur
Tec

TECNOLOGIAS DE PONTA EM GALVANIZAÇÃO A FOGO



A SurTec oferece soluções completas e tecnologias inovadoras e sustentáveis para Galvanização a Fogo.

Acesse nosso site



SurTec do Brasil

FREUDENBERG
INNOVATING TOGETHER



- Cubas para galvanização a fogo
- Pás para remoção de borra
- Bombas de zinco de alta performance
- Inspeção da cuba por ultrassom sem remoção do zinco

- Desengraxantes ácidos
- Inibidores para decapagem
- Fluxos: sais duplos comuns e aditivados
- Ligas especiais de zinco
- Assistência técnica
- Treinamentos em planta



✉ info.br@kdfeddersen.global 🌐 www.kdfeddersen.global/pt ☎ +55 (11) 5542-4921 📞 +55 (11) 98136-3409

Somos uma das maiores produtoras de zinco do mundo

Nosso propósito é integrar a mineração a um mundo em constante mudança como uma oportunidade para o desenvolvimento sustentável.

Somos uma empresa global e de capital aberto atuando nos segmentos de mineração e metalurgia, mas com **DNA Votorantim**, pautado pela **ética, transparência e compromisso com a sustentabilidade**, fortalecendo **relações de confiança e duradouras**.

Estamos ao lado da indústria de galvanização, fornecendo zinco de alta pureza, com **qualidade e confiabilidade** em cada entrega.

Seja no campo, na cidade ou em movimento, os metais que produzimos estão presentes no dia a dia de todos.

Mineração que muda com o mundo.

nexa



Raitz, há 35 anos fortalecendo a galvanização.

Com quatro plantas distribuídas em três estados - Santa Catarina, Paraná e Rio de Janeiro - com a maior capacidade produtiva do país, a Raitz é referência nacional em galvanização por imersão a quente.

Uma operação focada em qualidade e eficiência, movida por pessoas que acreditam na força da galvanização.



+ 700 MIL

Toneladas galvanizadas - a maior capacidade produtiva do Brasil.

4 plantas

industriais ativas, em 3 estados brasileiros.

7 linhas

de galvanização em operação.

+500

Colaboradores comprometidos.

Áreas de especialidade

- ✓ Agro
- ✓ Naval
- ✓ Estrutura Metálica Pesada
- ✓ Serralheria
- ✓ Iluminação e Sinalização Rodoviária
- ✓ Solar
- ✓ Tubos



Acesse nossos canais e contatos oficiais!

Estrada da Ilha, 315 - 89239-250
Pirabeiraba - Joinville / SC

Rua Paulo Capitania, 465 - 27540-172
Fazenda da Barra - Resende / RJ

Pedro Gusso, 2486 - 81310-300
Cidade Industrial - Curitiba / PR

R. Francisco Alves de Lima, 52 -
Barracão 02 Costeira, São José dos Pinhais / PR

Raitz
GALVANIZAÇÃO



STEELGUARD

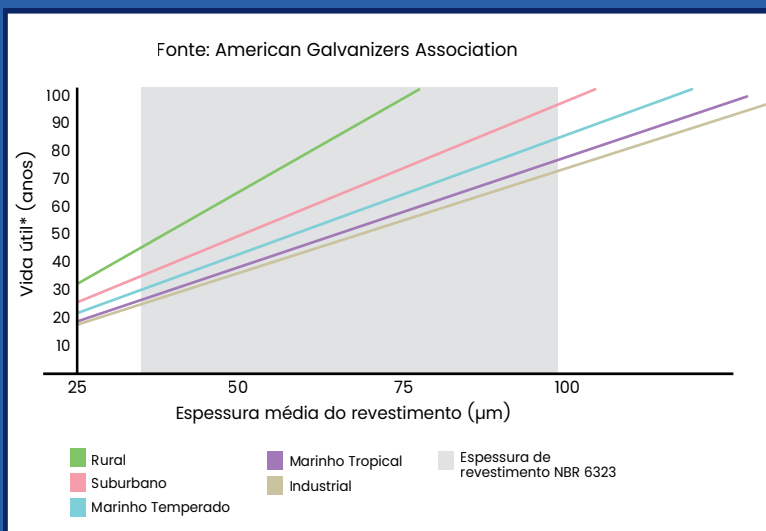
GALVANIZAÇÃO

BEM-VINDO À STEELGUARD!

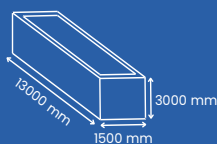
Durabilidade que preserva o futuro!

A SteelGuard é referência nacional em galvanização por imersão a quente, destacando-se pela responsabilidade, excelência, transparência e compromisso em todas as relações.

Com a galvanização, você investe em uma proteção eficaz e com menor necessidade de manutenção, economizando durante todo o ciclo de vida.



UNIDADE ARAQUARI - SC

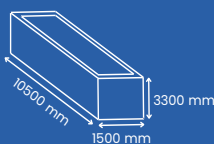


Dimensões Totais
13000mm x 1500mm x 3000mm

Dimensões Úteis
12800mm x 1400mm x 2800mm

Dupla Imersão:
Horizontal: até 1600mm de comprimento.
Vertical: até 5600mm de altura

UNIDADE CHAPECÓ - SC (1ºT 2027)



Dimensões Totais
10500mm x 1500mm x 3300mm

Dimensões Úteis
10300mm x 1400mm x 3100mm

(47) 99222-8949 (47) 3452-0020

www.steelguard.ind.br

vendas@steelguard.ind.br

[@steelguard.ind.br](https://www.instagram.com/steelguard.ind.br)





Ztec^{zn}
GALVANIZER

27 anos de excelência em galvanização a fogo

Com tecnologia de ponta, processos sustentáveis e uma equipe altamente qualificada, a **Ztec Galvanizer** é referência em soluções completas de proteção anticorrosiva.

Nossa atuação é guiada pela qualidade, segurança e pontualidade, garantindo resultados superiores para o setor metalúrgico e contribuindo para um futuro mais durável e eficiente.

A **Ztec** é sinônimo de *confiança e inovação*, entregando desempenho e proteção que atravessam décadas.

(11) 2632-5252 | (11) 2632-5232 | (11) 94171-5232



ztecmetais.com.br

Rua **Benedita Dornellas Claro**, 500
Vila Maria - São Paulo/SP





MISSÃO, VISÃO E VALORES

MISSÃO: Promover a qualificação técnica, o desenvolvimento tecnológico e o conhecimento em corrosão e proteção anticorrosiva, com atuação em treinamentos, certificações, eventos, elaboração de normas e recomendações técnicas, por meio da integração entre especialistas, empresas, entidades e universidades, contribuindo para que a sociedade possa garantir a integridade de ativos, proteger as pessoas e o meio ambiente dos efeitos da corrosão.

VISÃO: Manter a liderança nacional e ampliar sua projeção internacional como referência na difusão do conhecimento e na promoção da integridade de ativos, reunindo especialistas, empresas e instituições dedicadas à corrosão e à proteção anticorrosiva.

VALORES

Excelência Técnica e Científica: compromisso com a qualidade e rigor no desenvolvimento e disseminação do conhecimento em corrosão e proteção anticorrosiva;

Ética e Transparência: atuação íntegra e transparente em todas as relações e processos, promovendo a confiança entre associados, parceiros e sociedade;

Inovação e Sustentabilidade: busca contínua por soluções inovadoras que contribuam para a sustentabilidade e integridade dos ativos, protegendo o meio ambiente e a sociedade;

Colaboração e Pluralidade: valorização da diversidade de ideias e experiências, promovendo a união e o intercâmbio entre profissionais, empresas e instituições do setor;

Comprometimento com o Desenvolvimento Nacional: dedicação ao fortalecimento da indústria nacional por meio da capacitação, certificação e promoção de boas práticas em corrosão e proteção anticorrosiva.

ATIVIDADES

Cursos: Ministra cursos em sua própria sede, que conta com modernas instalações. Também são realizados cursos em parceria com importantes instituições nacionais de áreas afins e cursos In Company, sempre com instrutores altamente qualificados.

Eventos: Organiza periodicamente diversos eventos como: congressos, seminários, palestras, workshops e fóruns, com o objetivo de promover o intercâmbio de conhecimento e informação, além de compartilhar os principais avanços tecnológicos do setor.

Qualificação e Certificação: Mantém um programa de qualificação e certificação de profissionais da área de corrosão e técnicas anticorrosivas, por meio do seu Conselho de Certificação e do Bureau de Certificação.

CB-43: Coordena o CB-43 – Comitê Brasileiro de Corrosão, que abrange a corrosão de metais e suas ligas no que concerne à terminologia, requisitos, avaliação, classificação, métodos de ensaio e generalidade. O trabalho é desenvolvido desde 2000, após aprovação da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Comunicação: Utiliza canais de comunicação para informar ao mercado e à comunidade técnico-empresarial todas as novidades da área, conquistas da Associação, dos filiados e de parceiros, por meio de boletins eletrônicos, site, redes sociais e revista.

ASSOCIE-SE À ABRACO E APROVEITE SEUS BENEFÍCIOS:

Descontos em cursos e eventos técnicos

Descontos significativos nas aquisições de publicações na área de corrosão e proteção anticorrosiva

Descontos em anúncios na Revista Corrosão & Proteção

Recebimento de exemplares da Revista Corrosão & Proteção

Inserção do perfil da empresa no site institucional da ABRACO

E MUITO MAIS! PARTICIPE DO DESENVOLVIMENTO DA ÁREA!



Vinicius Salazar: experiência, formação e dedicação à pintura industrial

A trajetória de Vinicius Salazar com a pintura soma mais de duas décadas de dedicação e aprendizado. Aos 43 anos de idade, é inspetor de pintura nível II certificado pela ABRACO/SNQC, além de deter certificações como Inspetor Nível II I-Corr e Inspetor CIP-1 NACE.

Formado em Tecnologia Mecânica pela UniA – Universidade de Santo André, Vinicius também possui MBA em Gestão de Negócios e em Gestão da Produção. Essa base acadêmica, somada à experiência prática, o consolidou como referência no setor.

Sua carreira começou na pintura automotiva, onde atuou por 11 anos em grandes montadoras, como Randon Implementos, Fiat, Volkswagen e MAN Caminhões. Essa experiência lhe proporcionou conhecimento no ramo de pintura eletrostática e pintura a pó. Nos últimos 10 anos, direcionou sua atuação para a pintura industrial em grandes empreendimentos, incluindo obras de relevância nacional, como a Usina Hidrelétrica de Belo Monte, plataformas da Petrobras e projetos de mineração junto ao cliente Vale.

Desde 2015 como inspetor de pintura, Vinicius tem se dedicado não apenas ao campo, mas também à formação de novos profissionais. Há

quatro anos ministra treinamentos teóricos e práticos, sempre com o propósito de elevar o nível de qualificação no setor. Para 2026, ele planeja a implantação de um centro de treinamento voltado à capacitação de pintores industriais, com foco inicial na região de São Luís do Maranhão e no Nordeste, onde o setor ainda carece de profissionais qualificados. A iniciativa busca contribuir diretamente para o fortalecimento da mão de obra local, valorizando talentos e abrindo novas oportunidades em um mercado em constante crescimento.

Atento à importância de estar sempre atualizado, participa de cursos, treinamentos e eventos promovidos pela ABRACO, mantendo-se alinhado às normas, práticas e condutas que regem a profissão.

Nas redes sociais, Vinicius também se destaca por compartilhar experiências e fortalecer a categoria. No LinkedIn, soma 8.740 conexões, enquanto no Instagram, no perfil **@vini-cius_salazar_pintura**, já reúne mais de 2 mil seguidores acompanhando seu trabalho e sua vivência profissional.

Contato: visao.pintura@gmail.com | (12) 98143-1916



Que cada encontro seja repleto de amor.

Que cada abraço seja o mais
caloroso de sua vida.

Que cada celebração seja pela paz e
pelo bem de todos.

Que a vida seja plena e vibrante!

*Boas Festas e
Feliz 2026!*

SÃO OS VOTOS DA ABRACO

Estaremos em recesso de 22/12/2025 a 02/01/2026.
Retornaremos às atividades em 05/01/2026.



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

APERAM SOUTH AMERICA
www.aperam.com/pt-br/

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

PPL MANUTENCAO E SERVIÇOS LTDA.
www.pplmanutencao.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

(21) 2516-1962 • 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