

## Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

### Novas alternativas para garantir a qualidade do aço galvanizado utilizado em linhas de transmissão

FELIPE GARCIA NUNES (1); ELBER VIDIGAL BENDINELLI (1); ALBERTO PIRES ORDINE (1); CEPEL (1)

## RESUMO

O aço galvanizado produzido por imersão a quente é bastante empregado no setor elétrico, por conjugar excelentes propriedades mecânicas e anticorrosivas. Para garantir o bom desempenho deste material, deve-se ter comprometimento com a espessura, compatível com a agressividade do meio, e com qualidade da camada galvanizada. Este trabalho tem como objetivo avaliar as técnicas de perda de massa e de voltametria anódica para caracterização da velocidade de corrosão do aço galvanizado, auxiliando no projeto de estruturas galvanizadas a partir de uma estimativa de vida útil do material em diferentes meios e do controle de qualidade da camada galvanizada.

## PALAVRAS-CHAVE

Aço galvanizado, Linhas de transmissão, Estimativa de vida útil, Controle de qualidade

## 1.0 - INTRODUÇÃO

As estruturas do setor elétrico estão constantemente sujeitas à ação da corrosão devido ao contato com diferentes agentes do intemperismo, tais como poluentes marinhos, industriais, elevada umidade, contato com águas naturais e com o solo. Para preservar os ativos do setor, são utilizadas técnicas de proteção anticorrosiva ou materiais mais resistentes à corrosão. O aço galvanizado desponta como uma das alternativas mais empregadas, por conjugar excelentes propriedades de resistência mecânica e anticorrosivas. Por isto, observam-se exemplos de torres de linha de transmissão em aço galvanizado, com até 50 anos, apresentando estrutura em bom estado de integridade física [ CITATION NUE18 \l 1046 ].

O aço galvanizado é constituído por um revestimento de zinco sobreposto a um substrato, geralmente de liga ferrosa. Este material é produzido pelo processo de imersão a quente, a partir da imersão do substrato em um banho de zinco fundido. Durante este processo, fases intermetálicas com teores distintos de zinco e ferro se formam a partir do substrato até a superfície, constituindo a camada galvanizada. O recobrimento de zinco formado possui uma maior tendência a se oxidar do que a base ferrosa. Desta forma, esta camada se corrói preferencialmente em relação ao substrato, protegendo-o catodicamente [ CITATION Fer06 \l 1046 ].

Para assegurar a vida útil da estrutura, é essencial garantir a qualidade do revestimento e especificá-lo adequadamente. Uma falha na especificação do aço galvanizado gera problemas prematuros de corrosão, comprometendo a operação dos ativos do setor elétrico e acarretando custos diretos e indiretos para as empresas, devido a acidentes, parada de operação e manutenção não programada [ CITATION Fra03 \l 1046 ]. Desta forma, no projeto das estruturas metálicas de linhas de transmissão, deve-se especificar uma espessura de zinco compatível com a agressividade da atmosfera na qual o material será instalado. A especificação de uma espessura inadequada em um ambiente agressivo pode não fornecer a vida útil desejada, enquanto que o superdimensionamento em ambientes de baixa agressividade implica gastos excessivos.

Diante disso, o conhecimento prévio da velocidade de corrosão do aço galvanizado é essencial para o projeto de uma estrutura galvanizada, pois permite definir a espessura de zinco necessária para garantir a vida útil desejada. A forma mais adequada de se determinar a velocidade de corrosão dos materiais é a partir de ensaios

de perda de massa. Apesar do aço galvanizado ser um produto consolidado no mercado mundial, há uma carência de procedimentos normatizados para determinação de sua velocidade de corrosão. Atualmente, utilizam-se procedimentos elaborados para o zinco [ CITATION Cor08 \l 1046 ]. Neste caso, torna-se necessária uma avaliação criteriosa dos efeitos práticos deste uso.

Durante a etapa de imersão a quente, ocorre a difusão de zinco formando as fases intermetálicas de zinco e ferro. A camada mais superior, denominada eta ( $\eta$ ) contém praticamente zinco puro e, à medida que se aproxima do substrato, a composição de zinco em cada camada diminui e a de ferro aumenta. Abaixo da fase eta, localizam-se as fases zeta ( $\zeta$ ) e delta ( $\delta$ ), com teores de zinco de aproximadamente 94 e 90%, respectivamente. Por fim, tem-se a camada gama ( $\Gamma$ ), adjacente ao substrato, com teor de zinco em torno de 75% [ CITATION Fer06 \l 1046 ]. Avaliar-se a influência dos teores destas fases intermetálicas é de suma importância para a caracterização completa do desempenho anticorrosivo do aço galvanizado.

Nesse contexto, necessita-se de outras formas para complementar a caracterização do aço galvanizado. Técnicas eletroquímicas despontam como ferramentas auxiliares na caracterização deste material. Dentre estas, a voltametria anódica mostrou-se uma das mais promissoras. Esta permite a identificação das fases intermetálicas que constituem a camada galvanizada [ CITATION Nue18 \l 1046 ], relacionando-as com a velocidade de corrosão do aço galvanizado.

Face ao exposto, o presente trabalho conduziu uma análise crítica da metodologia de perda de massa aplicada ao aço galvanizado, e também, o desenvolvimento da técnica de voltametria anódica. A velocidade de corrosão do aço galvanizado foi avaliada em diferentes atmosferas, incluindo ensaios acelerados de corrosão com agentes próprios de atmosferas marinha, industrial e de elevada umidade, além da exposição natural em atmosfera marinha. A experiência adquirida poderá permitir o estabelecimento de requisitos técnicos para melhor projetar e diagnosticar os materiais em aço galvanizado a serem utilizados em linhas de transmissão. Futuramente, estes requisitos podem vir a contribuir para elaboração de normas técnicas de qualificação de aço galvanizado para o setor elétrico.

## 2.0 - METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Os corpos de prova de aço galvanizado foram confeccionados a partir de chapas de aço carbono, com dimensões de 100 mm por 150 mm e 6,4 mm de espessura. Os corpos de prova passaram pelo processo de galvanização por imersão a quente em uma empresa galvanizadora. Todas as amostras foram submetidas às mesmas condições operacionais e etapas de produção. Com o objetivo de verificar a aplicação das metodologias propostas em aços galvanizados com diferentes espessuras de camada de zinco, variou-se o tempo de residência dos corpos de prova na cuba de zinco fundido. Os corpos de prova que permaneceram por mais tempo imersos obtiveram uma espessura de zinco em torno de 100  $\mu\text{m}$ , enquanto que o restante das amostras formaram uma camada galvanizada com aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  de espessura. Os materiais foram divididos em dois grupos distintos de acordo com a espessura do revestimento, sendo que os corpos de prova com menor espessura de zinco foram denominados AC1, enquanto que as amostras com maior espessura foram denotadas AC2.

### 2.2 Ensaio de corrosão

Como as estruturas do setor elétrico estão distribuídas por ambientes com características variadas, foram avaliadas neste trabalho diferentes atmosferas agressivas, tais como: ensaio em câmara de exposição à névoa salina, exposição ao dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e exposição a 100% de umidade relativa do ar (UR). Para caracterizar os diferentes estágios de degradação da camada galvanizada, foram realizadas diversas retiradas dos materiais ao longo do tempo de ensaio. Além disso, também foi realizado o ensaio de exposição natural em atmosfera marinha.

O ensaio de névoa salina consistiu na exposição dos corpos de prova em uma câmara que simula a atmosfera marinha. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM B117 [ CITATION Ame11 \l 1046 ], sendo empregada

solução de 5% (m/m) de cloreto de sódio (NaCl). Os corpos de prova foram retirados do ensaio para avaliação após 167 h, 359 h, 610 h, 874 h e 1271 h, respectivamente.

Já o ensaio na câmara de SO<sub>2</sub> consistiu na exposição dos corpos de prova em um equipamento que simula a atmosfera industrial. O ensaio foi realizado com base na norma ASTM G87 [ CITATION AST02 \l 1046 ], sendo admitido um volume de 0,5 L de SO<sub>2</sub> na câmara e esta, mantida a 40°C e com 100% de umidade relativa (UR). Os corpos de prova foram expostos por 8 horas seguidas na atmosfera criada e, posteriormente, o equipamento foi aberto e as amostras foram deixadas às condições ambientes do interior do laboratório durante 16 horas. A sequência descrita consistiu em um ciclo de ensaio, sendo as amostras avaliadas após 20, 40 ciclos e 60 ciclos.

O ensaio de câmara úmida consistiu na exposição dos corpos de prova a uma condição de 100% de umidade relativa a 40°C, tendo como base os procedimentos da norma ASTM D224 [ CITATION AST15 \l 1046 ]. Os corpos de prova foram avaliados após 2526 h, 4000 h e 5517 h de ensaio.

O ensaio de exposição natural foi realizado durante um ano na estação de corrosão atmosférica de Mambucaba do Cepel, no município de Paraty - RJ. A estação está localizada na praia, a uma distância de cerca de 50 m do mar. O grau de corrosividade atmosférica desta estação foi caracterizado segundo a ISO 9223 [ CITATION ISO12 \l 1046 ], classificada como C4 para o zinco e C5 para o aço carbono, respectivamente.

### 2.3 Ensaio de perda de massa

Após os ensaios de corrosão, foram realizados os procedimentos de perda de massa. Estes consistiram em ensaios gravimétricos, baseados na diferença entre a massa das amostras antes e após a exposição às atmosferas agressivas. Para a determinação da massa final, os produtos de corrosão formados ao longo dos ensaios de corrosão foram removidos. A norma técnica ABNT NBR 6210 [ CITATION Cor08 \l 1046 ] recomenda soluções decapantes específicas para metais padrão, tais como aço carbono, zinco, alumínio e cobre. Estas removem preferencialmente os produtos de corrosão formados sem atacar significativamente o metal base. Porém, não há solução normatizada específica para o aço galvanizado.

Com isso, neste trabalho empregou-se a solução recomendada para o zinco, cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl) aquecida a 70°C. À medida que o aço galvanizado se corrói, produtos de corrosão de zinco e de ferro vão sendo formados. Como a solução é recomendada para remover produtos de corrosão do zinco, foi avaliado se esta é capaz de limpar eficientemente o aço galvanizado. Além disso, foi verificado se a solução ataca o substrato de aço carbono, levando a uma perda de massa adicional, na situação em que o substrato encontra-se exposto.

Para realizar a análise crítica da metodologia empregada, a remoção dos produtos de corrosão foi acompanhada a partir da construção da curva de perda de massa, tal como ilustrado na FIGURA 1. O procedimento de imersão na solução decapante foi repetido várias vezes, sendo a amostra pesada após cada imersão.

Podem ser observadas duas regiões bem definidas nessa curva, sendo a primeira localizada nos tempos iniciais de ensaio. Esta é relativa à remoção dos produtos de corrosão, uma vez que há a perda significativa de massa do corpo de prova. Já a outra se refere ao patamar de estabilização da massa, evidenciando o momento no qual a amostra encontra-se limpa de produtos de corrosão e a solução começa a atacar o metal base. A massa final do corpo de prova, ou seja, isenta de produto de corrosão, pode ser obtida através da interseção das retas que melhor representam os pontos experimentais de cada região. A ordenada do ponto de interseção das retas no gráfico refere-se à massa final do corpo de prova [ CITATION Cor08 \l 1046 ]. A taxa de corrosão, expressa em mm/ano, foi calculada em função da diferença entre a massa inicial, ou seja, antes do ensaio de corrosão e a massa final da amostra, levando em conta o tempo de exposição do material e a massa específica do zinco. Este procedimento foi realizado em triplicata para os grupos AC1 e AC2 para cada tempo de avaliação dos ensaios de corrosão.

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

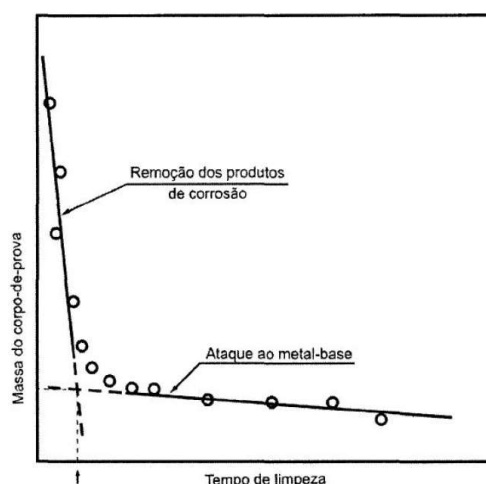


FIGURA 1 - Gráfico representativo da remoção dos produtos de corrosão durante o procedimento de perda de massa.

## 2.4 Voltametria anódica

As fases intermetálicas, por possuírem teores distintos de zinco e ferro, acabam apresentando diferentes potenciais eletroquímicos. A voltametria anódica se baseia nessa diferença para identificar cada camada. O ensaio consiste na lenta polarização do aço galvanizado, em direção a potenciais anódicos, de forma a estimular a corrosão da camada galvanizada. Durante este processo, as fases intermetálicas são seletivamente consumidas à medida que o potencial do sistema se equipara ao potencial de dissolução de cada fase. Ao final do ensaio, são construídos gráficos denominados voltamogramas, que apresentam o comportamento da corrente para cada fase intermetálica consumida, em formato de picos. A intensidade de cada pico está relacionada com a quantidade da fase intermetálica dissolvida [ CITATION Nue18 \l 1046 ].

Este ensaio foi realizado com o auxílio de um potenciostato conectado a uma célula contendo três eletrodos. O eletrodo de trabalho foi a amostra de aço galvanizado e corresponde ao anodo da célula eletroquímica. O eletrodo de referência foi o de calomelano saturado (ECS). Também foi utilizado um contra eletrodo de aço inoxidável, para fechar o circuito elétrico e fornecer uma área catódica para que a reação de redução aconteça. Foi empregada uma solução eletrolítica de 3,42 mol/L cloreto de sódio acrescida de 0,35 mol/L de sulfato de zinco. Segundo a literatura [ CITATION Car \l 1046 ], esta solução se mostra mais adequada para a visualização das fases intermetálicas, pela técnica de voltametria anódica.

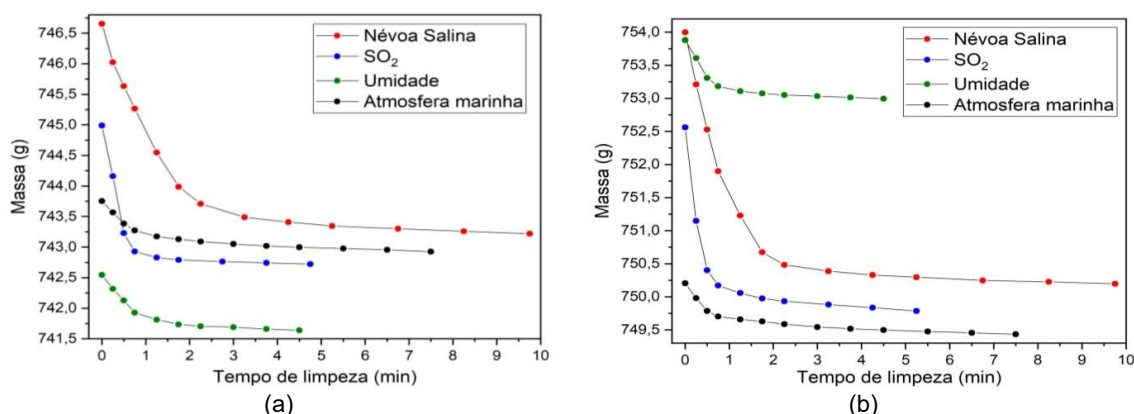
Após a montagem da célula eletroquímica, deixou-se o potencial do sistema estabilizar por uma hora para que o potencial de circuito aberto fosse lido. Posteriormente, foi realizada uma varredura de potencial a partir do potencial de circuito aberto até se atingir -0,6 V. Utilizou-se uma velocidade de varredura de  $10^{-6}$  V/s, lenta o suficiente para permitir a construção de picos bem definidos no voltamograma [ CITATION Que07 \l 1046 ].

## 3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Ensaio de perda de massa

As curvas de perda de massa para os materiais estudados podem ser vistas na FIGURA 2. Observa-se que os gráficos necessários para o cálculo da taxa de corrosão foram construídos com sucesso a partir da metodologia empregada. O patamar de estabilização da massa é claramente identificado nas curvas. Isso mostra que os procedimentos de perda de massa limpam eficientemente o aço galvanizado em todas as atmosferas estudadas. Estes resultados evidenciam que a técnica é capaz de remover produtos de corrosão de natureza distintas, podendo ser aplicada no projeto de estruturas expostas em atmosferas variadas, com diferentes

agentes do intemperismo. Além disso, os procedimentos podem ser aplicados tanto para aços galvanizados de menor espessura, quanto para materiais com uma maior camada de zinco, uma vez que a massa se estabilizou para os grupos AC1 e AC2.



A constatação da remoção completa dos produtos de corrosão pode ser comprovada na FIGURA 3 (e), que apresenta o aspecto representativo da superfície após a decapagem para limpeza dos materiais submetidos a todos os ensaios considerados, representados na FIGURA 3 - (a) até (d). Já os resultados obtidos de taxa de corrosão estão dispostos nas Tabela 1 e Tabela 2. Os valores representam a taxa de corrosão média obtida para cada triplicata, dos diferentes aços, ao longo do tempo de ensaio. Observando os resultados obtidos, verifica-se que a metodologia de perda de massa apresentou excelente reprodutibilidade.

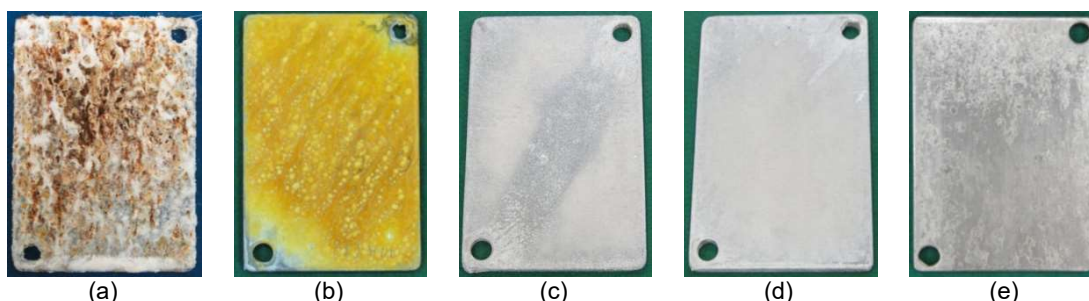


FIGURA 3 - Aspecto visual do grupo AC1 após ensaios de névoa salina (a), SO<sub>2</sub> (b), 100 % de umidade relativa (c), atmosfera marinha natural (d), e perda de massa remoção dos produtos de corrosão (e).

Tabela 1 - Taxa de corrosão para o grupo AC1

Névoa salina		SO <sub>2</sub>		100 % umidade relativa		Atmosfera marinha	
Tempo de ensaio (h)	Taxa de corrosão (mm/ano)	Número de ciclos	Taxa de corrosão (mm/ano)	Tempo de ensaio (h)	Taxa de corrosão (mm/ano)	Tempo de ensaio (ano)	Taxa de corrosão (mm/ano)
167	0,97 ± 0,016	20	0,42 ± 0,029	2526	0,0042 ± 0,00023	1,0	0,0023 ± 0,000037
359	0,66 ± 0,0062	40	0,41 ± 0,034	4000	0,0040 ± 0,00027		
610	0,44 ± 0,0057	60	0,45 ± 0,019	5517	0,0041 ± 0,00037		
870	0,39 ± 0,015						
1271	0,30 ± 0,018						

Tabela 2 - Taxa de corrosão para o grupo AC2

Névoa salina		SO <sub>2</sub>		100 % umidade relativa		Atmosfera marinha	
Tempo de ensaio (h)	Taxa de corrosão (mm/ano)	Número de ciclos	Taxa de corrosão (mm/ano)	Tempo de ensaio (h)	Taxa de corrosão (mm/ano)	Tempo de ensaio (ano)	Taxa de corrosão (mm/ano)
167	1,0 ± 0,016	20	0,44 ± 0,031	2526	0,0037 ± 0,00031	1,0	0,0020 ± 0,00011



359	$0,84 \pm 0,051$	40	$0,42 \pm 0,036$	4000	$0,0032 \pm 0,0029$		
610	$0,58 \pm 0,018$	60	$0,48 \pm 0,027$	5517	$0,0033 \pm 0,00028$		
870	$0,48 \pm 0,023$						
1271	$0,45 \pm 0,0048$						

Analisando os valores de taxa de corrosão contidos nas Tabela 1 e Tabela 2, constata-se que estas variaram expressivamente em função dos ensaios realizados. Isso evidencia a importância de se levar em conta a corrosividade da atmosfera em projetos de engenharia e de estruturas metálicas. Pelo aspecto visual dos corpos de prova e os resultados de taxa de corrosão, observa-se que a névoa salina e a câmara de  $\text{SO}_2$  foram os ensaios mais agressivos ao aço galvanizado, com o processo corrosivo avançando inclusive para as camadas de liga. Entretanto, a solução decapante destinada à limpeza de produtos de zinco removeu eficientemente os produtos de corrosão das fases intermetálicas, quando aliadas a ação mecânica provocada pela escova de aço utilizada. Assim, constatou-se que a metodologia foi capaz de limpar o aço galvanizado independente do estágio de degradação da camada galvanizada.

Para o ensaio em ambiente marinho natural, apesar de ser classificada como uma atmosfera agressiva para o zinco, a taxa de corrosão obtida foi muito baixa e sem quantidade considerável de produtos de corrosão na superfície, devido ao excelente desempenho anticorrosivo do aço galvanizado. Comportamento similar é visto ao analisar a taxa de corrosão e o aspecto visual do aço galvanizado após o ensaio de 100% de umidade relativa. Mesmo assim, a metodologia apresentou boa sensibilidade e foi capaz de mensurar a pequena perda de massa do aço galvanizado nestes ambientes. Portanto, observa-se que estes procedimentos podem ser aplicados para determinação da agressividade atmosférica, mesmo em ambientes caracterizados por baixas velocidades de corrosão. Vale ressaltar que os resultados podem variar em função da agressividade local do ambiente de exposição. Desta forma, recomenda-se a exposição das amostras por no mínimo um ano, para garantir resultados mensuráveis e reprodutíveis de perda de massa.

Avaliando os resultados do ensaio de campo, observa-se que as taxas de corrosão foram de, aproximadamente, 2  $\mu\text{m}/\text{ano}$  para os aços estudados. Assim, considerando uma velocidade de corrosão constante com o tempo e a corrosão homogênea da camada de zinco, uma estrutura em aço galvanizado com 100  $\mu\text{m}$  de espessura de zinco demoraria 50 anos para que todo revestimento fosse consumido. Cabe frisar que está é uma abordagem conservadora, visto que a taxa de corrosão em ambiente marinho tende a diminuir com o tempo, devido à formação de produto de corrosão e obstrução da superfície. Com efeito, os resultados de velocidade de corrosão em névoa salina diminuíram ao longo do tempo de ensaio.

### 3.2 Voltametria anódica

Na FIGURA 4, estão apresentadas as voltametrias anódicas do grupo AC1, na condição inicial e após diferentes tempos de ensaio de névoa salina. Tais resultados também foram similares aos materiais do grupo AC2.

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

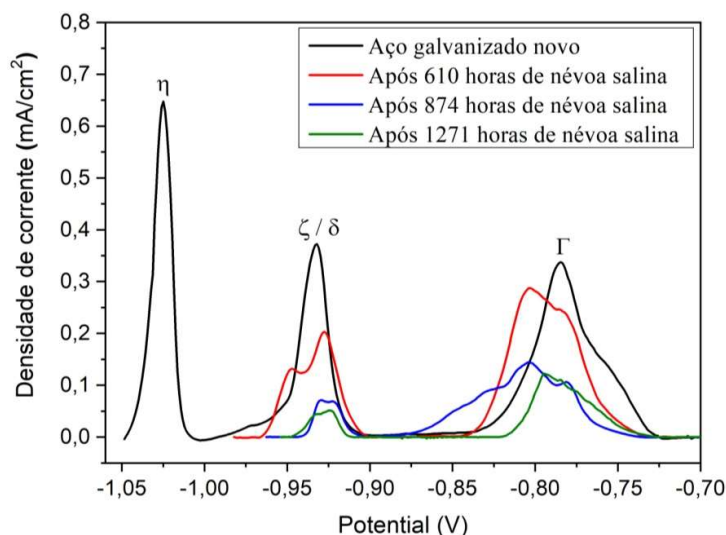


FIGURA 4 - Voltametrias anódicas do AC1 após exposição em névoa salina.

É possível observar no voltamograma inicial três picos distintos para o material antes da exposição aos ensaios acelerados. Como há quatro fases intermetálicas no aço galvanizado, era esperado o aparecimento de um pico relativo a cada fase. Isso indica que duas fases intermetálicas podem ter sofrido dissolução simultânea durante a voltametria [ CITATION Nog98 \l 1046 ]. O primeiro pico foi gerado em um potencial mais negativo, próximo àquele característico do zinco em meio salino, em torno de -1,0 V. Portanto, este pico representa o consumo da fase intermetálica mais superficial, a  $\eta$ , contendo praticamente zinco puro [ CITATION Nue18 \l 1046 ]. Posteriormente, há o aparecimento de um segundo pico em potenciais próximos de -0,95 V, representando a dissolução simultânea das fases zeta e delta. Como estas possuem potenciais de dissolução muito próximos, sua visualização em picos distintos é difícil, mesmo com velocidades de varredura baixas. O último pico surgiu no potencial de, aproximadamente, -0,8 V, estando mais próximo do potencial do ferro no meio em questão. Desse modo, este pico é referente ao consumo da camada gama, localizada imediatamente acima do substrato, apresentando, conseqüentemente, o maior teor de ferro [ CITATION Que07 \l 1046 ].

Ao comparar o voltamograma inicial e após a exposição à névoa salina, percebe-se uma diminuição ou até desaparecimento dos picos referentes às fases intermetálicas. A diminuição da intensidade e da área de cada pico é consequência do consumo das fases intermetálicas pelo processo corrosivo [ CITATION Nog98 \l 1046 ]. Observa-se que o pico referente à fase  $\eta$  desapareceu totalmente após 610 horas de ensaio, mostrando que ela foi completamente corroída. Como a fase  $\eta$  é a mais superficial, ela é consumida preferencialmente em relação às demais, uma vez que está exposta ao meio agressivo desde o início do ensaio acelerado de corrosão.

Comparando entre si os gráficos gerados após 874 h e 1271 h de ensaio, verifica-se que houve uma leve diminuição dos dois picos menos eletronegativos. Isso mostra que o consumo das fases intermetálicas foi menos intenso neste intervalo de tempo, indicando uma velocidade de corrosão menor. Este comportamento está de acordo com o que foi observado para a taxa de corrosão em névoa salina, uma vez que esta diminuiu com o tempo de exposição do AC1 ao meio agressivo. Portanto, além de identificar o consumo ou não das fases intermetálicas, a voltametria anódica foi sensível para identificar a redução da velocidade do aço galvanizado após sua exposição ao meio salino.

A inspeção visual é uma prática comum para as equipes de manutenção de estruturas do setor elétrico para averiguar o grau de corrosão de torres de transmissão. Porém, sabe-se que essa prática nem sempre fornece resultados que representam fielmente a magnitude da corrosão de estruturas metálicas. Verifica-se que a técnica eletroquímica não somente identifica qualitativamente as fases intermetálicas, como também é uma excelente ferramenta de análise semi-quantitativa da degradação da camada galvanizada. Assim, esta metodologia pode ser empregada futuramente no estabelecimento de padrões para controle da qualidade do aço galvanizado. Após o estabelecimento de um voltamograma padrão, a comparação do voltamograma padrão com o voltamograma de uma amostra pode indicar se as fases intermetálicas foram geradas adequadamente durante o

processo de imersão à quente, identificando a presença ou não dos picos e proporção correta dos mesmos e desvios ocorridos durante o processo de galvanização. Além disso, a voltametria anódica pode ser utilizada no diagnóstico do estado de degradação da camada de galvanização, auxiliando na tomada de decisão sobre a necessidade em se realizar a manutenção da estrutura.

### 3.3 Simulação da vida útil de aço galvanizado

Com base nos resultados experimentais de velocidade de corrosão nas câmaras de ensaios acelerados foram desenvolvidos modelos matemáticos a fim de simular a vida útil dos aços galvanizados após longos períodos de ensaio de corrosão. Através dos modelos propostos pode-se prever a vida útil de um revestimento de zinco, com base nos dados de velocidade de corrosão. Nesse procedimento, encontra-se o tempo necessário para que o processo corrosivo consuma toda a espessura da camada de zinco, esse tempo pode ser considerado como o tempo de vida útil do revestimento. A partir desse momento o substrato de aço carbono estará exposto ao meio, causando perda de massa. Matematicamente, esse tempo pode ser encontrado com a extrapolação das retas obtidas para cada aço até o eixo x em eixo y = 0 (camada residual de zinco).

Os modelos com o melhor ajuste aos dados experimentais estão exibidos nas Figuras 5, 6 e 7. Nestas figuras apresenta-se a comparação de vida útil entre os aços AC1 e AC2 em atmosferas marinha, industrial e úmida, respectivamente. A Figura 5 demonstra a importância do uso de uma maior espessura de zinco para ambientes marinhos, mesmo o AC2 apresentando maior velocidade de corrosão, conforme discutido anteriormente, a espessura adicional fornece um acréscimo de 33% na vida útil para o AC2 em relação ao AC1, ou seja, a camada de zinco do AC2 vai demorar um tempo maior para ser consumida. Essa diferença é ainda maior em ambiente industrial (Figura 6) em que o acréscimo de vida útil chega a 43%. Em ambientes úmidos essa diferença pode chegar a 20 anos (Figura 7). Quanto maior a agressividade maior a importância de se usar uma maior espessura de zinco ou associar a galvanização com outra forma de proteção anticorrosiva, para garantir uma maior vida útil da estrutura.

Ressalta-se que essa metodologia foi utilizada com base em dados de velocidade de corrosão obtidos em ensaios acelerados de corrosão, sendo assim, as expectativas de vida útil pelos modelos matemáticos não podem ser utilizadas para prever a vida útil de estruturas expostas em campo. Porém, essa metodologia pode trazer benefícios às empresas do setor elétrico na redução de custos de manutenção e no projeto e aquisição de materiais galvanizados, mais adequados com as condições de intemperismo a que estarão sujeitos.

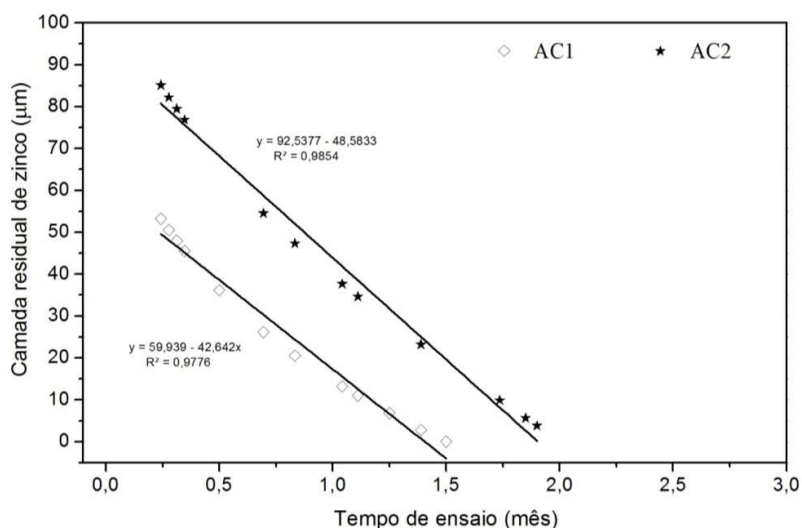


FIGURA 5 – Comparação da vida útil da camada de zinco dos aços AC1 e AC2 em atmosfera marinha.



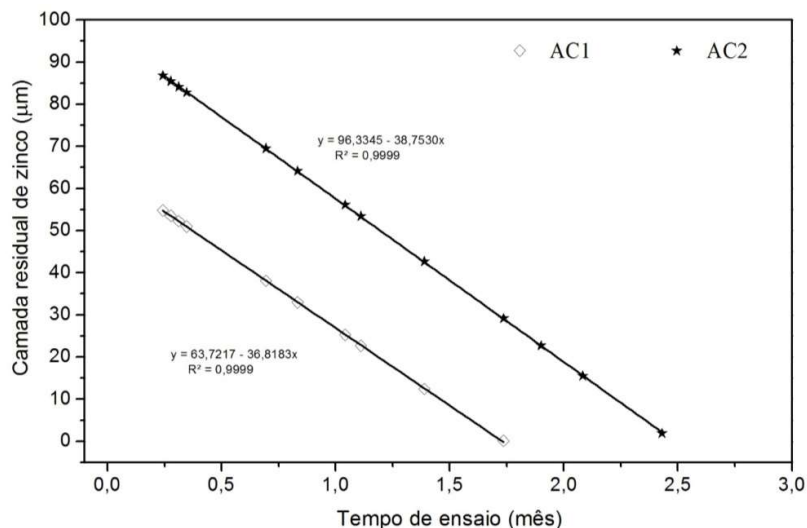


FIGURA 6 – Comparação da vida útil da camada de zinco dos aços AC1 e AC2 em atmosfera industrial.

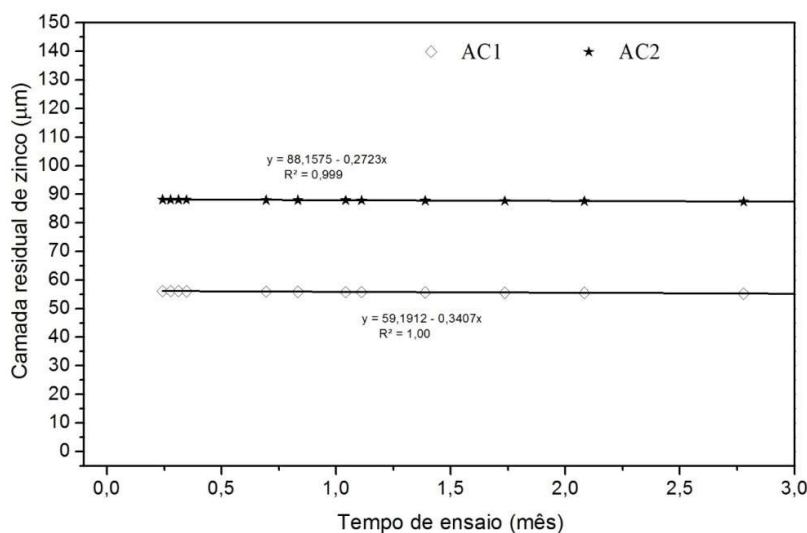


FIGURA 7 – Comparação da vida útil da camada de zinco dos aços AC1 e AC2 em atmosfera úmida.

Esse tipo de estudo de caracterização associado a ensaios de corrosão, acelerados e de campo, permite compreender o comportamento anticorrosivo do aço galvanizado em diferentes atmosferas e especificar o material adequadamente. Simulando-se os dados experimentais com modelos matemáticos foi possível elaborar uma metodologia que permite a estimativa de vida útil do aço galvanizado, em função do meio agressivo investigado.

A metodologia de estimativa de vida útil aplicada aos dados experimentais, em ensaios acelerados de corrosão, pode ser estendida aos dados de campo, permitindo no futuro, o projeto adequado de estruturas galvanizadas em função do meio corrosivo em que se encontram. Dessa forma, falhas prematuras por corrosão serão evitadas, bem como os gastos excessivos com superdimensionamento de proteção anticorrosiva em condições de baixa agressividade atmosférica.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

A metodologia de perda de massa proposta nesse trabalho removeu totalmente os produtos de corrosão do aço galvanizado formado em todas as atmosferas estudadas. Os procedimentos de perda de massa foram aplicados com sucesso no ensaio de exposição por um ano à atmosfera natural marinha. Apesar da pequena formação de produtos de corrosão neste ambiente, a metodologia apresentou sensibilidade suficiente para quantificar a baixa perda de massa neste caso. Isso valida o emprego dos procedimentos descritos neste trabalho em campo.

A voltametria anódica mostrou-se uma excelente ferramenta na identificação das fases intermetálicas. A partir desta técnica, é possível avaliar se as fases intermetálicas foram formadas adequadamente durante o processo de imersão a quente. Portanto, esta metodologia pode ser usada como recurso no controle de qualidade do processo de galvanização, a partir do estabelecimento de voltamogramas padrão, cujos desvios de tal condição sugerem a ocorrência de falhas durante a galvanização.

Esta técnica apresentou também alta sensibilidade ao processo corrosivo, evidenciando a quantidade restante de cada fase intermetálica após os ensaios de corrosão. Desse modo, a voltametria anódica pode ser utilizada no diagnóstico do estado de degradação da camada de galvanização. Ao ser aplicada na manutenção de estruturas galvanizadas, tal ferramenta pode auxiliar a tomada de decisão sobre a necessidade em se realizar a manutenção da estrutura.

Esse tipo de estudo de caracterização associado a ensaios de corrosão, acelerados e de campo, permite compreender o comportamento anticorrosivo do aço galvanizado em diferentes atmosferas e especificar o material adequadamente. Simulando-se os dados experimentais com modelos matemáticos foi possível elaborar uma metodologia que permite a estimativa de vida útil do aço galvanizado, em função do meio agressivo investigado. A partir deste estudo, o aço galvanizado com 100  $\mu\text{m}$  de espessura de zinco apresentou uma vida útil 33% superior que aquele com 50  $\mu\text{m}$  de espessura de zinco, em ambiente salino. Em ambiente industrial, o mesmo índice foi de 43%. Em ambientes de alta umidade, sem a presença de poluentes, a diferença na vida útil entre os dois materiais pode chegar a 20 anos.

A metodologia de estimativa de vida útil aplicada aos dados experimentais, em ensaios acelerados de corrosão, pode ser estendida aos dados de campo, permitindo no futuro, o projeto adequado de estruturas galvanizadas em função do meio corrosivo em que se encontram. Dessa forma, falhas prematuras por corrosão serão evitadas, bem como os gastos excessivos com superdimensionamento de proteção anticorrosiva em condições de baixa agressividade atmosférica.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NUNES, F. G.; BENDINELLI, E. V.; ORDINE, A. P. Avaliação do comportamento anticorrosivo do aço galvanizado por imersão a quente em diferentes atmosferas. Intercorr 2018, São Paulo, 2018.
- (2) FERRARI, J. V. Contaminação com sal de cloreto e cromatização da superfície do aço zincado no processo não-contínuo de zincagem por imersão a quente: influência no desempenho de tintas e determinação de pré-tratamentos para pintura adequados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo - Escola Politécnica. São Paulo. 2006.
- (3) FRAGATA, FERNANDO L.; PANOSSIAN, ZEBHOUR; FERRARI, JEAN VICENTE. Pintura de aço zincado por imersão a quente (aço galvanizado) - falha prematura devido à presença de contaminantes salinos provenientes do processo de zincagem. XI Encontro Brasileiro de Tratamento de Superfícies - EBRATS. São Paulo. 2003. p. 1-13.
- (4) NBR 6210 - Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2008.
- (5) NBR 6323 - Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido - Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). 2007.

- (6) ASTM B117 - Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. ASTM International. West Conshohocken. 2011.
- (7) ASTM G87 - Standard Practice for Conducting Moist SO<sub>2</sub> Tests. ASTM International. West Conshohocken. 2002.
- (8) ASTM D2247 - Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings in 100 % Relative Humidity. ASTM International. West Conshohocken. 2015.
- (9) ISO 9223 - Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation. International Organization for Standardization. Geneva. 2012.
- (10) PARANHOS, R. M. V. Caracterização de fases intermetálicas presentes em aço galvanizado por imersão a quente com tratamento térmico do revestimento metálico. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.
- (11) QUEIROZ, F. M.; COSTA, I. Electrochemical, chemical and morphological characterization of galvanized steel coating. Surface & Coatings Technology, v. 201, p. 7024-7035, 2007.
- (12) NOGUEIRA, T. M. C.; SEIXAS, U. R.; RIOS, P. R. Application of Voltammetric Stripping to a Galvanized Coating on an Interstitial Free Steel Sheet. ISIJ International, v. 38, n. 7, p. 775-777, 1998.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

### ELBER VIDIGAL BENDINELLI



Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Possui o curso de Engenheiro de Processos CAE pela Universidade Federal Fluminense (UFF) participando do Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural (PROMINP). Possui Mestrado (2014) em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ com ênfase em pesquisa e desenvolvimento de revestimentos anticorrosivos inteligentes aplicados ao setor elétrico brasileiro. Atualmente é Pesquisador de corrosão no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e doutorando no Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM) da COPPE/UFRJ.