

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS GALVANIZADOS INDUSTRIAIS COM E SEM CROMATIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ANTICORROSIVAS

João Alberto Martins Costa ⁽¹⁾ (joaoalbertomcosta@gmail.com), Luan Omena Bernardi ⁽¹⁾ (luan.bernardi@ufpe.br), Lucas Afonso Lyra ⁽¹⁾ (lucas.afonsolyra@ufpe.br), Euclides Apolinário Cabral de Pina ⁽¹⁾ (euclides.cabral@ufrpe.br), Magda Rosângela Santos Vieira ⁽¹⁾ (magda.vieira@ufpe.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE); COMPOLAB-LBC

RESUMO: O processo de galvanização por imersão é muito utilizado como forma de proteção anticorrosiva de estruturas metálicas, promovendo mutuamente, uma barreira física e a proteção catódica do substrato, atuando como “eletrodo de sacrifício”, caso metal de base venha a ser exposto. Ao processo de galvanização é comumente utilizado de forma associada, o processo de cromatização, que consiste na imersão da peça galvanizada em um banho contendo íons cromo hexavalente e trivalente. Apesar do caráter protetivo, a maior limitação desse processo são os efeitos tóxicos e carcinogênicos do Cr^{+6} . O presente trabalho tem como objetivo investigar a efetividade de proteção anticorrosiva da camada de cromatização aplicada sobre aço carbono galvanizado, obtido por meio de processo industrial, quando exposto ao NaCl. No presente estudo foram investigadas 3 condições de revestimentos galvanizados obtidos por meio de processo industrial sobre o aço ASTM A36: G (aço galvanizado); C10 (galvanização + cromatização por 10s) e C30 (galvanização + cromatização por 30s). Foi realizado o monitoramento da espessura dos revestimentos e da rugosidade das superfícies. Para avaliação da microestrutura do revestimento foram obtidas micrografias por MEV. Para análise da resistência à corrosão foram realizados ensaios de polarização linear em solução de NaCl 3,5%.

PALAVRAS-CHAVE: galvanização; cromatização; resistência à corrosão.

EVALUATION OF INDUSTRIAL GALVANIZED COATINGS WITH AND WITHOUT CHROMATIZATION FOR THE EVALUATION OF ANTICORROSION PROPERTIES

ABSTRACT: The hot-dip galvanizing process is widely used as a form of anti-corrosion protection for metallic structures, mutually promoting a physical barrier and cathodic protection of the substrate, acting as a “sacrificial electrode” if the base metal is exposed. the chromatization process is commonly used in combination with the galvanizing process, which consists of immersing the galvanized part in a bath containing hexavalent and trivalent chromium ions. Despite the protective nature, the biggest limitation of this process is the toxic and carcinogenic effects of Cr^{+6} . The present work aims to investigate the effectiveness of anti-corrosion protection of the chromatization layer applied to galvanized carbon steel obtained through an industrial process, when exposed to NaCl. In the present study, 3 conditions of galvanized coatings obtained through an industrial process on ASTM A36 steel were investigated: G (galvanized steel); C10 (galvanization + chromatization for 10s) and C30 (galvanization + chromatization for 30s). The thickness of the coatings and the roughness of the surfaces were monitored. To evaluate the microstructure of the coating, micrographs were obtained by SEM. To analyze corrosion resistance, linear polarization tests were carried out in a 3.5% NaCl solution.

KEYWORDS: hot-dip galvanizing; chromatization; corrosion resistance.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas, componentes e utilitários metálicos expostos às ações do meio ambiente estão sujeitos a danos causados por corrosão, que podem promover impactos negativos na durabilidade e desempenho dos materiais, ocasionando prejuízos financeiros, ambientais e sociais. (Gentil e Carvalho, 2022).

No cenário nacional e mundial, a preocupação com a estabilidade dos materiais metálicos é frequente. Várias são as tentativas de retardar a corrosão, que pode ser definida como um processo espontâneo, no qual o metal tende a voltar ao seu estado de menor energia. Essa deterioração do material metálico ocorre por meio da ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos (Gentil e Carvalho, 2022).

Diversos setores industriais são fortemente atingidos por problemas de corrosão, podendo se destacar as áreas da indústria química, petrolífera, petroquímica, naval, construção civil, automobilística, eletroeletrônicos, alimentícia, meios de transporte, comunicação, médica, odontológica, etc. O processo de corrosão pode causar alterações indesejáveis no material original, como perda de massa, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado ao uso (Gentil e Carvalho, 2022).

O interesse por alternativas de métodos de proteção no combate à corrosão é contínuo e crescente, frente aos elevados custos financeiros associados a esse processo (Revie, 2011). Estima-se que aproximadamente 3 a 4% do PIB (Produto Interno Bruto) das nações são gastos com corrosão, o que em termos financeiros, seriam estimando um custo global com o processo de corrosão de aproximadamente 2,5 trilhões de dólares (Koch, 2017).

O contínuo aperfeiçoamento dos métodos de proteção tradicionais e desenvolvimento de novos métodos eficientes, que promovam o aumento da vida útil de materiais susceptíveis à corrosão, é um tema de grande interesse e relevância para a indústria, pois além de promover a maior durabilidade do material, reduz os custos de manutenção, riscos de acidentes operacionais e ambientais.

Dentre os diversos métodos protetivos, a galvanização é um dos processos tradicionais largamente difundidos. Esse método consiste em revestir os substratos metálicos, geralmente aço ou ferro fundido, com um metal menos nobre, o zinco, para o aumento da proteção anticorrosiva e a estética das peças revestidas. O processo de galvanização por imersão é muito utilizado como forma de proteção anticorrosiva de estruturas metálicas, possibilitando que o revestimento promova, mutuamente, uma barreira física e a proteção catódica do substrato, atuando como “eletrodo de sacrifício”, caso metal de base venha a ser exposto (Kuklík e Kudlacek, 2016; Panossian, 1993; Pannoni, 2017).

De forma resumida, pode-se afirmar que a eficácia protetiva do revestimento de zinco em aços carbono depende de sua capacidade de agir como barreira de isolamento entre o metal base e a atmosfera, tendo relação direta com a espessura, uniformidade, aderência, baixa porosidade e ductilidade; e sua capacidade de proteção eletrolítica para o aço, agindo como ânodo de sacrifício pela formação de um par galvânico, principalmente em arestas ou áreas onde parte do revestimento foi perdido (Kuklík e Kudlacek, 2016; Panossian, 1993).

A peça submetida à galvanização pode ser utilizada logo após a finalização do processo, que leva poucos minutos. Entretanto, em ambientes úmidos, estruturas e peças galvanizadas estão sujeitas à oxidação, gerando um produto de corrosão de cor branca. Em complementação ao recobrimento de zinco, geralmente após a galvanização propriamente dita, é realizado o processo cromatização, que consiste em um tratamento de passivação, que visa a proteção do zinco metálico, dificultando a ocorrência de corrosão branca (Panossian, 1993; Panossian, 1997).

O processo de cromatização é um tratamento químico, no qual as estruturas são imersas em banhos de pH inferior a 1,5 e que resulta na formação de uma camada de conversão fina, inferior a 1µm, composta de íons de cromo trivalente, cromo hexavalente e zinco (Da Rosa, 2009). Este tratamento pode resultar em um brilho superior e aumento da resistência à corrosão.

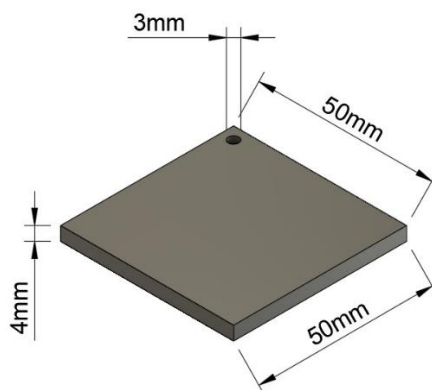
Devido a questões ambientais e de segurança operacional, vem se buscando, cada vez mais, a eliminação processos que utilizem substâncias tóxicas e nocivas ao ser humano e/ou ao meio ambiente, como o cromo. No caso do processo de cromatização, apesar da busca constante por alternativas totalmente isentas de sais de cromo, a utilização de cromo trivalente (Cr^{3+}) ainda se destaca como a melhor opção ao cromo hexavalente (Cr^{6+}), que é extremamente tóxico e cancerígeno (Pokorny *et al.*, 2016; Proctor *et al.*, 2014; Bastos, 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho busca investigar a efetividade de proteção anticorrosiva da camada de cromatização aplicada sobre aço carbono galvanizado obtido por meio de processo industrial, quando exposto a meios corrosivos ricos em cloretos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram confeccionados corpos-de-prova aço carbono ASTM A36, de dimensões de 50 mm x 50 mm x 4 mm com um furo de 3 mm num dos vértices da amostra, conforme desenho apresentado na Figura 1. A composição do aço utilizado encontra-se apresentada na Tabela 1. A chapa de Aço ASTM A36 foi fornecida pela empresa Galvanisa (Igarassu-PE), sendo as amostras feitas na própria firma.

FIGURA 1. Representação dos corpos de provas.



Fonte: Autor (2024).

TABELA 1. Composição química do aço ASTM A36.

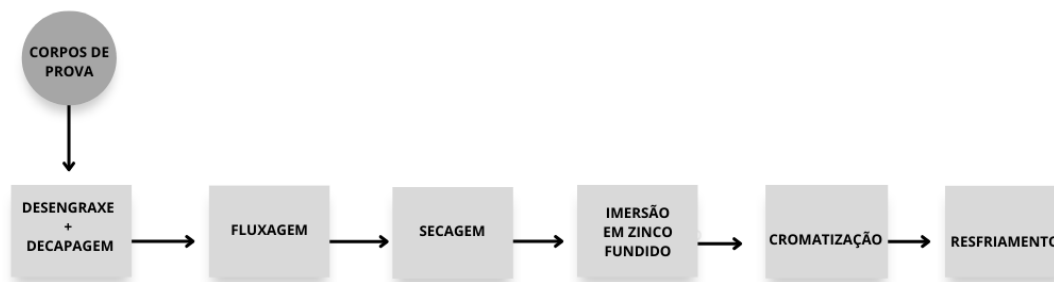
Fe (%)	C (%)	Cu (%)	Mn (%)	P(%)	Si (%)	S (%)
98	0,25	0,2	1,03	0,04	0,028	0,05

Fonte: Autor (2024).

As amostras de aço carbono foram submetidas ao processo de galvanização industrial da empresa Galvanisa (Igarassu-PE). Primeiramente, as amostras passaram por limpeza mecânica, via jateamento abrasivo com escória de cobre, para remoção de óxidos e contaminantes sólidos aderentes.

Após processo de limpeza mecânica, os corpos de prova foram direcionados ao processo de galvanização, que no caso da empresa Galvanisa, consiste em 6 etapas, conforme fluxograma de processo apresentado na Figura 2. Todas as etapas foram realizadas utilizando os parâmetros de processo utilizados pela empresa.

FIGURA 2. Fluxograma do processo de galvanização utilizado na empresa.



Fonte: Autor (2024).

Para o processo de desengraxe e decapagem ácida, foi utilizada solução comercial composta surfactantes e ácido inorgânicos, não sendo revelada a composição pela empresa. O tempo de imersão neste banho foi de 10 min. Esta primeira etapa teve o objetivo de remover óleos, graxas e produtos de oxidação. Após essa etapa, os corpos de prova passaram por 2 tanques de lavagem em água, visando remover os produtos ácidos e evitar a contaminação do banho seguinte.

Logo após, as peças foram imersas em um banho fluxante, contendo uma solução à base de sal duplo de zinco e amônia, com a função de melhorar a molhabilidade do aço no banho de zinco fundido, e promover a remoção de óxidos formados sobre a superfície, pois a etapa anterior deixa o substrato completamente exposto.

Após a fluxagem, os corpos de prova foram submetidos à secagem, para promover um pré-aquecimento das peças antes de realizar a imersão em zinco fundido. Esta etapa é muito importante para a segurança operacional durante o processo, evitando a ocorrência de explosões provenientes do contato da superfície fria com o zinco fundido.

Realizado o pré-aquecimento, as amostras foram submetidas à imersão em zinco fundido. A temperatura média do banho foi de 448 °C. O tempo de imersão utilizado foi de 2 min. Nesse momento, 1/3 das amostras seguiram diretamente para a etapa de resfriamento à temperatura ambiente e as outras foram submetidas à imersão em banho cromatizante.

Para as amostras submetidas ao processo de cromatização, foram investigados dois tempos de imersão: 10 s e 30 s. A concentração do banho cromatizante no dia da realização do processo era de 0,46 % m/v de Cr^{3+} (dado informado pela empresa). Após esse procedimento, as amostras foram submetidas a resfriamento à temperatura ambiente. Na Figura 3, é apresentada uma fotografia que mostra uma vista geral dos tanques utilizados no processo de galvanização.

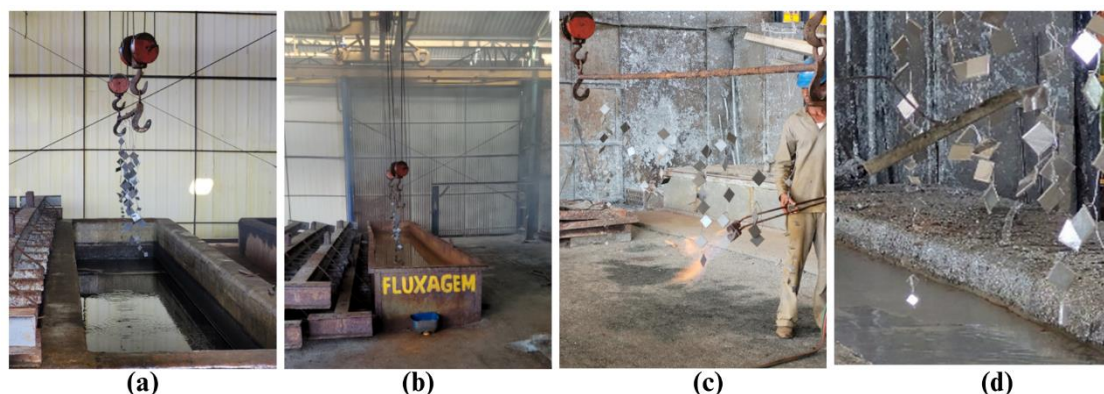
FIGURA 3. Vista geral do processo de galvanização da empresa Galvanisa.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 4 apresenta as diferentes fases do processo de obtenção das amostras na empresa Galvanisa.

FIGURA 4. Fases da obtenção das amostras galvanizadas – (a) decapagem e desengraxe; (b) secagem; (c) fluxagem e (d) zinco fundido.



Fonte: Autor (2024).

Para as análises e caracterizações, foram investigadas quatro condições de amostras, conforme descrição detalhada apresentada no Quadro 1.

QUADRO 1. Identificação das condições das amostras investigadas.

Código	Descrição da Amostra
Aço	Aço Carbono ASTM A36 (jateado)
G	Aço galvanizado
C10	Aço galvanizado + cromatização (10s)
C30	Aço galvanizado + cromatização (30s)

Fonte: Autor (2024).

Foram fabricadas cinco amostras para cada uma das condições supracitadas, sendo uma identificada pelo código do Quadro 1, acrescido da numeração variável de 1 a 5.

A espessura da camada do revestimento foi medida em cada uma das cinco amostras produzidas nas condições G, C10 e C30. Foram realizadas cinco medidas aleatórias em cada face da peça. As medições foram realizadas na empresa Galvanisa, utilizando um medidor digital de espessura, modelo MCT – 401 da marca Minipa. O resultado da espessura foi expresso a partir de 10 medidas em cinco amostras para cada condição, ou seja, a média e o desvio padrão foram obtidos a partir de 50 medidas.

Para realização da análise de rugosidade, as amostras foram previamente submetidas à limpeza em banho ultrassônico (marca ULTRACLEANER, modelo 800A), em álcool isopropílico e acetona, por cinco minutos cada.

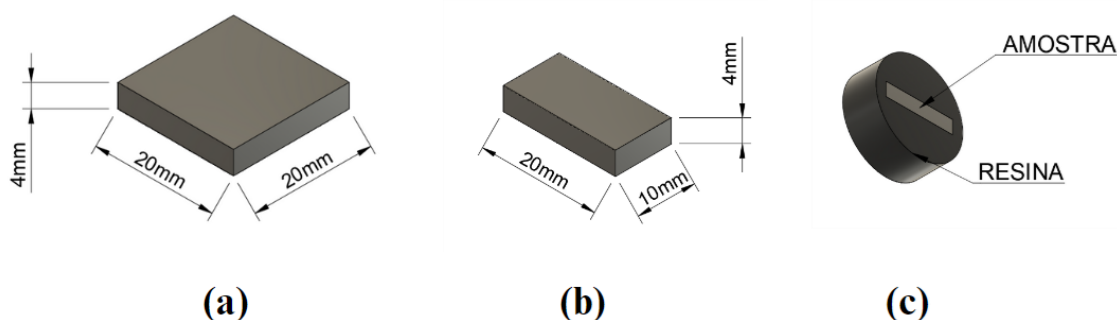
A rugosidade das amostras com e sem revestimento foi analisada por meio de um rugosímetro (Shop Floor Intra da Taylor Hobson® Ametek® e o software de análises TalyProfile Gold 7.4.8118), instalado no Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural da UFPE (COMPOLAB-LBC). Para cada condição, foram utilizadas duas amostras, sendo realizadas três medidas, em cada lado do corpo de prova.

Para avaliação morfológica e microestrutural dos revestimentos, foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura, utilizando-se um microscópio da Marca Hitachi Modelo TM3000.

Foram confeccionados corpos de prova de tamanhos menores a partir das amostras maiores, utilizando-se uma máquina de corte serra fita marca Fanho e modelo FMG 18-S. Para análise da superfície do revestimento foram utilizados corpos de prova de dimensões 20 mm x 20 mm x 4 mm e para avaliação da seção transversal, foram utilizados corpos de prova de dimensões 20 x 10 x 4 mm, os quais foram embutidos em resina fenólica-baquelite em pó, utilizando uma embutidora automática Struers, modelo CITROPRESS-30, disponibilizada no COMPOLAB-LBC. Na Figura 26, são apresentadas representações dos corpos de prova utilizados para análise de MEV, (a) análise de superfície, (b) avaliação da seção transversal antes e (c) após embutimento em resina baquelite.

As amostras embutidas foram submetidas à preparação metalográfica, utilizando-se uma politriz da marca AROTEC, modelo AROPOL VV. Foi realizado lixamento com lixa de carbeto de silício nas granulometrias de 200, 400, 600 e 1200 mesh; em seguida, foi realizado polimento com pasta de diamantes de 3 µm e solução lubrificante (50% isopropanol e 50% glicerina).

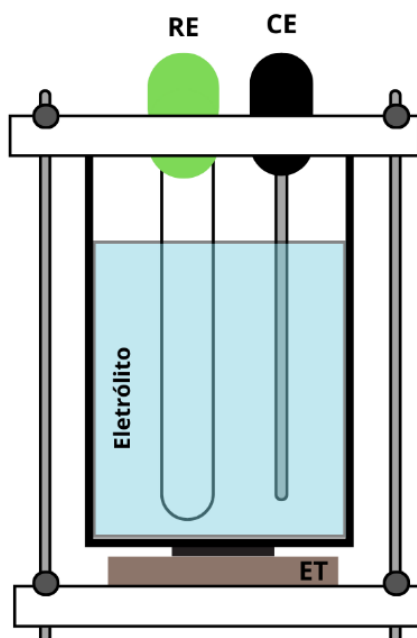
FIGURA 5. Representação dos corpos de prova para MEV – (a) análise de superfície, (b) avaliação da seção transversal antes e (c) após embutimento em resina baquelite.



Fonte: Autor (2024).

Visando compreender a resistência à corrosão das amostras investigadas foram realizados ensaios eletroquímicos e polarização linear, utilizando-se um Potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302 N e software de análise NOVA 2.1.4. Os ensaios foram conduzidos em uma célula plana de três eletrodos, conforme esquema da Figura 6, sendo o eletrodo de trabalho (ET) correspondente à amostra de interesse, e como eletrodo auxiliar ou contraeletrodo (CE), foi utilizado um eletrodo de platina e como eletrodo de referência (RE), um eletrodo de Ag/AgCl saturado. Como eletrólito, foi utilizada uma solução aquosa de NaCl 3,5% m/v.

FIGURA 6. Representação da célula eletroquímica utilizada.



Fonte: Autor (2024).

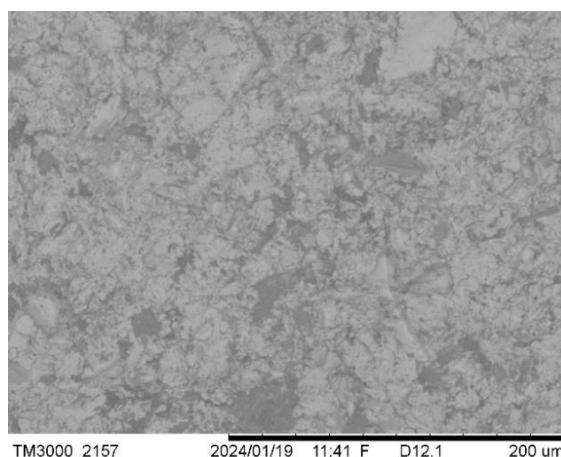
O eletrodo de trabalho utilizado consistiu em um corpo de prova de dimensões 20 mm x 20 mm x 4 mm (idêntico ao da Figura 26 (a)). A área útil de ensaio, submetida ao contato com o eletrólito, correspondia à área do orifício da célula plana de 1 cm², delimitada por um O-ring.

As curvas de polarização foram obtidas a uma taxa de varredura de 0,001 V/s em um intervalo de -1,0 V a +1,0 V em relação ao potencial de circuito aberto registrado após 24hs, tempo utilizado para estabilização do potencial do sistema. As medidas eletroquímicas foram realizadas em duplicata, utilizando uma gaiola de Faraday, visando evitar interferências nos resultados. Os ensaios foram realizados no COMPOLAB-LBC.

3. RESULTADOS

Foram obtidas três diferentes condições de revestimento metálicos via processo de galvanização por imersão a quente em condições industriais, aplicados sobre aço ASTM A36 jateado. Na Figura 7 é apresentada uma micrografia obtida por MEV do substrato de aço jateado. O corpo de prova jateado apresentou a superfície com topografia texturizada, com a presença de cavidades provenientes da ação do abrasivo.

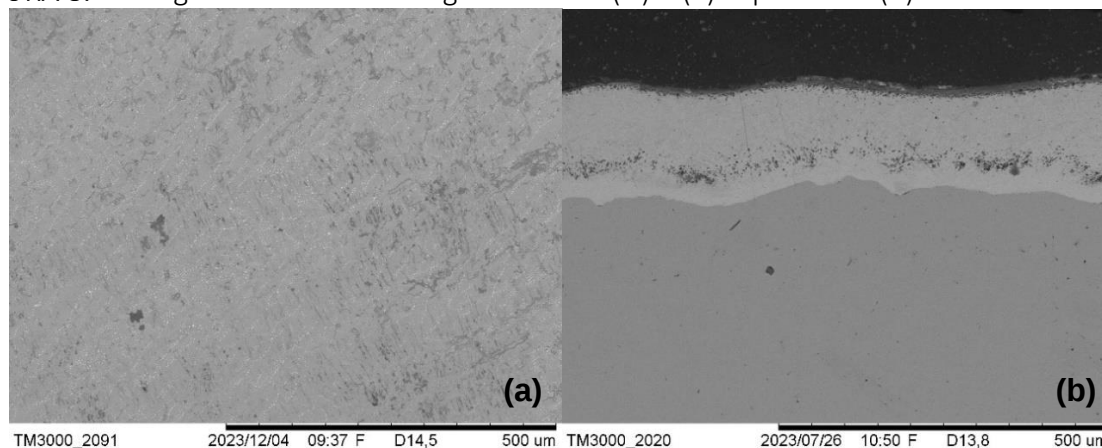
FIGURA 7. Micrografia do substrato jateado.



Fonte: Autor (2024).

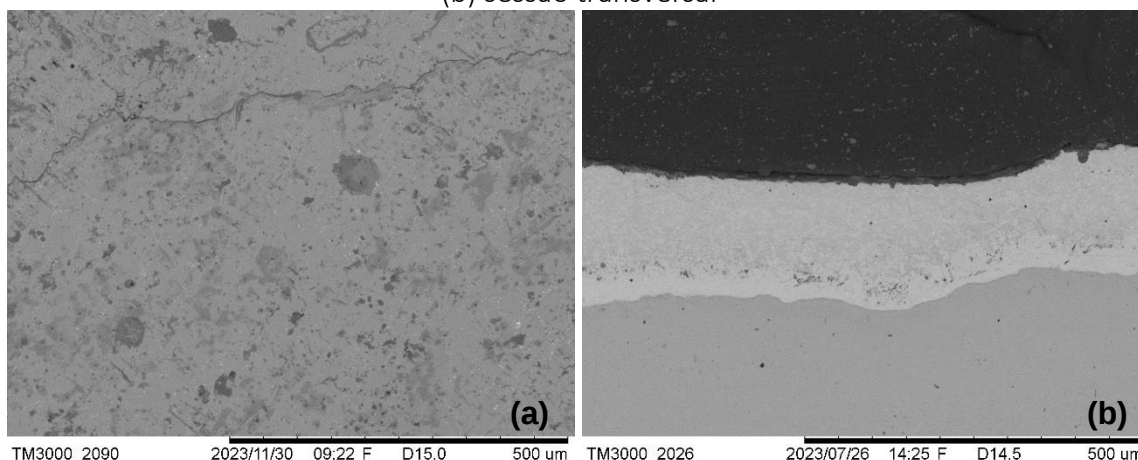
Nas Figuras 8, 9 e 10 podem ser observadas micrografias da superfície (a) e da seção transversal (b), obtidas por MEV das amostras galvanizadas (G); galvanizadas e cromatizadas nos tempos de 10s (C10) e 30s (C30).

FIGURA 8. Micrografias das amostras galvanizadas (G) – (a) superfície e (b) sessão transversal.



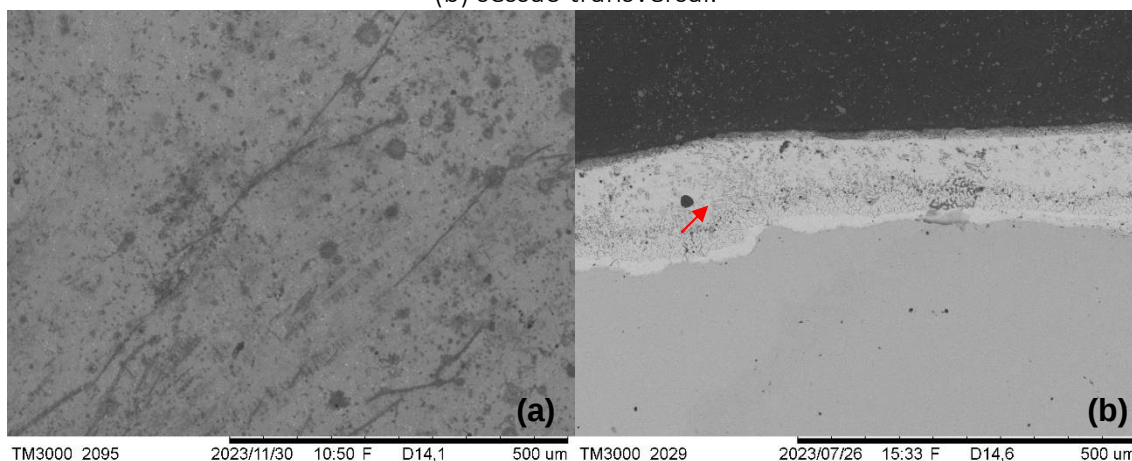
Fonte: Autor (2024).

FIGURA 9. Micrografias das amostras galvanizadas + cromatização por 10s (C10) – (a) superfície e (b) sessão transversal



Fonte: Autor (2024).

FIGURA 10. Micrografias das amostras galvanizadas + cromatização por 30s (C30) – (a) superfície e (b) sessão transversal.



Fonte: Autor (2024).

As micrografias mostram que houve o depósito de revestimentos com heterogeneidades superficiais para todas as condições investigadas, com a presença de mais de uma fase (zonas claras e escuras). Na amostra C30 (Figura 10 (b)) pode ser observada a presença de poros nas camadas intermetálicas, conforme indicação em destaque.

A análise das sessões transversais mostra que a reação metalúrgica entre o aço e o zinco fundido foi efetiva, havendo a formação de revestimentos integrados ao substrato e de camadas intermetálicas, típicas do processo de galvanização por imersão em zinco fundido.

Visando ter uma análise quantitativa da espessura dos revestimentos, são apresentadas na Tabela 2 as médias e desvios padrões, provenientes de 50 medidas de espessura, referentes a cinco amostras para cada condição investigada.

TABELA 2. Espessura dos revestimentos.

Amostra	Média da Espessura (mm)	Desvio Padrão (mm)
G	145,96	18,71
C10	156,52	22,02
C30	139,42	17,55

Fonte: Autor (2024).

Os dados apresentados na Tabela 2 indicam que há heterogeneidade da espessura dos revestimentos, o que pode ser constatado por meio de altos valores de desvio padrão. Esse comportamento pode estar associado à diferença de rugosidade do substrato, reprodutibilidade do tempo de imersão e área de deposição do banho no tanque de zinco fundido.

A rugosidade do revestimento foi analisada, sendo obtidas seis medições por amostra. Na Tabela 3 são apresentados os valores de Ra, a média e desvio padrão.

TABELA 3. Parâmetros de Rugosidade dos Revestimentos.

Amostra	Ra (mm)						Média (mm)	Desvio (mm)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
Aço	1,65	1,60	1,45	1,86	2,04	1,49	1,68	0,23
G	0,79	0,85	0,71	0,66	0,57	0,54	0,69	0,12
C10	0,54	0,36	0,38	0,79	0,57	0,84	0,58	0,20
C30	0,60	0,69	0,67	0,59	0,65	0,58	0,63	0,05

Fonte: Autor (2024).

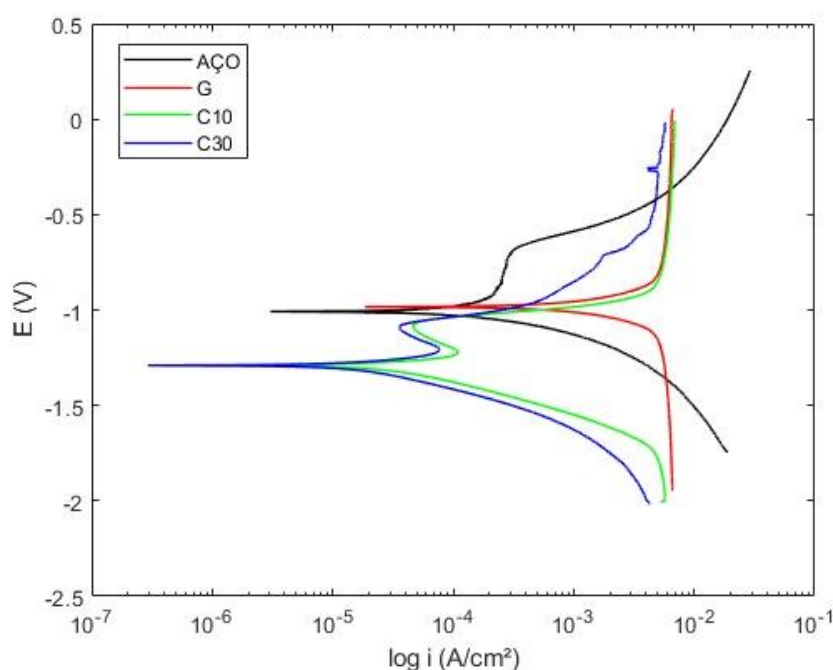
O substrato apresentou o maior valor de Ra (1,68 mm $\pm$ 0,23 mm), o que já era esperado, devido ao tratamento superficial de jateamento abrasivo. Que foi realizado previamente. Conforme foi mostrado anteriormente, na micrografia da superfície para o aço jateado (Figura 7), a superfície apresenta heterogeneidade com a presença de cavidades (picos e vales), ocasionando um aumento da área superficial disponível para ocorrência da reação metalúrgica entre ferro e o zinco.

O alto desvio padrão observado para o valor da média de Ra para o substrato ($\pm$ 0,23mm), reforça que a reprodutibilidade da espessura pode ser comprometida, justificando assim, os elevados desvios padrões observados para a espessura dos revestimentos apresentados na Tabela 2.

Entre as amostras que foram submetidas ao processo de galvanização, o revestimento apenas galvanizado (G) apresentou maior valor médio de R_a ($0,69 \pm 0,12\text{mm}$). Os revestimentos galvanizados e cromatizados (C10 e C30) apresentaram valores médios de R_a mais baixos. Esse comportamento pode estar associado a trechos de menor irregularidade do substrato e/ou a trechos de maior compactação do revestimento, propiciados pela deposição de cristais de cromato, a partir do processo de cromatização.

Na Figura 11 são apresentadas as curvas de polarização para o substrato e para as diferentes condições de revestimento investigadas.

FIGURA 11. Curvas de polarização realizadas em NaCl 3,5%.



Fonte: Autor (2024).

Como pode ser observado, o substrato (Aço) e a superfície galvanizada (G) apresentaram valores de potencial de corrosão mais elevados. O Fe, principal constituinte do aço é mais catódico do que o Zn, desse modo, era esperado que o revestimento galvanizado tivesse apresentado potenciais mais negativos (Gentil e Carvalho, 2022). Esse comportamento pode estar associado a formação de produtos de corrosão sobre o substrato de zinco, levando-o a apresentar potenciais mais catódicos.

Pode ser visto que apesar dos potenciais de corrosão para os revestimentos C10 e C30 terem se mostrado mais negativos, observa-se que há um comportamento de passivação, que mostra uma tendência de diminuição da densidade de corrente anódica e posterior aumento da densidade de

corrente para valores de potencial mais elevados. Geralmente, esse aumento de densidade de corrente pode ser atribuído a formação de corrosão localizada no substrato (Gentil e Carvalho, 2022).

A curva de polarização para o revestimento C30 mostra que em potenciais mais elevados, esta condição de revestimento apresenta menores valores de densidade de corrente anódica, sugerindo um comportamento mais protetivo, por propiciar uma cinética de transferência de carga mais lenta.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de E_{corr} e i_{corr} para as diferentes superfícies avaliadas, que foram obtidos através da extrapolação de Tafel (Wolyne, 2013).

TABELA 4. Potencial e densidade de corrente de corrosão.

Código	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)
S	-1,009	4,115 x10 ⁻⁵
G	-0,978	5,071 x10 ⁻⁴
C10	-1,296	1,522 x10 ⁻⁵
C30	-1,294	8,488 x10 ⁻⁶

Fonte: Autor (2024).

O revestimento C30 apresentou a menor densidade de corrente de corrosão, indicando que a deposição da cromatização com o tempo de 30s reduziu a cinética reacional de corrosão em relação ao revestimento apenas galvanizado.

4. CONCLUSÕES

A partir do acompanhamento do processo de galvanização industrial da empresa Galvanisa, foi possível identificar oportunidades de melhorias para melhor controle, tanto na etapa de imersão em zinco fundido, quanto na etapa de cromatização.

A análise de espessura dos revestimentos galvanizados nas condições G, C10 e C30 indicou heterogeneidade significativa nas medidas, sendo observados desvios padrões altos para as 3 condições.

Para melhor controle da espessura, faz-se necessário promover um monitoramento mais efetivo do tempo de imersão; controle da rugosidade superficial e da área de imersão no tanque de galvanização, tendo em vista que trechos com formação de “borra”, podem promover a formação de imperfeições e camadas mais espessas.

A deposição dos revestimentos nas condições G, C10 e C30 promoveram redução a uma suavização da superfície, obtendo-se valores de rugosidade inferiores ao do substrato.

As análises de MEV da superfície e sessão transversal, indicaram a presença de formação de camadas intermetálicas e a efetiva aderência do revestimento ao substrato, não sendo identificados trechos do substrato sem revestimento.

As curvas de polarização indicaram valores de E_{corr} para as condições C10 e C30 inferiores ao da camada apenas galvanizada (G), indicando que as camadas de cromatização depositadas não promoveram uma proteção efetiva à corrosão inicial do zinco.

Apesar de não ter apresentado potenciais superiores, os revestimentos C10 e C30 apresentaram um comportamento de tendência à passivação, sendo observada a redução da densidade de corrente anódica.

O revestimento C30 apresentou o menor valor de i_{corr} ($8,488 \times 10^{-6}$ A/cm²), indicando que mesmo com a heterogeneidade do revestimento depositado, foi possível promover uma redução na cinética de corrosão.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ARMCO STACO. Galvanização. Rio de Janeiro: Armco Staco, 2014. 12 f. (Folder). Disponível em: <https://www.armcostaco.com.br/armco/upload/download/folder_Galvanizacao_online.pdf>

Acesso em: 4 junho 2024.

BASTOS, L. L. Utilização de tanino como alternativa à cromatização no aço galvanizado. 2016. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 81 p. 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9. ed. LTC, Rio de Janeiro, 912 p., 2018.

CHOUBEY, N.; VERMA, N. Integration of design of experiment with galvanization process to achieve energy efficient sustainable galvanization: a review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, v. 10, p. 392-398, jan. 2021.

DANTAS, E. Geração de vapor e água de refrigeração: falhas - tratamentos - limpeza química. José Olympio Editora, Rio de Janeiro, 305 p., 1988.

DURING, E. D. D. Corrosion atlas. 3. ed. Elsevier, [S. l.], 828 p., 2018.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. Proteção catódica: técnica de combate à corrosão. 5. ed. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 372 p., 2011.

GEMELLI, E. Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização. 1. ed. LTC, Rio de Janeiro, 200 p., 2001.

JAVAHERDASHTI, R. Microbiologically influenced corrosion: an engineering insight. 2. ed. Springer Cham, Switzerland, 178 p., 2017.

KOCH, G. Cost of corrosion. *In*: EL-SHERIK, A. M. Trends in oil and gas corrosion research and technologies: Production and Transmission. Elsevier, Boston, p. 3-30, 2017.

KUKLÍK. V.; KUDLACEK, J. Hot dip galvanizing of steel structures. 1. ed. Butterworth-Heinemann, Boston, 234 p., 2016.

MAAB, P.; PEIBKER P. Handbook of hot-dip galvanization. Wiley-vch, Weinheim, 494 p., 2011.

GALVINFO CENTER. O papel do alumínio na galvanização contínua por imersão a quente. [S. l.]: GalvInfo Center, 2009. 5 f. Disponível em:

<https://www.icz.org.br/site/pdf/galvanizacao/GalvInfoNote_2_4.pdf>. Acesso em: 10 junho 2024.

PANNONI, F. D. Princípios da galvanização a fogo. São Paulo: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2008. 30 f. Disponível em:

<<https://maiscursoslivres.com.br/cursos/316c3d007eeca28eb941020daeffdf6c.pdf>>. Acesso em: 9 julho 2023.

PANNONI, F. D. Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 6. ed. Gerdau, São Paulo, 100 p., 2015.

PANNONI, F. D. Projeto e durabilidade. 2. ed. Instituto Brasileiro de Siderurgia, Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro, 72 p., 2017.

PANOSSIAN, Z. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas, v. 2. 1. ed. Eletropaulo Editora, São Paulo, 280 p., 1993.

PANOSSIAN, Z. Pós-tratamento do Revestimento de Zinco: Parte II – Propriedades da Camada Cromatizada. *Revista Tratamento de Superfícies*, v. 18, p. 14-16, nov. 1997.

PARANHOS, R. M. V. Caracterização de fases intermetálicas presentes em aço galvanizado por imersão a quente com tratamento térmico do revestimento metálico. Tese (Engenharia Química) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

POKORNY, P.; TEJ, P.; SZELAG, P. Chromate conversion coatings and their current application. *Metalurgija Journal*, v. 55, p. 253-256, abr. 2016.

PROCTOR, D. M.; SUH, M.; CAMPLEMAN, S.L.; THOMPSON, CH. M. Assessment of the mode of action for hexavalent chromium-induced lung cancer following inhalation exposures. *Toxicology*, v. 325, p. 160-179, ago. 2014.

REVIE, R. W. Uhlig's corrosion handbook. 3. ed. John Willey & Sons, [S. l.], 15 p., 2011.

ROBERGE, P. R. Handbook of corrosion engineering. 1. ed. McGraw-Hill, New York, 1545 p., 1999.

ROSA, R. L. Estudo do processo de cromatização de arames galvanizados e propostas de alternativas para retardamento da ocorrência prematura de oxidação branca. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 67 p., 2009.

SARAVANAN, P.; SRIKANTH, S. Post Treatment of Hot Dip Galvanized Steel Sheet- Chromating, Phosphating and other Alternative Passivation Technologies. *Journal of Material Science and Applications*, v. 3, p. 1-22, 2019.

SASTRI, V. S. Green corrosion inhibitors: theory and practice. 1. ed. John Willey & Sons, Columbia, 328 p., 2011.

SERRA, E. T. Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo. 1. ed. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 182 p., 2014.

SILVA, P. F. Pintura Anticorrosiva dos Metais. 1. ed. LTC, Rio de Janeiro, 352 p., 2010.

VIDELA, H.A. Biocorrosão, biofouling e biodeterioração de materiais. 1. ed. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 163 p., 2003.

WOLYNEC, S. Zincagem por imersão a quente. 1. ed. ABM, São Paulo, 1976.

WOLYNEC, S. Técnicas eletroquímicas em corrosão. 2. ed. EDUSP, São Paulo, 176 p., 2013.

XAVIER, J. B.; PICIOREANU, C.; ALMEIDA, J. S.; LOOSDRECHT, M. C. M. Monitorização e modelação da estrutura de biofilmes. *Revista Boletim de Biotecnologia*, v. 76, p. 2-13, 2015.