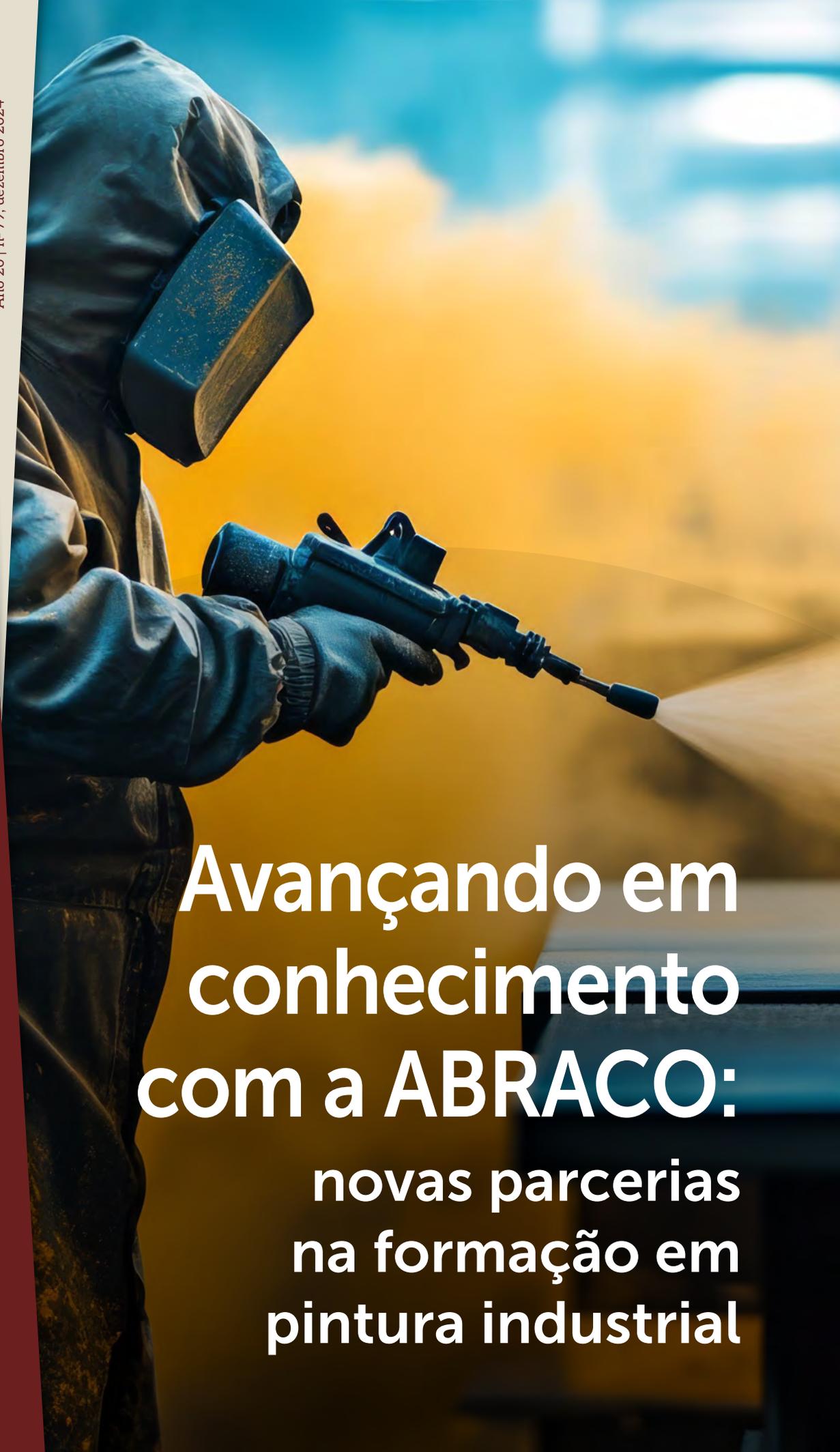


Corrosão & Proteção

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

Ano 20 | nº 79, dezembro 2024



**Avançando em
conhecimento
com a ABRACO:
novas parcerias
na formação em
pintura industrial**

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 2023/2025

Presidente

Neusvaldo Lira de Almeida

Vice-presidente

Luiz Paulo Gomes

Diretores

Carlos Aparecido da Silva

Adauto Riva

Roberto Bamenga Guida

Francisco Muller Filho

Roberto Newton Perantunes

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.

Nesta edição

- 03** Editorial
- 04** ENTREVISTA
Luiz Paulo Gomes
- 06** ARTIGO CIENTÍFICO
Avaliação da eficiência do extrato de chá branco como inibidor de corrosão natural para o aço carbono
Beatriz M. Andrade, Theo L. S. Rocha, Fernando C. L. Oliveira, Alessandra R. D. Monteiro, Felipe P. de Moura
- 13** ARTIGO CIENTÍFICO
Danificação de metais e ligas metálicas por hidrogênio – trabalho de revisão (Partes I e II)
Zehbour Panossian
- 38** ARTIGO CIENTÍFICO
Revisão de potenciais substitutos sustentáveis para revestimentos de aço eletro galvanizado: avanços e desafios
Sandra Jesus Barradas Travassos, Gustavo Aristides Santana Martinez, Célia Regina Tomachuk
- 56** ARTIGO TÉCNICO
Combate à corrosão e gestão de integridade de ativos através do monitoramento on-line e em tempo real das variáveis de processo
Leandro Valente Costa
- 60** ARTIGO TÉCNICO
Esquemas de pintura para superfícies de aço galvanizado novo e envelhecido de equipamentos e estruturas metálicas
Fábio Kränkel
- 64** 10º SBPA - Seminário Brasileiro de Pintura Anticorrosiva
- 70** VI Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamento
- 74** 7ª edição do Workshop de Galvanização
- 80** Empresas associadas

Novas parcerias

É com grande satisfação que dou as boas-vindas a mais uma edição da nossa revista, cujo tema é “Avançando em conhecimento com a ABRACO: como as novas parcerias estão elevando o nível da formação em pintura industrial”. Esta edição reflete um momento de significativa evolução para a nossa instituição e para o setor como um todo.

Na ABRACO, estamos continuamente empenhados em aprimorar e expandir as oportunidades de treinamento e certificação para os profissionais da área de corrosão e proteção. É com orgulho que destacamos nossas novas parcerias com a CETAL e a KRATOS, que têm sido fundamentais para o desenvolvimento de programas de formação de alta qualidade.

A CETAL, localizada em Macaé, está oferecendo cursos de Inspetor de Pintura Industrial Níveis 1 e 2, além de um curso para Encarregado de Pintura. Esses treinamentos são projetados para fornecer conhecimentos avançados e práticas essenciais para garantir a excelência no campo da pintura industrial.

Por outro lado, a KRATOS, com sede em São Paulo, amplia ainda mais as opções de formação ao oferecer cursos adicionais, incluindo o de Pintor Industrial, além dos já mencionados cursos de Inspetor de Pintura Industrial Níveis 1 e 2 e Encarregado de Pintura. Esta diversidade de cursos permite aos profissionais uma gama completa de qualificações para atender às demandas do mercado.

Este editorial é um convite para que você, leitor, explore e aproveite as oportunidades que essas parcerias proporcionam. Acreditamos que, ao investir na formação contínua e especializada, estamos não apenas elevando o nível de competência técnica em nosso setor, mas também contribuindo para a inovação e a excelência na proteção contra a corrosão.

Estamos entusiasmados com as perspectivas que essas novas colaborações trazem e confiantes de que, juntos, continuaremos a promover avanços significativos na formação profissional e no desenvolvimento de melhores práticas na indústria.

Agradeço a todos pelo apoio contínuo e espero que desfrutem desta edição tanto quanto nós desfrutamos em prepará-la para vocês.

Boa leitura!

Neusvaldo Lira de Almeida

Presidente da ABRACO



"A ABRACO trabalha para continuar contribuindo decisivamente para o desenvolvimento do Brasil"

Nesta edição, a Revista Corrosão e Proteção traz uma entrevista com Luiz Paulo Gomes, diretor da IEC, que assumirá a presidência da nossa Associação do biênio 2025/2027.

Na sua visão, como a área de corrosão se insere no desenvolvimento atual do Brasil e qual a importância da ABRACO neste cenário?

O conhecimento dos processos de corrosão e dos métodos de proteção é de fundamental importância para o projeto, a construção e a manutenção da integridade dos ativos de aço de um modo geral. Isso inclui: instalações aéreas (fábricas, usinas e plantas industriais); dutos enterrados (oleodutos, gasodutos, minerodutos, alcooldutos, adutoras e emissários); instalações submarinas (dutos, píeres de atracação de navios, plataformas de petróleo, navios e embarcações); e armaduras/ferragens de reforço de estruturas de concreto (edificações de um modo geral, em especial próximas ao mar). Essas construções são muito importantes para o desenvolvimento do país e tendem a crescer bastante na próxima década.

Isso posto, fica fácil perceber a grande relevância do trabalho da ABRACO na permanente divulgação, formação e capacitação

de técnicos e engenheiros especializados no controle da corrosão.

Nossa Associação sempre esteve atenta a essa demanda. Da mesma forma, sempre esteve à frente de todo esse processo de formação e qualificação de profissionais competentes para exercer atividades de prevenção e controle da corrosão, tão imprescindíveis para o bom andamento de indústrias, por exemplo, um forte setor da economia do país. E a ABRACO trabalha para continuar contribuindo decisivamente para o desenvolvimento do Brasil.

Considerando que a área de corrosão é multidisciplinar, de que forma a ABRACO poderá avançar nas diversas subáreas (revestimentos, pintura anticorrosiva, proteção catódica, materiais, entre outras), a partir da sua gestão?

Pretendemos aumentar consideravelmente a oferta de cursos e treinamentos especializados em todas as áreas de corrosão e proteção, em todas as regiões do Brasil. O principal



objetivo da ABRACO será o auxílio a estudantes com menor poder aquisitivo, de modo que eles possam ingressar no mercado de trabalho. Para tal, nossa intenção é promover essas capacitações a baixo custo ou, até mesmo, oferecê-las gratuitamente. Isso será possível com o patrocínio das empresas mantenedoras da ABRACO e de outras organizações que queiram se juntar a nós nessa empreitada.

Como será a atuação da ABRACO nos segmentos de eventos, normalização técnica, qualificação e certificação?

Nossa gestão pretende prosseguir com o excelente trabalho desenvolvido pela atual diretoria nesses últimos anos. Queremos também dar continuidade e todo o apoio necessário

para que os eventos, de um modo geral, e, em especial, as atividades de normalização, qualificação e certificação sejam realizados com excelência. Afinal, são ações muito importantes para o público da ABRACO e, conseqüentemente, para a preservação do ótimo conceito da Associação no setor em que atua.

Qual a sua visão sobre as parcerias, tanto para execução de projetos quanto para defesa dos interesses da ABRACO?

Temos hoje algumas parcerias importantes, de grande valor para a Associação, que corroboram nossa excelente performance no desenvolvimento das atividades de treinamento, normalização e qualificação. Contudo, pretendemos expandir conscientemente essa imprescindível contribuição.

A participação de empresas e instituições do setor, representadas por especialistas de alto nível, viabiliza, incontestavelmente, a realização de nossos projetos.

É justamente por esta razão que precisamos ampliar essas parcerias, pois queremos avançar em nossas metas e contribuir para o crescimento e o fortalecimento da qualidade profissional do setor de corrosão e proteção anticorrosiva, que é a missão da ABRACO.

O senhor gostaria de acrescentar algo sobre os planos para a sua gestão como presidente da ABRACO?

Sim, claro. Temos alguns planos em mente, sempre com o objetivo de fortalecer nossa Associação. Em conformidade com tudo o que fazemos, queremos torná-la ainda mais importante para a nossa comunidade técnica e científica.

Para isso, esperamos continuar contando com a atuação de todos os nossos funcionários e colaboradores. É uma equipe excelente, que sempre apoiou a ABRACO ao longo de todo esse tempo. Todos são importantes, cada um na sua função, e queremos proporcionar também a eles a oportunidade de serem treinados em suas atividades.

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO EXTRATO DE CHÁ BRANCO COMO INIBIDOR DE CORROSÃO NATURAL PARA O AÇO CARBONO

Beatriz M. Andrade^b, Theo L. S. Rocha^e, Fernando C. L. Oliveira^d, Alessandra R. D. Monteiro^a, Felipe P. de Moura^c

^b Engenheira Química - Universidade Federal Fluminense (UFF/RJ)

^c Engenheiro Químico - Universidade Federal Fluminense (UFF/RJ)

^d Mestre - Universidade Federal Fluminense (UFF/RJ)

^a PHD, Engenheira Química - Universidade Federal Fluminense (UFF/RJ)

^e Mestre - Pontifícia Universidade Católica (PUC/RJ)

1. Introdução

A corrosão atinge diversos setores da indústria e, por essa razão, é um assunto relevante e não pode ser menosprezado, uma vez que a deterioração dos materiais oferece grande risco ambiental, econômico e à segurança à vida humana^{1,2}. Um dos métodos de proteção anticorrosiva é o uso de inibidores de corrosão, substâncias que previnem ou reduzem a corrosão de um material. Este trabalho apresenta a avaliação do desempenho do extrato de chá branco (CB) como potencial inibidor de corrosão para o aço-carbono AISI 1020.

O aço carbono é uma liga metálica composta, majoritariamente, por ferro e carbono³. Esse tipo de aço é muito utilizado por ter um baixo

custo e alta disponibilidade, porém possui baixa resistência à corrosão em diversos meios⁴. Uma das formas mais comuns de ocorrer a corrosão é a partir de metais imersos em soluções aquosas, com incidência estimada de 90 % dos casos de corrosão eletroquímica⁵. Dentre as diversas formas de se prevenir corrosão, foca-se neste trabalho a ação dos inibidores de corrosão. Um inibidor de corrosão é uma substância que, efetivamente, reduz, ou até mesmo previne, a corrosão de um metal exposto a um meio agressivo⁶.

Em seu trabalho, Souza (2018) estudou a eficiência de corrosão do extrato de camomila em relação a um inibidor padrão de mercado, o molibdato de sódio,

Este trabalho apresenta a avaliação do desempenho do extrato de chá branco como potencial inibidor de corrosão para o aço-carbono AISI 1020 em soluções aquosas. Existem cada vez mais estudos sobre inibidores de corrosão verdes, por não serem tóxicos e nocivos ao meio ambiente, além de serem uma opção mais barata e de fácil obtenção e descarte. O chá branco é proveniente da planta *Camellia Sinensis* e contém em sua composição substâncias orgânicas como polissacarídeos, alcalóides e polifenóis (catequinas e flavonoides), que contribuem para a quimissorção das moléculas na superfície metálica, inibindo a corrosão. Para a análise do desempenho do inibidor escolhido, foram feitos ensaios de perda de massa e calculadas as eficiências de inibição para diversas concentrações do chá em três concentrações de ácido clorídrico, (0,1, 0,2 e 0,3) mol.L⁻¹. O chá branco foi preparado através da infusão a quente dos sachês de chá em água destilada por 60 minutos. A eficiência de inibição máxima obtida foi de 71,7 % para o inibidor na concentração de 5 g.L⁻¹ em ácido clorídrico 0,3 mol.L⁻¹ e a eficiência mínima foi de 10,3 % para o inibidor na concentração de 7 g.L⁻¹ em ácido clorídrico 0,1 mol.L⁻¹. Os resultados obtidos experimentalmente indicam um desempenho satisfatório do inibidor avaliado para a faixa de (0,5-1,4) g.L⁻¹ na solução de ácido clorídrico 0,1 mol.L⁻¹; (1,1 - 1,4) g.L⁻¹ na solução de ácido clorídrico 0,2 mol.L⁻¹ e (1,1-5,0) g.L⁻¹ na solução de ácido clorídrico 0,3 mol.L⁻¹, o que destaca o potencial de utilização de chá branco como inibidor de corrosão verde nessas condições.

Palavras-chaves: Inibidor de corrosão, chá branco, aço-carbono, eficiência de inibição, perda de massa.

Evaluation of the efficiency of white tea extract as a natural corrosion inhibitor for carbon steel

This work presents an evaluation of the performance of white tea extract, as a potential corrosion inhibitor for the carbon steel AISI 1020 in aqueous solutions. There increasing studies about green corrosion inhibitors, as they are considered non-toxic to the environment and they are a cheaper option that is easy to obtain. The white tea comes from the *Camellia Sinensis* plant and there are organic substances, such as polysaccharides, alkaloids and polyphenols (catechins and flavonoids), in its composition. These substances contribute to the process of chemisorption of the molecules on metallic surface, inhibiting corrosion. For the performance analysis of the chosen inhibitor, mass-loss tests were performed and the inhibition efficiencies were calculated for different tea concentrations in three concentrations of hydrochloric acid, (0.1, 0.2 and 0.3) mol.L⁻¹. White tea was prepared by infusing tea bags in boiling distilled water for 60 minutes. The obtained maximum inhibition efficiency was 71.7 % at a concentration of 5 g.L⁻¹ in 0.3 mol.L⁻¹ hydrochloric acid and the minimum efficiency was 10.3 % at a concentration of 7 g.L⁻¹ in 0.1 mol.L⁻¹ of hydrochloric acid. The results obtained experimentally imply that the inhibitor has a satisfactory performance in the range (0.5 - 1.4 g.L⁻¹) in the 0.1 mol.L⁻¹ hydrochloric acid solution, (1.1-1.4 g.L⁻¹) in the 0.2 mol.L⁻¹ hydrochloric acid solution and (1.1-5.0) g.L⁻¹ in the 0.3 mol.L⁻¹ hydrochloric acid solution, showing potential for the use of white tea as an inhibitor in these conditions.

Keywords: Corrosion inhibitor, white tea, carbon steel, inhibition efficiency, mass loss.

concluindo que o inibidor verde demonstrou boas propriedades anticorrosivas. Foi recomendado o ensaio de outros inibidores de corrosão verdes, com maior disponibilidade e facilidade de produção e obtenção. Dessa forma, neste trabalho, foi estudado o efeito inibidor do chá branco (CB), proveniente da planta *Camellia Sinensis*, que contém em sua composição substâncias orgânicas como polissacarídeos, alcalóides e polifenóis, que contribuem para a quimissorção das moléculas na superfície metálica⁷ e que favorecem a adsorção dos extratos sobre a superfície metálica, formando um filme protetor que evita a corrosão^{8,9}. Existem poucos estudos na literatura que se aprofundam nas propriedades anticorrosivas do chá branco,

porém, a partir dos dados existentes, pode ser observado um grande potencial no chá branco para obtenção de bons resultados em ensaios de inibição de corrosão^{10,11}.

2. Materiais e métodos

A avaliação do extrato de chá branco como potencial inibidor de corrosão para o aço-carbono AISI 1020 na presença de HCl foi realizada mediante sua eficiência de inibição, com a realização de ensaios de perda de massa (PM). O preparo do chá e das soluções de imersão e os ensaios de PM foram realizados em temperatura ambiente de 24 °C. Parei aqui

O chá branco foi preparado por infusão do sachê contendo 10 g em 1 L de água destilada, que foi medida em uma proveta e transferida

para a chaleira, onde foi aquecida. Após a fervura da água, o sachê de chá foi adicionado, ficando em contato com a água quente por 60 min. Em seguida, o chá foi armazenado em um recipiente de vidro e guardado na geladeira até o momento de uso. Para os corpos de prova, uma barra cilíndrica de aço carbono AISI 1020 foi cortada em pequenos cilindros nas dimensões de 2,8 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, com furos no centro. Os pequenos cilindros foram lixados em toda sua superfície com três lixas de diferentes granulometrias, para remoção de qualquer sinal de oxidação e possíveis irregularidades que pudessem gerar diferença de potencial entre diferentes pontos da superfície, deixando-a lisa. Na sequência, foram bem lavados com água destilada e deixados em um papel toalha para secar à temperatura ambiente. Quando estavam completamente secos, foi passada uma camada de esmalte cobrindo toda a superfície lateral e interna dos furos no centro para evitar a corrosão nessas áreas, direcionando a corrosão para as bases e, com isso, mantendo a área projetada praticamente constante. Por último, foram todos pesados em triplicata para que a média das massas fosse utilizada como base no cálculo das perdas de massa (PM). As Figuras 1.a e 1.b mostram o corpo de prova antes e após o tratamento, respectivamente.

A partir da Equação 1, que mostra a relação de diluição entre soluções, foram calculados os volumes de reagentes necessários para as diluições das soluções de ácido clorídrico e chá branco, feitas simultaneamente.

$$V_{Concentrado} = \frac{V_{Desejado} * C_{Desejada}}{C_{Concentrado}}, \text{Equação (1)}$$

onde $V_{concentrado}$ e $C_{concentrado}$ são, respectivamente, o volume da “solução mãe” necessário para a diluição e a concentração da “solução mãe”, $V_{desejado}$ é o volume desejado para se obter a concentração $C_{desejada}$, que será menor que a concentração inicial. A “solução mãe” de ácido clorídrico tinha concentração de 1 mol.L⁻¹, a de chá branco 10 g.L⁻¹ e o líquido utilizado nas diluições foi água destilada.

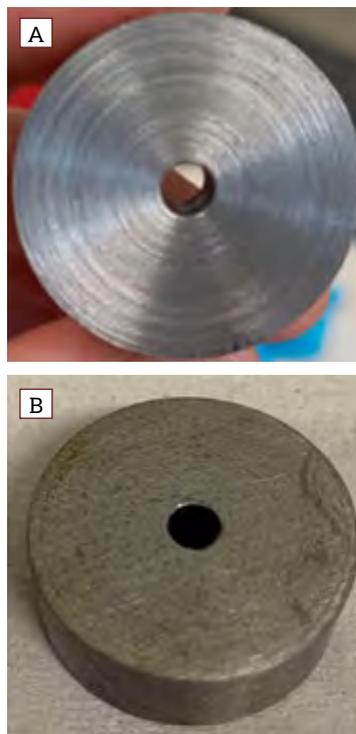


Figura 1 - 1.a: Corpo de prova sem tratamento; 1.b: Corpo de prova após o preparo

O $V_{desejado}$ foi escolhido de forma que o CP ficasse completamente imerso sem contato com a base do béquer. Esse volume foi de 200 mL, determinado visualmente pelos autores. As concentrações de HCl, $C_{desejadas}$, foram escolhidas com base em Souza (2018), que utilizou 0,1 mol.L⁻¹, 0,2 mol.L⁻¹, e 0,3 mol.L⁻¹, em seu trabalho; enquanto as concentrações de chá branco utilizadas para os ensaios iniciais foram escolhidas de acordo com Teixeira *et al.* (2015) e, para os ensaios secundários, de acordo com Souza (2018).

As concentrações de chá branco entre 0,2 g.L⁻¹ e 1,4 g.L⁻¹ serviram de ensaios preliminares para a determinação das concentrações críticas de inibidores, seguidas pelos ensaios definitivos nas concentrações 3,0 g.L⁻¹, 5,0 g.L⁻¹ e 7,0 g.L⁻¹. Os ensaios nas diversas concentrações do inibidor foram necessários para a obtenção da melhor eficiência de inibição (EI) possível.

Para a montagem do arranjo experimental, os corpos de prova foram completamente imersos por 24 horas em solução dentro de béqueres, em temperatura ambiente, e posicionados no centro de placas de agitação, de forma a manter o meio homogêneo. Após o término



Figura 2 - Arranjo experimental para ensaios da perda de massa

do tempo de imersão, os corpos de provas foram retirados, lavados com água destilada e secos à temperatura ambiente. Por fim, após a secagem, uma nova pesagem foi feita, também em triplicata. O pH das soluções também foi medido antes da imersão e após a retirada dos cilindros. A estrutura montada está ilustrada na Figura 2.

3. Resultados e discussão

Para cada concentração de HCl foram realizados os ensaios preliminares e definitivos para avaliação da eficiência de inibição do chá branco em diferentes teores, determinando assim, a concentração de chá necessária para

seu melhor desempenho como inibidor nos diferentes meios ácidos. Os cálculos de eficiência de inibição foram feitos conforme a Equação 2.

$$EI(\%) = \frac{PM_0 - PM}{PM_0} * 100\% \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

EI - eficiência de inibição

PM₀ e PM - perda de massa na ausência e na presença do inibidor

Como não foi realizada a decapagem ácida nos cilindros após os ensaios, a taxa de corrosão não pode ser calculada conforme sugerido pela norma ASTM G1.

3.1 Ensaios em branco Os ensaios em branco, na ausência de inibidor, foram realizados em triplicata e os resultados estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados da perda de massa na ausência de inibidor

Ensaio	C _{HCl} (mol.L ⁻¹)	PM (g)	PM média (g)
Branco 1	0,1	0,4802	0,4756
Branco 2	0,1	0,4711	
Branco 3	0,2	1,0493	0,9958
Branco 4	0,2	0,9424	
Branco 5	0,3	1,7155	1,7061
Branco 6	0,3	1,6967	



Figura 3 - Formação do gás H₂ na superfície metálica

Analisando a Tabela 1, fica claro o comportamento da perda de massa com a variação de concentração de ácido clorídrico, em que quanto maior o teor de HCl da solução de imersão dentro da faixa analisada no experimento, maior foi a perda de massa obtida, ou seja, maior a corrosão.

Durante a realização dos ensaios, foi possível observar visualmente a formação de bolhas de gás na superfície metálica (Figura 3), o que indica a ocorrência da reação de redução do íon H^+ , formando H_2 (g). Esta conclusão foi confirmada por meio da medição do pH após a realização dos ensaios, que mostrou aumento do mesmo e comprovou o consumo de H^+ . A Tabela 2 mostra os pHs antes e após a realização dos ensaios.

Tabela 2 - Valores medidos de pH antes e após os ensaios

Ensaio	C_{HCl} (mol/L)	pH inicial	pH final
Branco 1	0,1	1,35	1,75
Branco 2	0,1	1,33	1,70

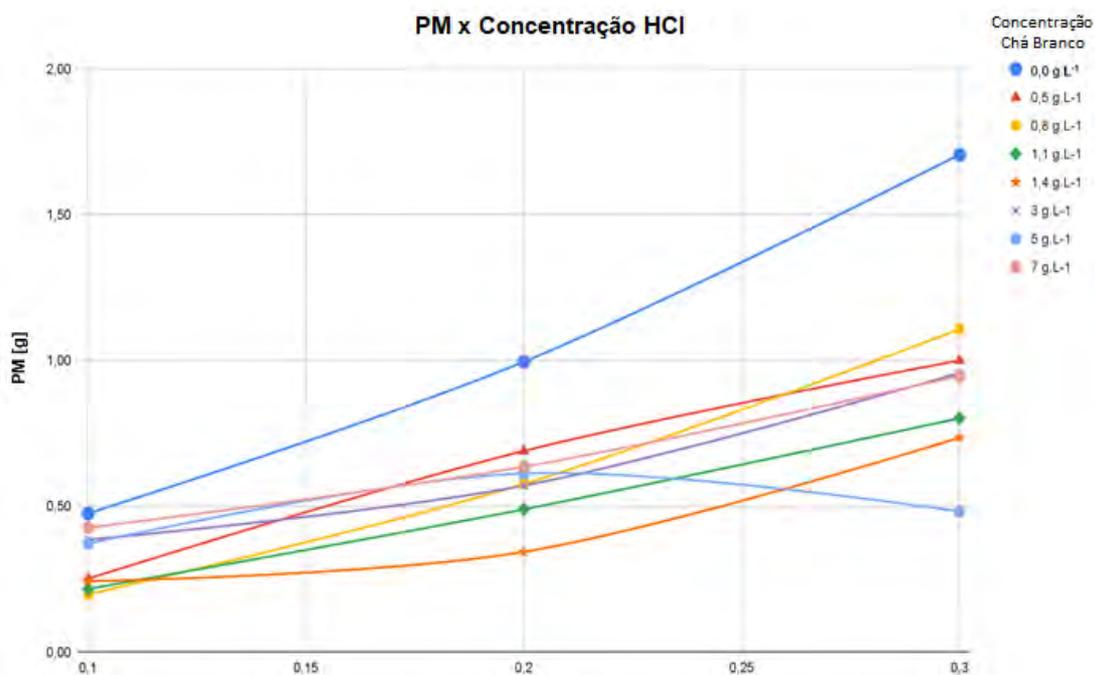
Branco 3	0,2	1,11	1,77
Branco 4	0,2	1,10	1,44
Branco 5	0,3	0,90	2,91
Branco 6	0,3	0,89	2,31

Com a avaliação visual dos corpos de prova após o tempo de imersão dos ensaios em branco (Figura 4), foi possível observar a corrosão uniforme, sendo adequado o uso do método da perda de massa para medição do processo corrosivo nesse caso.

3.2 Ensaios com inibidor

Em todos os ensaios das soluções de imersão de ácido clorídrico contendo diferentes concentrações de inibidor, a perda de massa foi menor do que na ausência de chá branco, como pode ser observado na Figura 5, o que comprova que o chá branco funciona como inibidor. Também foi possível observar a formação do gás H_2 , com consumo de H^+ e oxidação de Fe^0 , segundo as equações 3 e 4, porém, aparentemente em menor quantidade que nos ensaios em branco, como mostra a Figura 6.

Figura 5 - Perdas de massa nas diferentes concentrações de Chá Branco em Ácido Clorídrico $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$, $0,2 \text{ mol.L}^{-1}$ e $0,3 \text{ mol.L}^{-1}$



Isto é um forte indício de que houve inibição da corrosão, pois a taxa de uma importante reação catódica (redução do H^+), aparentou ser menor que aquela observada no ensaio em branco.

Para os ensaios em solução de ácido clorídrico $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$, a eficiência de inibição máxima obtida foi de 58,3 %, com a concentração de $0,8 \text{ g.L}^{-1}$ de chá branco. De acordo com cálculos feitos, com a concentração de $0,9 \text{ g.L}^{-1}$ de inibidor, obter-se-ia a máxima eficiência de inibição, nessas condições, de 61,5 %, resultado bem próximo ao obtido experimentalmente. Para os ensaios em solução de ácido clorídrico $0,2 \text{ mol.L}^{-1}$, a eficiência de inibição máxima obtida foi de 65,5 %, com a concentração de $1,4 \text{ g.L}^{-1}$ de chá branco. Também foram feitos cálculos teóricos para estas condições, obtendo-se uma eficiência de inibição máxima de 65,7 % com a concentração de $1,9 \text{ g.L}^{-1}$ de inibidor, resultado quase igual ao máximo obtido experimentalmente, que, por sua vez, é maior que o máximo obtido para os ensaios em solução de ácido clorídrico $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$. Por último, para os ensaios em solução de ácido clorídrico $0,3 \text{ mol.L}^{-1}$, a eficiência de inibição máxima obtida foi de 71,7 % com a concentração de $5,0 \text{ g.L}^{-1}$, o melhor desempenho do inibidor de corrosão entre todos os ensaios realizados. Vale destacar que essa eficiência obtida foi, inclusive, maior que a eficiência do conhecido inibidor



Figura 6 - Corpo de prova imerso em solução de chá branco $5,0 \text{ g.L}^{-1}$ e HCl $0,3 \text{ mol.L}^{-1}$

molibdato de sódio segundo a literatura, de 63,7 % [12], o que destaca o potencial de utilização do chá branco como inibidor de corrosão verde nessas condições. Ao longo dos experimentos, foi percebido que a concentração de chá branco na qual foi obtida a eficiência de inibição máxima aumenta juntamente com a concentração do ácido clorídrico. Deve-se ressaltar que o mecanismo principal para a inibição do chá branco em meio ácido é o da quimissorção, impulsionado por essas mesmas substâncias polifenólicas, conforme observado por Kaban *et al.* (2018).

4. Conclusões

É notável que o chá branco foi capaz de obter valores equiparáveis ao experimento de Souza (2018) com molibdato de sódio, dado que o chá branco é um inibidor com um custo muito menor de obtenção, com valor médio de R\$ 1,00 por sachê de 10 g de chá, e simples, além de descarte fácil e sem danos ao meio ambiente, sendo tecnicamente viável para ser utilizado como inibidor de corrosão verde e podendo, inclusive, substituir inibidores comerciais.

Este trabalho foi bem sucedido em avaliar a eficiência do extrato de chá branco como inibidor de corrosão natural, já que, como é possível observar na Figura 5, o chá branco de fato funciona como um inibidor de corrosão em todas as concentrações ensaiadas fazendo com que os corpos de prova obtivessem perdas de massa menores do que na ausência do inibidor. Os resultados obtidos experimentalmente indicam um desempenho satisfatório do inibidor avaliado para as faixas de $(0,5-1,4) \text{ g.L}^{-1}$ na solução de ácido clorídrico $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$, $(1,1-1,4) \text{ g.L}^{-1}$ na solução de ácido clorídrico $0,2 \text{ mol.L}^{-1}$ e $(1,1-5,0) \text{ g.L}^{-1}$ na solução de ácido clorídrico $0,3 \text{ mol.L}^{-1}$, o que destaca o potencial de utilização do chá branco como inibidor de corrosão verde nessas condições. Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar o potencial de inibição do chá branco para outros materiais e em outros meios corrosivos.

Referências

- [1] FERNÁNDEZ-SOLIZ, C.; VIMALANANDAN, A.; ALTIN, A.; *et al.* **Fundamentals of Electrochemistry, Corrosion and Corrosion Protection.** Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [2] KOCH, G. 1 - Cost of corrosion, **Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies**, Woodhead Publishing, pp 3-30, 2017.
- [3] DWIVEDI, D.; LEPKOVA, K.; BECKER, T. **Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods.** The Royal Society of Chemistry, n.7, p.4580-4610, 2017.
- [4] ROCHA, J. C.; PONCIANO GOMES, J. A. C. **Inibidores de Corrosão Naturais - Proposta de Obtenção de Produtos Ecológicos de Baixo Custo a Partir de Resíduos Industriais.** SciELO Brasil, 2017. Disponível em: SciELO - Brasil - Inibidores de corrosão naturais - Proposta de obtenção de produtos ecológicos de baixo custo a partir de resíduos industriais Inibidores de corrosão naturais - Proposta de obtenção de produtos ecológicos de baixo custo a partir de resíduos industriais. Acesso em 13/11/2022.
- [5] WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão.** São Paulo: EDUSP, 2002.
- [6] POPOV, B. N. **Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems.** Elsevier, 2015.
- [7] KABAN, A.; RIDHOVA, A.; PRIYOTOMO, G.; *et al.* **Development of white tea extract as green corrosion inhibitor in mild steel under 1 M hydrochloric acid solution,** Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, v. 2, pp 6-20, 2021.
- [8] OLIVEIRA, T. M.; CARDOSO, S. P. **Avaliação do chá branco como potencial inibidor de corrosão.** SciELO Brasil, 2019. Disponível <https://www.scielo.br/j/rmat/a/NXvGFRPBjnHLKfxQVJmNgSy/?lang=pt#.20/11/2022>.
- [9] RAJA, P. B., SETHURAMAN, M. G. **Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel,** Materials Letters, v.62, pp. 2977-2979, 2008.
- [10] TEIXEIRA, V. M., DOS SANTOS, E. C., REZENDE, M. J. C., *et al.* **Estudo da Ação Inibidora do Extrato de Camellia sinensis na Corrosão do Aço-carbono 1020 em HCl 1 mol/L,** Rev. Virtual Quim., v. 7, n. 5, pp.1780-1794, 2015.
- [11] KABAN, A.; RIDHOVA, A.; PRIYOTOMO, G.; *et al.* **Development of white tea extract as green corrosion inhibitor in mild steel under 1 M hydrochloric acid solution,** Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, v. 2, pp 6-20, 2021.
- [12] SOUZA, L. C. **Inibidores de Corrosão Naturais: Uma Comparação com Substâncias de Uso Comercial.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2018, 104 p.

DANIFICAÇÃO DE METAIS E LIGAS METÁLICAS POR HIDROGÊNIO – TRABALHO DE REVISÃO (PARTE I)

Zehbour Panossian

COMUNICADO: Este trabalho foi apresentado no CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 17., 1993, promovido pela ABRACO no Hotel Glória no Rio de Janeiro, na Sessão Ensino da Corrosão, em dois horários consecutivos (parte I e parte II) com apenas correção gramatical para enquadrá-lo dentro dos critérios da Nova Gramática da Língua Portuguesa. O conteúdo não sofreu qualquer alteração.

Resumo

A danificação de metais e ligas metálicas por hidrogênio constitui uma das formas de falhas em serviço de equipamentos e/ou componentes metálicos. Esse tipo de falha manifesta-se de várias maneiras, a saber, formação de bolhas, flocos, trincas ou fragilização. Neste trabalho, é apresentado um resumo dos vários tipos de falhas de maneira sucinta e esquematizadas.

Palavras-chaves: corrosão, hidrogênio, danificação por hidrogênio, fragilização por hidrogênio.

Abstract

Hydrogen damage in metal and their alloys is one of the service failure service failure modes in metallic equipment and/or components. This type of failure manifests itself in several ways, such as blisters, flaks, cracks, or embrittlement.

In the present work, these failure modes are discussed in a systematic way.

Keywords: corrosion, hydrogen, hydrogen damage, hydrogen embrittlement.

1. Introdução

A danificação por hidrogênio tem sido a causa de muitas falhas em serviço de materiais metálicos, tais como, ruptura em componentes aeroespaciais, vazamentos em vasos de pressão, redução das propriedades mecânicas de materiais nucleares e empoamento, flocos, olho de peixe e fissuramento em componentes forjados, fundidos e soldados. A importância desse tipo de danificação pode ser constatada pelo grande número de trabalhos publicados e de encontros promovidos sobre o assunto nas últimas décadas. Apesar do grande esforço dos pesquisadores, este é um assunto que ainda não está bem esclarecido, existindo controvérsias e equívocos, sendo difícil, se não impossível, tratá-lo de maneira simplificada. Isto é devido ao fato de existirem vários fenômenos de naturezas diferentes que causam falhas em metais e ligas devido à presença de hidrogênio, cada um dos quais apresentando influência de muitos parâmetros, tais como, temperatura, estado de tensões, composição microestrutura dos metais. Além disso, esse assunto apresenta um caráter multidisciplinar envolvendo entre outros mecânica da fratura, metalurgia física e corrosão, sendo estudado, portanto por pesquisadores de diferentes áreas.

Este trabalho tentará apresentar o assunto abordando os principais fatores que determinam as falhas em serviço, estando longe, no entanto, de esgotá-lo.

Esta apresentação abordará primeiramente alguns conceitos de fundamental importância para uma possível compreensão do assunto, em seguida discorrerá sobre as fontes de hidrogênio, seu aprisionamento e modos de transporte nos metais, as diferentes teorias que explicam a danificação por hidrogênio e os diferentes tipos de falhas.

2. Conceitos fundamentais

Para tentar entender a danificação por hidrogênio deve-se ter em mente alguns conceitos fundamentais e fatos, a saber:

- o hidrogênio só penetra no metal e só se difunde nele na forma de hidrogênio

nascente, ou seja, na forma de átomo de hidrogênio (H). O hidrogênio não penetra e não se difunde na forma de cátion hidrogênio (H^+) ou de hidrogênio molecular (H_2). Por exemplo, um metal em contato com H_2 não está sujeito à danificação. O perigo existirá se houver condições de dissociação e formação de hidrogênio atômico;

- o hidrogênio é um elemento intersticial, sendo capaz de formar uma solução sólida ocupando os interstícios de uma estrutura cristalina. O limite de solubilidade do hidrogênio nos metais depende de muitos fatores, tais como, composição, microestrutura e temperatura;
- o hidrogênio é capaz de causar danificação nos metais somente quando a sua concentração, na região onde ocorre a falha, atingir um determinado valor, denominado de concentração crítica. Essa é de fundamental importância no estudo da danificação por hidrogênio, sendo a base de vários modelos propostos. No entanto, não é um valor universal dependendo de uma série de fatores como: composição do metal ou liga, microestrutura, nível de tensões, temperatura e tipo de falha.

3. Fontes de hidrogênio

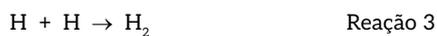
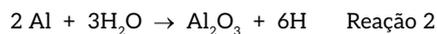
O conhecimento das diferentes maneiras de contaminação dos metais com hidrogênio - fontes de hidrogênio - é de fundamental importância, pois o seu conhecimento e controle é um dos primeiros passos para minimizar a danificação dos metais pelo hidrogênio. Essa contaminação pode ocorrer durante a fabricação ou uso de componentes metálicos podendo ser devido à:

- penetração de hidrogênio em altas temperaturas;
- contato de metais com gás hidrogênio em condições que é possível a sua dissociação;
- reações eletroquímicas nas quais a reação catódica é parcial ou totalmente a de redução do cátion hidrogênio.

A seguir, far-se-ão breves comentários sobre cada uma das fontes citadas.

3.1 Penetração de hidrogênio em altas temperaturas

Este caso, muito comum em aços, alumínio e suas ligas, refere-se principalmente à contaminação durante os processos de fundição, forjamento, soldagem e tratamento térmico. Quando o metal quente entra em contato com atmosfera úmida ocorre a sua oxidação com produção de hidrogênio atômico, conforme exemplificado a seguir:

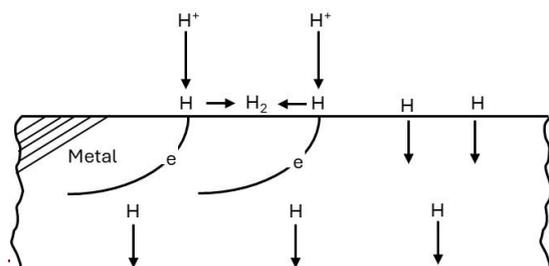


A produção de cada hidrogênio atômico necessário para a ocorrência da **Reação 3** ocorre em sítios diferentes na superfície do metal. Assim, para que ocorra a **Reação 3** é necessário que os dois hidrogênios atômicos produzidos nas reações anteriores vagueiem sobre a superfície metálica até se encontrarem, formarem o hidrogênio molecular e se desprenderem. No entanto, ao vaguearem pela superfície, os átomos de hidrogênio nascente poderão penetrar no metal (**Figura 1**).

Assim, parte do hidrogênio atômico forma gás hidrogênio na superfície do metal e parte penetra no metal. A temperaturas elevadas, a solubilidade do hidrogênio nos metais é alta; sendo assim, grandes quantidades de hidrogênio podem penetrar no metal.

A água presente nas atmosferas reinantes nos processos citados pode ser proveniente de:

Figura 1 - ilustração esquemática da penetração de hidrogênio nos metais durante a reação de formação de gás hidrogênio.



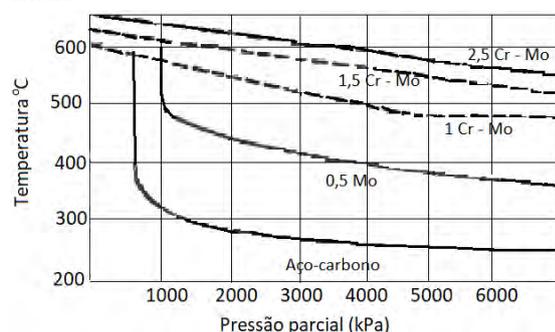
- **carga úmida:** por exemplo, a cal utilizada no processo de fundição pode ser úmida, o que é comum já que este produto é muito higroscópico;
- **atmosfera úmida:** a água pode ser proveniente da própria atmosfera reinante no ambiente, sendo crítica nos dias de alta umidade relativa. Nos processos em que se utiliza arco voltaico, este fato é especialmente importante, pois além das reações de oxidação, pode ocorrer dissociação de água pela ação do arco voltaico;
- **umidade no oxigênio:** nos conversores a oxigênio, a utilização de gás oxigênio úmido pode ser a principal causa da presença de água;
- **revestimentos de eletrodos úmidos:** estes são higroscópicos, sendo urna das principais causas responsável pela presença de água nos processos de soldagem;
- **umidade no fluxo granulado ou no gás protetor:** a presença de água pode ser proveniente da umidade contida no fluxo granulado ou no gás protetor utilizado nos processos de soldagem;
- **óxidos ou impurezas hidratados ou higroscópicos:** é possível que a superfície metálica a ser processada esteja coberta por óxidos e/ou impurezas hidratados ou higroscópicos, sendo esta a razão da presença de água.

3.2 Contato de metais com gás hidrogênio em condições em que é possível a dissociação

A dissociação do gás hidrogênio ocorrerá em condições de temperatura e pressão parcial de hidrogênio bem definidas. Este par (T, p) depende do metal em questão. Existem curvas empíricas, chamadas curvas de Nelson, traçadas num diagrama (T, p) para cada metal específico. Essas constituem os lugares geométricos que definem os pares acima dos quais existe o perigo de dissociação do gás hidrogênio e, conseqüentemente, penetração de hidrogênio atômico no metal. A **Figura 2** apresenta, a título de ilustração, algumas curvas de Nelson.

Observando as curvas, pode-se verificar que, para um aço-carbono comum em contato com gás hidrogênio, existe a possibilidade de dissociação em temperaturas superiores a 250 °C e pressões parciais de hidrogênio acima de 4.000 kPa. Para pressões menores, a dissociação ocorre a temperaturas cada vez mais elevadas, não ocorrendo quando a pressão parcial de hidrogênio for menor que aproximadamente 700 kPa. Pode-se também observar que a adição de cromo e molibdênio aumenta a faixa operacional.

Figura 2 – Curvas de Nelson para alguns tipos de anodo.



Fonte: autor.

3.3 Reações eletroquímicas nas quais a reação catódica é parcial ou totalmente a de redução do cátion hidrogênio

Vários são os processos eletroquímicos nos quais a reação catódica é parcial ou totalmente a de redução do cátion hidrogênio, podendo ser citados: eletrodeposição, decapagem (por imersão ou por imposição de corrente externa catódica), desengraxe eletrolítico catódico e corrosão.

A reação de redução do cátion hidrogênio ocorre da seguinte forma:



A penetração de hidrogênio no metal ocorre de maneira semelhante ao descrito no **Item 3.1**.

Convém mencionar que os processos citados ocorrem, em geral, a baixas temperaturas (normalmente inferiores a 100 °C), sendo assim, a quantidade de hidrogênio que penetra no metal

devido a tais processos é, via de regra, menor do que a que penetra devido aos processos que envolvem altas temperaturas citados no **Item 3.1** e **Item 3.2**.

No entanto, na presença de alguns compostos, denominados venenos, grandes quantidades de hidrogênio podem penetrar no metal. É o caso do gás sulfídrico. É sabido que esse gás, quando dissolvido em água, forma uma solução fracamente dissociada de caráter ácido (pH aproximadamente quatro). Nessas condições, reage com o ferro à temperatura ambiente, originando hidrogênio nascente e sulfeto ferroso (FeS). Esse último inibe a velocidade da reação de combinação (Reação 5), aumentando o tempo de permanência de átomos de hidrogênio na superfície metálica o que favorece, significativamente, a penetração de hidrogênio. Além disso, acredita-se que o sulfeto se adsorve na superfície metálica dificultando ainda mais a reação de combinação. Há outros compostos que desempenham funções idênticas à descrita. Dentre eles, em ordem crescente de agressividade, podem ser citados: bismuto, chumbo, enxofre, telúrio, selênio e arsênio e ainda fósforo e antimônio. Se esses venenos estiverem presentes nas soluções de decapagem, nos banhos eletrolíticos ou em qualquer meio corrosivo, grandes quantidades de hidrogênio podem penetrar nos metais. Tais venenos também agem quando presentes nos metais como impurezas ou elementos de liga.

4. Aprisionamento de hidrogênio

Quando se expõe um metal a um meio capaz de gerar, na sua superfície, átomos de hidrogênio, estes podem penetrar no metal e caminhar para o seu interior. Se o metal considerado fosse um monocristal perfeito, o hidrogênio gradativamente preencheria os interstícios cristalinos, formando uma solução sólida até o seu limite de solubilidade, atingindo o equilíbrio dinâmico, a partir do qual não se notaria aumento da concentração do soluto. Não foram encontrados na literatura relatos de danificação por hidrogênio como elemento intersticial, ou seja, na condição de solução sólida. A danificação poderá ocorrer se houver

supersaturação provocada, por exemplo, por mudanças bruscas das condições, como abaixamento de temperatura.

Na prática, os metais não são monocristais perfeitos, mas sim policristais, contendo contornos de grão, além de outras heterogeneidades, tais como, maclas, lacunas, inclusões (portanto interfaces inclusão/matriz), discordâncias, falhas de empilhamento, poros e vazios. No caso de ligas, têm-se ainda fases distintas. Nesse trabalho, essas heterogeneidades serão tratadas como defeitos. É comprovada a ocorrência de interação de diferentes naturezas do hidrogênio com muitos tipos de defeitos. Tais interações ocorrerão preferencialmente se a energia envolvida for maior do que a necessária para a acomodação do hidrogênio nos interstícios cristalinos do metal. Tais defeitos serão denominados neste trabalho de aprisionadores de hidrogênio (*hydrogen traps*) e a ocorrência da ligação preferencial de hidrogênio no defeito, aprisionamento de hidrogênio (*hydrogen trapping*).

O aprisionamento do hidrogênio ocorre de várias formas podendo ser citadas:

- acomodação preferencial do hidrogênio nos defeitos devido à existência de “mais espaço” ou à maior afinidade do hidrogênio pelo defeito. Exemplos de defeitos desta natureza são os contornos de grão;
- interação do hidrogênio com campos elétricos ou campos de tensões, por exemplo, interação do hidrogênio com o campo de tensões de uma discordância;
- precipitação de hidrogênio molecular. Em condições de concentração suficiente de hidrogênio atômico, poderá ocorrer a reação $H + H \rightarrow H_2$. Esse fato é comum em contorno de grão e vazios quando se tem condições de supersaturação;
- reações com elementos de liga. Por exemplo, no aço-carbono, o hidrogênio poderá reagir com o carbono formando metano; no cobre contendo oxigênio poderá ocorrer a formação da água, alguns metais podem reagir com o hidrogênio e formar hidretos.

O aprisionamento pode ser reversível ou irreversível, dependendo do grau de facilidade de escape do hidrogênio captado. Em geral, é do tipo irreversível quando ocorrem reações. No caso de acomodação, a irreversibilidade dependerá da energia de ligação, acentuando-se para valores mais elevados. A **Tabela 1** apresenta valores dessa energia para diferentes defeitos em aços. Consideram-se irreversíveis aqueles com valores superiores a 60 kJ/mol.

Tabela 1 - Valores da energia de ligação defeito/hidrogênio em aços

Defeito	Energia de Ligação (kJ/mol)
Soluto intersticial (N, C)	3 a 15
Átomo de Si	> 20
Átomo de Ti	26
Lacuna	46
Núcleo de discordância em hélice	20 a 30
H ₂ (vapor/vazio)	29
Contorno de grão	59
Superfície livre	70 a 95
Interface Fe ₃ C	84
Interface TiC	96

Fonte: autor

O aprisionamento aumenta a quantidade de hidrogênio incorporado pelo metal. Esse aumento ocorre de maneira localizada em torno do defeito e depende da capacidade de retenção e/ou do grau de saturação do defeito.

5. Transporte de hidrogênio nos metais

O transporte de hidrogênio nos metais ocorre predominantemente através de dois mecanismos, a saber: difusão normal e transporte por discordâncias.

Entende-se por difusão normal o transporte que ocorre devido ao deslocamento do hidrogênio através dos interstícios cristalinos determinado pela existência de um gradiente de concentração entre duas regiões distintas no metal.

Como todos os processos de difusão, este modo de transporte também aumenta com o aumento da temperatura, sendo desprezível a temperaturas muito baixas, e tanto maior quanto maior for o gradiente de concentração.

Na prática, são várias as situações em que pode se estabelecer um gradiente de concentração entre duas regiões distintas de um metal, podendo ser citadas:

- **metal em contato com fontes de hidrogênio:** quando um metal, isento de hidrogênio, entra em contato com uma fonte do hidrogênio, a difusão de hidrogênio para o interior do metal ocorre devido ao gradiente de concentração entre a superfície e o interior do metal. Essa difusão persistirá até se atingir o equilíbrio dinâmico, situação em que se tem a mesma concentração de hidrogênio por todo o metal;
- **metal contaminado em contato com atmosfera limpa:** quando um metal contaminado com hidrogênio entra em contato com uma atmosfera isenta de hidrogênio, por exemplo quando se retira a fonte de hidrogênio, ocorre o processo oposto ao anteriormente descrito. Alguns átomos de hidrogênio na superfície recombina-se formando hidrogênio molecular. Isso faz com que a concentração do hidrogênio atômico diminua junto à superfície, estabelecendo-se um gradiente entre este local e o interior, o que determina a difusão do hidrogênio do interior para a superfície do metal. Esse fenômeno é utilizado para descontaminar metais. Como é um processo termicamente ativado, o metal contaminado é mantido aquecido em atmosferas isentas de hidrogênio por um determinado período de tempo. Essa prática, denominada desidrogenação, é largamente utilizada em peças revestidas por eletrodeposição;
- **estado não uniforme de tensões de tração:** para uma mesma quantidade de hidrogênio presente num metal, a concentração do hidrogênio é maior nas regiões tensionadas. Assim um gradiente de concentração pode surgir quando um metal, previamente contaminado com hidrogênio, é solicitado com carga estática. Parte do hidrogênio das

regiões não tensionadas difunde-se para as regiões tensionadas;

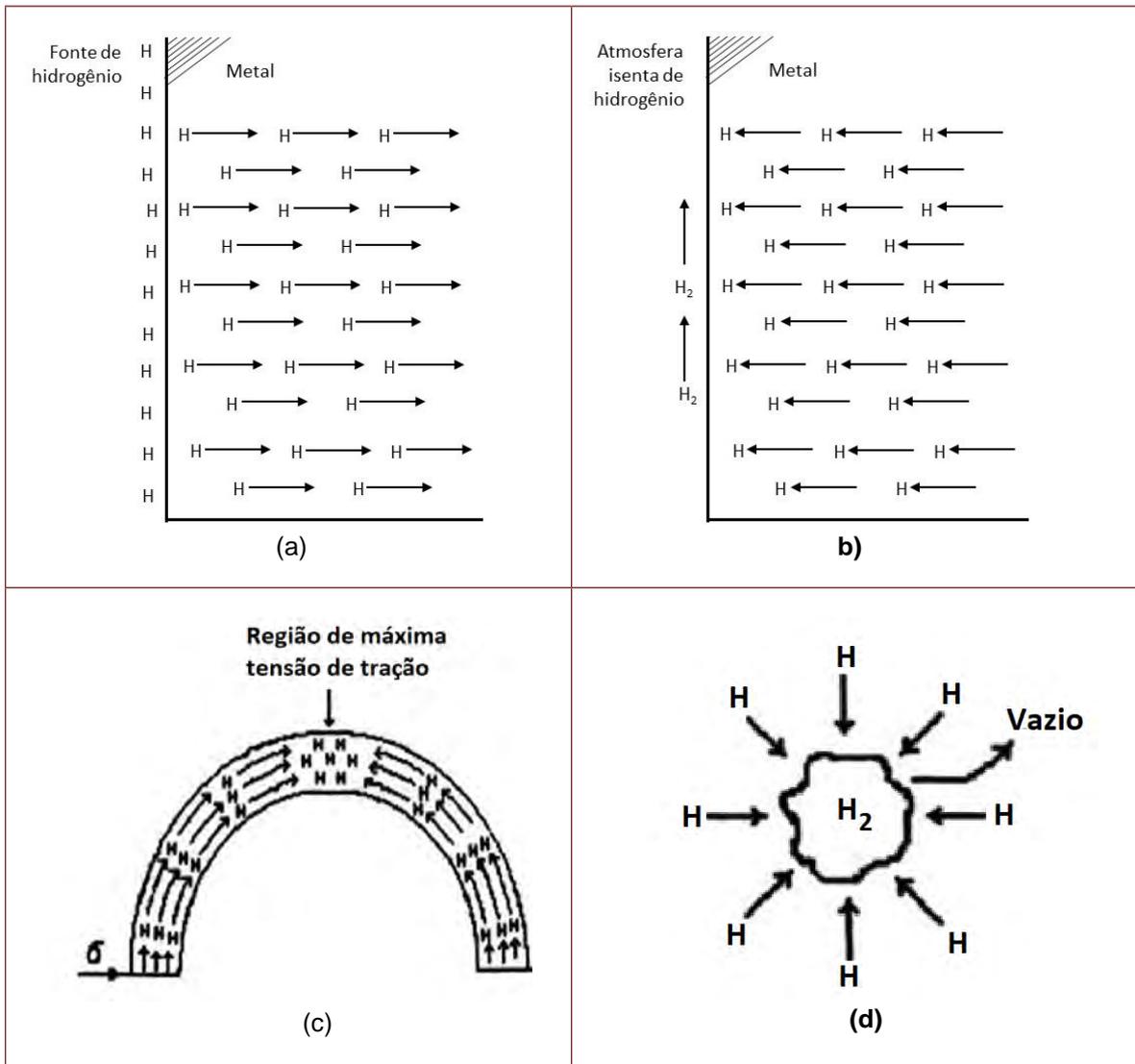
- **presença de aprisionadores de hidrogênio:** se numa determinada região do metal o hidrogênio está sendo consumido, por exemplo com formação de hidrogênio molecular ou metano, a concentração de hidrogênio atômico nesta região diminui havendo uma difusão de hidrogênio para estes locais.

A **Figura 3** apresenta esquematicamente as quatro situações descritas anteriormente.

O transporte de hidrogênio por discordância é aquele em que os átomos de hidrogênio ligados às discordâncias são “arrastados” quando elas se movimentam (**Figura 4**). A velocidade com que as discordâncias se movem é muito maior do que a velocidade de difusão normal dos átomos de hidrogênio. Além disso, a ligação hidrogênio/discordância é mais forte do que a ligação hidrogênio/interstício. Sendo assim, em condições de deformação plástica, o transporte por discordâncias é muito mais efetivo do que o transporte por difusão normal. O transporte por discordâncias depende da velocidade de deformação, sendo menos efetivo quanto maior for esta velocidade podendo não ocorrer para valores muito elevados. Isso porque para velocidades de formação acima de um valor crítico, a ligação das discordâncias com o hidrogênio é rompida, de modo que não ocorre mais transporte. Esse tipo transporte também é influenciado pela temperatura. Para cada condição específica (metal, velocidade de deformação, concentração de hidrogênio) existe uma temperatura em que o transporte por discordância é máximo, diminuindo para temperaturas mais baixas e mais altas.

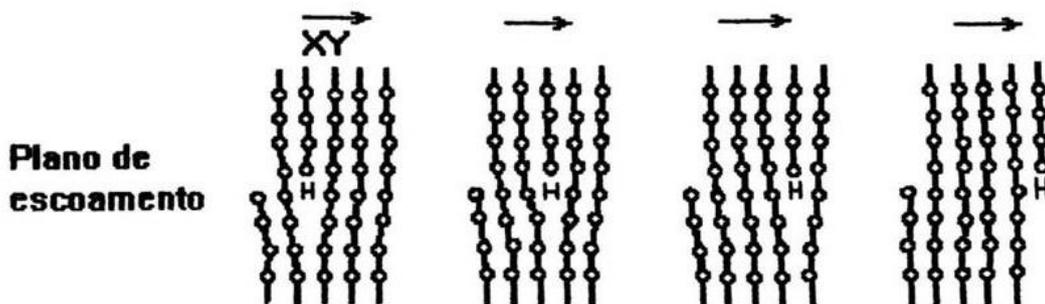
Um fator muito importante a ser considerado no transporte do hidrogênio, seja por difusão, seja por discordâncias, é a presença de aprisionadores de hidrogênio no metal. Se a energia de ligação dos átomos de hidrogênio com um determinado defeito for maior do que a energia de ligação hidrogênio/interstício ou hidrogênio/discordância ocorre um aprisionamento dos átomos de hidrogênio durante o transporte o que diminui de maneira significativa a quantidade de hidrogênio transportado

Figura 3 - Representações esquemáticas de situações em que se tem gradiente de concentração de hidrogênio nos metais: (a) metal em contato com fonte de hidrogênio; (b) metal contaminado em atmosfera limpa; (c) estado não uniforme de tensões de tração; (d) presença de aprisionadores de hidrogênio.



Fonte: autor.

Figura 4 - Ilustração esquemática do transporte de hidrogênio por discordância.



Fonte: autor.

(Figura 5). Nesse sentido, a difusão normal também é menos efetiva do que o transporte por discordâncias, visto que a energia de ligação hidrogênio/interstício é muito menor do que a do hidrogênio/ discordância.

Por outro lado, no caso de se ter um defeito já com hidrogênio, durante o transporte, poderá haver liberação se a energia de ligação do hidrogênio com o defeito for menor do que a energia de ligação hidrogênio/interstício ou hidrogênio/discordância (Figura 6).

A ocorrência de aprisionamento durante o transporte é experimentalmente verificada quando se estuda a difusão de hidrogênio nos metais. Os valores de velocidade de difusão obtidos teoricamente são muito menores do que aqueles observados na prática. Tais valores tornam-se concordantes somente quando ocorre a saturação dos aprisionadores.

6. Teorias que explicam a danificação por hidrogênio

Existem várias teorias que tentam explicar as diferentes formas de danificação por hidrogênio, dentre as quais serão abordadas aquelas

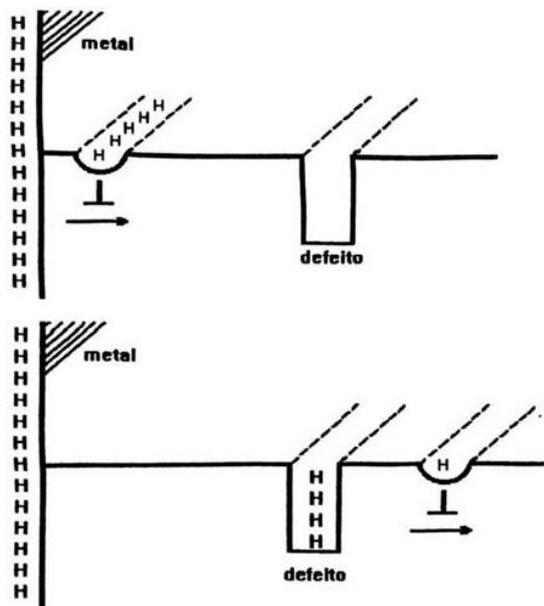
mais aceitas atualmente, a saber: adsorção superficial, decoesão, pressão e formação de fases frágeis.

As duas primeiras teorias atribuem a danificação à presença do hidrogênio atômico, enquanto as demais se referem às consequências danosas dos produtos formados por reações que envolvem a participação do hidrogênio. Qualquer uma das teorias pressupõe que houve concentração localizada de hidrogênio num defeito até um valor crítico, a partir do qual a danificação começa a se manifestar. A seguir cada uma das teorias será apresentada de maneira simplificada.

6.1 Teoria da adsorção superficial

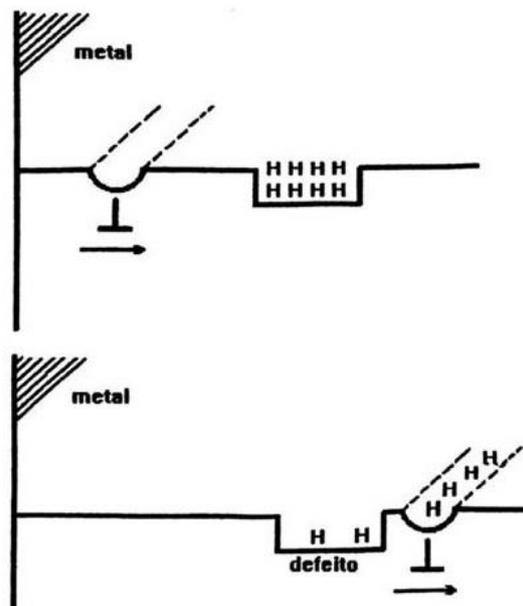
Segundo esta teoria, o hidrogênio atômico se adsorve numa superfície livre, como as paredes livres de uma trinca, ocasionando a diminuição da energia de superfície. Assim, para haver a propagação de uma trinca pré-existente é necessário menos energia para formar as novas superfícies das paredes da trinca. O material estará danificado, pois poderá sofrer ruptura com valores de tensões de tração

Figura 5 - Ilustração esquemática do aprisionamento de hidrogênio durante o transporte (\perp representa uma discordância em movimento).



Fonte: autor.

Figura 6 - Ilustração esquemática da liberação de hidrogênio durante o transporte (\perp representa uma discordância em movimento).



Fonte: autor.

inferiores àqueles necessários na ausência de hidrogênio.

6.2 Teoria da decoesão

Segundo esta teoria a presença de hidrogênio diminui a força de coesão entre os átomos do metal. Assim, um nível de tensão não capaz de causar ruptura, pode causá-la se o metal estiver suficientemente contaminado com hidrogênio.

6.3 Teoria da pressão

Segundo esta teoria, nos defeitos ocorre a formação de fases gasosas com alta pressão pela combinação de dois átomos de hidrogênio ou pela reação do hidrogênio com outros elementos. A formação contínua destes gases acarreta o aumento gradativo da pressão no interior do defeito, atingindo níveis capazes de gerar tensões de tração que, por si só ou somadas às tensões residuais ou aplicadas, podem ultrapassar o limite de escoamento ou da resistência do metal, causando deformações ou rupturas.

6.4 Formação de fases frágeis

Esta teoria se refere aos casos de danificação em que o hidrogênio reage com elementos presentes no metal e forma compostos sólidos frágeis o que diminui as propriedades mecânicas do metal. Além disso, tais compostos ocupam, em geral, maior volume causando o aparecimento de tensões de tração, que muitas vezes já são suficientes para causar rupturas.

7. Tipos de danificação por hidrogênio

Neste item, serão apresentados os vários tipos de danificação que os metais sofrem devido à contaminação com hidrogênio. A falta de conhecimento dos conceitos e fatos anteriormente discutidos dificultaria sobremaneira a abordagem deste assunto.

A revisão bibliográfica mostra que a divisão dos tipos é feita sob diferentes pontos de vista. Neste trabalho, far-se-á uma divisão que pode até contrariar outros autores. No entanto, a compreensão do assunto não será prejudicada, podendo-se fazer uma correlação entre o

que será aqui apresentado e o encontrado na literatura.

Serão apresentados a seguir seis tipos de danificação por hidrogênio a saber:

- empolamento (*blistering*);
- flocos (*flaks*), olho de peixe (*fish eye*) e fissuramento;
- fratura retardada (*delayed fracture*);
- ataque por hidrogênio;
- formação de hidretos;
- corrosão sob tensão assistida por hidrogênio;
- perda de ductilidade.

Antes de descrever cada um destes tipos, convém fazer uma distinção entre danificações causadas por tensões induzidas por hidrogênio e as causadas por tensões não induzidas por hidrogênio.

As danificações causadas por tensões induzidas por hidrogênio ocorrem devido à formação de compostos de hidrogênio – hidrogênio molecular (H_2), metano (CH_4), água (H_2O), hidretos. Esses compostos, seja por gerarem pressões elevadas, no caso de serem gasosos, seja por possuírem maior volume, no caso de serem sólidos, geram tensões de tração que determinam ruptura, se o metal for frágil, ou deformação, se metal for dúctil.

As danificações causadas por tensões não induzidas por hidrogênio são aquelas em que as tensões responsáveis pela ruptura ou deformação dos metais não são devido à presença de hidrogênio, porém são ou residuais ou aplicadas. A danificação ocorre porque a presença de hidrogênio no metal afeta as suas propriedades mecânicas de modo que níveis de tensões de tração, que nada causariam na ausência de hidrogênio, danificam o material na presença dele.

7.1 Empolamento

Este tipo de danificação ocorre principalmente em metais dúcteis, como os aços baixa

Figura 7 - Ilustração esquemática de (a) formação de bolhas; (b) formação de flocos, e (c) formação de olho de peixe.



Fonte: autor.

resistência, e quando há formação de gases capazes de gerar altas pressões em defeitos (Figura 7a).

Os casos práticos mais comuns, são aqueles observados com aços-carbono fundidos, forjados, soldados ou tratados termicamente. Nessas operações, grandes quantidades de hidrogênio podem penetrar no metal, devido à alta solubilidade do hidrogênio no aço, a altas temperaturas. Durante o resfriamento, esta solubilidade decresce gradativamente correndo uma supersaturação que é aliviada pela precipitação de gás hidrogênio em defeitos. Cabe citar o fato que a pressão de hidrogênio molecular em equilíbrio com hidrogênio atômico é de milhares de atmosferas, portanto facilmente podem ser atingidos níveis elevados de pressão capazes de gerar tensões de tração que ultrapassam o limite de escoamento dos metais, causando deformações.

Este fato se torna crítico em aços, quando o resfriamento é brusco até temperaturas inferiores a 200 °C. Isto porque a temperatura próxima desse valor, observa-se uma queda brusca da solubilidade de hidrogênio que cai de 8,0 mg/L para 0,1 mg/L.

No caso de metais fundidos, o empolamento raramente é verificado, uma vez que a quantidade de defeitos existentes, principalmente poros, é muito grande. A precipitação ocorrerá em praticamente todos eles e a pressão causada em cada um não atingirá valores críticos. No entanto, falhas podem ocorrer em condições de severa contaminação.

O empolamento também é verificado, na prática, nos processos de eletrodeposição de metais e nos processos de intensa corrosão dos aços

de baixa resistência, expostos a meios extremamente agressivos, como H₂S. A formação de bolhas será devido à grande quantidade de hidrogênio gerado durante tais processos.

Convém mencionar, que muitas bolhas formadas no interior de um metal poderão não ser perceptíveis, sendo mais visíveis as bolhas formadas junto à superfície. Em muitos casos, as bolhas poderão não comprometer o uso de uma determinada peça, causando apenas problemas estéticos.

7.2 Flocos, olho de peixe e fissuramento

Estes defeitos, comuns em aços de alta resistência forjados ou laminados, também são gerados pela formação de gases com alta pressão, principalmente pelo gás hidrogênio. Nesse caso, as tensões geradas pelo gás causam rupturas e não deformações, devido ao fato do metal danificado ser frágil (Figura 7b).

Quando o trincamento ocorre ao redor de uma inclusão como consequência do acúmulo de gás na interface inclusão/matriz, tem-se uma falha com aspecto que lembra o olho de um peixe, razão da denominação a ela dada (Figura 7c).

7.3 Fratura retardada

A fratura retardada também chamada de fadiga estática (*static fatigue*) é caracterizada pela ocorrência de fratura frágil de metais, previamente contaminados com hidrogênio e submetidos a tensões de tração estáticas abaixo do limite de resistência. Isso ocorre devido à difusão de hidrogênio, antes uniformemente distribuído, para os locais de máxima tensão de tração. A ruptura ocorrerá quando

a concentração de hidrogênio atingir um valor crítico (**Figura 8**). Dependendo do tipo de defeito existente e da natureza do metal, a fratura poderá ser causada por diferentes mecanismos;

- gás hidrogênio poderá ser formado em fissuras, em contornos ou outro tipo de defeitos. As tensões devido à pressão do gás somadas às tensões externas poderão ultrapassar localmente o limite de resistência e causar a ruptura;
- o acúmulo de hidrogênio poderá causar diminuição da força de coesão entre átomos e a tensão externa, a níveis suficientes para causar ruptura.

A fratura será intergranular se o hidrogênio se acumular em contorno de grão, e transgranular se os defeitos presentes no interior do grão acarretarem acúmulo de hidrogênio.

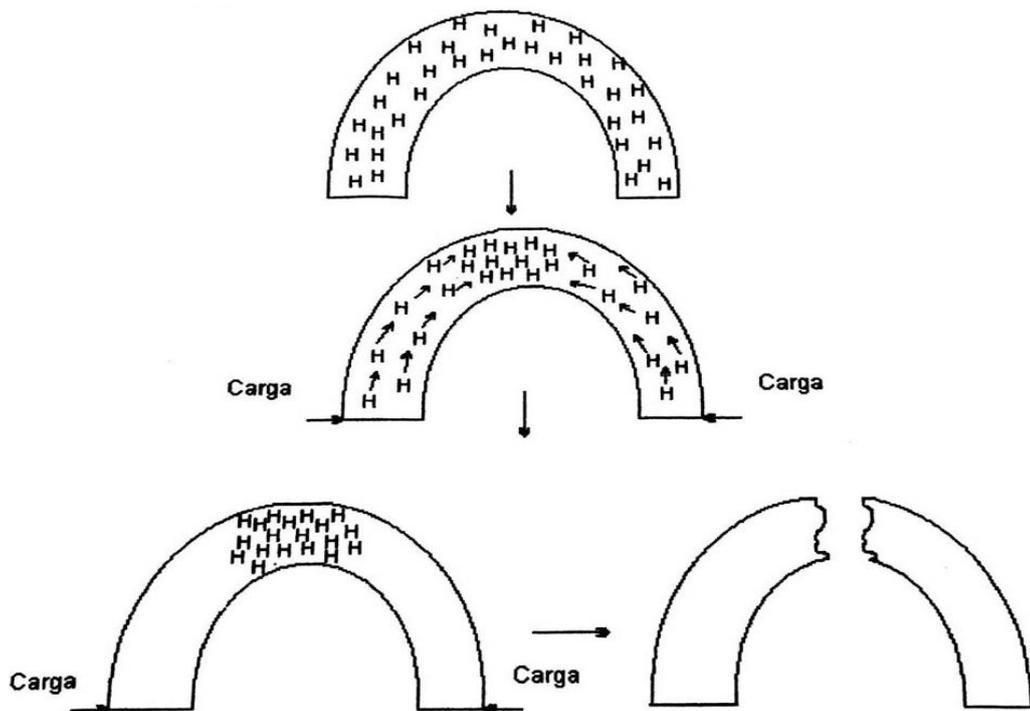
Independente do mecanismos de ação do hidrogênio, este tipo de falha é caracterizado por necessitar um certo tempo para ocorrer (tempo de incubação) e por ser descontínuo.

O tempo de incubação é o tempo necessário para o transporte do hidrogênio das regiões não tensionadas para as regiões tensionadas, sendo a difusão normal o principal modo de transporte, visto que o fenômeno ocorre em condições estáticas. Este depende, entre outros fatores, da temperatura e do teor inicial de hidrogênio.

A fratura é descontínua devido ao fato de que apenas as regiões de máxima tensão de tração ficam enriquecidas com hidrogênio e, portanto, somente nestas regiões o metal fica afetado podendo surgir uma trinca. A região à frente da ponta da trinca é agora aquela submetida à máxima tensão de tração. Portanto, haverá difusão de hidrogênio em sua direção, o que afeta o metal. A extremidade da trinca avançará através da região afetada até ser bloqueada pelo metal não afetado, o qual por sua vez sofrerá danificação por hidrogênio, permitindo o prosseguimento da trinca.

Convém mencionar que, para determinadas condições de temperatura e concentração de hidrogênio, este tipo de fratura também

Figura 8 - Ilustração esquemática de (a) formação de bolhas; (b) formação de flocos, e (c) formação de olho de peixe.



Fonte: autor.

é caracterizado pelo fato de ocorrer apenas acima de um certo valor de tensão de tração. A explicação disso é que é necessário um nível mínimo de tensão, para ocasionar um gradiente de concentração suficiente para a difusão da quantidade mínima de hidrogênio necessária para a ruptura. Níveis mais baixos de tensões, apesar de ocasionarem a difusão de hidrogênio, não o fazem em grau suficiente para elevar a concentração de hidrogênio até o nível crítico.

Este tipo de falha é muito comum em parafusos de aço eletrorevestidos com cádmio ou zinco. O hidrogênio que penetra no metal durante a eletrodeposição não é suficiente para causar danificação, pois está distribuído no metal de forma suficientemente homogênea. Posteriormente, quando se utiliza o parafuso, a carga aplicada origina regiões de concentrações de tensões. Isso ocasiona a quebra do parafuso segundo o mecanismo descrito.

7.4 Ataque por hidrogênio

Este tipo de ataque ocorre quando o hidrogênio reage com um os elementos presentes no metal e forma gases. Alguns autores particularizam, dando esta denominação apenas para as falhas observadas em aço-carbono a altas temperaturas, que serão descritas a seguir. No entanto, neste trabalho, essa denominação abrange todas as situações nas quais são produzidos gases devido à reação do hidrogênio com elementos presentes no metal. Este tipo de falha será descrito por meio da exemplificação de dois metais, a saber aço e cobre.

O hidrogênio quando presente em aços-carbono ou em aços baixa liga, a altas temperaturas, reage com o carbono tanto proveniente da solução sólida como da cementita, formando metano. Altas pressões podem ser geradas no interior do metal devido à formação do metano o que poderá causar empolamento ou aparecimento de fissuras, dependendo das propriedades mecânicas do aço original. Deve-se lembrar que devido ao consumo do carbono para formação de metano, ocorre descarbonatação do aço o que, por si só, já reduz as suas propriedades mecânicas.

O cobre puro apresenta alta resistência ao ataque pelo hidrogênio, no entanto quando contém oxigênio em solução sólida ou na forma de óxido, torna-se susceptível a danificação por hidrogênio. Isso ocorre devido à reação ao hidrogênio com o oxigênio com formação de água. A contínua formação de água gera pressões elevadas que causam fissuras e o metal poderá sofrer fratura frágil quando solicitado. Em geral, a formação de água ocorre em contorno de grão razão pela qual, normalmente, as fraturas observadas neste metal, devido à ação do hidrogênio são intergranulares. Convém ressaltar que, no caso do cobre, também o ataque por hidrogênio é favorecido com aumento da temperatura. Para temperaturas mais baixas, o tempo de ruptura pode ser da ordem de anos.

7.5 Formação de hidretos

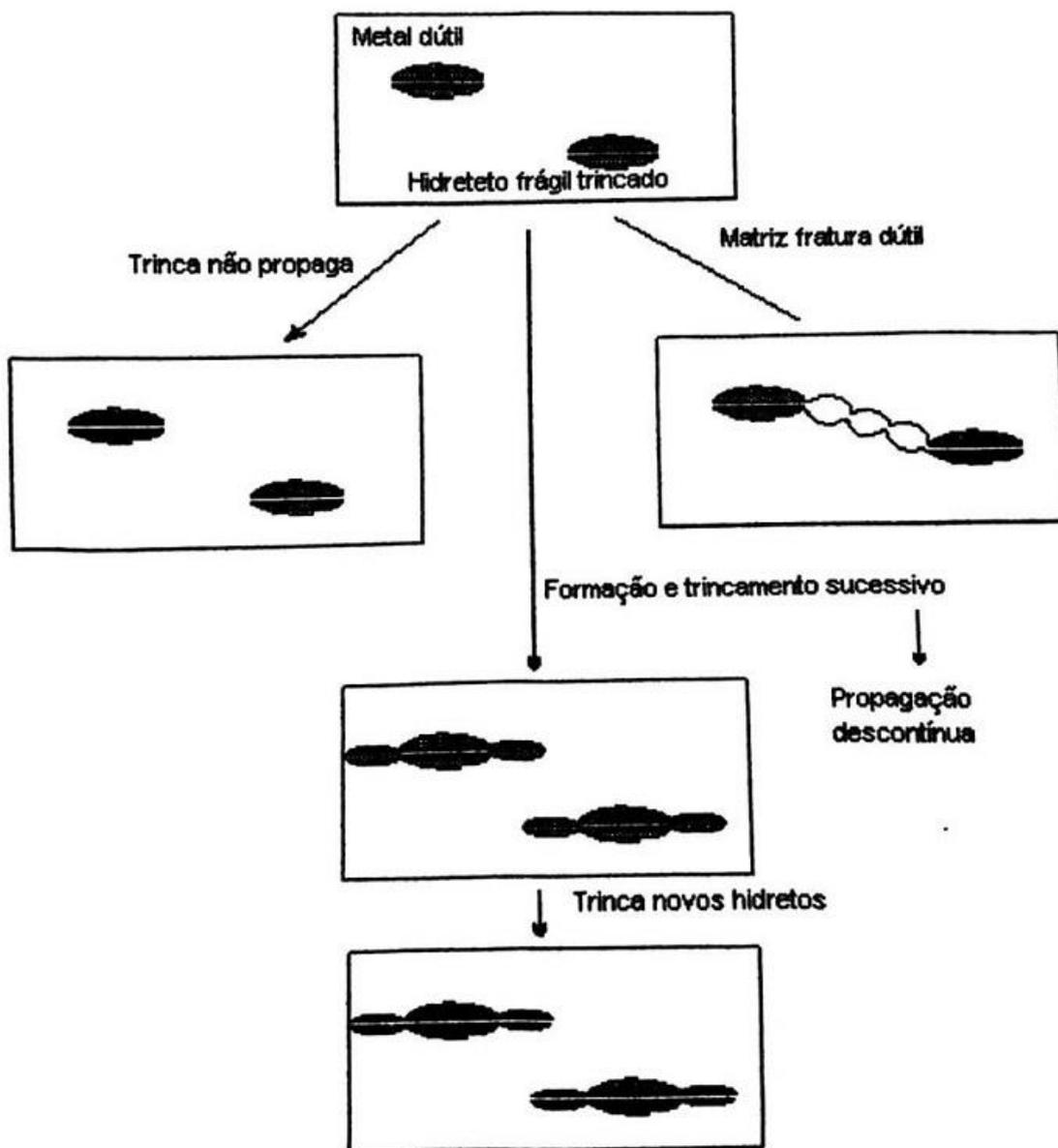
Metais, tais como magnésio, tântalo, nióbio, vanádio, urânio, zircônio e titânio, reagem prontamente com hidrogênio formando hidretos.

Nesses metais, a solubilidade do hidrogênio cai rapidamente com a temperatura sendo praticamente nula à temperatura ambiente. Assim, quando se tem contaminação com hidrogênio, mesmo em baixas concentrações, ocorre a formação de hidretos.

Os hidretos formados são frágeis e possuem volume maior do que o do metal que lhe deu origem. Como consequência disso, é observada perda das propriedades mecânicas devido à formação de fases frágeis e aparecimento de tensões como consequência das variações de volume.

Os hidretos são formados preferencialmente em defeitos tais como contornos de grão, contornos de macla, discordâncias, visto serem locais preferenciais para a acomodação de hidrogênio. A precipitação de hidretos é favorecida, ainda, por tensões (*stress-induced hydride formation*). Isso associado à difusão preferencial de hidrogênio para regiões tensionadas, tornam essas regiões mais propícias a precipitações de hidretos, ocasionando falhas por ruptura após a sua formação. Normalmente, o hidreto trinca. A propagação dessa trinca pode não ocorrer, pois ela pode ser bloqueada

Figura 9 - Ilustração esquemática da propagação de trincas devido à formação de hidretos.



Fonte: autor.

pela matriz dútil, pode ocorrer de maneira descontínua devido à sucessiva formação e trincamento de hidretos na ponta da trinca, ou ainda, pode ocorrer por fratura dútil da matriz entre hidretos. Esse caso ocorre quando se tem formação de hidretos localizados por toda matriz (**Figura 9**).

Em caso de intensa contaminação de hidrogênio, a quantidade de hidretos formados pode ser muito elevada, de modo que o trincamento pode ocorrer pela ação das tensões geradas

pelas variações de volume, sem a necessidade de se ter tensões externas.

Além das tensões de tração, são muitas as variáveis que influenciam a susceptibilidade dos metais a este tipo de danificação, incluindo, concentração de hidrogênio, distribuição e orientação dos hidretos e temperatura.

A susceptibilidade cresce com o aumento de concentração de hidrogênio, devido ao fato de aumentar o número de hidretos formados por

unidade de volume e, conseqüentemente, diminuição do volume da matriz entre os hidretos. A orientação e distribuição de hidretos em relação à tensão aplicada tem influência marcante - hidretos alongados dispostos perpendicularmente às tensões de tração são muito mais nocivos do que aqueles dispostos paralelamente.

O aumento da temperatura diminui a susceptibilidade, pois os hidretos tornam-se dúcteis acima de uma certa temperatura. Além disso, a tração volumétrica dos hidretos diminui.

7.6 Corrosão sob tensão assistida por hidrogênio

A corrosão sob tensão é um processo destrutivo, por trincamento, de um metal ou liga, resultante da ação simultânea de um meio agressivo (em que o mesmo se encontre) e de tensões de tração estáticas, residuais ou devido a esforços externos, atuando em sua superfície. Nesse tipo de trincamento, a corrosão do metal desempenha um papel fundamental tanto para o início como para a propagação da trinca.

De maneira geral, os mecanismos de corrosão sob tensão podem ser agrupados em dois, a saber:

- mecanismos nos quais a polarização catódica diminui o desenvolvimento do processo.

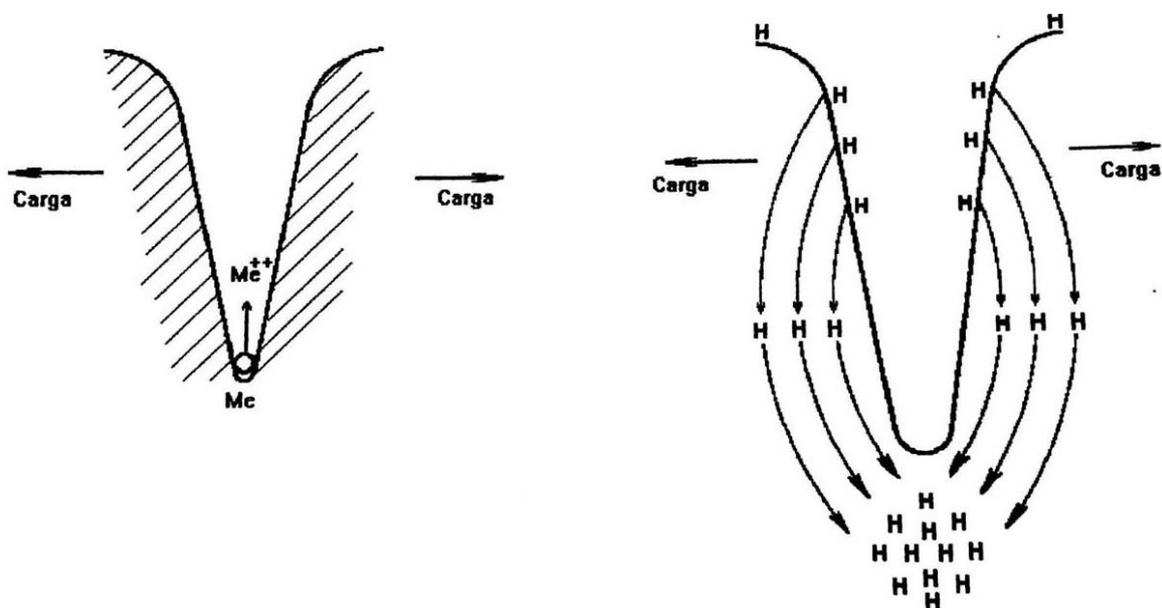
Nesses casos, a corrosão sob tensão está associada à dissolução localizada do metal na ponta da trinca. Alguns autores chamam esse tipo falha de corrosão sob tensão anódica;

- mecanismos nos quais a polarização catódica favorece o desenvolvimento do processo. Nestes casos, a corrosão sob tensão está associada à danificação por hidrogênio. Alguns autores chamam este tipo de falha de fragilização por hidrogênio.

Os dois grupos podem ser mais bem visualizados na **Figura 10**.

O primeiro mecanismo não será aqui abordado. O segundo mecanismo é devido ao fato de o hidrogênio gerado no processo corrosivo penetrar no metal, e difundir-se para as regiões de máxima triaxialidade de tensões da extremidade da trinca e aí danificar o metal segundo os mecanismos já descritos. A extremidade da trinca avança através da região danificada pelo hidrogênio até ser bloqueada pelo metal não afetado o qual, por sua vez, sofre danificação devido à concentração de tensões, permitindo assim a propagação da trinca.

Figura 10 - Ilustração esquemática dos dois mecanismos de corrosão sob tensão.



Fonte: autor.

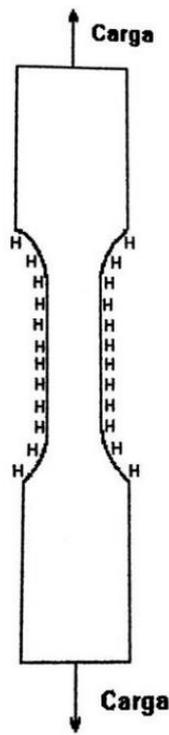
Esse tipo de danificação ocorre preferencialmente em metais cúbicos de corpo centrado, tais como aço-carbono e aços inoxidáveis martensíticos, sendo os casos mais conhecidos aqueles que ocorrem na indústria de petróleo devido à presença da água e gás sulfídrico.

7.7 Perda de ductilidade

Este tipo da danificação é observado quando metais, tais como aço-carbono, o aço inoxidável, ligas de níquel, de alumínio e de titânio, expostos a meios capazes de gerar hidrogênio atômico são submetidos à deformação, (Figura 11). Observa-se decréscimo no alongamento denotando perda de ductilidade. Nesse caso, o transporte de hidrogênio ocorre predominantemente por discordâncias. Esse efeito é:

- **tanto maior quanto maior e a produção de hidrogênio na superfície metálica:** isto aumenta a quantidade de hidrogênio incorporado e transportado, o que torna mais

Figura 11 – Ilustração esquemática de um ensaio de tração de um metal em contato com um meio capaz de gerar hidrogênio atômico (fonte de hidrogênio).



Fonte: autor.

fácil atingir a concentração crítica para ocorrência de falha;

- **máxima para uma dada temperatura que corresponde à máxima capacidade de transporte de hidrogênio pelas discordâncias:** para os aços, esta temperatura é próxima à ambiente;
- **atenuado com o aumento da velocidade da deformação:** para velocidades muito elevadas, o efeito do hidrogênio não se manifesta, pois, a ligação das discordâncias com o hidrogênio é rompida, conforme citado anteriormente.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1988. Revestimentos de zinco eletrodepositado sobre ferro ou aço. [NBR 10476](#). Rio de Janeiro. 17p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1989. Revestimentos de cádmio eletrodepositado sobre ferro ou aço. [NBR 10709](#). Rio de Janeiro. 17p.

CRAIG, B. Hydrogen damage. In: METALS handbook. 9 ed. Metals Park ASM, 1987. p.163-171.

JONES. J.M.V. Desidrogenação. Galtec Galvanotécnica/ Divisão Química, s.d. 29p.

FONNTANA. M.G. Corrosion Engineering. 3 ed. New York: Mc Graw-Hill, 1987. p. 143-152.

GIBALA, R.; DeMIGLO, D.S. Hydrogen in iron and steels: interactions, traps and crack path. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT ON HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIME, 1981. p. 113-122.

JOHNSON, H.H.; LIN, R.W. Hydrogen and deuterium trapping in iron. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIMS, 1981. p. 3-25

PRESOUYRE, G.M.; FIDELLE, J.P.; ARNOULD-LAURENT, R. Trap theory of hydrogen embrittlement: experimental investigations, in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIMS, 1981. p.27-36.

TIEN, J.K.; HAIR, S.V.; JENSEN, R.R. Dislocation sweeping of hydrogen and hydrogen embrittlement. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIMS, 1981. p.37-56.

THOMPSON, A.M.; BERNSTEIN, I.M. Microstructure, and hydrogen embrittlement, in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIME, 1981. p. 291-308.

TROIANO, A.R. The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behavior of metals. Transactions of the ASM, Chicago, v.52, p.54-78, 1960

DANIFICAÇÃO DE METAIS E LIGAS METÁLICAS POR HIDROGÊNIO – CASOS PRÁTICOS (PARTE II)

Zehbour Panossian

COMUNICADO: Este trabalho foi apresentado no CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 17., 1993, promovido pela ABRACO no Hotel Glória no Rio de Janeiro, na Sessão Ensino da Corrosão, em dois horários consecutivos (parte I e parte II) com apenas correção gramatical para enquadrá-lo dentro dos critérios da Nova Gramática da Língua Portuguesa. O conteúdo não sofreu qualquer alteração.

Resumo

Neste trabalho, são apresentadas medidas preventivas utilizadas no controle da danificação por hidrogênio, quais sejam: técnicas de descontaminação, seleção de materiais e controle das fontes de hidrogênio. Alguns casos práticos de danificação por hidrogênio também são aqui apresentados.

Palavras-chaves: corrosão, hidrogênio, danificação por hidrogênio, fragilização por hidrogênio.

Abstract

This paper presents preventive measures used to control hydrogen damage: decontamination techniques, material selection, and control of hydrogen sources. It also presents some practical cases of hydrogen damage.

Keywords: corrosion, hydrogen, hydrogen damage, hydrogen embrittlement.

1. Introdução

O controle de todos os tipos de danificação por hidrogênio não é uma tarefa fácil, visto que existe uma grande quantidade de formas de contaminação. A danificação só seria totalmente evitada, se não houvesse contato do hidrogênio atômico com a superfície dos metais. No entanto, isso nem sempre é possível.

Neste trabalho, estão apresentadas as medidas que podem ser utilizadas para minimizar este tipo de ataque e alguns casos práticos de danificação por hidrogênio, estudados pelo Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., IPT.

2. Prevenção da danificação por hidrogênio

As medidas preventivas para o controle da danificação por hidrogênio podem ser agrupadas em três ações, a saber: evitar a contaminação

por meio do controle das fontes de hidrogênio; adotar técnicas de descontaminação e/ou recuperação; seleção adequada de materiais.

2.1 Controle das fontes de hidrogênio

A danificação por hidrogênio é completamente evitada se não houver a contaminação. Na prática, são muitas as fontes de hidrogênio e o controle ideal é muitas vezes impraticável. No entanto, algumas medidas podem minimizar a contaminação. A **Tabela 1** apresenta as possíveis fontes de hidrogênio com as respectivas medidas de controle recomendadas.

2.2 Descontaminação e/ou recuperação

No caso de ser impossível evitar a contaminação por hidrogênio nas várias etapas de fabricação de um determinado componente, recomenda-se a adoção de técnicas de descontaminação. A desidrogenação é uma prática largamente adotada nos processos de eletrodeposição de metais e consiste em aquecer o componente revestido e

Tabela 1 - Medidas que podem ser adotadas para minimizar a contaminação com hidrogênio

FONTES	MEDIDAS PREVENTIVAS
Cal utilizada na fundição	Utilização de cal seco
Conversores de oxigênio	Utilização de oxigênio seco
Processos que utilizam arco voltaico	Evitar a utilização em dias de alta umidade relativa do ar
Revestimentos de eletrodos de soldagem	Armazenar os eletrodos aquecidos
Fluxo e gás protetor utilizados em soldagem	Evitar umidade no fluxo e no gás protetor
Óxidos e/ou impurezas presentes na superfície de um metal	Limpar adequadamente a superfície dos produtos metálicos a serem soldados ou forjados
Contato com gás hidrogênio	Utilizar as curvas de Nelson para compatibilizar o material com as condições de operação e/ou armazenamento (temperatura e pressão parcial de hidrogênio)
Eletrodeposição	Selecionar o revestimento e/ou tipo de banho de eletrodeposição com maior eficiência de corrente catódica. Por exemplo, os banhos ácidos de zinco produzem menor quantidade de hidrogênio do que os banhos alcalinos a base de cianetos. Evitar o uso de aditivos nos banhos de eletrodeposição que agem como "venenos", como por exemplo os polissulfetos
Decapagem	Usar inibidores que controlam a reação de redução de hidrogênio
Desengraxamento eletrolítico	Evitar desengraxamento eletrolítico catódico
Corrosão	Em sistemas fechados, usar inibidores adequados Evitar a exposição de metais em meios que contêm compostos como "venenos", como solução aquosa de sulfetos

assim mantê-lo por um certo período de tempo, a fim de que o hidrogênio se difunda em direção à superfície e escape para a atmosfera após a formação de gás hidrogênio. Para essa prática, alguns cuidados são recomendados:

- a desidrogenação deve ser efetuada no máximo até duas horas após a eletrodeposição, a fim de evitar e/ou minimizar o aprisionamento do hidrogênio atômico nos defeitos do metal de maneira irreversível;
- o tempo e a temperatura de aquecimento devem ser criteriosamente selecionados, sendo função da natureza do revestimento, do limite de resistência do metal do substrato e da máxima seção da peça. Para o caso do aço-carbono zincado ou cadmiado, utiliza-se a faixa de temperatura de (190 a 210) °C, variando-se o tempo em função do limite de resistência e a máxima seção. A **Tabela 2** apresenta as condições normalizadas pela ABNT NBR 10476 e ABNT NBR 10709.

É possível recuperar peças nas quais ocorreu formação de bolhas e/ou fissuras internas devido à formação de gás hidrogênio, aquecendo-a e submetendo-a ao forjamento. Dependendo das condições, é possível que ocorra o caldeamento, o gás hidrogênio dissocie-se, penetre no metal e, eventualmente, seja eliminado pelas paredes externas.

2.3 Seleção de materiais

A seleção de materiais é a prática mais adequada a ser adotada, principalmente nos

casos em que as fontes de hidrogênio existem durante a utilização dos componentes de aço. Existe na literatura um número inestimável de trabalhos com o objetivo de estudar a influência da composição e da microestrutura na susceptibilidade dos metais à danificação por hidrogênio. Essa tarefa é especialmente difícil, pois, conforme pode ser constatado na Parte I e nos itens anteriores, existe um número muito grande de variáveis envolvidas nos fenômenos de danificação por hidrogênio. Nesse particular, cabe ressaltar o trabalho de Thompson e Bernstein (1981). Esses autores dedicaram-se ao estudo de seleção de materiais e elaboraram um trabalho orientativo no qual eles não só apontam o efeito prejudicial ou benéfico de um dado elemento numa liga, mas também apresentam as razões baseadas nos vários modelos que tentam explicar a danificação por hidrogênio. Nesse trabalho, apenas os efeitos dos diferentes elementos presentes nas ligas serão apresentados sem as respectivas justificativas. A **Tabela 3** apresenta resumidamente os efeitos de diferentes elementos na danificação por hidrogênio para os aços ferríticos e martensíticos e, a **Tabela 4**, para os aços austeníticos.

O alumínio e suas ligas foram por muito tempo considerados imunes à danificação por hidrogênio. Recentemente¹, foi constatada a ocorrência de falhas atribuídas ao hidrogênio. Apenas as ligas que contêm zinco como elemento de liga (série 7000) foram consideradas

1. Lembrar que este artigo foi elaborado em 1993.

Tabela 2 - Tempo de desidrogenação em função da seção máxima da peça e do limite de resistência do substrato

Limite de resistência à tração (MPa)	Espessura máxima da seção da peça (mm)	Tempo mínimo de tratamento entre (190 a 210) °C (h)
500 a 1150	Menor que 12	2
	Entre 12 e 25	4
	Maior que 25	8
1150 a 1400	Menor que 12	4
	Entre 12 e 25	12
	Entre 25 e 40	24
	Maior que 40	Requer determinação experimental

Fonte: ABNT NBR 10476 e ABNT NBR 10709

Tabela 3 – Efeito dos diferentes elementos de liga na danificação por hidrogênio de aços ferríticos e martensíticos

Elemento	Efeito	Medida preventiva
Carbono e nitrogênio	Favorecem a danificação por hidrogênio	Controlar os teores utilizando os mínimos necessários para as propriedades mecânicas
Manganês	Mais prejudicial do que o carbono	Evitar o uso como elemento de adição
Silício	É benéfico tanto para os aços de alta como de baixa resistência	Recomenda-se o uso como elemento de liga
Molibdênio	É benéfico principalmente na presença de H ₂ S, quando presente em teores de até 0,75 %. Acima desse valor, pode ocorrer a formação da fase Mo ₂ C o que é prejudicial	Manter os teores abaixo de 0,75 %
Enxofre	Prejudicial	Reduzir ao máximo como impureza
Fósforo	Prejudicial	Reduzir ao máximo como impureza
Níquel	Seu efeito não está esclarecido. É prejudicial na presença de H ₂ S	Recomenda-se manter abaixo de 1 %
Cromo	É prejudicial particularmente em baixas concentrações	Evitar como elemento de adição
Titânio	É muito benéfico	Recomenda-se o uso como elemento de adição

Tabela 4 – Efeito dos diferentes elementos de liga na danificação por hidrogênio de aços austeníticos

Elemento	Efeito	Medida preventiva
Nitrogênio	Altamente prejudicial	Reduzir ao máximo
Fósforo	Altamente prejudicial	Reduzir ao máximo
Enxofre	Prejudicial	Reduzir ao máximo
Arsênio	Prejudicial	Evitar o uso como elemento de adição
Antimônio	Prejudicial	Evitar o uso
Bismuto	Prejudicial	Evitar o uso
Níquel	Benéfico acima de 8 %, oferecendo excelente desempenho acima de 45 %	Utilizar teores elevados tanto quanto possível sempre acima de 10 %
Cromo	É prejudicial para teores críticos próximos a 18 %. Para teores maiores e menores é benéfico	Evitar teores próximos a 18 %
Carbono	É prejudicial para teores críticos próximos a 0,06 %. Para teores maiores e menores é benéfico	Utilizar teores inferiores a 0,06 %, pois teores maiores afetam outras propriedades
Manganês	Seu efeito não está esclarecido. Provavelmente, é prejudicial.	-
Silício	É benéfico, especialmente acima de 4 %	Recomenda-se o uso acima de 4 %
Titânio	É benéfico acima de 2 %	Recomenda-se o uso acima de 2 %
Molibdênio	É prejudicial, especialmente para teores próximos a 1,5 %. Quando presente com cromo na sua concentração crítica, o efeito prejudicial é acentuado	Evitar o uso

as que apresentavam maior susceptibilidade à danificação por hidrogênio. Estudos mostraram que o zircônio e o arsênio aumentam a susceptibilidade à danificação por hidrogênio das ligas ternárias Al-Zn-Mg.

Para o cobre, considera-se que o oxigênio é um elemento muito prejudicial, recomendando-se a utilização do cobre desoxidado quando o mesmo apresenta possibilidade de falha por hidrogênio.

Entre as ligas de níquel, o Inconel e o Monel estão sendo cada vez mais utilizados. Até o momento de elaboração deste trabalho, as informações disponíveis na literatura sobre o efeito dos elementos de liga presentes nesses materiais eram muito escassas, seja como elementos de adição, seja como impurezas. Tanto o ferro como o cobre aumentam a resistência dessas ligas à danificação por hidrogênio, podendo ser utilizados como elementos de adição. Os elementos estanho, antimônio e aqueles considerados “venenos” (esses presentes mesmo em teores muito baixos, da ordem de ppm) aumentam a susceptibilidade à danificação por hidrogênio, devendo ser evitados.

As ligas de titânio comerciais são aquelas contendo fases α e β . A adição de elementos que estabilizam a formação da fase β , como molibdênio, vanádio, nióbio e tântalo, melhoraram a resistência dessas ligas, pois a fase β é mais resistente à danificação por hidrogênio. Os elementos manganês, cobalto e cromo são prejudiciais, quando presentes nessa fase. Os elementos alumínio, estanho e oxigênio, estabilizadores da fase α das ligas de titânio são

prejudiciais, devendo ser evitados. O alumínio é excepcionalmente prejudicial em concentrações superiores de (5 a 6) %, recomendando-se mantê-lo abaixo de 5 %.

A estrutura metalográfica e a presença de defeitos, no sentido definido na Parte I deste trabalho, também podem ser adotados como critérios para a seleção de materiais. Algumas estruturas são mais resistentes à danificação por hidrogênio, enquanto outras são altamente susceptíveis. A **Tabela 5** apresenta, para os aços e ligas de titânio, as estruturas mais e menos resistentes. Para as ligas de alumínio e níquel, não se encontraram estudos sistemáticos que apresentassem as estruturas mais resistentes.

Em relação aos defeitos, pode-se generalizar o fato de que quanto maior for o seu número e mais dispersos estiverem no metal, mais uniformemente o hidrogênio estará distribuído, sendo menos provável ter-se condições de se atingir a concentração crítica, de maneira localizada, para a ocorrência de falhas. Nesse contexto, estão incluídos os contornos de grão. Assim sendo, pode-se afirmar que quanto menor o tamanho de grão, maior será a resistência dos metais e ligas à danificação por hidrogênio.

3. Alguns casos práticos de danificação por hidrogênio

3.1 Primeiro caso prático

A **Figura 1** e a **Figura 2** mostram o aspecto de peças de aço zincadas e cromatizadas que

Tabela 5 - Critérios de seleção relacionados à estrutura de algumas ligas metálicas

Ligas metálicas	Estrutura mais resistente	Estrutura menos resistente
Aços ferríticos e martensíticos	Aços de alta resistência: martensita ou bainita temperada e revenida com granulação fina e carbonetos finos uniformemente distribuídos Aços de baixa resistência: estrutura esferoidizada com carbonetos uniformemente dispersos	Normalizada
Aços austeníticos	Presença de ferrita δ fina e dispersa	-
Ligas de titânio	Estrutura $\alpha + \beta$	Evitar precipitados de intermetálicos na fase β

Fonte: ABNT NBR 10476 e ABNT NBR 10709

apresentaram empolamento. Tais peças não eram desidrogenadas após a eletrodeposição, pois não apresentavam, em condições normais de utilização, falhas de danificação por hidrogênio.

Nessas peças, eram aplicados adesivos cuja cura era realizada por aquecimento a 150 °C durante (10 a 15) min. Normalmente, nenhum tipo de falha era observado. Porém, alguns lotes começaram a apresentar empolamento durante a cura do adesivo, conforme visto nas figuras mencionadas. Tais lotes quando reprocessados, após o deslocamento do zinco, não apresentavam mais falhas.

O exame metalográfico realizado nessas peças indicou que as bolhas se formaram na interface substrato/revestimento, conforme mostrado na Figura 3 e na Figura 4.

A formação de bolhas foi atribuída à falta de aderência localizada do revestimento, visto que nos locais onde formavam as bolhas, o substrato apresentava-se coberto por óxidos. O hidrogênio, que penetrava no metal durante a decapagem e a eletrodeposição de zinco, acumulava-se nos defeitos, nesse caso locais de não aderência metal/revestimento, formando gás hidrogênio e, conseqüentemente, bolhas. Isso ocorria durante o aquecimento, por ocasião da cura do adesivo, pois a difusão do hidrogênio era favorecida. O reprocessamento evitava a formação de bolhas, pois uma segunda decapagem era capaz de remover mais efetivamente a camada de óxidos presentes sobre o substrato. Eliminado o defeito (interface metal/revestimento), o hidrogênio não tendo locais preferenciais no metal, escapava para a atmosfera durante o aquecimento.

3.2 Segundo caso prático

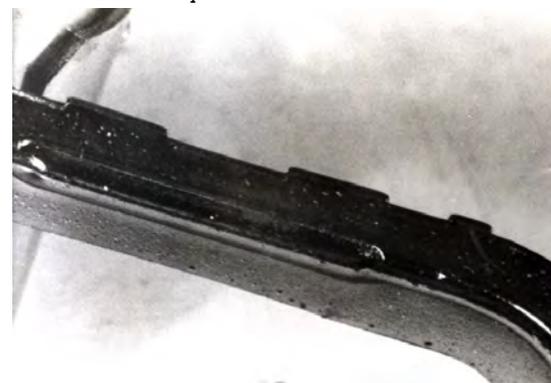
A **Figura 5** mostra o aspecto de uma mola de aço AISI 1070 (temperada e revenida) revestida com zinco por eletrodeposição. Molas deste tipo eram desidrogenadas após a eletrodeposição durante duas horas a uma temperatura de 180 °C. Apesar dessa prática, apresentavam rupturas em serviço. A **Figura 6** mostra o aspecto da superfície de fratura. Nota-se fratura intergranular apresentando

Figura 1 - Aspecto de uma carcaça de aço zincado e cromatizado que apresentava empolamento



Fonte: autor.

Figura 2 - Detalhe da carcaça da Figura 1 evidenciando o aspecto das bolhas



Fonte: autor.

Figura 3 - Aspecto da seção transversal da camada de zinco da carcaça mostrada na Figura 1 e Figura 2, numa região com bolhas. Nota-se que as mesmas se formaram entre o substrato e o revestimento. Sem ataque. Aumento: 250 x



Fonte: autor.

sinais de ductilidade, aspecto típico de fraturas causadas devido à presença de hidrogênio em contorno de grão.

Para confirmar a ação do hidrogênio na ruptura, análises realizadas indicaram a presença de

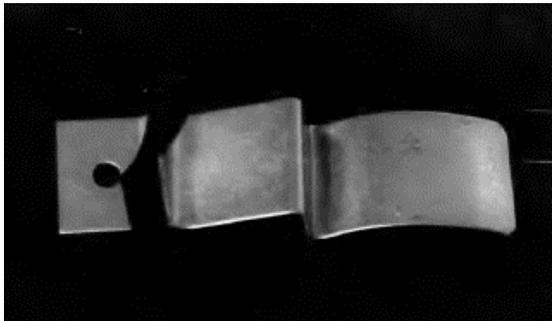
39 ppm deste elemento no metal, mesmo após a desidrogenação. Esse fato foi atribuído às condições inadequadas de descontaminação. De fato, para aços de alta resistência, é especificado um tempo mínimo de 4 h e temperaturas superiores a 180 °C (ver **Tabela 2**).

Figura 4 - Aspecto da seção transversal de uma carcaça que não apresentava bolhas. Nota-se falta de aderência do revestimento. Sem ataque. Aumento: 400 x



Fonte: autor.

Figura 5 - Aspecto de uma mola de aço zincado e cromatizado que sofre ruptura



Fonte: autor.

Figura 6 - Aspecto da superfície de fratura mostrada na Figura 5. Imagem de elétrons secundários obtida em MEV. Nota-se morfologia intergranular com sinais de deformação plástica localizada. Aumento: 1000 x



Fonte: autor.

3.3 Terceiro caso prático

As **Figura 7**, **Figura 8** e **Figura 9** mostram o aspecto de três tubos rompidos que pertenciam a uma caldeira aquotubular, de alta pressão, alimentada com água desmineralizada e desae-rada. Essa caldeira sofreu três contaminações ácidas, por acidente, durante a sua operação. Após essas contaminações, os tubos começaram a romper em ocasiões de solicitações máximas, porém dentro das condições de operação.

O exame visual das fraturas indicou ausência de estrição e sinais de intensa corrosão na superfície interna dos tubos junto à fratura (**Figura 10**). O exame metalográfico da seção transversal dos tubos mostrou a ocorrência de alterações estruturais nas regiões próximas à ruptura, conforme ilustrado na **Figura 11**.

A análise de um tubo não rompido, porém com corrosão intensa da superfície interna, também indicou a ocorrência de alterações estruturais localizadas que atingiram mais da metade da espessura do tubo (**Figura 12**). Um exame mais detalhado acusou a ocorrência de descarbonetação e presença de várias fissuras na região afetada conforme mostram as **Figura 13** e **Figura 14**.

A conclusão a que se chegou, baseado nos exames e em literatura consultada, foi de que a ruptura ocorreu devido à contaminação ácida que determinou a ocorrência de forte corrosão com produção de hidrogênio, que penetrou no metal. Esse concentrou-se em regiões preferenciais (alto fluxo de calor e/ou mudança de direção do fluxo de vapor) reagiu com o carbono - devido às condições favoráveis de temperatura - formando gás metano e diminuindo a resistência mecânica da região afetada. O gás formado determinou o aparecimento de microtrincas que comprometeram ainda mais a resistência mecânica do metal, que não suportando as tensões do gás somadas às tensões externas, por ocasião de aumento de carga, rompeu com fratura frágil.

Este tipo de danificação é extremamente prejudicial para uma caldeira, principalmente devido ao fato de não ser possível detectar o número e a localização dos tubos danificados, recomendando-se a total substituição dos mesmos.

Figura 7 – Aspecto da fratura do segundo tubo da caldeira que sofreu contaminações ácidas. Nota-se ausência de estrição do tubo denotando fratura frágil



Fonte: autor.

Figura 8 – Aspecto da fratura do terceiro tubo da caldeira que sofreu contaminações ácidas. Nota-se ausência de estrição do tubo denotando fratura frágil



Fonte: autor.

Figura 9 – Aspecto da fratura do terceiro tubo da caldeira que sofreu contaminações ácidas. Nota-se ausência de estrição do tubo denotando fratura frágil



Fonte: autor.

Figura 10 – Detalhe da superfície interna do primeiro tubo rompido junto à fratura. Pode-se verificar a ocorrência de corrosão acentuada



Fonte: autor.

Figura 11 – Aspecto macrográfico da seção transversal do segundo tubo rompido após ataque com iodo. Pode-se verificar o escurecimento do material na região da fratura característica de ataque por hidrogênio. Aumento 1 x



Fonte: autor.

Figura 12 – Aspecto macrográfico da seção transversal de um tubo que apresentava intensa corrosão na superfície interna, mas não tinha sofrido ruptura. Pode-se verificar, em algumas regiões, escurecimento característico de ataque por hidrogênio. Aumento 2 x



Fonte: autor.

Figura 13 – Aspecto da microestrutura da região escurecida do material do tubo mostrado na Figura 12. Nota-se descarbonetação parcial. Aumento 50 x. Ataque: Nital



Fonte: autor.

3.4 Quarto caso prático

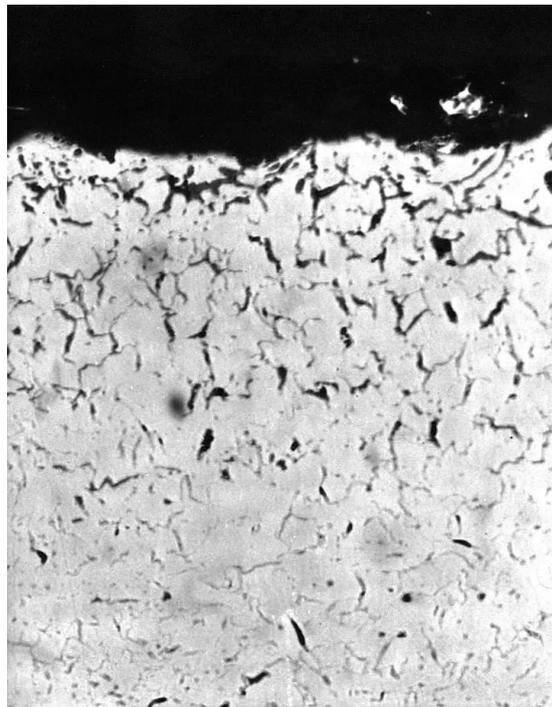
A Figura 15 mostra o aspecto de elementos de fixação de anodos de titânio utilizados na fabricação de cloro. Estes elementos, de cobre prateados, começaram a romper-se nos locais assinalados após praticamente um ano de sua instalação. O aspecto das fraturas de alguns desses elementos está mostrado na Figura 16. Nota-se fratura frágil.

Figura 15 – Aspecto dos elementos de fixação dos anodos de titânio. A seta indica a região onde ocorrem as rupturas



Fonte: autor.

Figura 14 – Aspecto micrográfico da região escurecida mostrado na Figura 12. Notam-se microtrincas que são maiores e mais numerosas junto à superfície interna. Aumento: 200 x. Ataque: Nital



Fonte: autor.

A superfície das fraturas foi examinada com o auxílio de microscópio eletrônico de varredura, o que indicou serem elas intergranulares conforme pode ser observado na Figura 17. Isso foi confirmado pelo exame metalográfico da seção transversal de um elemento em que a ruptura estava no seu estágio inicial (Figura 18).

A análise quantitativa do cobre dos elementos de fixação acusou a presença de 99,99 % de cobre, 150 ppm de oxigênio e 1,7 ppm de hidrogênio.

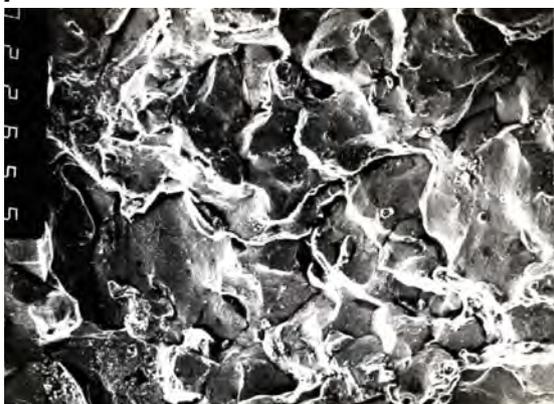
A ocorrência dessas rupturas foi atribuída à danificação por hidrogênio. Esse elemento reagiu com o oxigênio presente nos contornos de grão do cobre formando água. As tensões que determinaram a ruptura foram aquelas provenientes do torque aplicado nos fixadores - notar que as rupturas ocorreram na região de aumento de seção - somadas às tensões geradas pela água formada. Convém chamar a atenção que o tempo de ocorrência das falhas foi elevado (um ano), fato atribuído à baixa temperatura dos elementos de fixação que era mantida a valores próximos a 80 °C.

Figura 16 – Aspecto da superfície da fratura de alguns elementos de fixação. Nota-se que as fraturas, que ocorreram na região de transição do diâmetro maior para o diâmetro menor, apresentam caráter frágil



Fonte: autor.

Figura 17 – Aspecto da superfície da fratura de um dos elementos de fixação mostrados na Figura 16. Imagens de elétrons secundários obtida em MEV. Nota-se morfologia intergranular com sinais de deformação plástica localizada. Aumento 100 x



Fonte: autor.

O hidrogênio presente no metal teve sua origem provável em duas fontes: eletrodeposição da prata e produção do gás cloro. Essa última hipótese foi considerada devido ao fato de se ter detectada a presença de gás hidrogênio no cloro produzido.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1988. Revestimentos de zinco eletrodepositado sobre ferro ou aço. NBR 10476. Rio de Janeiro. 17p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1989. Revestimentos de cádmio eletrodepositado sobre ferro ou aço. NBR 10709. Rio de Janeiro. 17p.
- BERNSTEIN, I. M.; THOMPSON, A.W. Alloy design to resist hydrogen embrittlement (trabalho não publicado)

Figura 18 – Aspecto da seção transversal de uma amostra de elemento de fixação em que a ruptura estava se iniciando. Nota-se trincas intergranulares e ramificadas. Ataque: cloreto férrico. Aumento 50 x



Fonte: autor.

BERNSTEIN, I.M., Thompson, A.W. Hydrogen in metals: proceedings of an international conference on the effects of hydrogen on materials properties and selection and structural design, 23-27 September, 1973, Seven Springs Conference Center, Champion, Pa, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1974.

CRAIG, B. Hydrogen damage. In: METALS handbook. 9 ed. Metals Park ASM, 1987. p.163-171.

FONTANA. M.G. Corrosion Engineering. 3 ed. New York: Mc Graw-Hill, 1987. p. 143-152.

GIBALA, R.; De MIGLIO, D.S. Hydrogen in iron and steels: interactions, traps and crack path. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT ON HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIME, 1981. p. 113-122.

GOMES. J.M.V. Desidrogenação. Galtec Galvanotécnica/ Divisão Química, s.d. 29p.

JOHNSON, H.H.; LIN, R.W. Hydrogen and deuterium trapping in iron. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIMS, 1981. p. 3-25

PRESSOUYRE, G.M.; FIDELLE, J.P.; ARNOULD-LAURENT, R. Trap theory of hydrogen embrittlement: experimental investigations, in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIMS, 1981. p.27-36.

TIEN, J.K.; NAIR, S.V.; JENSEN, R.R. Dislocation sweeping of hydrogen and hydrogen embrittlement. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIMS, 1981. p.37-56.

THOMPSON, A.M.; BERNSTEIN, I.M. Microstructure, and hydrogen embrittlement, in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFECT OF HYDROGEN ON BEHAVIOR OF MATERIALS, 3; Moran, 1980. Proceedings... New York: AIME, 1981. p. 291-308.

TROIANO, A.R. The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behavior of metals. Transactions of the ASM, Chicago, v.52, p.54-78, 1960

REVISÃO DE POTENCIAIS SUBSTITUTOS SUSTENTÁVEIS PARA REVESTIMENTOS DE AÇO ELETROGALVANIZADO: AVANÇOS E DESAFIOS

Sandra Jesus Barradas Travassos¹, Gustavo Aristides Santana Martinez¹, Célia Regina Tomachuk¹

¹ Departamento de Ciências Básicas e Ambientais, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Estrada Municipal do Campinho, 100, CEP 12602-810, Lorena - SP, Brasil
e-mail: stravassos29@gmail.com, gustavo.martinez@usp.br, celiatomachuk@usp.br

1. Introdução

Os revestimentos de zinco emergem como solução eficaz para a proteção de substratos de aço contra a corrosão, funcionando como uma barreira física e atuando como ânodo de sacrifício, aumentando a durabilidade e integridade estrutural dos metais em ambientes corrosivos [1]. A eficácia desses revestimentos pode ser melhorada por meio de tratamentos de conversão química, que não apenas protegem contra a degradação, mas também melhoram a adesão de pinturas subsequentes [2].

Historicamente, os tratamentos de conversão convencionais utilizam compostos contendo íons de cromo hexavalente, reconhecidamente

tóxico e associado a riscos significativos à saúde humana e ao meio ambiente [3-5].

Com a entrada em vigor de regulamentações ambientais rigorosas, como a Norma Europeia EN 12476:2018, que proíbe o uso de Cr⁶⁺ em certos produtos e materiais, e a Diretiva Europeia 2000/53/CE, que restringe a utilização desses compostos em tratamentos para veículos, a pressão para adotar alternativas mais seguras tem crescido. Além da legislação, a conscientização crescente sobre os efeitos nocivos do Cr⁶⁺ tem impulsionado a pesquisa por tratamentos de conversão ambientalmente amigáveis, especialmente aplicáveis a superfícies de aço zincado [6-16]. Empresas que ainda usam Cr⁶⁺ precisam investir em tecnologia que reduza a exposição dos funcionários e o

A substituição do cromo hexavalente (Cr^{6+}) por alternativas mais seguras e sustentáveis é um desafio urgente para a indústria de tratamento de superfícies metálicas. O Cr^{6+} , amplamente utilizado em revestimentos de conversão para aço eletrolgalvanizado, é reconhecidamente tóxico e apresenta sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A necessidade de proteger o meio ambiente e a saúde dos trabalhadores, sem comprometer a qualidade dos revestimentos, impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias. Este artigo de revisão examina os principais tratamentos de conversão para aço eletrolgalvanizado, com foco na substituição do Cr^{6+} . A análise inicia-se com os tratamentos tradicionais à base de cromo, incluindo o hexavalente e o trivalente, descrevendo seus mecanismos, vantagens e desvantagens. O artigo então explora alternativas sustentáveis, como a fosfatização e o uso de sais de cobalto, terras raras, zircônio e silanos. A pesquisa destaca a eficácia e a viabilidade industrial dessas alternativas, com ênfase em soluções que minimizem os impactos ambientais. O artigo discute o papel da Inteligência Artificial (IA) e do Aprendizado de Máquina (AM) na otimização desses processos. Essas tecnologias emergentes oferecem oportunidades para a modelagem de processos, previsão de desempenho e aprimoramento contínuo dos métodos de tratamento, resultando em operações mais eficientes e com menor desperdício de materiais. A adoção de alternativas sustentáveis não apenas atende aos requisitos técnicos, mas também promove práticas industriais mais responsáveis.

Palavras-chaves: Tratamento de conversão. Cromatização. Aço eletrolgalvanizado. Sustentabilidade. Tratamento de superfície.

Review of potential sustainable substitutes for electrogalvanized steel: advances and challenge

The replacement of hexavalent chromium (Cr^{6+}) with safer and more sustainable alternatives is an urgent challenge for the metal surface treatment industry. Cr^{6+} , widely used in conversion coatings for electrogalvanized steel, is known to be toxic and poses significant risks to human health and the environment. The need to protect the environment and workers' health without compromising coating quality drives research and development of new technologies. This review article examines the main conversion treatments for electrogalvanized steel, focusing on the replacement of Cr^{6+} . The analysis begins with traditional chromium-based treatments, including hexavalent and trivalent chromium, describing their mechanisms, advantages, and disadvantages. The article then explores sustainable alternatives, such as phosphating and the use of cobalt salts, rare earths, zirconium, and silanes. The research highlights the efficacy and industrial feasibility of these alternatives, emphasizing solutions that minimize environmental impacts. The article also discusses the role of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) in optimizing these processes. These emerging technologies offer opportunities for process modeling, performance prediction, and continuous improvement of treatment methods, resulting in more efficient operations with reduced material waste. Adopting sustainable alternatives not only meets technical requirements but also promotes more responsible industrial practices.

Keywords: Conversion treatment. Chromating. Electrogalvanized steel. Sustainability. Surface treatment.

impacto no meio ambiente, ao mesmo tempo que procuram opções sustentáveis.

No Brasil, o uso de cromo hexavalente é regulamentado por órgãos como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), o Instituto Nacional do Câncer (INCA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Por exemplo, a Resolução RDC nº 481/1999 da ANVISA proíbe o uso de Cr^{6+} em cosméticos como tinturas de cabelo, enquanto normas do MTE limitam sua exposição no ambiente de trabalho, e o CONAMA estabelece

parâmetros para o descarte de resíduos que contenham cromo hexavalente.

A literatura técnica documenta uma variedade de alternativas para o tratamento de conversão, incluindo compostos à base de sais de cobalto [12, 16], titânio [17-19], zircônio [19-21], vanádio [22], molibdênio [23-24], elementos de terras raras como Ce, La, Ne, e Y [25], silanos [6-7, 26-27], entre outros [28]. Cada processo apresenta características únicas e promissoras, potencialmente viáveis como substitutos para os tratamentos convencionais com Cr^{6+} .

Além da pesquisa de novos materiais, a Inteligência Artificial (IA) e o Aprendizado de

Máquina (AM) têm emergido como ferramentas poderosas para otimizar os processos de tratamento de conversão. Por meio da modelagem, simulação e análise de dados, a IA pode auxiliar na identificação de formulações e parâmetros de processo que maximizem a resistência à corrosão e minimizem o impacto ambiental.

Neste contexto, este artigo propõe-se a explorar os potenciais substitutos que estão sob investigação, analisando suas propriedades anticorrosivas, eficiência de adesão e viabilidade industrial. A busca por soluções inovadoras e sustentáveis é essencial para assegurar a proteção dos substratos metálicos, em conformidade com diretrizes ambientais cada vez mais rigorosas, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais.

A estrutura deste artigo está organizada da seguinte forma: uma revisão breve sobre o estado da arte dos tratamentos de conversão, seguida por uma análise detalhada de cada alternativa ao Cr^{6+} , discussão sobre sustentabilidade e impacto ambiental das tecnologias, e perspectivas futuras com ênfase no papel da IA e do AM nesta área.

2. Tratamentos de conversão para aço eletrolgalvanizado

Os tratamentos de conversão química são fundamentais para aprimorar as propriedades do aço eletrolgalvanizado, aumentando significativamente sua resistência à corrosão e garantindo uma maior durabilidade e eficiência em aplicações variadas [1-2, 9, 29]. Contudo, a escolha do tratamento de conversão adequado depende de diversos fatores críticos, como a aplicação final do produto, o ambiente em que será utilizado e as especificações técnicas exigidas. Por exemplo, em ambientes altamente corrosivos, como áreas marinhas ou industriais, tratamentos com alta eficiência anticorrosiva são imprescindíveis para evitar a rápida deterioração do material e assegurar o desempenho adequado [30]. Além disso, aplicações em setores como o automotivo, o aeroespacial e a construção civil requerem tratamentos específicos que não apenas resistam à corrosão, mas também ofereçam compatibilidade com revestimentos adicionais, como tintas e camadas protetoras [31].

Sendo assim, a realização de ensaios de desempenho e a análise das condições de uso são essenciais para determinar a melhor abordagem a ser adotada.

Ensaio como o de exposição em câmara de névoa salina (ASTM B117), a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e a análise de polarização potenciodinâmica são amplamente utilizados para avaliar a eficácia dos tratamentos de conversão e comparar diferentes formulações [32-33]. Esses ensaios permitem não apenas a comparação da eficácia dos diferentes tratamentos, mas também a avaliação da durabilidade em cenários reais de uso, auxiliando na escolha de um tratamento que atenda tanto às normas de qualidade quanto às exigências ambientais.

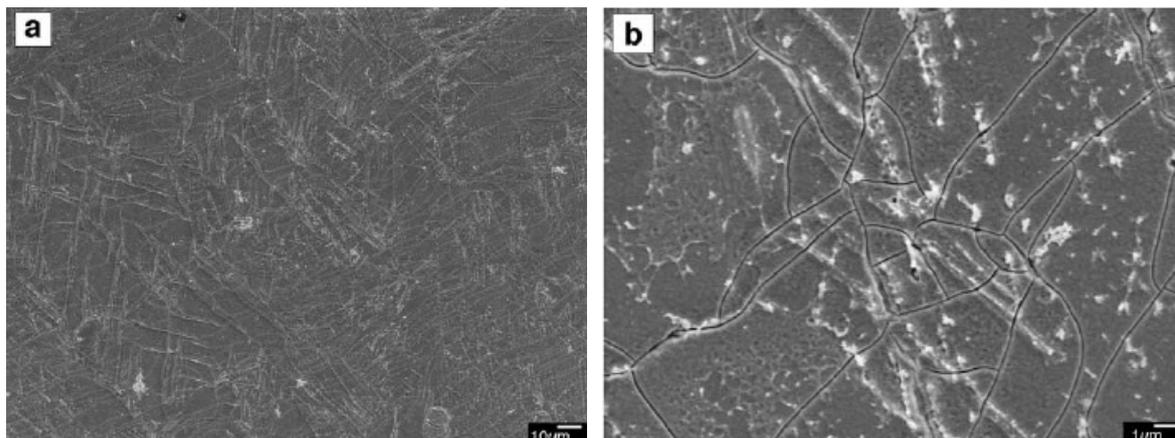
Neste artigo de revisão os tratamentos à base de íons cromo (Cr^{6+} , Cr^{3+}) e os tratamentos isentos de íons cromo (fosfatização, sais de cobalto, sais de terras raras, sais de zircônio, silanos) são contemplados.

2.1. Cromo hexavalente

O tratamento de conversão à base de cromato (Cr^{6+}) é realizado em soluções ácidas em pH que varia de 1,0 a 3,5. A espessura da camada resultante é de (200 a 300) nm, correspondendo a uma massa de 0,43 g/m². Essa camada é composta por óxidos e hidróxidos de zinco, Cr^{3+} e Cr^{6+} . Oferecem boa resistência à corrosão em vários ambientes e servem como excelente base para pintura [8, 11, 32, 34-35]. Todavia, são considerados substância cancerígena, têm sua utilização restrita pelas normas europeias [3-5]. Essa preocupação tem levado à pesquisa de alternativas menos prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana.

A formação da camada de conversão é descrita como uma reação redox entre os íons de Cr^{6+} oxidantes e o metal do substrato e ocorre em dois estágios: (I) dissolução do zinco na solução ácida de tratamento, que facilita a interação dos íons de Cr^{6+} com a superfície metálica (II) formação de um precipitado aderente de Cr^{3+} , que resulta da reação redox em que os íons de Cr^{6+} são reduzidos [8, 13, 36].

Figura 1 – Micrografia do substrato de zinco tratado com Cr^{6+} (60 s) em estufa por 30 min em diferentes aumentos [37].



Fonte: autor.

Esse processo é acompanhado por um aumento do pH local, devido ao consumo de íons de hidrogênio que participam da redução do Cr^{6+} , promovendo a precipitação de compostos insolúveis de cromo trivalente. Assim, o cromo na camada de conversão é encontrado em dois estados de oxidação, Cr^{3+} e Cr^{6+} , o que pode influenciar suas propriedades eletroquímicas e a resistência à corrosão.

A Figura 1 ilustra a micrografia do substrato de zinco tratado com Cr^{6+} [37]. Sendo a Figura 1(b) uma imagem ampliada da superfície representada na Figura 1(a). Observa-se microfissuras presentes na camada de conversão, característica típica desse revestimento, que pode ser atribuído às tensões de tração desenvolvidas durante os processos de deposição e ou secagem [36]. Camadas espessas à base de Cr^{6+} apresentam maior suscetibilidade à formação de microtrincas [35-37], o que pode comprometer a integridade da proteção anticorrosiva. Portanto, a otimização dos parâmetros de tratamento e o controle da espessura da camada são essenciais para maximizar a eficácia dos tratamentos de conversão e minimizar os defeitos associados.

2.2. Cromo trivalente

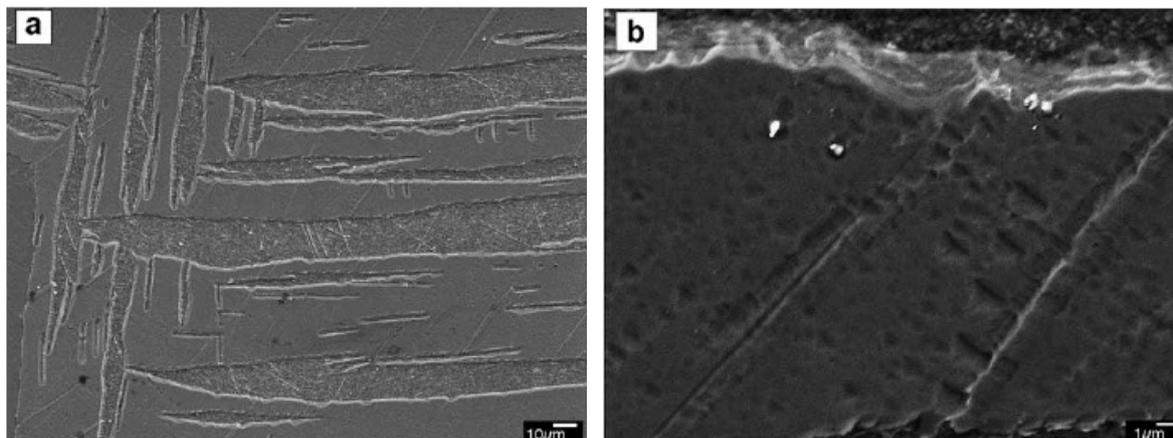
Os tratamentos de conversão à base de cromo trivalente são considerados alternativas comercialmente aceitáveis para certas aplicações, embora apresentem propriedades anticorrosivas parciais. Esta limitação tem

motivado a investigação de estratégias adicionais que busquem aprimorar a proteção oferecida por essas camadas de conversão [8, 11-13, 15-16, 37-43]. A adição de sais contendo cobalto [12, 16, 44-46] ou cério [47-48] ao eletrólito de conversão tem sido bastante explorada, onde cada um desses elementos desempenha um papel fundamental na melhoria das características anticorrosivas e na promoção da adesão de tintas em superfícies de aço zincado. Essa evolução representa um avanço significativo no campo dos tratamentos de superfície, com implicações profundas em termos de sustentabilidade, segurança e eficácia, especialmente em conformidade com regulamentações ambientais mais rigorosas que restringem o uso de compostos à base de Cr^{6+} .

No entanto, é importante ressaltar que o processo de conversão com Cr^{6+} envolve sua redução a Cr^{3+} e a formação de hidróxido por hidrólise sobre o metal exposto, que contribui para a proteção do substrato contra corrosão, mas, também, ajuda a “curar” eventuais defeitos presente na camada passivante formada [8, 13, 49]. Isso não é possível quando se utiliza banhos contendo somente Cr^{3+} , tornando a busca por alternativas ainda mais relevantes.

Adicionalmente, alguns banhos comerciais de Cr^{3+} , que utilizam em soluções de $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$, têm mostrado potencial para gerar Cr^{6+} ao

Figura 2 - Micrografia do substrato de zinco tratado com Cr^{3+} (60 s) seca em estufa por 30 min em diferentes aumentos [37].



Fonte: autor.

longo do tempo, devido à ação oxidante do nitrato. A temperatura de deposição e de secagem da camada de conversão, também podem promover a oxidação do Cr^{3+} [34]. Este fenômeno levanta preocupações sobre a segurança ambiental, já que a conversão para Cr^{6+} reduz os ganhos de sustentabilidade esperados com o uso de Cr^{3+} .

A Figura 2 apresenta a micrografia do substrato de zinco submetido ao tratamento com Cr^{3+} [37]. A Figura 2(a) mostra uma visão geral da superfície do revestimento. Nota-se uma mudança na textura da superfície, com algumas áreas apresentando uma textura mais lisa. A Figura 2(b) expande uma região particular da Figura 2(a), focando uma área de ataque preferida. Diferentemente das camadas que contêm Cr^{6+} (Figura 1), não foram detectadas fissuras. Contudo, notam-se regiões com ataque predileto, indicando que a formação da camada, no processo de Cr^{3+} , é afetada pela disposição dos grãos de zinco individuais [37]. Ao longo da deposição da camada, a composição química e a estrutura microscópica da camada de conversão se alteram dinamicamente conforme o tempo de imersão [15-16, 37, 42-43]. Assim, um controle rigoroso dos parâmetros do processo, como o tempo de imersão e a temperatura do banho, podem afetar de maneira significativa as características do revestimento final.

Pesquisas recentes têm explorado a combinação de Cr^{3+} com nanopartículas de óxido

metálico para melhorar ainda mais a proteção anticorrosiva, além de alterar as propriedades ópticas da superfície tratada [50]. O uso de aditivos orgânicos também tem sido investigado para aumentar a durabilidade e a resistência à corrosão das camadas de conversão à base de Cr^{3+} [8, 13].

Ressalta-se que, embora os tratamentos de conversão à base de Cr^{3+} representem um avanço importante em relação aos métodos tradicionais que utilizam Cr^{6+} , a pesquisa contínua em aditivos e modificações de processos é essencial para otimizar a eficácia e a sustentabilidade desses tratamentos, assegurando a proteção adequada do material zincado em aplicações industriais e comerciais.

2.3. Fosfatização

A fosfatização é um processo de tratamento químico conhecido há mais de um século, ganhou destaque durante a Segunda Guerra Mundial, impulsionado pela intensificação da mecanização e pelo aumento no uso de metais e suas ligas [51]. Mesmo com o fim do conflito, o processo de fosfatização não perdeu relevância: os grandes avanços de tecnologia e processos fabris conquistados durante os anos de guerra deram continuidade ao aumento do consumo de metais, que ao invés de serem destinados aos esforços da guerra passaram a ser utilizados na modernização e reconstrução, em especial de fábricas. Até os dias de hoje, a fosfatização

ainda é estudada e melhorias são desenvolvidas de forma contínua [8, 13, 52-57].

Trata-se da conversão do metal em um fosfato insolúvel do íon metálico; o fosfato insolúvel deposita-se sobre o metal modificando as suas propriedades superficiais. Este filme é formado por meio de reação eletroquímica em um ambiente com composição química controlada, onde os produtos da corrosão atuam como agentes protetores [53]. Devido à área superficial e ao volume de peças a serem tratadas, o processo de fosfatização requer grandes quantidades de água, gerando resíduos sólidos e efluentes líquidos. O resíduo gerado durante a fosfatização contém íons fosfato, que podem contribuir para a eutrofização das águas [55].

A técnica de fosfatização pode ser classificada de acordo com o tipo de cristal formado, podendo resultar em camadas cristalinas ou amorfas. A camada cristalina, que geralmente é preferida, oferece uma proteção mais robusta e duradoura, enquanto a amorfa é frequentemente utilizada para proteção temporária contra a corrosão ou como uma opção de custo reduzido para pinturas [56].

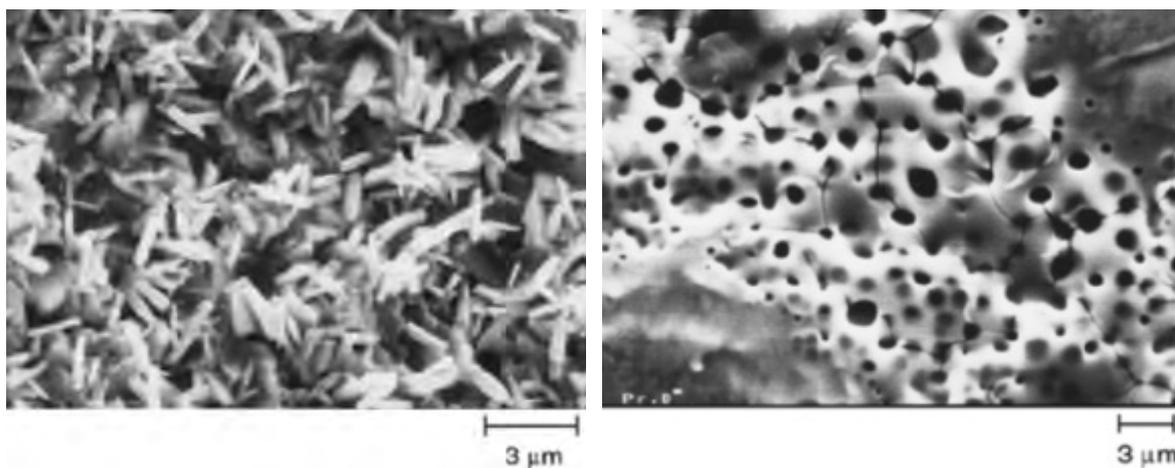
Os dois tipos de camadas, cristalina e amorfa, são apresentadas na Figura 3 [56].

Existem diversos tipos de camadas fosfatizadas, algumas amplamente utilizadas em escala

industrial, outras menos e algumas ainda em desenvolvimento sem aplicação industrial estabelecida. Exemplos desses processos incluem a fosfatização à base de fosfato de ferro; fosfato de zinco e; fosfato de manganês. É importante ressaltar que, embora esses nomes sejam usados para diferenciá-las, as camadas não são formadas exclusivamente por apenas um único tipo de fosfato (seja ferro, zinco ou manganês). Em vez disso, são compostas por uma combinação complexa de diferentes sais de fosfato, resultando em propriedades variadas que podem ser otimizadas para atender a necessidades específicas de proteção e aderência em diversos contextos industriais [53, 57].

- **Fosfato de Ferro:** foi um dos primeiros processos comercialmente disponíveis, caracterizado por um revestimento opaco de coloração cinza escuro. Atualmente, banhos modernos incluem aditivos como fosfatos de metais alcalinos ou de amônio, além de aceleradores. A base da camada é uma mistura de fosfato de ferro e óxido de ferro (magnetita), e essas camadas possuem um bom custo-benefício, sendo eficientes em processos que eliminam a necessidade de desengraxe.
- **Fosfato de Zinco:** é amplamente utilizado, especialmente em indústrias automobilísticas, devido às altas exigências de proteção anticorrosiva e estética. Os revestimentos

Figura 3 - Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura: (a) camada de fosfato cristalino e, (b) camada de fosfato amorfo, aplicadas sobre aço carbono [56].



Fonte: autor.

são geralmente cristalinos e podem apresentar variantes em sua composição, com uma estrutura interna rica em ferro na camada mais próxima do substrato e ácido fosfórico como componente vital. A coloração dos revestimentos de fosfato de zinco varia de cinza claro a cinza escuro e, apesar de sua resistência à corrosão, estas camadas ainda não apresentam boa resistência a altas temperaturas.

- **Fosfato de Manganês:** obtidas por imersão a temperaturas elevadas (85°C a 95°C), as camadas de fosfato de manganês são conhecidas por sua excelente resistência à abrasão e corrosão. Este procedimento é especialmente útil em aplicações que requerem proteção sob condições de temperatura extremas, podendo suportar temperaturas de até 200°C. A coloração característica das camadas de manganês é uma tonalidade preta com um acabamento brilhante.

O processo de fosfatização, portanto, é um tratamento essencial na indústria de metais, contribui para aumentar a vida útil e a resistência à corrosão dos componentes tratados. A literatura tem mostrado que o uso de aditivos como Fe, Mn, Ca, Cu, Ni, Co e metais de terras raras (TR), podem funcionar como importantes aceleradores na fosfatização [52, 54, 58-59]. Esses aceleradores químicos não apenas reduzem o tempo necessário para a formação da camada, mas também possibilitam que o processo ocorra a temperaturas mais baixas, muitas vezes à temperatura ambiente, o que representa uma significativa economia de energia e recursos.

Su e Lin [60] investigaram a adição de Ni²⁺ e de Mn²⁺, de forma independente, no banho de fosfatização de zinco. Observaram que esses íons desempenham papéis distintos na formação da camada protetora. O Ni²⁺ foi reduzido pelo Zn, promovendo a nucleação de hopeita, enquanto o Mn²⁺ intensificou a nucleação e aumentou a interação com espécies reagentes durante o processo. Adicionalmente, tanto o Ni²⁺ quanto o Mn²⁺ contribuíram para a diminuição do tamanho do grão e da porosidade,

o que, por sua vez, aumentou a resistência à corrosão do revestimento de fosfato.

An e colaboradores [61] investigaram camadas de fosfatização submetidas a um pós-tratamento de selagem com solução de silicato, visando avaliar seu impacto na resistência à corrosão de aço eletrolgalvanizado. Os resultados mostraram que, durante o processo de fosfatização, formaram-se cristais de fosfato porosos, os quais foram eficazmente preenchidos pela presença de silicato de sódio, formando uma camada contínua de filme de silicato sobre o revestimento. A selagem proporcionou uma melhoria significativa na resistência à corrosão, reduzindo a densidade de corrosão em uma ordem de magnitude. O estudo também destacou que a oxidação anódica e a redução catódica do zinco foram inibidas, resultando em uma menor dissolução ativa do zinco, o que contribuiu para uma proteção eficaz contra a corrosão do aço eletrolgalvanizado.

A evolução contínua das técnicas de fosfatização, alimentada pela pesquisa e pelo desenvolvimento de novos métodos e modificadores, ressalta a adaptabilidade e a relevância desse processo, que continua a desempenhar um papel crucial em diversas aplicações, principalmente nas indústrias automotiva e de maquinaria. As inovações nesse campo [62-64] prometem aprimorar ainda mais a eficácia das camadas fosfatizadas, visando um equilíbrio entre custo e desempenho, o que é crucial em um contexto industrial competitivo.

2.4. Sais de cobalto

A adição de sais de cobalto no banho de tratamento de conversão à base de cromo trivalente apresenta vantagens [8, 12-13, 16, 44-46], a saber:

- estabilidade química que contribui significativamente para a durabilidade da camada de conversão. Isso resulta em uma maior resistência à corrosão e ao desgaste, prolongando a vida útil do revestimento.
- aumento da aderência de pinturas e revestimentos aplicados sobre o aço. A interação entre a camada de conversão e os materiais subsequentes é crucial para evitar descascamentos e falhas no revestimento.

- melhoria na resistência à corrosão especialmente em ambientes agressivos. Isso é fundamental para aplicações em indústrias como automotiva, construção e eletroeletrônica.

Apesar das vantagens, a adição de íons de cobalto também apresenta desvantagens, a saber:

- **controle de banho:** um dos principais desafios. O excesso de íons de cobalto pode levar a uma formação não uniforme da camada de conversão, resultando em reduções na qualidade do revestimento. Além disso, o controle constante do banho é necessário para garantir a consistência do processo.
- **custo:** sais de cobalto é relativamente caro e seu preço pode ser volátil. Isso pode impactar a viabilidade econômica do tratamento em larga escala.
- **questões ambientais:** o cobalto, em concentrações elevadas, pode ser tóxico, levantando preocupações sobre a segurança ambiental e a saúde dos trabalhadores envolvidos no processo. A gestão e descarte adequado dos resíduos gerados pelo processo são, portanto, fundamentais.
- **regulamentação:** devido as implicações ambientais e de saúde, existem regulamentações crescentes sobre o uso de metais pesados como o cobalto. A conformidade com normas ambientais é uma consideração importante para a indústria.

Cho, Rho e Kwon [16] investigaram a camada de conversão obtida a partir de banho contendo Cr^{3+} e Co^{2+} e, identificaram microfissuras na superfície do revestimento. Notaram que a densidade dessas microfissuras e a espessura do revestimento estão diretamente relacionadas com o tempo de imersão e ao pH do banho. Com o aumento da espessura, a densidade de corrente de corrosão diminui resultando em uma maior resistência à corrosão. A melhor condição identificada foi pH 1,7, tempo de imersão de 40 s e, temperatura de secagem a 40°C a 4 min.

Embora existam vantagens significativas, como estabilidade química e aumento da resistência à corrosão, desafios como o controle do banho,

custos e questões ambientais não podem ser ignorados. Portanto, é essencial continuar a pesquisa e o desenvolvimento de métodos que maximizem os benefícios do cobalto enquanto minimiza seus impactos negativos, buscando alternativas sustentáveis e econômicas para o tratamento de superfícies metálicas.

2.5. Sais de terras raras

A eficácia dos sais de terras raras (TR), especialmente Ce e La, como inibidores de corrosão ou em tratamentos de conversão, tem sido consideravelmente investigada como potenciais alternativas isentas de cromo [8, 13, 47-48, 65-67].

Tratamentos de conversão à base de cério [68-77] têm demonstrado resultados significativos no que diz respeito à proteção contra a corrosão, por meio da inibição e da formação de camadas protetoras que melhoram a adesão de recobrimentos. O óxido de cério (CeO_2) destaca-se por suas propriedades de resistência à corrosão e pela capacidade de formar ligas estáveis com o zinco, resultando em uma barreira eficiente contra o ataque corrosivo.

Além disso, as pesquisas de Song e Manself [75] e de Aramaki [76] demonstraram grande potencial na aplicação de *primers* à base de óxido de cério sobre superfícies zincadas, contribuindo para a compreensão do comportamento eletroquímico em sistemas de eletrogalvanizado. Esses estudos pré-definiram conceitos importantes para a implementação de tratamentos que melhoram a durabilidade e a resistência à corrosão das superfícies metálicas.

Entretanto, para alcançar um desempenho ótimo dos tratamentos de conversão com sais de cério, são necessários ajustes nos processos de aplicação, bem como nas composições dos banhos. Variações nas concentrações de sais, nos parâmetros de temperatura e tempo de imersão, e nas condições de pH podem impactar significativamente a qualidade da camada formada, sua adesão e, conseqüentemente, sua eficiência na proteção contra a corrosão [69, 73-75].

É relevante considerar a integração de técnicas de caracterização avançadas, como espectroscopia de fotoelétrons de raios X

(XPS) e microscopia eletrônica de varredura (SEM), para compreender melhor as interações entre os sais de cério e as superfícies de zinco e para otimizar os processos de conversão [35]. Esses estudos adicionais permitem identificar as condições ideais para a aplicação de tratamentos de conversão, maximizando assim a proteção anticorrosiva e aumentando a vida útil dos componentes metálicos tratados.

Além disso, a avaliação da sustentabilidade e a análise do ciclo de vida dos processos envolvendo sais de cério é fundamental, uma vez que a redução do impacto ambiental é uma preocupação crescente na indústria. Portanto, a pesquisa contínua nessa área poderá abrir novas oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e ambientalmente responsáveis no tratamento de proteção de superfícies metálicas e composições dos banhos ainda são necessárias para atingir os resultados desejados.

2.6. Sais de Zircônio

Nos últimos anos, houve um crescente interesse na utilização de metais do grupo IIIB (como o boro e o gálio), IVB (como o titânio e o zircônio) e VB (como o vanádio e o nióbio) da tabela periódica para melhorar processos de proteção de superfícies metálicas. Dentre esses, o zircônio e o titânio se destacam por apresentarem uma combinação ideal de propriedades que promovem eficácias funcionais e viabilidade econômica na indústria de tratamento de superfícies, especialmente em processos de conversão aplicados em eletrolgalvanizado [8, 13, 17-22, 78-86].

Estes revestimentos são às vezes referidos como nanocerâmicos, pois são formados como um produto sólido inorgânico composto por elementos metálicos e não metálicos, apresentando cristallitos com dimensões abaixo de 100 nm. Pela sua inércia química, fornecem uma camada protetora altamente densa e uniforme na superfície dos materiais, isolando-os efetivamente de agentes corrosivos como umidade, produtos químicos e sais [81,83]. Para minimizar o tensionamento nas camadas obtidas, muitas vezes são adicionados plastificantes e até mesmo silanos [-87].

Os tratamentos de conversão à base de zircônio oferecem vantagens significativas em relação aos métodos convencionais contendo cromatos [13, 21]. Esses produtos geralmente contêm, além do metal de interesse, uma fonte de flúor livre e uma fonte de flúor que está quimicamente ligada aos metais. O flúor livre atua como um agente que promove o ataque ao substrato metálico, facilitando a deposição dos óxidos metálicos formados pelo zircônio ou titânio presentes na solução [79-82, 85]. Esse processo resulta na formação de uma camada protetora de óxido metálico de espessura nanométrica, que proporciona uma segurança adicional contra a corrosão.

A implementação de tratamentos de conversão à base de zircônio não apenas proporciona proteção eficaz contra corrosão, mas também leva a grandes reduções de custos operacionais e respeito ao meio ambiente [8, 13]. Entre os principais benefícios estão:

- **redução no consumo:** as soluções de tratamento de conversão são formuladas de forma a minimizar a quantidade de material utilizado na aplicação, abrangendo apenas o necessário para uma cobertura eficaz.
- **baixo consumo de água e energia:** os processos exigem quantidades reduzidas de água e energia elétrica. Processo de conversão a quente, tradicionalmente utilizado, pode ser substituído por processos a frio ou em temperaturas moderadas, otimizando o uso de recursos.
- **processos acelerados:** o tempo de imersão e os ciclos de tratamento são significativamente mais curtos. Isso não só aumenta a eficiência de produção, mas também melhora a produtividade das linhas de montagem.
- **menor geração de resíduos:** devido ao menor consumo de produtos químicos e à natureza dos tratamentos, a quantidade de resíduos gerados é reduzida, facilitando a gestão e o descarte.

Os tratamentos de conversão à base de zircônio são versáteis e podem ser aplicados não apenas a revestimentos de zinco, tendo

mostrado eficiência sobre diversos substratos [84-85], incluindo:

- alumínio: o zircônio forma uma camada passivante que protege contra a corrosão, melhorando a durabilidade de componentes em ambientes agressivos.
- aço laminado a frio: a aplicação de tratamentos em aço laminado garante uma camada de proteção que melhora a adesão de revestimentos posteriores, como pintura ou galvanização.
- aço galvanizado: em revestimentos já galvanizados, o tratamento à base de zircônio pode aumentar a resistência da camada de zinco, prolongando a vida útil do material.

A utilização de sais de zircônio no tratamento de conversão sobre eletro galvanizado representa um avanço significativo nas tecnologias de proteção de superfícies metálicas, conjugando eficiência, economia e sustentabilidade. Como a indústria continua a buscar métodos que reduzam seu impacto ambiental enquanto atendem a requisitos de durabilidade e eficiência, os tratamentos à base de zircônio surgem como uma solução promissora que satisfaz essas demandas. A pesquisa e inovação contínuas nesse campo são essenciais para otimizar ainda mais os processos e expandir as suas aplicações na indústria [86].

2.7 Silanos

Os silanos são compostos químicos que possuem uma estrutura baseada em silício, sendo classificados como silanos simples ($-\text{SiH}_3$) ou bissilanos ($-\text{Si}_2\text{H}_5$). Eles têm se destacado no tratamento de conversão para eletro galvanizados devido aos seus benefícios ambientais e técnicos [6-7, 87-90]. Em comparação aos processos tradicionais de fosfatização, os silanos oferecem um acabamento mais ecológico, com menor geração de resíduos, reduzido consumo de energia e de água, embora sua eficácia dependa fortemente da qualidade da água utilizada no processo. A água que contém alto teor de cálcio e magnésio pode afetar a adesão e a formação do filme de silano na superfície [87-88].

Os silanos de primeira geração eram predominantemente baseados na aderência física do depósito formado sobre o substrato metálico. Essa abordagem, embora funcional, apresentava limitações em termos de durabilidade e resistência ao desgaste. Com o avanço da tecnologia, a segunda geração de silanos surgiu, oferecendo uma melhoria significativa na adesão. Esses silanos promovem não apenas a aderência física, mas também uma interação química com a superfície do substrato, resultando em uma camada de silano que se liga quimicamente ao material base [88, 91].

Essa interligação é facilitada pela formação de ligações Si-O-Si, que criam uma rede tridimensional estável e robusta. A camada resultante proporciona não apenas uma aderência superior, mas também uma proteção eficaz contra a corrosão, prolongando a vida útil do revestimento eletro galvanizado. Além disso, os silanos de segunda geração podem ser formulados para melhorar a resistência à degradação em ambientes agressivos e podem ser adaptados para diferentes aplicações, incluindo ambientes industriais e automotivos [90].

Os silanos quando aplicados em conjunto com os tratamentos à base de cério, ocorre uma sinergia que potencializa a formação de uma barreira protetora ainda mais eficaz, pois há formação de uma rede molecular que não só encapsula as partículas de cério, mas também melhora a aderência e a integridade da camada protetora. Essa interação promove um aumento na resistência à corrosão, atuando como uma primeira linha de defesa contra fatores ambientais, como umidade, salinidade e substâncias químicas agressivas [27, 77].

Diversos métodos têm sido propostos para a formação dessas camadas inertes, destacando-se o processo sol-gel [91-93], a eletrodeposição, a deposição física ou química da fase vapor e a spray-pirólise.

Após o processo sol-gel, que consiste na transformação de uma solução precursora em uma rede sólida semelhante a um gel por hidrólise e condensação de alcóxidos metálicos [93], é comum a necessidade de um tratamento

térmico para conferir caráter cerâmico ao revestimento. Esses revestimentos oferecem boa adesão e podem ser adaptados a diversas composições e espessuras [87, 90].

Nguyen e colaboradores [93] investigaram o desempenho da resistência à corrosão de camadas obtidas pelo processo sol-gel híbrido orgânico/inorgânico de Si/Zr dopado com várias concentrações de nitrato de cério aplicado sobre aço galvanizado a quente. A solução de sol-gel de Si/Zr foi preparada a partir de tetraetila ortossilicato (TEOS), 3-(trimetoxisilil) propil metacrilato (MAPTMS) e propóxido de zircônio (IV) (ZTP) como precursores. Os resultados mostraram que os teores de nitrato de cério influenciam significativamente o comportamento protetor do revestimento sol-gel a longo prazo. Entre as condições analisadas, o sol-gel dopado com 650 ppm de Ce^{3+} foi a que demonstrou melhor desempenho.

O uso de silanos no tratamento de conversão para aços eletro galvanizados, portanto, representa uma inovação importante na busca por processos mais sustentáveis e eficientes. A evolução do desenvolvimento desses compostos tem permitido otimizar suas propriedades, aumentando a resistência e a durabilidade dos revestimentos, e contribuindo para a proteção ambiental. Essa combinação de vantagens

torna os silanos uma alternativa atraente aos tratamentos convencionais, atendendo às demandas da indústria moderna.

3. Sustentabilidade na substituição do cromo hexavalente

A sustentabilidade no setor de tratamento de superfície vai além da simples substituição do íon cromo hexavalente para atender à demanda regulatória. Essa abordagem implica uma análise abrangente dos impactos ao longo do ciclo de vida dos materiais utilizados, promovendo, assim, a competitividade no mercado global. Deste modo, a adoção de substitutos deve considerar não apenas a resistência à corrosão, mas também fatores como a minimização da geração de resíduo, o uso eficiente de recursos e a segurança dos trabalhadores.

Com base no exposto, o Quadro 1 apresenta uma análise comparativa dos tratamentos de conversão, destacando aspectos como a resistência à corrosão, sustentabilidade, geração de resíduos e outras considerações pertinentes. Entretanto, é fundamental otimizar os parâmetros de deposição para alcançar os melhores resultados possíveis.

Vale ressaltar que a pesquisa e desenvolvimento de soluções sustentáveis são fases cruciais para

Quadro 1: Análise comparativa de tratamentos de conversão aplicados em aços eletro galvanizados

Tratamento de conversão	Resistência à corrosão	Sustentabilidade	Geração de Resíduos	Custo	Considerações pertinentes
cromo hexavalente	alta	baixa	alta	moderado	tóxico, regulamentações rigorosas
cromo trivalente	moderada	moderada	moderada	moderado	pode gerar Cr^{6+} ao longo do tempo
fosfatização	alta	baixa	alta	baixo	questões ambientais e regulatórias
Cr^{3+} + sais de cobalto	moderada a alta	moderada	moderada	alto	questões ambientais e regulatórias
sais de terras raras	moderada a alta	moderada	baixa	alto	eficácia promissora, mas impacto da extração
sais de zircônio	moderada a alta	moderada a alta	baixa	moderado a alto	redução significativa no consumo de recursos
silanos	moderada a alta	moderada	baixa	alto	dependente da qualidade da água utilizada

Fonte: Autor

assegurar que as alternativas adotadas contribuam efetivamente para um futuro mais responsável e ambientalmente amigável. A transição para novas tecnologias requer investimentos significativos em P&D, treinamento do pessoal e adaptações na infraestrutura existente. Apesar desses desafios, os benefícios são claros e tangíveis. A implementação de tratamentos menos prejudiciais ao meio ambiente pode resultar em redução de custos relacionados à conformidade regulatória, além de aprimorar a imagem e a aceitação da empresa entre um público cada vez mais consciente sobre questões sustentáveis.

Além disso, empresas que lideram essa transição em direção a processos mais limpos e seguros tendem a se destacar em um cenário onde a responsabilidade social e ambiental assume um papel central nas decisões de consumidores e investidores. Essas iniciativas não apenas criam vantagens competitivas, mas também promovem uma cultura de inovação e responsabilidade que pode inspirar toda a indústria a seguir o mesmo caminho. Assim, a adoção de práticas sustentáveis representa não apenas uma obrigação, mas uma oportunidade para redefinir o futuro do setor de tratamento de superfície de forma integral e positiva.

4. Inteligência artificial e aprendizado de máquina

A integração da Inteligência Artificial (IA) e do Aprendizado de Máquina (AM) ao setor de tratamento de superfícies apresenta oportunidades promissoras e inovadoras, embora ainda esteja em estágio exploratório.

No estado da arte atual, o número de estudos sobre o uso dessas tecnologias é relativamente limitado, tanto na área da corrosão [94-96] quanto em setores específicos, como o de petróleo e gás [97-100], no desenvolvimento de ligas metálicas [101-102] e, na eletroquímica [103-105]. No entanto, o potencial transformador dessas ferramentas já é evidente.

Os algoritmos de AM têm se mostrado eficazes na otimização de variáveis fundamentais, como tempo, temperatura e composição dos

banhos químicos [94], com o objetivo de melhorar a resistência à corrosão e minimizar os impactos ambientais. Essa abordagem permite a identificação de novas formulações e processos mais eficazes. Em aplicações específicas, o AM tem sido utilizado para prever a corrosão em oleodutos, viabilizando ações de manutenção preventiva e reduzindo significativamente o risco de falhas catastróficas [94].

Pesquisas como as de Saminathan e colaboradores [95] destacam a aplicação da IA no monitoramento da corrosão em estruturas metálicas, como tanques de armazenamento de produtos químicos e edificações de grande porte. A utilização de sensores e sistemas de análise em tempo real possibilitou a emissão de alertas sobre potenciais problemas, garantindo respostas rápidas e eficazes. Da mesma forma, Chen e colaboradores [103-104] exploraram o uso de técnicas de AM na análise de voltamogramas, identificação de mecanismos eletroquímicos e extração de parâmetros essenciais, tais como taxas de reação e coeficientes de difusão, a partir de dados amperométricos de natureza estocástica. Esses autores também investigaram o uso de redes neurais na simulação de processos eletroquímicos, por meio da integração de equações de transporte de massa e condições de contorno, na busca de soluções mais precisas e eficientes.

Esses avanços destacam o enorme potencial de IA e AM para transformar o setor. A capacidade extraordinária de processar grandes volumes de dados de maneira ágil, rápida e eficiente gera *insights* valiosos que impulsionam avanços significativos na proteção anticorrosiva [97, 105] e na análise de falhas [94, 98]. Essa agilidade permite que as organizações respondam de forma mais prontamente às mudanças nas demandas do mercado e nas exigências regulatórias, proporcionando uma vantagem competitiva estratégica.

Além disso, a convergência dessas tecnologias promove processos personalizados e a sustentabilidade dos processos industriais, reduzindo desperdícios e maximizando a eficiência no uso de recursos. Com o progresso das pesquisas, espera-se o desenvolvimento de

formulações e técnicas que elevem os padrões de desempenho e resistência à corrosão, ampliando as fronteiras do setor.

Entretanto, a implementação de IA enfrenta desafios significativos. A necessidade de amplos conjuntos de dados de alta qualidade para treinar algoritmos apresenta uma barreira importante, assim como a complexidade dos mecanismos de corrosão e a escassez de dados confiáveis. Superar essas limitações requer investimentos em infraestrutura de dados, capacitação de equipes e colaborações interdisciplinares que unam especialistas em tecnologia e ciência dos materiais.

Apesar desses desafios, a IA e o AM têm grande potencial para promover processos mais sustentáveis. Essas tecnologias podem otimizar o uso de recursos, como água e energia, nos processos de tratamento de superfícies, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais. Além disso, pode contribuir para minimizar a geração de resíduos ao aprimorar os procedimentos produtivos e selecionar materiais com menor toxicidade, alinhando-se aos princípios da economia circular. Com a implementação adequada, IA e AM não apenas aumentam a eficiência dos processos industriais, mas fomentam práticas responsáveis, alinhadas às demandas por sustentabilidade e inovação tecnológica.

A aplicação dessas tecnologias em áreas específicas, como revestimentos de zinco e tratamentos de conversão, apresenta um potencial transformador para as práticas industriais atuais. Ao converter dados complexos em conhecimento aplicável, IA e AM oferecem não apenas melhorias operacionais, mas também avanços significativos na durabilidade dos materiais e na proteção contra corrosão. Nesse contexto de inovação contínua, a IA posiciona-se como um elemento estratégico essencial para o futuro dos tratamentos de superfície, equilibrando a busca por sustentabilidade com a necessidade de progresso tecnológico. Assim, essas tecnologias emergentes não apenas garantem a competitividade no presente, mas também moldam o futuro das práticas industriais de forma responsável e inovadora.

5. Considerações finais

A substituição do cromo hexavalente em tratamentos de conversão para aço eletro galvanizado é uma necessidade urgente para garantir a proteção ambiental e a saúde humana. Diferentes alternativas, como o cromo trivalente, a fosfatização, os sais de terras raras, os sais de cobalto, os sais de zircônio e os silanos, demonstram potencial para substituir o Cr^{6+} de forma eficaz e sustentável. Contudo, a otimização dos processos, o desenvolvimento de novas formulações e a análise do ciclo de vida dos materiais são essenciais para a consolidação dessas tecnologias.

A Inteligência Artificial e o Aprendizado de Máquina despontam como ferramentas poderosas para acelerar a pesquisa e o desenvolvimento de revestimentos mais eficientes e ecológicos. A modelagem, a simulação, a otimização de parâmetros e a análise de dados podem contribuir para a criação de soluções inovadoras e personalizadas.

A busca por alternativas ao cromo hexavalente exige um esforço conjunto de pesquisadores, indústria e órgãos reguladores. O investimento em pesquisa e desenvolvimento, a adoção de práticas sustentáveis e a disseminação de conhecimento são fundamentais para impulsionar a inovação e garantir um futuro mais limpo e seguro para o setor de tratamento de superfícies.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da FAPESP (Processo 2015/09952-0 e Processo 2016/50454-6), CNPQ (Processo 407549/2022-6) e a CAPES (Código de Financiamento 001).

Referências

- [1] Roberge, P. R., "Corrosion Engineering: Principles and Practice", Ed. McGraw-Hill Education. 754 p., 2008.
- [2] WINAND, R., "Electrodeposition of zinc and zinc Alloys", In: Schlesinger, M., Paunovic, M. (eds), *Modern Electroplating*, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch10>
- [3] MONGA, A., FULKE, A.B., DASGUPTA, D., "Recent developments in essentiality of trivalent chromium and toxicity of hexavalent chromium: implication on human health and remediation strategies", *Journal of Hazardous Materials Advances*, v. 7, pp. 100113, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125967>
- [4] ZHANG, Z, CAO, Z., SONG, N., ZHANG, L., CAO, Y., TAI, T., "Long-term hexavalent chromium exposure facilitates

- colorectal cancer in mice associated with changes in gut microbiota composition", *Food and Chemical Toxicology*, v. 138, pp. 111237, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111237>
- [5] HANDA, K., JINDAL, R., "Genotoxicity induced by hexavalent chromium leading to eryptosis in *Ctenopharyngodon idellus*", *Chemosphere*, v. 247, pp. 125967, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125967>
- [6] ZAFERANI, S.H., PEIKARI, M., ZAAREI, D., MOHAMMADI, M., "Using silane films to produce an alternative for chromate conversion coatings", *Corrosion*, v. 69, n. 4, pp. 273-387, 2013. <https://doi.org/10.5006/0686>
- [7] SERÉ, P.R., DEYÁ, C., EGLI, W.A., ELSNER, C.I., DI SARLI, A.R., "Protection of galvanized steel with silanes: its comparison with chromium (VI)", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, pp. 342- 348, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-013-0746-1>
- [8] GAO, Z., ZHANG, D., LIU, Z., LI, X., JIANG, S., ZHANG, Q., "Formation mechanisms of environmentally acceptable chemical conversion coatings for zinc: a review", *Journal of Coatings Technology and Research*, v. 16, n. 1, pp. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0076-1>
- [9] BIBBER, J.W., "An overview of nonhexavalent chromium conversion coatings-Part II: Zinc" *Metal Finishing*, v. 100, pp. 97-102, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(01\)81711-6](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(01)81711-6)
- [10] LI, Q., LI, F., AN, M., "Alternative chromium-free passivation combined with nano-electrodeposition for electrogalvanized steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 7, pp. 3961-3971, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3498-0>
- [11] GUO, X., WANG, Y., SUN, H., "Comparative research on properties of trivalent and hexavalent passive film on galvanized steel", *Advanced Materials Research*, v. 396-398, pp. 1760-1763, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.396-398.1760>
- [12] HERNANDEZ, V. E. P., "Comportamento de corrosão de camadas isentas de cromo hexavalente e sem enxágue aplicadas sobre superfícies eletrozincadas produzidas em linhas contínuas", *Dissertação de Mestrado*, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-31122015-115301/>. Acesso em: 21 out. 2024
- [13] SHAHINI, M., MOHAMMADLOO, H.EE., RAMEZANZADEH, B., "Recent advances in steel surface treatment via novel/green conversion coatings for anti-corrosion applications", *Journal of Coatings Technology and Research*, v. 19, pp. 159-199, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00466-0>
- [14] FENG, J., WANG, Y., LIN, X., BIAN, M., WIE, Y., "SECM in situ investigation of corrosion and self-healing behavior of trivalent chromium conversion coating on the zinc", *Surface and Coatings Technology*, v. 459, pp. 129411, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129411>
- [15] WEN, N.T., CHEN, F.J., GER, M.D., PAN, Y.N., LIN, C.S., "Microstructure of trivalent chromium conversion coating on electrogalvanized steel plate", *Electrochemical and Solid-State Letters*, v. 11, pp. C47-50, 2008. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2932053>
- [16] CHO, K.W., RAO, V.S., KWON, H.S., "Microstructure and electrochemical characterization of trivalent chromium-based conversion coating on zinc", *Electrochimica Acta*, v. 52, pp.4449-4456, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.12.032>
- [17] ZHU, L., YANG, F., DING, N., "Corrosion resistance of the electrogalvanized steel treated in a titanium conversion solution", *Surface and Coatings Technology*, v. 201, pp. 7829-7834, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.03.024>
- [18] SALDANHA, J.L.B., "Emprego de agente redutor no processo de conversão de revestimento nanocerâmico à base de Ti sobre aço carbono e galvanizado", *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/248682>, Acesso em: 21 out. 2024.
- [19] MILOŠEV, I., FRANKEL, G., "Review - Conversion coatings based on zirconium and/or titanium", *Journal of the Electrochemical Society*, v. 165, n. 3, pp. C127, 2018. <https://doi.org/10.1149/2.0371803JES>
- [20] HAVIGH, M. D., NABIZADEH, M., WOUTERS, B., HALLEMANS, N., HAUFFMAN, T., LATAIRE, J., HUBIN, A., TERRYN, H., "Operando odd random phase electrochemical impedance spectroscopy (ORP-EIS) for in situ monitoring of the Zr-based conversion coating growth in the presence of (in)organic additives", *Corrosion Science*, v. 223, pp. 111469, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111469>
- [21] TAHERI, P., LILL, K., DE WIT, J., MOL, J., TERRYN, H., "Effects of zinc surface acid-based properties on formation mechanisms and interfacial bonding properties of zirconium-based conversion layers", *The Journal of Physical Chemistry*, v. 116, n. 15, pp. 8426-8436, 2012. <https://doi.org/10.1021/JP209422D>
- [22] ZOU, Z., LI, N., LI, D., LIU, H., MU, S., "A vanadium-based conversion coating as chromate replacement for electrogalvanized steel substrates", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 509, n. 2, pp. 503-507, 2011. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2010.09.080>
- [23] LEWIS, O.D., GREENFIELD, D., AKID, R., DAHM, R.H., WILCOX, G.D., "Conversion coatings for zinc electrodeposits from modified molybdate solutions", *Transactions of the Institute Metal Finishing*, v. 88, n. 2, pp. 107-116, 2010. <https://doi.org/10.1179/174591910X12646062076760>
- [24] LIU, D., YANG, Z., WANG, Z., ZHANG, C., "Synthesis and evaluation of corrosion resistance of molybdate-based conversion coatings on electroplated zinc", *Surface and Coatings Technology*, v. 205, n. 7, pp. 2328-2334, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.09.018>
- [25] MAJD, M.T., SHAHRABI, T., RAMEZANZADEH, B., "The role of neodymium based thin film on the epoxy/steel interfacial adhesion and corrosion protection promotion", *Applied Surface Science*, v. 464, pp. 516-533, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.09.109>
- [26] SERÉ, P. R.; PARY, P., GÓMEZ-ESPINOSA, E., EGLI, W., DI SARLI, A. R., DEYÁ, C., "Surface preparation and double layer effect for silane application on electrogalvanized steel", *Corrosion Reviews*, v. 41, n. 4, pp. 497-513, 2023. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2022-0042>
- [27] KONG, G., LU J.; WU H., "Post treatment of silane and cerium salt as chromate replacers on galvanized steel", *Journal of Rare Earths*, v. 27, n. 1, pp. 164-168, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(08\)60213-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(08)60213-6)
- [28] ZABERI, A., BAHMANI, E., AGHDAM, A.S.R., "Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for

- protection of ferrous metals in corrosive media: a mini review", *Corrosion Communication*, v. 5, pp. 22-38, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>
- [29] LI, Q., LI, F., NA, M. "Alternative chromium-free passivation combined with nano-electrodeposition for electrogalvanized steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 27, pp. 3961-3971, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3498-0>
- [30] JONES, D. A. *Principles and Prevention of Corrosion*. 2nd Edition, Ed. Pearson, 592p., 1995.
- [31] FONTANA, M. G., *Corrosion Engineering*. Ed. Tata McGraw-Hill, 556p., 2005.
- [32] ALJIBORI, H.S., ALAMIERY, A., KADHUM, A.A.A.H., "Advances in corrosion protection coatings: a comprehensive review", *International Journal of Corrosion Scale Inhibition*, v. 12, n. 4, pp. 1476-150, 2023. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-6>
- [33] ORAZEN, M.E., TRIBOLLET, B., "Electrochemical Impedance Spectroscopy", Ed. Wiley, New York, 2008.
- [34] LI, J., YAO, C., LIU, Y., LI D., ZHOU, B., CAI, W., "The hazardous hexavalent chromium conversion coating: the origin, influence factors and control measures. *Journal Hazardous Materials*, v. 221-222, pp. 56-61, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.004>
- [35] ZHANG, X., SLOOF, W.G., HOVESTAD, A., VAN WESTING, E.P.M., TERRYN, H., DE WIT, J.H.W., "Characterization of chromate conversion coatings on zinc using XPS and SKPFM", *Surface and Coatings Technology*, v. 197, n. 2-3, pp. 168-176, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.196>
- [36] MARTYAH, N.M., "Internal Stresses in Zinc Chromate Coating", *Surface Coating and Technology*, v. 88, n. 1-3, pp. 139-146, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)02927-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02927-1)
- [37] ZHANG, X., VAN DEN BOS, C., SLOOF, W.G., HOVESTAD, A., TERRYN, H., DE WIT J.H.W., "Comparison of the morphology and corrosion performance of Cr(VI) and Cr(III)-based conversion coatings on zinc", *Surface and Coatings Technology*, v. 199, n. 1, pp. 92-104, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.002>
- [38] ZAKI, N., "Trivalent chrome conversion coating for zinc and zinc alloys", *Metal Finishing*, v. 105, n.10, pp. 425-435, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80361-8](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80361-8)
- [39] ZHANG, X., VAN DEN BOS, C., SLOOF, W.G., TERRYN, H., HOVESTAD, A., DE WIT J.H.W., "Investigation of Cr(III) based conversion coatings on electrogalvanized steel", *Surface Engineering*, v. 20, n. 4, pp. 244- 250, 2004. <https://doi.org/10.1179/026708404225016436>
- [40] GARCÍA-ANTÓN, J., FERNÁNDEZ-DOMENE, R.M., SÁNCHEZ-TOVAR, R., ESCRIVÀ-CERDÁN, C., LEIVA-GARCÍA, V., URTIAGA, A., "Improvement of the electrochemical behaviour of Zn-electroplated steel using regenerated Cr(III) passivation baths", *Chemical Engineering Science*, v. 111, pp. 402- 409, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.03.005>
- [41] HESAMEDINI, S., BUND A., "Trivalent chromium conversion coatings", *Journal of Coatings Technology and Research*, v. 16, n. 3, pp. 623-641, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00210-9>
- [42] CHANG, Y-T, WEN, N-T., CHEN, W-K., GER, M-D., PAN, G-T., YANG, T.C-K., "The effects of immersion time on morphology and electrochemical properties of the Cr(III)-based conversion coatings on zinc coated", *Corrosion Science*, v. 50, n. 12, pp. 3494-3499, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.051>
- [43] LIU, X., WANG, L., WANG, M., FENGHUA, L., GAO, J., LI, J., "Dynamic structures, and electrochemical behavior during the formation of trivalent chromium-based conversion coating on Zn", *Surface and Coatings Technology*, v. 31, pp. 128041, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128041>
- [44] DI SARLI, A.R., CULCASI, J.D., TOMACHUK, C.R., ELSNER, C.I., FERRERIRA-JR, J.M., COSTA, I., "A conversion layer based on trivalent chromium and cobalt for the corrosion protection of electrogalvanized steel", *Surface and Coatings Technology*, v. 258, pp. 426-436, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.057>
- [45] HESAMEDINI, S., ECKE, G., BUND, A., "Structure and formation of trivalent chromium conversion coatings containing cobalt on zinc plated steel", *Journal of the Electrochemical Society*, v. 165, n. 10, pp. C657-669, 2018. <https://doi.org/10.1149/2.0951810jes>
- [46] RAMEZANZADEH, B., ATTAR, M.M., "Effects of Co(II) and Ni(II) on the surface morphology and anticorrosion performance of the steel samples pretreated by Cr(III) conversion coating", *Corrosion*, v. 68, n. 1-11, pp. 015008-1-015008-11, 2012. <https://doi.org/10.5006/1.3676629>
- [47] LIU, X., WANG, M., LI, H., WANG, L., XU, Y., "Electrochemical effects of pH value on the corrosion inhibition and microstructure of cerium doped trivalent chromium conversion coating on Zn", *Corrosion Science*, v. 167, pp. 108538, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108538>
- [48] DI SARLI, A.R., ELSNER, C.I., PALOMINO, L.E.M., TOMACHUK, C.R., "Corrosion performance of conversion treatments for electrogalvanized steel sheet", *Journal of Materials and Materials Characterization and Engineering*, v. 7, pp. 307-329, 2019. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2019.75022>
- [49] ALMEIDA, E., DIAMANTINO, T.C., FIGUEIREDO, M.O., SÁ, C., "Oxidizing alternative species to chromium VI in zinc galvanized steel surface treatment. Part 1- A morphological and chemical study", *Surface and Coatings Technology*, v. 106, n. 1, pp. 8-17, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00464-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00464-2)
- [50] ROMERO, R., MARTIN, F., RAMOS-BARRADO, J.R., LEINEN, D., "Study of different inorganic oxide thin films as barrier coatings against the corrosion of galvanized steel", *Surface and Coatings Technology*, v. 204, n. 12-13, pp. 2060-2063, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.10.006>
- [51] BEEVOR, A., *A Segunda Guerra Mundial*, Rio de Janeiro, Editora Record Ltda, 2012.
- [52] RAMEZANZADEH, B., VAKILI, H., AMINI, R., "Improved performance of cerium conversion coatings on steel with zinc phosphate post-treatment", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 30, pp. 225-233, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.05.026>
- [53] PANOSSIAN, Z., DOS SANTOS, C.A.L., "Corrosão e Proteção, Compêndio de artigos técnicos sobre fosfatização de metais ferrosos", Disponível em: <https://www.researchgate.net/>

publication/317348781_Compêndio_de_artigos_técnicos_sobre_fosfatizacão_de_metalos_ferrosos, Acesso em 22 de outubro de 2024.

[54] SAID, V.H., HAAKMANN, F., BRINKBAUMER, J., ULBRICHT, M., "Comparison of the nucleation and growth of a phosphate conversion coating on Zn-Al and Zn-Al-Mg coatings under the influence of a corrosion inhibitor film", *Surface and Coatings Technology*, v. 451, pp. 129044, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129044>

[55] SILVA-FERNÁNDEZ, S., DÍAZ, B., FEJOO, I., RAMÓN NÓVOA, X., PÉREZ, C., "Influence of pH and temperature in the performance of Zn phosphate conversion coatings", *Electrochimica Acta*, v. 457, pp. 142510, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142510>

[56] GUERREIRO, M.A.V., "Avaliação de processo de fosfatização", *Trabalho de Conclusão de Curso*, Departamento de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/24746>, Acesso em 26 de outubro de 2024.

[57] PANOSSIAN, Z.; DOS SANTOS, C.A.L., "Fosfatização de Metais Ferrosos Parte 2 - tipos de camadas fosfatizadas", *Corrosão & Proteção*, v. 10, n. 3, pp. 24-26, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317348781_Compêndio_de_artigos_técnicos_sobre_fosfatizacão_de_metalos_ferrosos, Acesso em 22 de outubro de 2024.

[58] TSAI, C.Y., LIU, J.S., CHEN, P.L., LIN, C.S., "Effect of Mg²⁺ on the microstructure and corrosion resistance of the phosphate conversion coating on hot-dip galvanized sheet steel", *Corrosion Science*, v. 52, n. 12, pp. 3907-3912, 2010. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2010.08.007>

[59] GIRCIENÈ, O., GUDAVICIUTÈ, L., SELSKIENÈ, A., KIRDEIKIENE, A., RAMANAUSKAS, R., "Electrochemical investigations of the anticorrosive behaviour of the phosphated electrogalvanized steel additionally coated with conversion layer of cerium oxide", *Chemija*, v. 31, pp. 77-86, 2020. <https://doi.org/10.6001/chemija.v31i2.4219>

[60] SU, H-Y, LIN, C-S, "Effect of additives on the properties of phosphate conversion coating on electrogalvanized steel sheet", *Corrosion Science*, v. 83, pp. 137-146, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.02.002>

[61] AN, K., AN, C., YANG, C., QING, Y., SHANG, Y., LIU, C., "Effect of phosphating and post-sealing on the corrosion resistance of electrogalvanized steel", *International Journal Electrochemical Society*, v. 12, n. 3, pp. 2102-2111, 2017. <https://doi.org/10.20964/2017.03.39>

[62] RAMEZANZADEH, B., VAKILI, H., AMINI, R., "The effects of addition of poly(vinyl) alcohol (PVA) as a green corrosion inhibitor to the phosphate conversion coating on the anticorrosion and adhesion properties of the epoxy coating on the steel substrate", *Applied Surface Science*, v. 327, pp. 174-181, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.167>

[63] VELASQUEZ, C.S., PIMENTA, E.P.S., LINS, V.F.C., "Anticorrosive behavior and porosity of tricationic phosphate and zirconium conversion coating on galvanized steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 27, pp. 2138-2147, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3294-x>

[64] JAZBINSEK, L.A.R., "Investigação de tratamentos alternativos de fosfatização para eliminação do níquel e cromo hexavalente", *Dissertação de Mestrado*, Instituto

de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-05122014-083916/>, Acesso em 21 outubro de 2024.

[65] MONTEMOR, M.F., SIMÕES, A.M., FERREIRA, M.G.S., "Composition and corrosion behaviour of galvanized steel treated with rare-earth salts: the effect of the cation", *Progress in Organic Coatings*, v. 44, n. 2, pp. 111-120, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00250-8](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00250-8)

[66] KONG G., LIU, L., LU, J., CHE, C., ZHANG, Z., "Corrosion behavior of lanthanum-based conversion coating modified with citric acid on hot dip galvanized steel in aerated 1 M NaCl solution", *Corrosion Science*, v. 53, n. 4, pp. 1621-1626, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.038>

[67] ZHANG, S.H., KONG, G., LU, J.T., CHE, C.S., LIU, L.Y., "Growth behavior of lanthanum conversion coating on hot-dip galvanized steel", *Surface and Coatings Technology*, v. 259, pp. 654-659, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.017>

[68] ARENAS, M.A., DE DAMBORENA J.J., "Surface characterisation of cerium layers on galvanized steel", *Surface and Coatings Technology*, v. 187, n. 2-3, pp. 320-325, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.02.033>

[69] MONTEMOR, M.F., SIMÕES, A.M., FERREIRA, M.G.S., "Composition and corrosion behaviour of cerium films on galvanized steel", *Progress in Organic Coatings*, v. 43, pp. 274-281, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00209-0](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00209-0)

[70] FERREIRA-JR, J.M., SOUZA, K.P., QUEIROZ, F.M., COSTA, I., TOMACHUK, C.R., "Electrochemical and chemical characterization of electrodeposited zinc surface exposed to new surface treatments", *Surface and Coatings Technology*, v. 294, pp. 36-46, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.023>

[71] FERREIRA-JR J.M., ROSSI J.L., BAKER M.A., HINDER S.J., COSTA I., "Deposition and characterization of a new mixed organic/inorganic cerium containing coating for the corrosion protection of electrogalvanized steel", *International Journal of Electrochemical Science*, v. 9, n. 4, pp. 1827-1839, 2014. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)07895-1](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07895-1)

[72] ZHELUDKOVA, E. A., ABRASHOV, A. A., GRIGORYAN, N. S., ASNIS, N. A., VAGRAMYAN, T. A., "Cerium-containing solution for chromate-free passivation of zinc coatings", *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, v. 55, n. 7, pp. 1329-1334, 2019. <https://doi.org/10.1134/s2070205119070190>

[73] MOTTE, C., MAURY N, OLIVIER M.G., PETITI-JEAN J.P., WILLEN J.F., "Cerium treatments for temporary protection of electroplated steel", *Surface and Coatings Technology*, v. 200, n. 7, pp. 2366-2375, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.032>

[74] HUANG, H.Y., MANSFELD, M.F., "Evaluation of the effects of different process parameters on the corrosion protection provided by cerium-based coatings on galvanized steels", *Corrosion*, v. 65, pp. 507-510, 2009. <https://doi.org/10.5006/1.3319154>

[75] SONG, Y.K., MANSFELD, F., "Evaluation of the corrosion resistance of different galvanized steels treated in a cerium salt solution", *Materials and Corrosion Werkstoffe und Korrosion*, v. 6, n. 4, pp. 229-236, 2005. <https://doi.org/10.1002/maco.200403830>

- [76] ARAMAKI, K., "A self-healing protective film prepared on zinc by treatment in a Ce (NO₃)₃ solution and modification with Ce (NO₃)₃", *Corrosion Science*, v. 47, n. 5, pp. 1285-1298, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.022>
- [77] LI, C., LIANG, T., MA, R., DU, A., FAN, Y., ZHAO, X., CAO, X., "Superhydrophobic surface containing cerium salt and organosilane for corrosion protection of galvanized steel", *Journal of Alloys Compounds*, v. 825, n. 5, pp. 153921, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153921>
- [78] SZCZYGIĘŁ, B., WINIARSKI, J., TYLUS, W., "Effect of deposition time on morphology, corrosion resistance and mechanical properties of Ti-containing conversion coatings on zinc", *Materials Chemistry and Physics*, v. 129, n. 3, pp. 1126-1131, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.05.074>
- [79] WINIARSKI, J., MASALSKI, J., SZCZYGIĘŁ, B., "Corrosion resistance of chromium-free conversion coatings deposited on electrogalvanized steel from potassium hexafluorotitanate(IV) containing bath", *Surface and Coatings Technology*, v. 236, pp. 252-261, 2013. [https://doi.org/10.1016/S0294-0885\(13\)00566-6](https://doi.org/10.1016/S0294-0885(13)00566-6)
- [80] MOHAMMADLOO, S., SARABI, A.A., MOHAMMAD HOSSEINI, R., SARAYLOO, M., SAMEIE, H., SALIMI, R., "A comprehensive study of the green hexafluorozirconic acid-based conversion coating", *Surface and Coatings Technology*, v. 253, pp. 65-72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.10.006>
- [81] ES-SOUFI, H., BERDIMURODOV, E., SAYYED, M.I., BIH L., "Nanoceramic-based coatings for corrosion protection: a review on synthesis, mechanisms, and applications", *Environmental Science and Pollution Research*, (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31658-3>
- [82] MOHAMMADLOO, H. E., SARABI, A. A., ALVANI, A. A. S., SAMEIE, H., SALIMI, R., "Nanoceramic hexafluoro-zirconic acid-based conversion thin film: surface characterization and electrochemical study", *Surface and Coatings Technology*, v. 206, n. 19-20, pp. 4132-413, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.009>
- [83] DRONIOU, P., FRISTAD, W., LIANG, J-L., "Nanoceramic-based Conversion Coating: Ecological and economic benefits position process as a viable alternative to phosphating systems", *Metal Finishing*, v. 103, n. 12, pp. 41-43, 2005. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(05\)80849-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(05)80849-9)
- [84] FOCKAERT, L.I., TAHERI, P., ABRAHAMI, S.T., BOELEN, B., TERRYN, H., MOL, J.M.C., "Zirconium-based conversion film formation on zinc, aluminum and magnesium oxides and their interactions with functionalized molecules", *Applied Surface Science*, v. 423, pp. 817-828, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.174>
- [85] CEREZO, J., VANDENDAEL, I., POSNER, R., TERRYN, H., "Initiation, and growth of modified Zr-based conversion coatings on multi-metal surfaces", *Surface and Coatings Technology*, v. 236, pp. 284-289, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.09.059>
- [86] CRISTAUDO, V., BAERT, K., LAHA, P., LIM, M. L., "A combined XPS/ToF-SIMS approach for the 3D compositional characterization of Zr-based conversion of galvanized steel", *Applied Surface Science*, v. 562, pp. 150166, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150166>
- [87] OOLJ, W.J., ZHU, D., STACY, M., SETH, A., MUGADA, T., GANDHI, J., PUOMI, P., "Corrosion protection properties of organofunctional silanes—An overview", *Tsinghua Science and Technology*, v. 10, n. 6, pp. 639-664, 2005. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(05\)70134-6](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(05)70134-6)
- [88] PANTOJA, M., ABENOJAR, J., MARTÍNEZ, M.A., VELASCO, F., "Silane pretreatment of electrogalvanized steels: effect on adhesive properties", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 65, pp. 54-62, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.11.006>
- [89] SERÉ, P.R., EGLI, W., DI SARLI A.R., DEYÁ, C., "Preparation and characterization of silanes films to protect electrogalvanized steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 27, n. 3, pp. 1194-1202, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3178-0>
- [90] SERÉ, P.R., BANERA, M., EGLI, W., ELSNER, C.I., DI SARLI, A.R., DEYÁ, C., "Effect on temporary protection and adhesion promoter of silane nanofilms applied on electrogalvanized steel", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 65, pp. 88-95, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.11.008>
- [91] ALI, S.M., AL LEHAIBI, H.A., "Protective sol-gel coatings for zinc corrosion: precursor type effect", *Surface and Coatings Technology*, v. 11, pp. 172-181, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.010>
- [92] ZHELUDKEVICH M.L., MIRANDA-SALVADO I., FERREIRA M.G.S., "Sol-gel coatings for corrosion protection of metals", *Journal of Materials Chemistry*, v. 15, n. 48, pp. 5099-5111, 2005. <https://doi.org/10.1039/b419153f>
- [93] NGUYEN, T.T., THAI, T.T., PAINT, Y., TRINCH, A.T., OLIVIER, M-G., "Effect of cerium nitrate concentration on corrosion protection of hybrid organic/inorganic Si/Zr sol-gel coating applied on hot-dip galvanized steel", *Surface and Coatings Technology*, v. 480, pp. 130562, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130562>
- [94] ALAMRI, A., "Application of machine learning to stress corrosion cracking risk assessment", *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 31, pp. 11-21, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165984>
- [95] SAMINATHAN, R., NASHALI, A.Y.A., HAQAWI, A.A., MARAPPAN, S., NATESAN, S.P., SHAKEEL, F., "Role of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) in the corrosion monitoring process", *Zastita Materijala*, v. 65, n. 3, pp. 473-480, 2024. <https://doi.org/10.62638/ZasMat1192>
- [96] PEI, Z., ZHANG, D., ZHI, Y., YANG, T., JIN, L., FU, D., CHENG, X., TERRYN, H.A., MOL, J.M.C., LI, XIAOGANG., "Towards understanding and prediction of atmospheric corrosion of an Fe/Cu corrosion sensor via machine learning", *Corrosion Science*, v. 170, n. 1, pp. 108697, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108697>
- [97] XU, L., WANG, Y., MO, L., TANG, Y., WANG, F., LI, C., "The research progress and prospect of data mining methods on corrosion prediction of oil and gas pipelines", *Engineering Failure Analysis*, v. 144, pp. 106951, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106951>
- [98] AL-SABAEI, A. M., ALHUSSIAN, H., ABDULKADIR, S. J., JAGADEESH, A., "Prediction of oil and gas pipeline failures through machine learning approaches: a systematic review", *Energy Reports*, v. 10, pp. 1313-1338, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.009>
- [99] LIU, Y. BAO, Y., "Review on automated condition assessment of pipelines with machine learning", *Advances in*

Engineering Informatics, v. 53, pp. 101687, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101687>

[100] MAHADI HASAN IMRAN, M.D., JAMALUDIN, S., MOHAMAD AYOB, A.F., "A critical review of machine learning algorithms in maritime, offshore, and oil & gas corrosion research: a comprehensive analysis of ANN and RF models", *Ocean Engineering*, v. 295, pp. 116796, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116796>

[101] LIU, X., XU, P., ZHAO, J., LU, W., LI, W., WANG, G., "Material machine learning for alloys: applications, challenges and perspectives", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 921, pp. 165984, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165984>

[102] HU, M., TAN, Q., KNIBBE, R., XU, M., JIANG, B., WANG, S., LI, X., ZHANG, M., "Recent applications of machine learning in alloy design: a review", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, v. 155, pp. 100746, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100746>

[103] CHEN, H., KATELHON, E., COMPTON, R.G., "Predicting voltammetry using physics-informed neural networks", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, v. 13, pp. 536-543, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.1c04054>

[104] CHEN, H., KATELHON, E., COMPTON, R.G., "Machine learning in fundamental electrochemistry: recent advances and future opportunities", *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 38, pp. 101214, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101214>

[105] COELHO, L.B., ZHANG, D., INGELGEM, Y.V., STECKELMACHER, D., NOWÉ, A., TERRY, H., "Reviewing machine learning of corrosion prediction in a data-oriented perspective", *Materials Degradation*, v. 6, p. 8, 2002. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00218-4>

Biografia dos autores

Sandra de Jesus Barradas Travassos

stravassos29@gmail.com

Engenheira metalúrgica com doutorado em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP), com mais de 20 anos de experiência no setor industrial, atuando em empresas multinacionais e de grande porte. Possui

ampla expertise nas áreas de Comercial, Novos Negócios, Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação Industrial, Marketing e Vendas, com foco no segmento de Construção Civil. Experiência comprovada em parcerias colaborativas com instituições de pesquisa e no desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras para enfrentar desafios industriais. Reconhecida por suas contribuições ao setor e premiada por sua excelência acadêmica e profissional.

<https://orcid.org/0000-0001-8115-7648>

<http://lattes.cnpq.br/7172169347886687>

Gustavo Aristides Santana Martinez

gustavo.martinez@usp.br

Graduação em Administração pela Universidade Metodista de São Paulo (2012), graduação em Engenharia de Operação Mecânica pela Universidade Braz Cubas (1982), mestrado (1993) e doutorado (1998) em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Atualmente é Professor Associado na Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena. Tem experiência na área de Administração e Engenharia Mecânica, com ênfase em Conformação. Atua principalmente nos seguintes temas: solução inventiva de problemas, ensino da engenharia, trefilação, conformação mecânica, tribologia e lubrificação

<http://lattes.cnpq.br/3828935126781467>

<https://orcid.org/0000-0002-7870-9269>

Célia Regina Tomachuk

celiatomachuk@usp.br

Química, Mestre e Doutora em Engenharia na área de Processos de Fabricação pela UNICAMP e pela Università Politecnica delle Marche, Ancona, Itália, pós-doutorado em Corrosão pela Università degli Studi di Napoli "Federico II", Itália e pelo IPEN. Atualmente é Professora Doutora na Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Departamento de Ciências Básicas e Ambientais. Atua na área de materiais, com ênfase em eletroquímica, revestimentos e corrosão.

<https://orcid.org/0000-0002-3771-5945>

<http://lattes.cnpq.br/0670006721310285>

COMBATE À CORROSÃO E GESTÃO DE INTEGRIDADE DE ATIVOS ATRAVÉS DO MONITORAMENTO ON-LINE E EM TEMPO REAL DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

Leandro Valente Costa, D.Sc.

IEC-Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda.
leandrovalente@iecengenharia.com.br

Introdução

No atual momento de avanço tecnológico mundial voltado para o combate da corrosão e gestão da Integridade, a principal novidade nesse mercado de plataformas digitais de monitoramento on-line das variáveis de processo é a incorporação da ferramenta computacional LDS (Leak Detection System), isto é, além das vantagens do processo de aquisição de dados real-time para monitoramento da Integridade e corrosão, as empresas também podem contar com a opção de executar a detecção de vazamentos dos fluidos instantânea através da aquisição dos dados do sistema supervisor SCADA.

A relevância técnica dessa mudança está numa condição de oferta do produto mais completa e robusta ao mercado, o que vêm favorecendo sua aceitação e implementação por um número cada vez maior de empresas ao

redor do mundo, principalmente aquelas produtoras, transportadoras e distribuidoras de combustíveis por dutos metálicos enterrados.

Nesse artigo, são apresentadas algumas tecnologias inovadoras e soluções tecnológicas não intrusivas, que vêm auxiliando essas empresas a gerenciar remotamente a integridade e o combate à corrosão dos seus dutos metálicos enterrados, propiciando um ganho exponencial na segurança de suas operações, na qualidade dos serviços realizados e principalmente na redução dos custos com operação e manutenção desses ativos.

Evolução tecnológica dos serviços remotos de monitoramento de dutos

No mercado de softwares e serviços digitais remotos para monitoramento de dados de dutos enterrados, a evolução tecnológica vêm ocorrendo com o desenvolvimento das novas

plataformas redimensionadas sob a base e conceitos de aprendizagem “Machine Learning” da Inteligência Artificial (IA), que em grande parte, usam um método de análise de dados que automatiza a construção de modelos analíticos e elaboração de diagnósticos técnico-operacionais on-line e real time.

A concepção moderna do uso da Inteligência Analítica computacional e a intercambialidade das ferramentas, vêm facilitando o seu crescimento e ganhando mais adeptos nos corpos técnicos das empresas, as quais estão digitalizando seus processos e aproveitando das inúmeras vantagens diretas e indiretas dessa tecnologia.

Na figura 1 por exemplo, observa-se o equipamento GOLIAH da Italiana Automa Srl., que faz parte do projeto SMART GRID, o qual executa a medição remota e on-line do potencial tubo-solo da tubulação de aço enterrada protegida, e envia os dados da voltagem ao sistema WEBPROCAT. Esse sistema apresenta graficamente todas as informações dos pontos de medição monitorados no GIS da empresa, de forma instantânea, evitando que as empresas tenham que continuar investindo em equipes motorizadas para percorrer as antigas rotas da proteção catódica para medir fisicamente os potenciais tubo/solo, evitando

Fig. 1 Telemedição de Proteção Catódica

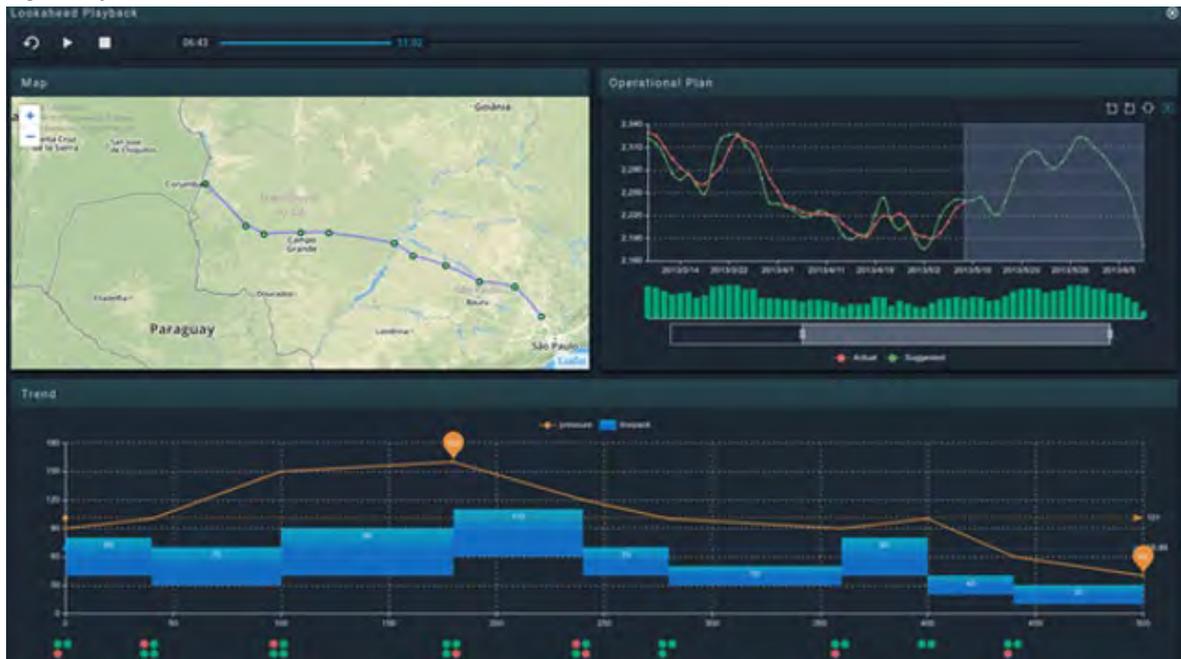


Fonte: Automa Srl.

assim, acidentes em campo, aumentando a confiabilidade nas leituras e diminuindo consideravelmente os custos de operação.

Na figura 2 observamos outro exemplo sobre inovação tecnológica remota e não intrusiva.

Fig. 2 - Software LDS Atmos SIM



Fonte: Atmos International.

Trata-se do LDS - Leak Detection System Atmos SIM, da Atmos International, software especializado em monitoramento e detecção de vazamentos em sistemas de dutos através da análise e diagnóstico instantâneo baseado nos dados das variáveis da pressão, vazão temperatura e velocidade dos fluidos em campo, o qual aproveita os dados oriundos do sistema supervisorio SCADA, já instalado largamente pelas grandes empresas do setor ao redor do mundo.

Essa ferramenta permite que as empresas possam operar de forma remota seus ativos, deixando de lado os modelos mais antigos de operação e monitoramento, em geral com dados colhidos via rádio e com inúmeras equipes operacionais em campo, reduzindo assim o número de acidentes e tornando a operação mais eficiente e econômica.

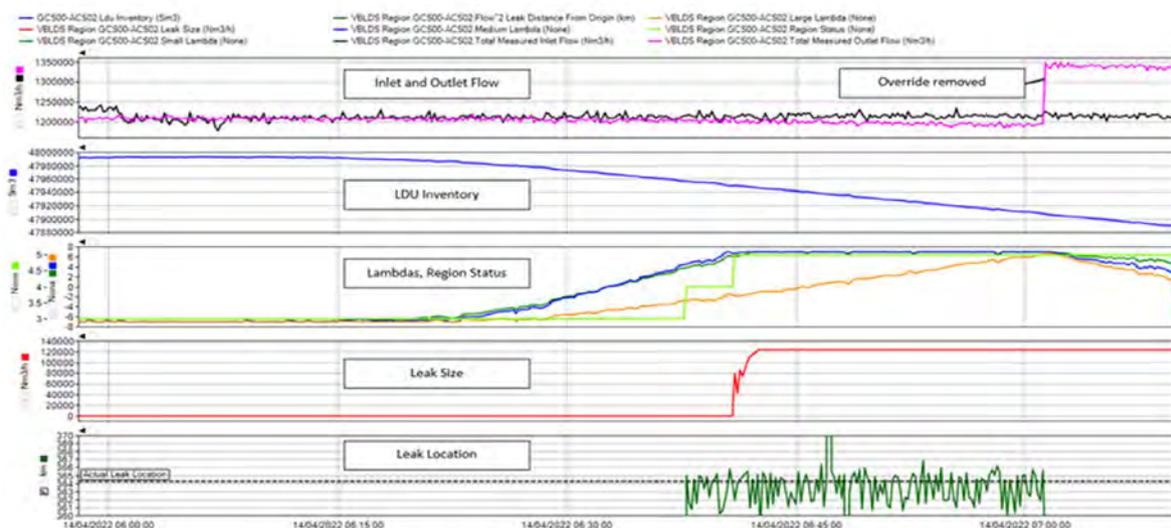
A forma de implementação e atuação não-intrusiva dessas tecnologias atendem a demanda crescente das grandes transportadoras e distribuidoras de gases combustíveis, por exemplo, as quais desejam realizar todas as suas operações do cotidiano, e ações necessárias de diagnóstico da integridade dos ativos, mas sem interromper ou afetar suas atividades essenciais, seja parcial ou integralmente, propiciando continuidade em seus processos sem custos adicionais pela operação.

Nos gráficos abaixo (Figura 3), os dados real-time estão presentes numa tela do software de detecção de vazamentos on-line Atmos SIM, monitorando um duto on-line (dados do Supervisorio SCADA) contendo um determinado 'blend' de gás natural e Hidrogênio, comum na Europa nos dias de hoje, com os resultados obtidos através da coleta de dados pela instrumentação existente na rede de transporte e distribuição por dutos.

Pode-se observar que o software detecta remotamente o vazamento da mistura de gases chamada "blend", sua localização em Km, vazão de perda ou tamanho do vazamento em Nm³/h, e demais informações de processo inerentes ao que ocorre de mudanças nas variáveis de processo com o advento dessa perda.

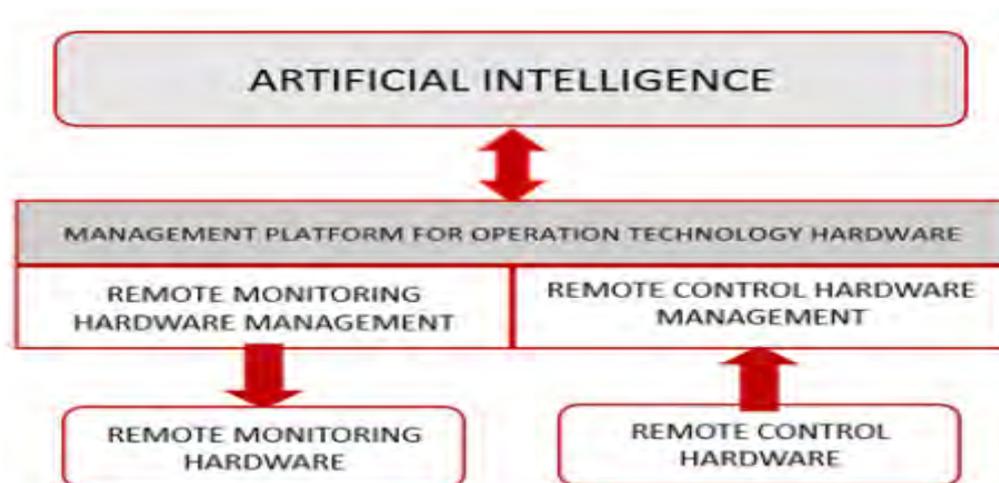
Um outro exemplo importante a citar é a plataforma de IA (figura 4) Giant da italiana Automa Srl, que é abastecida ou carregada com os dados coletados on-line ou real time referentes às variáveis de processo no caso de dutos: pressão, vazão, temperatura e velocidade dos fluidos. Durante 24h por dia a plataforma IA segue analisando os dados remotamente e gerando relatórios e diagnósticos de crise ou de melhoria para as operações da rede ou malha de dutos.

Fig. 3 - Gráficos de Detecção de Vazamentos



Fonte: Atmos International.

Fig. 4 - Plataforma GIANT IA



Fonte: Automa Srl.

Conclusão

Nesse artigo, destacou-se a importância do monitoramento e da gestão on-line e real time das variáveis dos processos para as empresas, formatando os seus resultados consolidados em diagnósticos instantâneos, os quais auxiliam na análise das condições de integridade e controle da corrosão, o que implica em maior segurança na operação dos sistemas, na previsão de crises, na melhor alocação dos recursos e investimentos, tornando mais eficiente a ação de melhoria na operação e manutenção da malha de dutos, como nos exemplos citados acima.

As novas tecnologias apresentadas no monitoramento remoto das variáveis essenciais dos processos, como por exemplo como no de transporte e distribuição por dutos, possibilitam o gerenciamento on-line dos seus estados e perturbações em campo, além disso soma-se o controle da corrosão dos dutos, através da telemedição da proteção da catódica e dos ajustes remotos dos retificadores de corrente impressa, responsáveis pela proteção e integridade dos dutos enterrados.

A evolução tecnológica nos processos causada pelas leituras remotas on-line das

variáveis de processo desencadeia um novo ciclo na área de gestão da integridade de ativos e controle da corrosão.

Uma nova geração de técnicos e engenheiros vêm se capacitando para esse novo desafio industrial, onde o gerenciamento dos dados coletados em campo e o seu tratamento computacional pode representar o diferencial operacional e de futuros investimentos na área e os fornecedores dessa tecnologia renovam seu portfólio anualmente e ofertam cada vez mais soluções técnicas remotas para as indústrias de energia e outras envolvidas nos transportes por dutos.

Referências

- Smith, Harry. Progress and challenges in pipeline theft detection. Rio Pipeline Conference & Exhibition, 2023. | ISSN 2447-2069
- Zhang, Jun. Meeting The challenges of gas transmission and distribution systems with advanced Technologies. Rio Pipeline Conference & Exhibition, 2023. | ISSN 2447-2069
- Metwally, Moemen; Modisette, Jason. THE ATMOS BOOK OF PIPELINE SIMULATION, Atmos International, First published 2022, ISBN 978-1-7391810-6-2.
- Magnifico, Ivano; Mercanti, Manlio. Soluciones de Vanguardia en Telecontrol y Monitoreo en Protección Catódica. LatinCORR & InterCorr, 2023. Rio de Janeiro, Brazil.

ESQUEMAS DE PINTURA PARA SUPERFÍCIES DE AÇO GALVANIZADO NOVO E ENVELHECIDO DE EQUIPAMENTOS E ESTRUTURAS METÁLICAS

Fábio Kränkel

1. Introdução

A galvanização é um processo amplamente utilizado para proteger estruturas metálicas contra corrosão. No entanto, a aplicação de pintura sobre superfícies galvanizadas requer cuidados especiais para garantir a aderência e a durabilidade do revestimento. Este artigo apresenta diretrizes para a pintura de superfícies de aço galvanizado, com base em normas técnicas e melhores práticas.

2. Preparação da Superfície

A preparação da superfície é um passo crítico antes da aplicação da pintura. Os principais métodos de preparação incluem:

- **Lavagem da Superfície:** A lavagem com água é fundamental para a remoção de contaminantes, como poeira, óleos, graxas e, principalmente, sais solúveis, que são resquícios comuns e inerentes ao processo de galvanização a quente por imersão. Esses contaminantes podem comprometer a aderência do revestimento e reduzir a durabilidade dos sistemas anticorrosivos. Recomenda-se o uso de água limpa, podendo ser adicionado um detergente específico, caso necessário, para potencializar a descontaminação. É importante que a superfície esteja totalmente seca antes da aplicação da pintura. A aplicação

Resumo

Este artigo aborda os esquemas de pintura recomendados para superfícies de aço galvanizado, tanto novo quanto envelhecido, com foco na preparação da superfície e nas especificações de aplicação de tintas, e também da preparação do aço galvanizado a quente para receber uma pintura, ressaltando importância da identificação e, se necessário for, da remoção da camada de passivação mantendo a conformidade dos serviços de pintura com a norma ABNT NBR 16733.

de alta pressão durante a lavagem também contribui substancialmente para a eficiência do processo, especialmente em superfícies de aço galvanizado.

- **Lixamento Manual Mecânico:** O lixamento manual mecânico é empregado para suavizar a superfície e remover irregularidades, sendo especialmente eficaz em áreas menores e de difícil acesso, onde se exige maior controle sobre a remoção da camada de zinco. O objetivo deste método é apenas gerar uma aspereza mínima, que favoreça a adesão das tintas e/ou do promotor de aderência. Deve-se utilizar lixas de grão fino para evitar a remoção excessiva do revestimento de zinco, preservando assim a integridade da camada protetora.
- **Jato de Varredura:** O “sweep blating” ou como também é conhecido, o jateamento de varredura é uma técnica eficaz para preparar superfícies, mas que deve ser realizado com cautela. O objetivo do jateamento é limpar a superfície sem remover a camada de zinco. Para isso, é fundamental ajustar a pressão do ar comprimido e a velocidade do bico do jato. O jateamento deve ser feito de forma leve, de maneira a “conformar” o substrato e evitando a remoção excessiva do material galvanizado.

3. Importância do Treinamento e Qualificação dos Profissionais de Jateamento

A qualificação dos profissionais responsáveis pelo jateamento é crucial para garantir a eficácia do processo de preparação da superfície. Profissionais bem treinados entendem a importância de conservar a camada de zinco, evitando a remoção excessiva que pode comprometer a proteção contra corrosão. O treinamento deve incluir:

- **Técnicas de Jateamento:** Os operadores devem ser capacitados nas técnicas adequadas de jateamento, incluindo a escolha do tipo de abrasivo, a pressão do ar e a distância do bico em relação à superfície.
- **Identificação de Falhas:** Profissionais qualificados devem ser capazes de identificar

falhas na superfície galvanizada, como corrosão inicial ou danos mecânicos, e aplicar reparos adequados, como metalização ou aplicação de tintas ricas em zinco, conforme a norma ASTM A 780.

4. Esquemas de Pintura

Sistemas de Pintura para Estruturas Galvanizadas

Para especificar o revestimento adequado, deve-se consultar a Tabela 2 da norma ABNT NBR 16733, que classifica as estruturas metálicas e equipamentos em diferentes situações e indica o esquema de pintura recomendado. Esses esquemas são definidos conforme o estado do aço galvanizado, que pode ser novo, envelhecido ou envelhecido com corrosão, e consideram a condição do substrato em relação à corrosão, o tratamento da superfície e o ambiente ao qual as estruturas estarão expostas.

Os esquemas incluem tanto tintas líquidas quanto tintas em pó, essenciais para a proteção e durabilidade das superfícies galvanizadas. Para situações específicas, como bases metálicas de equipamentos e estruturas fixadas em concreto, recomenda-se um sistema que inclua borracha líquida, manta geotêxtil e selador epóxi, combinação eficaz na prevenção de corrosão e aumento da vida útil das estruturas em ambientes desafiadores.

Foto # 1 - Bases metálicas dos equipamentos e estruturas apoiadas e fixadas em Concreto.



Revestimento executado com Borracha líquida + Manta geotêxtil + selador epóxi (na base de concreto)

A escolha do sistema de pintura deve, portanto, considerar o estado do substrato, o tratamento da superfície e as condições ambientais às quais as estruturas estarão expostas.

Esquemas de Pintura

Os esquemas de pintura descritos consideram o estado do substrato em relação à corrosão, o tratamento da superfície e o ambiente ao qual as estruturas estarão expostas. Os esquemas incluem:

- **Tintas Líquidas:** Tipos I a VII, conforme descrito nas seções específicas do documento 26.
- **Tintas em Pó:** Também categorizadas e descritas em detalhes.

Os esquemas de pintura variam conforme o tipo de tinta e a espessura desejada. A tabela a seguir resume os tipos de tinta e suas especificações:

Tipo	item	Tinta	Nº de demãos	EPS/demão (µm)	Espessura Total µm
Tipo I	6.2.1	Tinta de fundo: acrílica base água	01	70	210
		Tinta de acabamento: acrílica base água	02	70	
Tipo II	6.2.2	Tinta de fundo: epóxi	01	25	145
		Tinta de acabamento: poliuretano	02	60	
Tipo III	6.2.3	Tinta de fundo: epóxi	01	25	265
		Tinta intermediária: epóxi	01	120	
		Tinta de acabamento: poliuretano	02	60	
Tipo IV	6.2.4	Tinta de fundo: epóxi rico em zinco	01	75	195
		Tinta de acabamento: poliuretano	02	60	
Tipo V	6.2.5	Tinta de fundo: epóxi alumínio	01	120	240
		Tinta de acabamento: poliuretano	02	60	
Tipo VI	6.2.6	Tinta de fundo: epóxi alumínio	01	120	360
		Tinta intermediária: epóxi	01	120	
		Tinta de acabamento: poliuretano	02	60	
Tipo VII	6.2.7	Tinta de fundo: epóxi rico em zinco	01	75	315
		Tinta intermediária: epóxi	01	120	
		Tinta de acabamento: poliuretano	02	60	
Tipo VIII	6.3.1	Tinta em pó poliéster	01	80	80
Tipo IX	6.3.2	Tinta em pó poliéster	01	140	140
Tipo X	6.3.3	Tinta de fundo: Tinta em pó epóxi	01	90	170
		Tinta de acabamento: Tinta em pó poliéster	01	80	
Tipo XI	6.3.4	Tinta de fundo: Tinta em pó epóxi c/zinco	01	90	170
		Tinta de acabamento: Tinta em pó poliéster	01	80	

Nota: Quando consultado, o fabricante da tinta poderá recomendar outro tipo de tinta de fundo promotora de aderência (epóxi, vinílica ou outro tipo de resina), bem como a espessura de película seca mais adequada ao seu respectivo produto.

Fotos # 2 e # 3 - Bases metálicas de estruturas apoiada e fixada em concreto.



Fotos de cortesia: Fernando Loureiro Fragatas

Fotos # 4 e # 5 - Estruturas metálicas enterradas.



Fotos de cortesia: Fernando Loureiro Fragatas



A tabela demonstra que a escolha do tipo de tinta e a espessura total são fundamentais para a proteção da estrutura. É importante consultar o fabricante da tinta para recomendações específicas sobre a aderência e a espessura da película seca.

5. Condições Específicas de Aplicação

As condições de aplicação variam conforme a localização e o tipo de estrutura como, por exemplo, bases metálicas dos equipamentos e estruturas apoiadas e fixadas em Concreto: - A pintura deverá abranger as peças metálicas e demais componentes (porcas, arruelas e parafusos) apoiados e/ou fixados em concreto, bem como as peças das estruturas até uma altura de 60 cm, acima da superfície do concreto.

Já para estruturas enterradas: - a pintura deve ser aplicada em uma extensão de 1,2 m, sendo 0,6 m acima do solo e 0,6 m abaixo. Para estruturas fixadas em concreto, recomenda-se o uso de borracha líquida, manta geotextil e selador epóxi para garantir a proteção adequada.

6. Conclusão

A pintura de superfícies de aço galvanizado é um processo que requer atenção aos detalhes, desde a preparação da superfície até a escolha do esquema de pintura. A conformidade com as normas técnicas, como a ABNT NBR 16733,

é essencial para garantir a eficácia do revestimento e a durabilidade das estruturas metálicas. A colaboração entre fabricantes de tintas e profissionais de galvanização é fundamental para o sucesso deste processo.

A combinação da galvanização, com seu revestimento metálico protetor, e a pintura, através de revestimentos orgânicos e inorgânicos, oferece uma proteção sinérgica excepcional contra a corrosão, aumentando significativamente a durabilidade e a resistência dos materiais expostos a ambientes agressivos.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que tornaram o 7º Workshop de Galvanização a Fogo um grande sucesso!

Foi uma honra poder representar a Kratos Treinamentos e compartilhar conhecimento neste evento tão relevante.

Um agradecimento especial ao ICZ, IPT e ABRACO, assim como a todos os membros do Comitê Técnico, pela dedicação e esforço na organização deste workshop.

A troca de experiências e aprendizados foi enriquecedora e fundamental para o nosso progresso na área.

Durante minha apresentação, mencionei a importância da sinergia entre galvanização e pintura: "A combinação da galvanização, com seu revestimento metálico protetor, e a pintura, através de revestimentos orgânicos e inorgânicos, oferece uma proteção sinérgica excepcional contra a corrosão, aumentando significativamente a durabilidade e a resistência dos materiais expostos a ambientes agressivos." Que essa ideia continue a inspirar nossas práticas e inovações!

A todos que participaram e contribuíram para o sucesso do evento, meu muito obrigado!

Vamos juntos continuar promovendo a excelência na galvanização e pintura!

10º Seminário Brasileiro de Pintura Anticorrosiva

O Seminário Brasileiro de Pintura Anticorrosiva (SBPA) tornou-se um marco não somente no calendário da ABRACO, mas também no segmento da corrosão, e chegou a sua 10ª edição transbordando conhecimento a respeito das tendências atuais do mercado sobre novas tecnologias de produtos e de aplicação para prevenção da corrosão e manutenção em estruturas, equipamentos e plantas de processo.

Realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em São Paulo, no último dia 31 de outubro, o encontro contemplou um momento muito especial: uma singela homenagem ao professor Fernando Fragata, que não pôde estar presente, mas gravou um vídeo com uma mensagem para os participantes desta edição comemorativa pelos 10 anos do SBPA. Afinal, mais do que uma autoridade do setor, Fragata é um ícone. Um profissional que, há décadas, corrobora a missão da ABRACO, dividindo seu conhecimento e experiências com toda a comunidade de pintura.

Conforme afirmou nosso presidente, Neusvaldo Lira, “a sua contribuição para a organização e o sucesso de várias edições deste seminário é verdadeiramente notável. Sua paixão, empenho e visão foram fundamentais para a criação e o crescimento contínuo deste evento, que hoje se destaca como uma referência para profissionais e pesquisadores do setor.”

Sempre muito atuante, o professor Fragata tem uma capacidade ímpar de reunir especialistas, fomentar debates e promover inovações, sendo um verdadeiro mentor e incentivador de novas ideias. “Por isso, a nossa gratidão é imensa e a

marca é indelével na história deste seminário”, finalizou Neusvaldo.

Nesta edição do SBPA, tivemos, mais uma vez, a certeza de que estamos fazendo a coisa certa. A intensa participação de profissionais e inspetores de pintura denotam a importância desse tipo de evento. Já o suporte imprescindível de nossos apoiadores e patrocinadores nos mantém firmes nesse propósito de disseminar o conhecimento e cumprir nossa missão.

Por falar em suporte, vale ressaltar que a realização deste seminário somente foi possível a partir do apoio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, que nos cedeu seu auditório, bem como do patrocínio das empresas Jotun, Tintas Weg, Renner Coatings, Tinôco Anticorrosão, Eco Abrasivos e LGE Revestimentos.

Além disso, para que todo o evento acontecesse de forma plena e com conteúdo de excelência, contamos com a competência do comitê técnico composto por Neusvaldo Lira de Almeida (IPT), Adauto Riva (Renner Coatings), Adriana Araújo (IPT), Bernardo Rocha (Vale), Eder Dirceu Dela Justina (Weg Tintas), Erik Barbosa Nunes (Petrobras), Fábio Krankel (Kratos Treinamento



Neusvaldo Lira, em palestra durante o evento

e Consultoria), Isaac Catran (Abraco), Laerce de Paula Nunes (IEC Engenharia), Leonardo Mukim (Jotun) e Patrícia Ruani (Advance Tintas).

Programação

No primeiro bloco do seminário foram apresentadas palestras sobre os temas: *Novas tecnologias em tintas ricas em zinco*, por Zehbour Panossian, do IPT; *Casos de inspeção*, por Heron Pereira Mendes, da Renner Coatings; *Testes de Salinidade e Pull-Off: Abordagens Práticas e Análise de Desempenho*, por Vinicius Carvalho, da CPX coat; *Navegando para eficiência usando nanotecnologia - Tintas anti-incrustantes para redução de combustível*, por

Eder Dela Justina, da WEG Tintas; *Um panorama sobre grafeno e seus derivados em coatings*, por Danae Lopes Francisco, do IPT.

Após um breve intervalo para *brunch* tivemos as apresentações de Xavier Yves Roger Raby, da Gerdau, com o tema *Explorando o potencial do grafeno em revestimentos anticorrosivos industriais*; e Erik Barbosa Nunes, da Petrobras, com *Tecnologia de revestimentos viscoelásticos - conceito, características e aplicação*.

Em seguida, foi aberto o painel *Proteção passiva contra fogo*, quando os participantes puderam assistir à exposição dos trabalhos de: Rogério Lin, da Associação Brasileira de Proteção Passiva (ABPP), com *A importância da certificação e compatibilidade dos sistemas de proteção passiva contra incêndio*; Fábio Kränkel, da Kratos Treinamentos, com *Instalação dos Revestimentos do tipo PFP para o mercado offshore: desafios e soluções existentes*; e Everton Souza, da Jotun, com *Inspeção do Revestimento do tipo PFP: uma visão para o inspetor de pintura industrial*.

Não podemos finalizar esta matéria sem destacar mais um trecho das palavras de nosso presidente: "Que continuemos a avançar juntos, impulsionados pela inovação e pelo conhecimento, sempre com o espírito colaborativo que tem caracterizado o nosso seminário. E, ainda, que o SBPA continue sendo um espaço de aprendizado e desenvolvimento para todos nós."





Mantendo a integridade do aço

Motivados pelas condições mais difíceis, procuramos constantemente resolver os problemas futuros. Como parceiro de confiança de tintas e revestimentos de proteção anticorrosiva e contra fogo, oferecemos produtos e tecnologias inovadores que proporcionam desempenho excepcional para ativos de aço.



Apoia operações
eficientes



Reduz perigos
e riscos



Minimiza o impacto
ambiental

Jotun Brasil
marketing.brasil@jotun.com.br

Desde 1961

T **TINÔCO**
ANTICORROSÃO

**RECORDES EM PROTEÇÃO
ANTICORROSIVA DE
FLANGES E VÁLVULAS**

- ✓ 7 anos de proteção anticorrosiva comprovada
- ✓ Aumento da vida útil dos ativos e redução dos custos com manutenção
- ✓ Revestimento à base de água e secagem rápida (ao toque)
- ✓ Alta elasticidade e boa aderência ao metal e concreto



TRANSPETRO - ARCEL (SUZANO)

7 ANOS E 9 MESES

(2012 - 2020)
C5 Corrosividade Muito Alta
ISO 12944-9:2018



PETROBRAS - RLAM (Refinaria Landulpho Alves-Mataripe)

6 ANOS

(2014 - 2020)
CX Corrosividade Extrema
ISO 12944-9:2018



BRASKEM - PE 2 / Polo Petroquímico do Camaçari - Bahia

5 ANOS

(2015 - 2020)
CX Corrosividade Extrema
ISO 12944-9:2018

+55 21 98117-4557 | +55 21 3553-1953 • mtinoco@tinocoanticorrosao.com.br • www.tinocoanticorrosao.com.br



**REVESTIMENTOS INTELIGENTES
ANTICORROSIVOS**

TECNOLOGIA E CONFIANÇA QUE SUPERAM A FORÇA DO TEMPO PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL

41. 3341.3401

linkedin.com/company/rennercoatings

Av. Juscelino Kubitschek de Oliveira, 12453 - CIC - Curitiba/PR

rennercoatings.com



CORROSÃO? TEMOS A SOLUÇÃO!



ECO
ABRASIVOS

☎ (43) 99953-0062 ✉ williamcapello@gmail.com

www.ecoabrasivos.com

Anuncie na Revista Corrosão & Proteção

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

INFORMAÇÕES:
marketing@abraco.org.br




REVESTIMENTO DE POLIOLEFINA AMORFO, APOLAR, VISCO-ELÁSTICO, SEMISÓLIDO.

SOLUÇÕES	SISTEMA DE REVESTIMENTO	NORMAS DE REFERÊNCIA
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE TUBULAÇÕES DE AÇO OU FERRO FUNDIDO ENTERRADAS	VISCOTAQ ST WRAP + FITA DE PROTEÇÃO MECÂNICA PVC OUTERWRAP	ISO 21809
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE TUBULAÇÕES DE AÇO OU FERRO FUNDIDO EXPOSTAS	VISCOTAQ ST WRAP + FITA DE PROTEÇÃO MECÂNICA POLIETILENO OUTERWRAP	///
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE TRANSIÇÕES AÇO/POLIETILENO OU COALTAR	VISCOTAQ ST WRAP	ISO 21809
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE JUNTAS DE CAMPO	VISCOTAQ ST WRAP + FITA DE PROTEÇÃO MECÂNICA POLIETILENO OUTERWRAP	///
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE ÁREA CRÍTICAS EM PLATAFORMAS OFFSHORE (FLANGES, VÁLVULAS, ACESSÓRIOS, CANTOS VIVOS)	VISCOTAQ ST WRAP	///
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA NO ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DE PEÇAS E EQUIPAMENTOS	VISCOTAQ ST WRAP	ET 1500-913-PAZ-001
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE TUBULAÇÕES EM ÁREA DE AERAÇÃO/AR (ZONA DE TRANSIÇÃO);	VISCOTAQ ST WRAP + FITA DE PROTEÇÃO MECÂNICA POLIETILENO OUTERWRAP	///
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE BASE DE TANQUES (INTERFACE CONCRETO / AÇO)	PRIMER VISCOTAQ + VISCOTAQ EZ WRAP	///
PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DE TUBULAÇÕES DE AÇO PARA TEMPERATURAS ACIMA DE 70 GRAUS CELSIUS	VISCOTAQ EZ WRAP	///



vendas@grupolge.com.br
 Rua Dezesseis de Março 155
 sala 501 - Centro, Petrópolis - RJ
 25620-040






☎ (24) 2237-4275 ☎ (24) 99948-0333 🌐 <https://lgeserv.com.br/> @lgerestimentos

TINTAS WEG

TECNOLOGIA E PERFORMANCE EM TINTAS ANTICORROSIVAS



A **WEG Tintas** possui uma linha completa de **produtos anticorrosivos** para os mais diversos segmentos. Além de tintas anti-incrustantes para embarcações em geral, navios e plataformas offshore. São produtos homologados por órgãos nacionais e internacionais que garantem alta resistência física e química.

Visite agora o nosso perfil

  @wegtintas

 weg.net/tintas



Acesse o
catálogo completo

Driving efficiency and sustainability

VI Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamentos

No último dia 07 de agosto, a ABRACO promoveu o VI Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamentos, evento no qual especialistas do setor discutiram tecnologias e soluções inovadoras visando à manutenção e à segurança de dutos e equipamentos.

Todos nós, profissionais da área de corrosão, sabemos que esta deterioração demanda constante ação não apenas combativa, mas, principalmente, preventiva por parte de especialistas, visto que é um dos mecanismos de falha mais importantes que comprometem a integridade de dutos e equipamentos, e, conseqüentemente, de extremo impacto no resultado positivo de todas as operações dos setores econômicos usuários de tais estruturas.

Assim, o combate e a prevenção da corrosão, seja interna ou externa, são questões que permeiam todo o trabalho de profissionais deste segmento, bem como o da nossa Associação; uma preocupação permanente, que rompe as fronteiras de nosso país. E diante do fato de que a corrosão é inerente à existência de instalações e maquinários dos mais diversos, o esforço incansável no sentido de difundir o avanço de metodologias capazes de inibir sua evolução e também mitigar os danos decorrentes de sua ação, é a grande contribuição que a ABRACO entrega para a sociedade, por meio de seus cursos e eventos.

Desta forma, o *Seminário de Corrosão Interna e Externa de Dutos e Equipamentos*, que está em sua 6ª edição, é, sempre, uma oportunidade

ímpar para profissionais do setor se atualizarem, expandirem seus conhecimentos e trocarem experiências com seus pares. Trata-se de um encontro que apresenta uma visão ampla dos desafios e demandas, e no qual especialistas expõem soluções de mercado e tendências tecnológicas, como, por exemplo, técnicas de monitoração fundamentais na avaliação, tanto das ameaças do dia a dia quanto da efetividade das ações mitigadoras dos efeitos da corrosão.

Para compor este grande evento, realizado no Instituto Nacional de Tecnologia (INT), que gentilmente cedeu seu auditório, a ABRACO contou com a participação de especialistas conceituados no mercado, cujas contribuições foram imensuráveis.

Na abertura do encontro, os participantes ouviram a mensagem de boas-vindas proferida pelo nosso presidente, Neusvaldo Lira de Almeida, e pelo coordenador do Laboratório de Biocorrosão e Biodegradação do Instituto Nacional de Tecnologia/MCTI, dr. Walter Barreiro Cravo Junior, representando a drª Ieda Maria Vieira Caminha, que pôde estar presente.

Em seguida, Carlos Alexandre Martins da Silva, da Transpetro, e Ilson Palmieri Baptista, da Petrobras, fizeram a abertura do primeiro



Ilson Palmieri (Petrobras), Pedro Altoé (Petrobras), Carlos Alexandre (Transpetro), Denise Freitas (INT), João Klausing (Petrobras) e Neusvaldo Lira (ABRACO)

bloco, que abordou o tema *Corrosão Interna: Desafios nos Projetos de Descarbonização onshore e offshore para o Sequestro, Transporte e Armazenamento de CO₂*.

E, compondo esta primeira parte do dia, foram apresentadas as palestras: *Descarbonização com Projetos de CCUS/CCS no Brasil: status, tendências e oportunidades*, por Andrea Pontual Weydmann, gerente de tecnologia para CCS (Petrobras); *Corrosão sob tensão induzida por CO₂: abordagem metodológica da sua abrangência em dutos flexíveis e principais aprendizados*, exposto por Fabrício Pinheiro dos Santos (Petrobras); *Desafio do reaproveitamento da infraestrutura de O&G para CCUS: impacto da corrosão sob tensão em linhas flexíveis em ambientes de CO₂*, por Vanessa Dreilich (DNV); *Cenários e desafios da corrosão interna e seleção de materiais no transporte, processamento e injeção em sistemas de CCUS com CO₂ com impurezas*, por Pedro Altoé Ferreira (Cenpes/Petrobras); e *Desafios Metodológicos na Avaliação da Corrosão Interna com CO₂ impuro*, por Denise Freitas (INT) e por Mariana dos Reis Tagliari (UFRGS/Lamef). Mariana foi autora mas não esteve presente no evento.

Após o almoço, com espaço para o sempre bem-vindo networking, houve o segundo bloco, intitulado *Corrosão Externa: Interferências Elétricas e aplicação da Proteção Catódica em Áreas Industriais*, com mais três palestras, sobre os temas: *Interferência Elétrica provocada por rede de AT*, por Gláucio Weigert (Compagás); *Proteção Catódica em*



Neusvaldo Lira, presidente da ABRACO, e Walter Cravo, do INT, deram as boas-vindas aos participantes

Áreas Industriais, por Luiz Paulo Gomes (IEC Engenharia); *A importância da correlação de diferentes técnicas de inspeção para controle da corrosão externa de dutos*, por Christian Lorences (IGP).

Além disso, foi aberta uma mesa-redonda, que propiciou aos profissionais participarem do bate-papo acerca dos desafios da corrosão para os cenários apresentados.

A ABRACO, em nome do comitê técnico deste seminário (Carlos Alexandre Martins da Silva e Marcelo Lopes, da Transpetro; João Paulo Klausing Gervasio e Pedro Altoé, da Petrobras; Neusvaldo Lira de Almeida e Zehbour Panossian, do IPT), agradece a todos os que viabilizaram sua realização: à Petrobras e ao Governo Federal; ao Instituto Nacional de Tecnologia; às empresas Passivar, EGD Engenharia, Aselco e De Nora; aos palestrantes, que dedicaram seu tempo à expansão do conhecimento; e a todos os profissionais que compareceram, fortalecendo a nossa Associação.

A 7ª edição deste seminário está planejada para acontecer em novembro de 2025, também no Rio de Janeiro. Até lá!



**CONSEGUIMOS O
QUE TODOS QUERIAM:
A CURA DEFINITIVA
CONTRA A CORROSÃO.**

Tecnologia testada em laboratório

Presente em diversas empresas do Brasil

100% de confiança dos clientes



**Aumento da
vida útil dos
seus ativos**

**Monitoramento
remoto e
assistência
técnica**

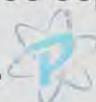
**Até 70% de
economia em
manutenção**

ÁREAS DE ATUAÇÃO

- Setores naval e offshore
- Dutos e reservatórios
- Setor automobilístico
- Construção civil
- Mineração
- Transporte
- Agronegócio
- Indústrias
- Galpões logísticos
- Linhas de transmissão
- Comércio e residências
- Usinas fotovoltaicas

Converse hoje mesmo com nossos especialistas.

**0800 880 6668
passivar.com.br**



Única empresa que possui um CTPC.

Centro de treinamento e pesquisas em Proteção Catódica.

Situado em Guararema-SP, com mais de 6.000 m² de área, o local conta com uma estrutura que inclui uma sala de treinamento equipada com recursos audiovisuais e instalações de campo, destinada à qualificação de profissionais na área de proteção catódica.



Conheça mais sobre nós em:



EGD
ENGENHARIA

ASELCO

COSASCO®

Monitoramento de corrosão interna - MICROCOR

Por conta de sua alta resolução e sensibilidade, esse sistema mostra-se ideal para ajuste de processo além de contribuir nas manutenções preventivas ligadas à integridade dos dutos, como por exemplo o uso otimizado de inibidores de corrosão.

Disponibiliza 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

Anodos de
óxido de metal misto
para proteção catódica



Lida®

Descubra mais sobre nossas soluções
para prevenção de corrosão

denorabrasil@denora.com
brasil.denora.com

DE NORA



A 7ª edição do Workshop de Galvanização: experiências e aplicações foi um grande sucesso!



Com o objetivo de promover o conhecimento e o desenvolvimento do setor de galvanização a fogo, o ICZ (Instituto da Cadeia de Zinco) e a ABRACO (Associação Brasileira de Corrosão) organizaram, no dia 9 de outubro de 2024, um evento no IPT – SP, que reuniu profissionais e entusiastas da área. Durante o encontro, foram discutidas as principais tendências e estratégias desse mercado, proporcionando um dia repleto de aprendizado, troca de experiências e fortalecimento de conexões.

O evento teve como foco disseminar a tecnologia da galvanização por imersão a quente como uma técnica eficiente para a proteção do ferro e aço contra a corrosão, proporcionando o aumento da vida útil das estruturas, além de esclarecer dúvidas sobre as diversas aplicações e especificações da técnica.

O engajamento dos 122 participantes presentes foi um dos destaques, demonstrando o crescimento e interesse em ampliar o conhecimento sobre a técnica. Os palestrantes, por sua vez, enriqueceram o evento ao compartilhar perspectivas únicas e *insights* sobre temas variados, como o mercado de zinco, otimização de processos de galvanização, sustentabilidade na cadeia produtiva e boas práticas do setor.

No evento foram apresentadas as palestras:

- Desafios econômicos - Projeções 2025
- Cenário do Zinco
- As inovações no controle do processo de galvanização

- Performance da Galvanização a Fogo em incêndio
- A Galvanização a Fogo na era da Indústria 4.0
- Esquemas de pintura para superfícies de aço galvanizado
- Galvanização por imersão a quente: uma longa história de sucesso.

Além disso, o evento contou com um painel de *cases* de sucesso e a novidade de dois trabalhos técnicos muito importantes para disseminação da galvanização. O participante Hugo M. Cruz trouxe um projeto com o tema “Influência dos elementos de liga na galvanização de material centrifugado”; e Paulo Roberto L. apresentou o projeto “Galvanização de Aço Reativo”.

Foi inspirador ver o empenho de nossa comunidade em promover e difundir a técnica de galvanização a fogo no Brasil.

Agradecemos muito aos nossos patrocinadores: Petrobras e Governo Federal, bbosch Galvanização do Brasil Ltda, Nexa Resources, International Zinc Association, Raitz e Surtec, palestrantes e participantes.

E já temos boas notícias para o ano que vem: a próxima edição do evento está confirmada para novembro de 2025, e teremos a honra de contar com a participação especial da Petrobras como patrocinador Diamante!

Juntos, estamos construindo um futuro cheio de soluções.

EXCELÊNCIA NA GALVANIZAÇÃO A FOGO

Com o objetivo de **atender de forma eficiente** o **crescente mercado metalúrgico**, acreditando que **inovação, qualidade e pontualidade** são fatores essenciais para o atendimento com excelência, a **ZTEC** conta com matérias primas e **equipamentos de última geração** e uma equipe de profissionais altamente qualificados, o que garante a sua classificação como uma das mais otimizadas empresas do setor de galvanização por imersão a quente.



CONHEÇA MAIS EM:

☎ 11 2632 5252 | 11 2632 5232

📞 11 94171 5232

🌐 ztecmetais.com.br

📍 Rua Benedita Dornellas Claro, N° 500
Vila Maria - Km 1,5 Dutra - São Paulo - SP



26 ANOS

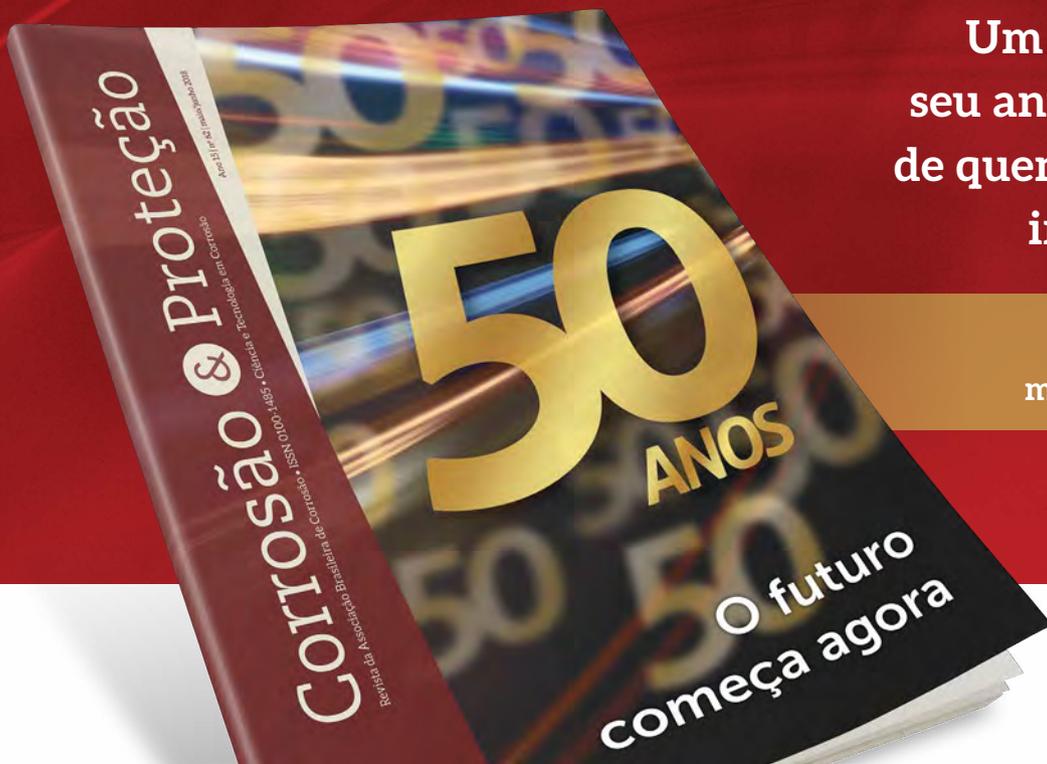
DE QUALIDADE TÉCNICA
E PONTUALIDADE

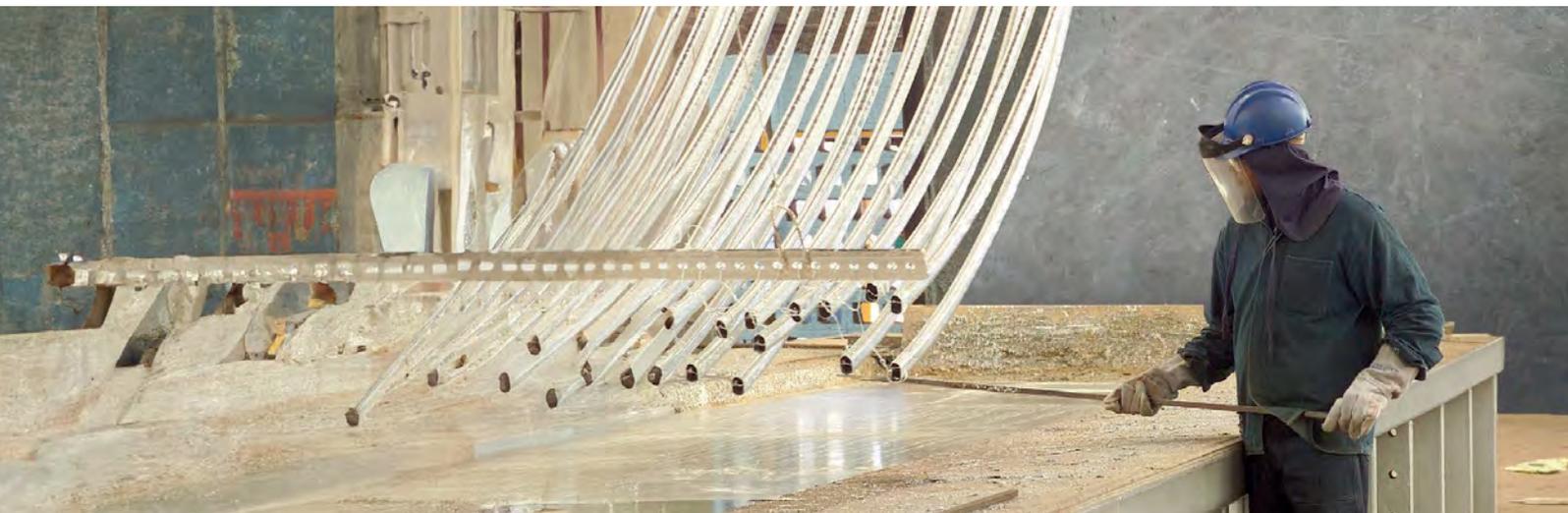


Anuncie na Revista Corrosão & Proteção

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

INFORMAÇÕES:
marketing@abraco.org.br





Galvanização a Fogo

A melhor proteção contra a corrosão do aço

Benefícios destacados:



Inovação contínua na relação com nossos clientes



Processos de galvanizado de vanguarda



Ampla rede de suporte no Brasil e no Chile



Compromisso com a melhor relação custo benefício



Contribuição para o desenvolvimento sustentável

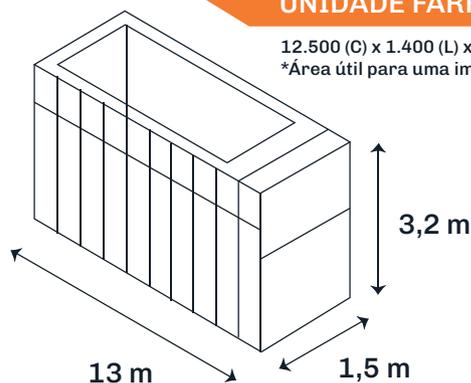
UNIDADE JUNDIAÍ - SP

12.700 (C) x 1.700 (L) x 2.700 (A) mm
*Área útil para uma imersão



UNIDADE FARROUPILHA - RS

12.500 (C) x 1.400 (L) x 2.900 (A) mm
*Área útil para uma imersão



bbosch: Garantia de qualidade certificada por décadas de experiência

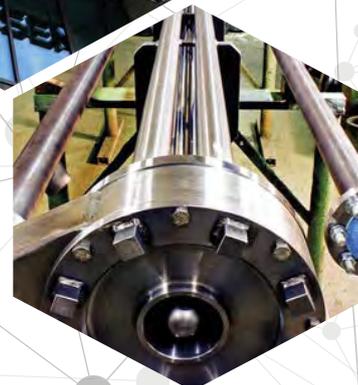
Contate-nos

☎ 11 21527900

✉ contato@bbosch.com.br

Siga-nos  

- Desengraxantes Ácidos
- Inibidores
- Fluxos
- Ligas Especiais de Zinco
- Cubas para Galvanização a Fogo
- Bombas de Zinco de Alta Performance
- Inspeção da Cuba de Zinco com Ultrassom
- Assistência Técnica



✉ info.br@kdfeddersen.global ☎ +55 (11) 98136-3409

Oxiprana desenvolve produtos químicos que geram menos impactos ambientais

A Oxiprana desenvolve produtos químicos eficientes, gerando menos consumo nas aplicações, causando menos impacto ambiental.

Além disso, a empresa oferece consultoria e assistência técnica, disponibilizando as melhores soluções de aplicação dos produtos e melhorias no processo, de acordo com a necessidade de cada cliente.

LISTA DE PRODUTOS

- Desengraxantes Alcalinos e Ácidos
- Desengraxante Alcalino Spray a Frio e a Quente
- Aditivos para Desengraxante a Spray a Frio e a Quente
- Decapantes Ácidos
- Decapantes Neutro
- Fluxos para Galvanização a Fogo
- Oxidante para tratar o ferro do fluxo
- Oxidante para tratar o ferro do desengraxante ácido
- Inibidores de Corrosão
- Passivadores a base de cromo
- Protetivo isento de cromo para Galvanização
- Passivador para tirar o brilho do galvanizado em Torres de Alta Tensão
- Óleo de Estampagem
- Óleos Protetivos e Conformação
- Lubrificantes de esteira
- Fosfatos de Zinco e Tricatiónico
- Refinadores e Acelerador para Fosfato
- Nanocerâmico
- Removedores de Tinta

 **xiPranaQuímica**
Soluções que nos conectam à vida

MATRIZ: Rua Bagre, 768 - Prazeres - Jaboatão dos Guararapes - PE

FILIAL: Rua Helena Pellizzari Lorençon, 727 - Santa Júlia - Itupeva - SP (Eco Park Empresarial)

Telefones: 📞 (11) 94188-9672 (11) 4290-0720 - E-mail: comercial@oxiprana.com.br

Zinco: Proteção de alta Performance

Quando se trata de proteção do aço contra a corrosão, os revestimentos com zinco são imbatíveis. O **zinco**, além de criar uma barreira protetora que impede a corrosão, oferece proteção catódica ao aço, **prolongando a vida útil** de estruturas expostas mesmo em ambientes agressivos.

Além disso, o zinco é **100% reciclável**, mantendo suas propriedades ao longo do tempo e contribuindo para soluções mais sustentáveis. Com menor necessidade de intervenções, ele garante um **investimento inteligente** e uma **opção ecoeficiente**.

Escolha zinco: mais **proteção**, menos **manutenção** e um futuro mais **sustentável**.



MINERAÇÃO
QUE **MUDA** COM O
MUNDO

Acesse o site
Nexa para mais
informações



35 ANOS

**OFERECENDO A MELHOR
SOLUÇÃO CONTRA A
CORROSÃO**

Atuando no mercado desde 1989, a Raitz Galvanização surgiu com o propósito de oferecer qualidade e tecnologia no tratamento de superfície metálicas. A empresa destaca-se pela preocupação constante em proporcionar satisfação aos seus clientes, além de excelentes serviços e produtos atrelados ao respeito para com o meio ambiente.

Raitz
GALVANIZAÇÃO



Member of CISQ Federation



CERTIFIED MANAGEMENT SYSTEM

ISO 9001 - ISO 14001

CONTATO: (47) 98497-4526

EMAIL: COMERCIAL@GALVANIZACAORAITZ.COM.BR



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

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 BRASILEIRO 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

SACOR SIDEROTÉCNICA S/A
www.sacor.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

Biblioteca: biblioteca@abraco.org.br

CB-43: cb43@abraco.org.br

Comunicação: marketing@abraco.org.br

Eventos: eventos@abraco.org.br

Financeiro: financeiro@abraco.org.br

Gerência Geral: gerenciageral@abraco.org.br

Presidência: presidencia@abraco.org

Qualificação e Certificação: qualificacao@abraco.org.br

Treinamentos: cursos@abraco.org.br