

REVESTIMENTO NANOCERÂMICO EM ARAMES AGROPECUÁRIOS COMO PROTEÇÃO ANTICORROSIVA*

João Vinícius de Souza Varres¹
Jane Zoppas Ferreira²

Resumo

A galvanização é um dos métodos mais aplicados à proteção do aço contra a corrosão. Busca-se prolongar a vida útil do revestimento galvanizado através de processos de conversão da camada galvanizada que retardem o início da corrosão. O processo mais utilizado para esses fins é a cromatização. As exigências de tecnologias mais limpas são cada vez mais uma necessidade. Os revestimentos cerâmicos nanoestruturados têm boa resistência à corrosão e ao desgaste, constituindo uma boa alternativa à cromatização. Esse tipo de revestimento consiste na formação de uma camada de óxido de zircônio de espessura nanométrica sobre a superfície do aço galvanizado. Neste trabalho é apresentado um estudo da influência do pH da solução, tempo de imersão, concentração da solução e diâmetro dos arames revestidos sobre a resistência à corrosão conferida pelo revestimento. A avaliação foi feita através de ensaios acelerados de corrosão e ensaios eletroquímicos. Verificou-se a existência de efeito de interação significativo dos fatores avaliados para os resultados de tempo para início da corrosão do revestimento.

Palavras-chave: Aço galvanizado; Revestimentos de conversão; Nanocerâmico; Arames.

NANOCERAMIC COATING IN AGRICULTURAL WIRES AS ANTICORROSIVE PROTECTION

Abstract

Galvanization is one of the most applied methods to protect steel against corrosion. The objective is to extend the galvanized coating useful life by conversion processes of the galvanized layer, which delay the corrosion onset. Chromatization is the process most used for these purposes. The demands of cleaner Technologies are increasingly a necessity. Nanostructured ceramic coatings have good corrosion and abrasion resistance, and it is a good alternative to chromatization. This type of coating consists in forming a layer of nanometric thickness of zirconium oxide on the galvanized steel surface. In this work a study is presented about the influence of solution pH, immersion time, solution concentration and diameter of the coated wires on the corrosion resistance by the conversion coating. It was verified the existence of a significant interaction effect of the evaluated factors for the results of time to start coating corrosion.

Keywords: Galvanized steel; Conversion coatings; Nanoceramic; Wires.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia, Doutorando em Engenharia, PPGE3M/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pesquisador, Bruning Tecnometal, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Química, Doutora em Eletroquímica, Professora Titular, Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão do aço é uma das grandes preocupações da engenharia, razão por que são estudadas formas de evitá-la. Os prejuízos provocados pela corrosão são muitos, podendo citar a degradação prematura de materiais e os gastos relativos à reposição, o superdimensionamento de peças, que acarreta o aumento do custo de produção e, muitas vezes, por exemplo, impacta o projeto final de determinado equipamento [1].

Nesse sentido, a galvanização é um dos métodos mais largamente aplicados ao aço. Trata-se de um revestimento metálico que oferece proteção catódica ao metal de interesse. O zinco atua como ânodo de sacrifício, corroendo-se preferencialmente ao ferro presente no aço. Em razão disso, busca-se também prolongar a vida útil do revestimento galvanizado através de processos de conversão da camada galvanizada, que retardem o início da corrosão. O processo mais utilizado para esses fins é a cromatização [2].

As aplicações possíveis para arames de aço são as mais diversas, podendo ter emprego na indústria mecânica, da construção civil e na agropecuária. Essa diversidade de usos e aplicações se deve, principalmente, à enorme variedade dimensional e de propriedades mecânicas que se podem obter nos arames.

Os estudos na área de tratamentos de superfícies têm sido cada vez maiores, buscando melhor desempenho dos revestimentos. Além disso, a exigência de tecnologias mais limpas, que resultem em processos com menores impactos ambientais, é cada vez mais uma necessidade. Inúmeros componentes são cromatizados, nas mais diversas aplicações, o que torna esse processo responsável pela geração de uma expressiva quantidade de efluentes e resíduos sólidos [3].

Esse é um dos motivadores para pesquisas na área de superfícies que visam desenvolver processos alternativos, que não empreguem elementos tóxicos e que possibilitem a redução de resíduos gerados em seu processamento. Uma das linhas de pesquisa é a de revestimentos cerâmicos nanoestruturados. Os revestimentos cerâmicos têm boa resistência à corrosão e ao desgaste, constituindo uma boa alternativa à cromatização. O processo de revestimento consiste em formar uma camada de espessura nanométrica sobre o substrato metálico a ser protegido, no caso, o aço, livre de metais tóxicos e componentes orgânicos [3][4].

O presente trabalho tem como objetivo aplicar um revestimento protetor nanocerâmico em arames de aço galvanizado e avaliar o seu desempenho na resistência à corrosão, comparativamente ao tradicional revestimento cromatizado.

O emprego da galvanização é bastante difundido e encontra inúmeras aplicações industriais, que visam proteger o aço da corrosão. Somado a isso, tem-se como objetivo também prolongar a vida útil, através do retardo do início da corrosão, do próprio revestimento galvanizado [5].

O fato de trabalhar com cromo hexavalente é um dos fortes motivadores dos estudos para o desenvolvimento de processos alternativos, em razão de sua toxicidade e seu potencial carcinogênico. Os estudos nesse sentido buscam

desenvolver um revestimento que tenha desempenho passivante similar, porém, sem elementos tóxicos, que contribuam com menor geração de efluentes e possibilitem, conseqüentemente, redução de custos de produção.

1.1 Mecanismos de Proteção

Com o objetivo de evitar ou ao menos retardar o processo corrosivo, há diversas estratégias que podem ser adotadas. A fim de proteger o metal de interesse, alguns mecanismos que podem ser empregados são: uso de inibidores de corrosão no meio, modificação da superfície metálica, proteção catódica e proteção anódica. Os revestimentos protetores, no caso de modificação superficial, atuam primordialmente por três mecanismos de proteção: proteção por barreira, proteção catódica e proteção anódica [1].

A proteção por barreira é o mecanismo mais difundido para o combate à corrosão de materiais metálicos. O seu funcionamento consiste em formar uma camada sobre o substrato (metal de interesse), isolando-o do meio corrosivo – esse processo pode ocorrer de forma natural ou forçada. Nos casos em que ocorre a proteção natural (filme de oxidação), essa camada formada, normalmente, é porosa e permeável, permitindo, assim, a corrosão do material. Os revestimentos empregados para reduzir a corrosão podem ser inorgânicos, metálicos ou orgânicos. Independente da sua natureza, o revestimento deve possuir um grau elevado de adesão à superfície.

Os revestimentos de conversão são revestimentos de natureza orgânica e recebem essa denominação em razão da forma como são obtidos. Seus filmes, geralmente são porosos, necessitando um tratamento posterior de selagem – uma técnica para fechar esses poros e reduzir a sua permeabilidade. Os revestimentos de fosfatização, anodização e cromatização são exemplos de revestimentos orgânicos.

No caso dos revestimentos metálicos, que apesar de serem inorgânicos, são tratados de forma separada, emprega-se outro metal com característica mais nobre ou mais ativo para revestir o metal de interesse. No caso de usar um metal mais ativo, esse mesmo atuará como ânodo de sacrifício, corroendo-se antes do substrato. Em caso de revestimento com metal mais nobre, a proteção será maior desde que o revestimento seja uniforme e não contenha ranhuras ou falhas, pois caso isso ocorra, o substrato irá corroer, independentemente do revestimento. Cladização, imersão a quente e eletrodeposição são os processos empregados para obtenção de revestimentos metálicos. Os revestimentos orgânicos são largamente utilizados e compreendem as tintas, vernizes e alguns polímeros oxidáveis [1].

1.2 Corrosão de aço galvanizado

O aço galvanizado quando exposto a atmosferas não poluídas, apresenta reação da camada de zinco puro com o CO₂ presente no ar e forma um óxido com características protetoras em sua superfície. Contudo, caso a atmosfera seja agressiva, como a de ambientes industriais e marinhos, haverá a formação de um sulfato de zinco solúvel, sem características protetoras e que possibilitará um processo corrosivo severo [6][7].

O aço galvanizado, normalmente, apresenta deficiências superficiais relacionadas com a aderência de revestimentos orgânicos – como as tintas, por exemplo. Essa deficiência está atrelada justamente à formação dos óxidos e sais formados pela oxidação do zinco, conforme já mencionado. Em razão disso, são necessários pré-tratamentos da superfície galvanizada anteriormente à aplicação de revestimentos orgânicos, a fim de garantir uma adesão satisfatória. Quando a adesão é insuficiente, ocorre a permeação da água e do oxigênio até o substrato, formando sais, que posteriormente saponificam a tinta e causam seu descascamento [2].

1.3 Cromatização

A cromatização é um tipo de revestimento orgânico, que consiste na conversão do metal do substrato em um cromato. A camada é formada por processos químicos baseados em soluções contendo cromato ou ácido crômico. Essa camada formada é muito eficiente na proteção da superfície do metal de interesse contra a corrosão. O desempenho anticorrosivo se deve à presença de Cr^{6+} e Cr^{3+} no filme formado. A cromatização pode ser realizada diretamente sobre o substrato de interesse ou até mesmo sobre óxidos oriundos de processos anteriores de fosfatização ou anodização, em que atuará como selante dos poros [1].

A cromatização e a fosfatização são os pré-tratamentos de superfícies metálicas mais empregados, tendo como base cromo hexavalente e trivalente e fosfatos, respectivamente. Especificamente sobre a cromatização, o cromo hexavalente é um metal considerado tóxico e com alto potencial carcinogênico. Os íons fosfato, por sua vez, contribuem para geração de lodo e a eutrofização de águas superficiais [8].

1.4 Revestimento Nanocerâmico

A nanotecnologia aplicada aos revestimentos está presente no desenvolvimento de novos pré-tratamentos de superfícies, livres de metais tóxicos e dos íons fosfatos, que têm consideráveis impactos ambientais. O desenvolvimento dessas soluções está baseado em combinações nanoestruturadas de óxidos metálicos, com metais como zircônio e/ou titânio [9][10].

A zircônia é um material tecnologicamente interessante, usado em lâminas de turbinas, revestimentos ópticos com alta transparência e índice de refração e, também, como anticorrosivo em revestimentos de proteção por barreira. Ela proporciona elevada resistência mecânica, resistência à temperatura e estabilidade química. O principal processo para aplicação da zircônia em revestimentos é a deposição por spray em pirólise, pois apresenta custo competitivo e possibilidade de trabalhar na temperatura ambiente. O revestimento que se forma é caracterizado por uma estrutura amorfa, com tamanhos de partícula da ordem de 90 a 500nm, com bom desempenho em meios ácidos [11][12].

Nos revestimentos de conversão nanocerâmicos a camada de conversão nanocerâmica é aplicada em várias etapas, porém num processo mais simples que o da fosfatização, proporcionando menor geração de efluentes e, conseqüentemente, reduzindo os impactos ambientais da atividade industrial [9][13].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos foram realizados com arames galvanizados produzidos em uma usina siderúrgica a partir de fio-máquina, posteriormente trefilados e galvanizados por imersão a quente de forma contínua.

Para a realização dos ensaios foram utilizados arames de aço galvanizado pelo processo de imersão a quente da marca Gerdau, de diâmetros 1,24 mm e 2,10 mm, adquiridos no comércio local. Em função da composição química e de acordo com a ABNT NBR 6330:1980, trata-se de um aço 1006.

2.1 Preparação da superfície

Os corpos de prova foram, inicialmente, lavados com água corrente e posterior operação de desengraxe alcalino. Foi utilizado o desengraxante comercial para aço galvanizado Saloclean 667 N, do fabricante Klintex Insumos Industriais. Esse desengraxante é à base de sais de sódio, tensoativos aniônicos, umectantes e sequestrantes, sendo utilizado para remover óleos e sujidades que se encontram sobre as superfícies que deverão ser tratadas para etapas posteriores de revestimento.

A aplicação do desengraxante se dá pelo método de imersão em solução, com temperatura de trabalho de 55°C a 75°C, com tempo de tratamento de 10 minutos. Após a etapa de imersão, os corpos de prova são secos com jato de ar quente e armazenados em um dessecador.

2.3 Solução conversora e aplicação do revestimento

Foi empregada uma solução de ácido hexaflúorzircônio comercial (do fabricante Aldrich Chemistry) com variação das concentrações de zircônio. Para a realização dos ajustes de pH da solução foi utilizado hidróxido de sódio 1 mol.L⁻¹.

O revestimento foi aplicado pelo método de imersão, também denominado *dip-coating*. Para tanto, foi utilizado o equipamento Elevador de Disco, modelo MA-765 da marca Marconi, a fim de possibilitar maior controle e exatidão no tempo de imersão e estabilidade no movimento das peças, com velocidade de entrada e retirada do banho de 7 mm.s⁻¹.

Os parâmetros da solução de zircônio sofreram variações de concentração e pH. Quanto ao processo de imersão a variação se deu no tempo de permanência do corpo de prova imerso na solução. Após a retirada da solução, os corpos de prova foram secos com jato de ar quente e armazenados em um dessecador.

2.4 Planejamento do experimento

Para o desenvolvimento do presente estudo foram empregados métodos estatísticos para o planejamento dos experimentos, a fim de otimizar os recursos na execução dos mesmos, reduzindo o tempo dispendido e a quantidade de amostras necessárias, mantendo a significância e o nível de confiança dos experimentos.

Os parâmetros de entrada compreendem os fatores controláveis, os fatores constantes e os de ruído. Como parâmetros controláveis do experimento, tem-se a concentração da solução, o pH da solução e o tempo de imersão da amostra na solução para revestimento.

Para a montagem do experimento foi utilizado o software Minitab®, em sua versão 18. Trata-se de um software com recursos estatísticos que possibilitam o planejamento de experimentos e apresenta formas de organizá-los, garantindo também a aleatorização dos erros necessária à suposição de homogeneidade das variâncias e à independência estatística dos valores observados.

Os fatores e seus níveis foram escolhidos a partir da revisão da literatura e trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais, ligado à Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Na Tabela 1, pode-se observar o resumo dos fatores e os níveis empregados.

Tabela 1. Resumo dos fatores controláveis e os seus níveis adotados no experimento

Fator	Nível baixo	Nível alto	Tipo de fator
Concentração da solução	1 mmol	7 mmol	Contínuo
pH da solução	3,5	4,5	Contínuo
Tempo de imersão	120 s	480 s	Contínuo
Diâmetro do arame	BWG18	BWG14	Categórico

Fonte: Elaborada pelo autor.

O tipo de planejamento utilizado para o experimento foi do tipo fatorial 2^k , com quatro fatores e duas repetições.

Foi utilizada também a blocagem dos ensaios em razão do tempo necessário para a realização dos mesmos, dividindo-os em dois blocos. Com essa estratégia, visa-se mitigar o erro resultante de influências externas sobre o experimento.

Dentre as variáveis de resposta para o experimento foi eleita a que corresponde ao surgimento da corrosão branca, no decorrer do ensaio acelerado de corrosão em câmara úmida.

2.5 Caracterização das amostras

Com a finalidade de caracterizar as amostras e avaliar o desempenho dos revestimentos obtidos a partir da variação de determinados parâmetros foram realizados ensaios de resistência à corrosão, ensaios eletroquímicos e avaliação microscópica.

2.5.1 Ensaios acelerados de corrosão

Os ensaios de resistência à corrosão são empregados para avaliar o desempenho de materiais, como o aço, e podem ser classificados como acelerados e não acelerados.

É um ensaio de exposição à atmosfera úmida saturada, com condensação na superfície dos materiais metálicos revestidos e não revestidos. O equipamento é

constituído por uma câmara de ensaio, suportes de corpos de prova, dispositivos para aquecimento e controle de temperatura durante o período total de ensaio.

A temperatura do ar saturado é mantida a $40\pm 3^{\circ}\text{C}$. A atmosfera no interior da câmara deve ser mantida saturada, com contínua condensação de água sobre os corpos de prova, conforme é preconizado pela norma técnica ABNT NBR 8095:2015.

No presente estudo foi utilizado um equipamento da marca Bass, modelo UK-MP-01/2005-S.

2.5.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE)

A espectroscopia de impedância eletroquímica é uma técnica que trabalha no domínio de frequência. O conceito básico envolvido em EIE é que uma interface pode ser vista como uma combinação de elementos de circuitos elétricos passivos, isto é, resistência, capacitância e indutância. Quando uma corrente alternada é aplicada a esses elementos, a corrente resultante é obtida pela lei de Ohm. As medidas de impedância são apresentadas por meio das representações gráficas de Nyquist e Bode.

2.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Como parte da caracterização das amostras foram feitas microscopias eletrônicas de varredura e análises elementares por espectroscopia de energia dispersiva, utilizando-se de um microscópio eletrônico de varredura da marca PHENOM WORLD, modelo PHENOM PRO-X.

A referida análise das superfícies dos substratos foi realizada com uma tensão de 5kV, a fim de possibilitar a análise da região mais próxima à superfície do revestimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 Ensaios acelerados de corrosão

O ensaio acelerado de corrosão em câmara úmida, para este estudo, foi encerrado ao atingir o tempo total de 1008 horas, durante o qual foi avaliado periodicamente o aspecto e o grau de corrosão de cada amostra. Para comparação de desempenho foram utilizados os resultados referentes ao tempo decorrido de ensaio para o surgimento da oxidação branca, que indica o início da corrosão do revestimento.

Através da análise do planejamento de experimentos foi possível identificar os fatores estatisticamente significativos e seus efeitos. Na Tabela 2, pode-se verificar pela Análise de variância (ANOVA) quais os fatores são significativos em relação à variável resposta, adotado um nível de significância alfa de 0,05.

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) do experimento para determinar os fatores significativos para o tempo decorrido até o início da corrosão

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	F tab	Valor-P
Modelo	15	70,9512	4,7301	5,38	2,352	0,001
Blocos	1	2,6738	2,6738	3,04	4,494	0,1
Linear	4	30,7891	7,6973	8,75	3,007	0,001
Tempo de imersão	1	0,002	0,002	0	4,494	0,963
pH	1	27,6582	27,6582	31,43	4,494	0
[Zr]	1	2,9707	2,9707	3,38	4,494	0,085
Arame	1	0,1582	0,1582	0,18	4,494	0,677
Interações de 2 fatores	6	36,4492	6,0749	6,9	2,741	0,001
Tempo de imersão*pH	1	7,752	7,752	8,81	4,494	0,009
Tempo de imersão*[Zr]	1	4,3145	4,3145	4,9	4,494	0,042
Tempo de imersão*Arame	1	0,002	0,002	0	4,494	0,963
pH*[Zr]	1	24,0645	24,0645	27,35	4,494	0
pH*Arame	1	0,1582	0,1582	0,18	4,494	0,677
[Zr]*Arame	1	0,1582	0,1582	0,18	4,494	0,677
Interações de 3 fatores	4	1,0391	0,2598	0,3	3,007	0,877
Tempo de imersão*pH*[Zr]	1	1,0332	1,0332	1,17	4,494	0,295
Tempo de imersão*pH*Arame	1	0,002	0,002	0	4,494	0,963
Tempo de imersão*[Zr]*Arame	1	0,002	0,002	0	4,494	0,963
pH*[Zr]*Arame	1	0,002	0,002	0	4,494	0,963
Erro	16	14,0781	0,8799			
Total	31	85,0293				

Para o experimento realizado foram considerados significativos o efeito principal do *pH da solução* e os efeitos de interação *tempo de imersão*pH da solução*, *tempo de imersão*concentração da solução*, *pH da solução*concentração da solução*. Em razão dos efeitos de interação serem estatisticamente significativos na análise, não é possível interpretar o efeito principal do pH isoladamente. Isso vale dizer que a relação entre um fator e a resposta depende do outro fator no termo.

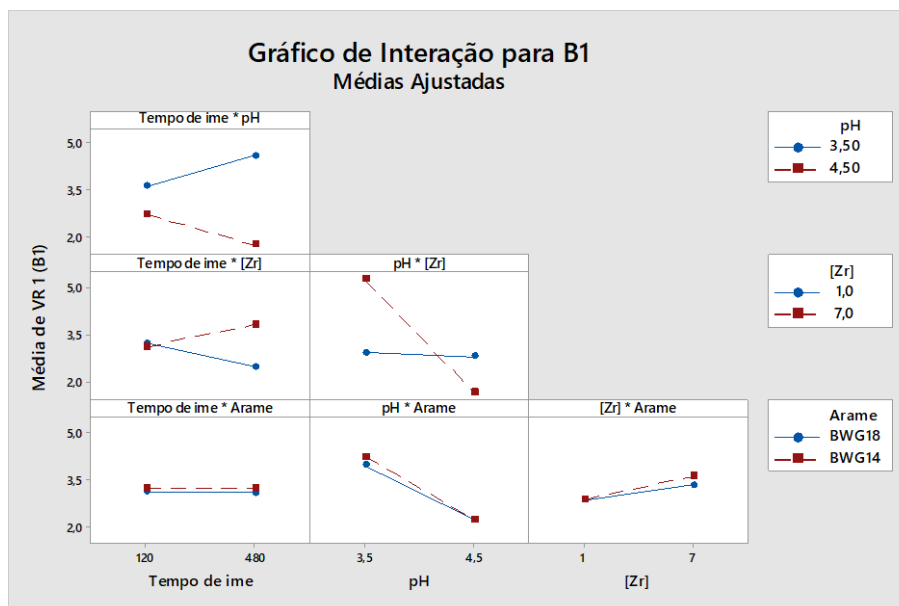


Figura 1. Gráficos dos efeitos de interação dos fatores controláveis para a B1 (tempo para início da corrosão)

Na Figura 1, pode-se analisar, por meio dos gráficos de interação para B1, os efeitos de interação dos fatores avaliados, em que se evidencia graficamente o efeito de interação apontado na ANOVA. Em cada um dos gráficos há a variação de dois parâmetros e um terceiro mantido fixo. Pode-se ainda avaliar os resultados do ensaio acelerado de corrosão em câmara úmida de forma gráfica, em que é representada a evolução do grau de corrosão de cada amostra em função do tempo, conforme ilustra a Figura 2.

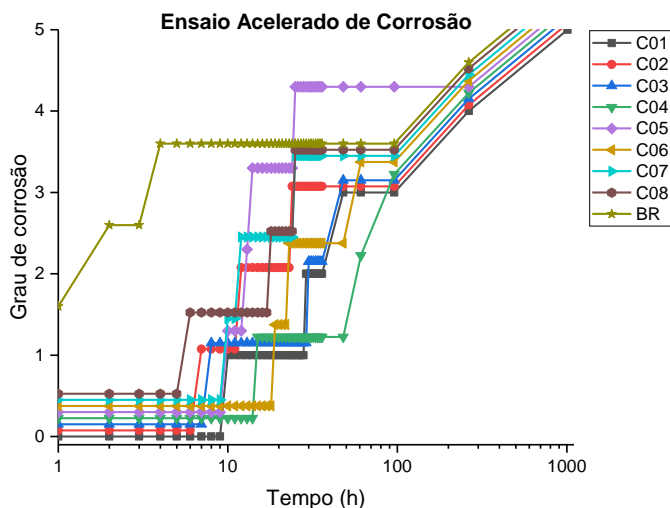


Figura 2. Gráfico do ensaio acelerado de corrosão em câmara úmida para as diferentes condições testadas para os arames BWG 14. Foi introduzido um leve deslocamento das curvas para evitar a sobreposição das mesmas.

No gráfico do ensaio acelerado de corrosão, na Figura 2, merece destaque a evolução do grau de corrosão da amostra branco (BR) em relação às demais amostras das diferentes condições de revestimento. Torna-se evidente o efeito do revestimento de conversão nanocerâmico na resistência à corrosão dos arames avaliados.

2.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE)

A partir dos resultados dos ensaios acelerados de corrosão, foram selecionados corpos de prova para os ensaios de EIE. Foram ensaiados apenas os arames BWG14, já que o diâmetro do arame foi considerado, após análise de variâncias, um fator não significativo para resistência à corrosão. Foram avaliados os parâmetros do banho de conversão (pH e concentração) e o tempo de imersão, nos níveis apresentados na Tabela 3. Os resultados de EIE podem ser vistos na Figura 3.

Tabela 3. Fatores e níveis das amostras avaliadas por EIE

CONDIÇÃO	pH	[H ₂ ZrF ₆]	t _{imersão}
C01	3,5	1 mmol	480 s
C02	3,5	7 mmol	120 s
C03	3,5	1 mmol	120 s
C04	3,5	7 mmol	480 s
C05	4,5	7 mmol	120 s
C06	4,5	1 mmol	480 s
C07	4,5	1 mmol	120 s
C08	4,5	7 mmol	480 s

B

Fonte: Elaborada pelo autor.

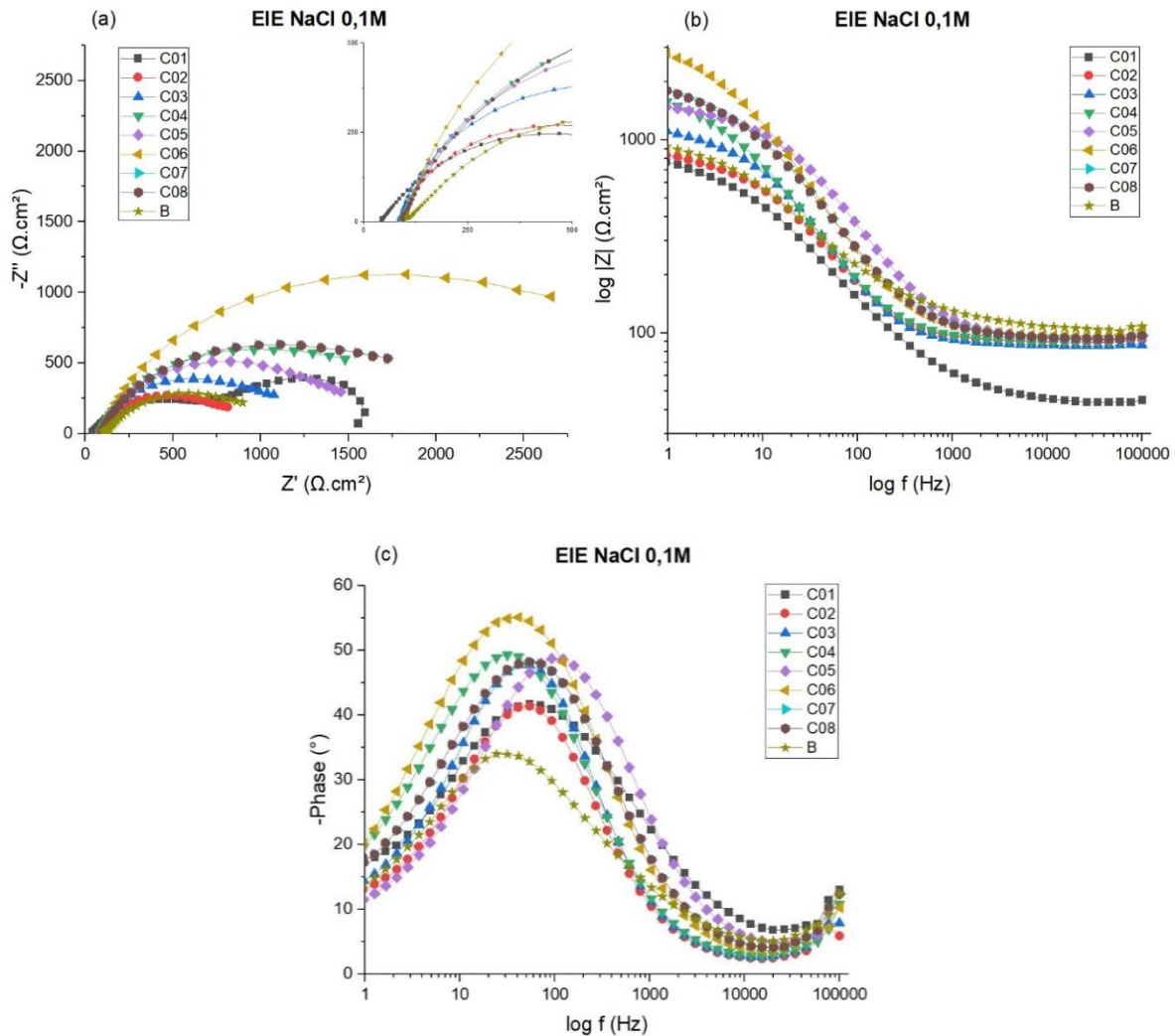


Figura 3. Representações gráficas dos resultados experimentais de Nyquist (a) e de Bode (b) e (c).

Através das representações gráficas de Nyquist (Figura 3a) das amostras, pode-se inferir que o revestimento C 06 apresentou proteção a corrosão superior aos demais quando exposto ao eletrólito de NaCl 1 mol.L⁻¹ durante 1 h. Verifica-se pela representação de Bode, na curva $\log |Z|$ versus $\log f$ (Figura 3b) em baixas frequências, que a magnitude de impedância da condição C 06 é maior. Na curva $-Phase$ versus $\log f$ (Figura 3c) se observa maior ângulo de fase por dada frequência, correspondendo também a uma maior proteção conferida pelo revestimento.

Nas representações gráficas também se pode evidenciar que a maioria dos revestimentos apresentou resultado superior à amostra branco.

2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Através dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura foi possível verificar, de fato, a ocorrência da deposição do revestimento na superfície do aço galvanizado. Por meio da técnica de espectroscopia de dispersão (EDS), analisa-se

qualitativamente os elementos químicos que estão depositados em determinados pontos ou regiões de interesse.

Foi possível evidenciar a presença de zircônio nas quatro amostras revestidas com hexafluorzircônio que foram analisadas. A detecção da presença dos elementos acontece pelos seus picos de energia. O zircônio possui dois picos, um em 2 kV e outro em 15 kV. As micrografias foram feitas para as amostras com maior tempo de imersão e podem ser vistas na Figura 4.

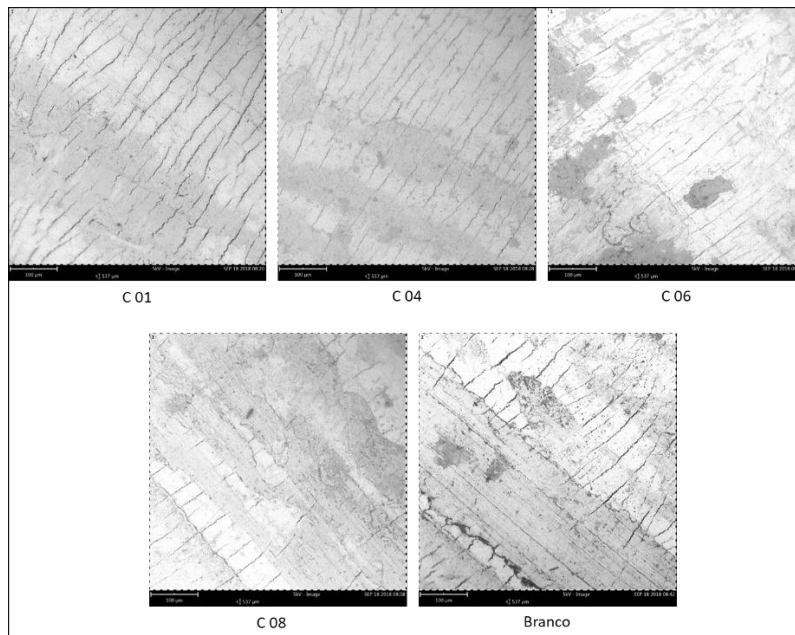


Figura 4. Micrografias das amostras revestidas e da amostra branco.

Na Tabela 4, pode-se verificar o resultado da análise semi-quantitativa das regiões analisadas, em que são apresentadas as porcentagens atômicas de cada elemento detectado.

Tabela 4. Porcentagem atômica dos principais elementos para as amostras analisadas

	C01	C04	C06	C08	Branco
Zn	68,86	63,10	44,26	55,75	79,21
O	24,21	27,65	25,97	36,25	20,79
Zr	6,92	9,24	5,30	8,00	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os maiores valores percentuais de zircônio para as amostras C04 e C08 podem ser em razão da maior concentração da solução de hexafluorzircônio utilizada na etapa de conversão do substrato (produção do revestimento). E entre elas, a amostra C04 em razão do menor pH da solução de conversão, pois o tempo de imersão na solução foi o mesmo para ambas as amostras.

4 CONCLUSÃO

Fundamentando-se nos ensaios realizados, na metodologia aplicada e nos resultados obtidos neste trabalho, permite-se concluir que:

1. Houve efeito significativo de interação dos fatores controláveis no resultado do tempo para início da corrosão do revestimento no presente estudo;

2. Considerando as condições do experimento realizado, os diferentes dimensionais dos arames não tiveram efeito significativo sobre a variável de resposta (tempo para início da corrosão do revestimento);
3. As amostras revestidas com o revestimento nanoestruturado apresentaram resultados satisfatórios de resistência à corrosão e superiores às amostras não revestidas, o que ficou evidenciado tanto pelos ensaios acelerados de corrosão quanto pelos ensaios eletroquímicos;
4. A aplicação de revestimentos nanocerâmicos tem potencial para ser uma alternativa aos revestimentos à base de Cr, constituindo-se em uma solução ambientalmente mais limpa.

REFERÊNCIAS

- 1 Gentil V. Corrosão. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC; 2003
- 2 Roberge PR. Corrosion Engineering: Principles and Practice. New York: McGraw-Hill Professional Publishing; 2008
- 3 Santa Coloma P, Izagirre U, Belaustegi Y, Jorcin JB, Cano FJ, Lapeña N. Chromium-free conversion coatings based on inorganic salts (Zr/Ti/Mn/Mo) for aluminum alloys used in aircraft applications. Applied Surface Science. 2015; 345: 24-35.
- 4 Saji VS. The impact of nanotechnology on reducing corrosion cost. In: Cook R. Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials. Cambridge: Woodhead Publishing; 2012. p. 3-15.
- 5 American Galvanizers Association. Zinc coatings: a comparative analysis of process and performance characteristics. Centennial: AGA; 2011
- 6 Callister WD, Rethwisch DG. Materials Science and Engineering an introduction. 8 ed. Hoboken: John Wiley and Sons; 2009
- 7 Ramezanzadeh B, Attar MM, Farzam M. Corrosion Performance Of A Hot-Dip Galvanized Steel Treated By Different Kinds Of Conversion Coatings. Surface And Coatings Technology. 2010; 205(3): 874-884.
- 8 Santos CAL, Leite E, Ferreira Filho A, Panossian Z. Utilização de técnicas eletroquímicas na avaliação da porosidade de camadas fosfatizadas. Corrosão e Proteção de Materiais. 2006; 25(4): 114-120.
- 9 Droniou P, Fristad WE, Liang J. Nanoceramic-based Conversion Coating: Ecological and economic benefits position process as a viable alternative to phosphating systems. Metal Finishing. 2005; 103(12): 41-43.
- 10 Milosev I, Frankel GS. Review - Conversion Coatings Based On Zirconium And/Or Titanium. Journal Of The Electrochemical Society. 2018; 165(3): 127-144.
- 11 Pareja RR, Ibáñez RL, Martín F, Ramos-Barrado JR, Leinen D. Corrosion behaviour of zirconia barrier coatings on galvanized steel. Surface and Coatings Technology. 2006; 200(22-23): 6606-6610.
- 12 Adhikari S, Unocic KA, Zhai Y, Frankel GS, Zimmerman J, Fristad W. Hexafluorzirconic Acid Based Surface Pretreatments: Characterization And Performance Assessment. Electrochimica Acta. 2011; 56(4): 1912-1924.
- 13 Taheri P, Laha P, Terryn H, Mol JMC. An In Situ Study Of Zirconium-Based Conversion Treatment On Zinc Surfaces. Applied Surface Science. 2015; 356: 837-843.