

Estudo eletroquímico em solo saturado com água para a liga 70% alumínio – 30% zinco depositada por aspersão térmica em aço carbono 1020

Electrochemical study in soil saturated with water for the 70% aluminum - 30% zinc alloy deposited by thermal spray onto 1020 carbon steel

DOI:10.34117/bjdv8n4-433

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

Julio Cezar Zaupa

Mestre pela UFPR- PIPE

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rua Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100. Centro Politécnico

Edifício da Administração – 4^o Andar. Curitiba – PR – BR. CEP: 8153 –980

E-mail. juliozaupa@gmail.com

José Maurílio da Silva

Doutorado em físico-química pela UFSCar

Instituição: Universidade Federal de São Carlos · UFSCar

Endereço: Travessa Rafael Greca 99. Apto 102. Bloco “B”. Água Verde. Curitiba. PR

CEP: 80 620 -150

E-mail: mauriliopcdegrelhas@gmail.com

Ramon Sigifredo Cortes Paredes

Professor do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da UFPR

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Rua Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100. Centro Politécnico – Edifício da

Administração – 4^o Andar. Curitiba – PR – BR

Caixa Postal; 19 011. CEP: 81531 – 980

E-mail: ramoncparedes@gmail.com

Rullian Ferreira Pinheiro

Aluno do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da UFPR

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rua Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100. Centro Politécnico –

Edifício da Administração – 4^o Andar. Curitiba – PR – BR. CEP: 81531 – 980

E-mail: rullianpinheiro@gmail.com

Estéfano da Silva Poletto

Graduação em Química pela UFPR

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rua Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100. Centro Politécnico,

Edifício da Administração – 4^o Andar. Curitiba – PR – BR. CEP: 81531 – 980

E-mail: estefanopoletto@gmail.com

Marcelo Buras

Mestrado em geotecnia experimental pelo PPGECC da UFPR

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rodovia BR 116 km 98 N° 8813. Jardim das Américas. Caixa Postal: 19067

CEP: 81531-980 Curitiba, PR, Brasil

E-mail: marceloburas@lactec.org.br

Betina Lepretti Medeiros

Mestre em construção civil pelo PPGECC da UFPR

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rodovia BR 116 km 98 N° 8813. Jardim das Américas, Caixa Postal: 19067

CEP: 81531-980 Curitiba, PR, Brasil

E-mail: betina@lactec.org.br

Juliane de Melo Rodrigues

Mestrado em desenvolvimento de tecnologia pelo LACTEC

Instituição: Institutos para o desenvolvimento LACTEC

Endereço: Rodovia BR 116 km 98 N° 8813. Jardim das Américas, Caixa Postal: 19067

CEP: 81531-980 Curitiba, PR, Brasil

E-mail: Juliane@lactec.org.br

RESUMO

Os pés das torres das linhas de transmissão elétrica são frequentemente construídos em aço galvanizado e estão sujeitos às mesmas condições de corrosão de outras instalações metálicas enterradas. A gravidade desta corrosão é determinada pelo nível de agressividade do solo. A galvanização das estruturas de aço dos pés das torres confere, normalmente, proteção razoável contra a corrosão pelo solo por vários anos, mas quando as torres se encontram em solos altamente corrosivos, torna-se ineficiente muito antes da torre alcançar o final do seu período econômico de vida. Visando contribuir na identificação de alternativas de proteção contra corrosão em fundações metálicas de haste de torres atirantadas, neste estudo foi verificado o desempenho do revestimento anticorrosivo de zinco e alumínio, aplicado por aspersão térmica sobre o aço carbono 1020 por intermédio de ensaios eletroquímicos. O revestimento também foi estudado em laboratório pela caracterização microestrutural por intermédio de técnicas de superfície (microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura “MEV” e microanálise de energia dispersiva “EDS”). O objetivo principal desse trabalho é avaliar a proteção obtida pelos revestimentos aspergidos em aço carbono por aspersão térmica a “chama-pó”. A caracterização da liga Al-Zn, ao fim deste estudo, mostra que este revestimento melhora a proteção contra a corrosão quando comparado aos revestimentos puros destes metais.

Palavras-chave: corrosão pelo solo, aspersão térmica, zinco, alumínio.

ABSTRACT

The feet of transmission lines towers are frequently built of galvanized steel and they are subject to the same conditions of corrosion another buried metallic as pipelines. The gravity of this corrosion is determined by the level of soil aggressiveness. The galvanized steel in feet transmission line tower and towers superstructure usually, reasonable protection against underground corrosion for several years. When transmission line tower localized in highly soils corrosive, or where exists grounding formed by copper counterpoise, the galvanized steel in feet transmission line tower becomes a lot inefficient

before tower to reach economic life period. Seeking to contribute in the identification of protection alternatives against corrosion in metallic foundations anchor rods of guided transmission tower, this study the acting of coating 70% alumínio-30% zinc league, applied by thermal aspersion on carbon steel 1020. The coating 70% aluminum – 30% zinc was studied in laboratory through electrochemistry techniques and surface techniques. The main objective of present work is to evaluate the protection obtained by the thermal aspersion coatings. The characterization made this study, showed coating offers good protection to the underground corrosion of carbon steel 1020.

Keywords: underground corrosion, thermal aspersion, zinc, aluminum.

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos metálicos para a proteção por barreira de equipamentos e estruturas metálicas são bastante difundidos, pois oferecem efetiva proteção ao substrato, garantindo um maior tempo de vida útil a um custo relativo baixo quando comparado com o dos revestimentos orgânicos. Os processos de aplicação economicamente viáveis e mais comumente utilizados para se obter revestimentos com bom desempenho, são os de imersão à quente e os de aspersion térmica. A aspersion térmica é uma tecnologia de deposição de revestimentos que atuam como protetores contra o desgaste e a corrosão devido a sua versatilidade de materiais para aplicação e é utilizada em diversas áreas da engenharia. Para uma definição geral dos processos de aspersion térmica tem-se que, o material de revestimento, que pode estar inicialmente na forma de pós, arames ou vareta, é alimentado por uma pistola de aspersion que possui uma fonte de calor, cuja origem pode ser plasma, chama por combustão de gases, gases quentes e arco elétrico [01]. Diante disto, os processos de aspersion térmica apresentam algumas vantagens com relação ao processo de imersão à quente, sendo as mais importantes, a possibilidade de ser executado em campo sobre peças de qualquer dimensão, não existindo limite na espessura de camada a ser aplicada. Outra vantagem, é que o revestimento pode constituir-se numa eficiente base para tratamentos posteriores por pintura, tendo como principais desvantagens, a natureza porosa do revestimento e a dificuldade em se obter proteção uniforme [02].

Estudos realizados sobre a metalurgia física do sistema binário Zn-Al [03, 04] demonstraram que a microestrutura dos revestimentos desta liga e conseqüentemente, o seu desempenho frente à corrosão, se dá em função do conteúdo de alumínio e da velocidade de solidificação do revestimento. Esses autores fizeram uma análise do diagrama de equilíbrio de fases do sistema zinco-alumínio. Desse estudo eles concluíram

que a solubilidade do zinco na solução sólida da fase final rica em alumínio (α) é grande, porém é muito limitada a solubilidade do alumínio em solução sólida da fase final rica em zinco (fase β). Por essa razão, a fase predominante em grande extensão do diagrama de fase, principalmente em temperaturas mais elevadas, é a solução sólida da fase rica em alumínio com uma quantidade considerável de zinco dissolvido. À temperatura ambiente, a estrutura em equilíbrio compreende uma fase α , rica em alumínio e uma fase β , rica em zinco, não ocorrendo formação de compostos intermetálicos no sistema binário Zn-Al. De fato, a densidade do alumínio equivale a metade da densidade do zinco, sendo assim, a porcentagem em volume do alumínio será muito maior que a sua porcentagem em peso. Portanto, seja qual for a composição da liga Al-Zn na microestrutura do revestimento, predominará sempre a fase rica em alumínio (fase α), por dois motivos: pela natureza do diagrama de fase binário e pelas densidades dos dois elementos envolvidos. O diagrama de fase representa a presença dessas fases em equilíbrio e as reações eutética, eutetóide e peritética são todas controladas por difusão e, portanto, requerem tempo e temperatura definidos para ocorrer.

Em um revestimento de liga Al-Zn aspergido, a liga permanece a uma elevada temperatura durante um espaço de tempo muito curto, e as fases em equilíbrio não tem oportunidade de se formarem. O líquido Al-Zn resfria para menos de 200 °C em fração de um segundo [03]. Sob estas condições, as temperaturas líquidas e sólidas de ambas soluções das fases sólidas finais são deslocadas e a transformação eutetóide, que é a única reação do sistema que ocorre inteiramente no estado sólido e a temperatura mais baixa é, provavelmente, suprimida completamente ou ocorre somente em escala limitada. Assim, as fases presentes em um revestimento de liga Al-Zn, depositado pelo processo de aspersão térmica, certamente serão diferentes daqueles obtidos por outros processos caracterizados por diferentes velocidades de resfriamento.

Pela análise da microestrutura dos revestimentos da liga Al-Zn por aspersão térmica, observa-se que a solubilidade do alumínio no zinco, a temperatura ambiente, é de 0,05%, enquanto a do zinco no alumínio é muito mais elevada. Isso explica porque o zinco encontra-se uniformemente distribuído no revestimento, enquanto o alumínio concentra-se em certas partículas. Esta estrutura heterogênea do material encontra-se fora do equilíbrio e a fase rica em alumínio apresenta-se supersaturada em zinco. Ao longo do tempo de resfriamento, a fase rica em alumínio tende a atingir o equilíbrio, o que acarreta uma separação do zinco supersaturado, com o que, ocorre a formação de um filme contínuo da fase rica em zinco.

Existem diversas marcas e modelos de equipamentos comerciais que se destinam ao diagnóstico de corrosão em estruturas enterradas [05, 06, 07], com base na técnica de injeção de corrente, em sua maioria, costumam determinar o valor da resistência de polarização linear e os valores das constantes de Tafel diretamente das curvas de polarização experimental, usando trechos da curva potenciodinâmica catódica em altos valores de potenciais. O objetivo principal do presente trabalho foi estudar o revestimento da liga 70% alumínio – 30% zinco, usando técnicas eletroquímicas para avaliar a eficiência na proteção do revestimento aspergido em aço carbono por aspersão térmica chama-pó.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

Foram preparados alguns cupons metálicos (placas aspergidas) em diversas proporções conforme mostra a Tabela 1:

Tabela 1 - Composição química das amostras

Al%	Zn%	Al-Zn%
100	100	70-30

A granulometria dos “pós metálicos” foram de 250 mesh. As morfologias do zinco e do alumínio são arredondadas. Inicialmente, a granulometria do pó foi estabelecida entre as peneiras de malha 0,106 a 0,250 mm. Esta granulometria foi obtida através da agitação dos grãos em peneira vibratória Vibrotech – Modelo CT- 025 e a homogeneização dos compósitos foi feita em um misturador do tipo “Y” por um tempo de 45 minutos. A faixa granulométrica escolhida, teve como objetivo, evitar a obstrução do sistema de alimentação do pó da pistola de aspersão.

Os substratos de aço carbono AISI 1020, com dimensões de (150x100) cm, utilizados na confecção dos cupons metálicos foram previamente preparados por jateamento abrasivo. O jateamento foi realizado de acordo com a Norma Petrobras 2568 [08]. A Tabela2 apresenta as condições de operação de jateamento abrasivo utilizadas neste trabalho. Após o jateamento as peças foram colocadas em estufa a (70±5) °C por pelo menos 12 horas e retiradas no momento da deposição.

Tabela 2 – Condições de jateamento dos corpos de prova estudados

Parâmetro	Valores empregados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco # 36 mesh
Tipo de jato empregado	Jato por pressão
Pressão de jateamento	80-90psi
Distância de jateamento	100-150mm
Rugosidade mínima obtida	3,73 μ m Ra

As medições de rugosidade foram realizadas por um rugosímetro portátil, com apalpador de contato mecânico, marca Mitutoyo, modelo SJ201, com capacidade de medição entre 0,05 e 15 μ m Ra.

Para a deposição do revestimento, utilizou-se o processo de aspersão térmica a chama oxiacetilênica, FS, para a deposição dos compósitos utilizados. A deposição dos revestimentos foi realizada com a pistola tipo 6P-II da marca Sulzer Metco.

A deposição foi realizada com um ângulo de 90°, em relação à superfície, reduzindo a formação de salpicos no revestimento depositado. Os parâmetros utilizados estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de deposição FS utilizados

Matéria prima	Parâmetros
Pré-aquecimento	150°C
Distância pistola substrato	100 mm
Fluxo de oxigênio [*1]	45
Fluxo de acetileno [*2]	35
Fluxo de Nitrogênio [*3]	15
Taxa de alimentação	45 g/min
Número de passes	3 passes

[*1] 45 = 87,43 pés/h [*2] 35 = 68,01 pés/h [*3] 15 = 29,14 pés/h

2.2 ADERÊNCIA POR DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento é um ensaio qualitativo para verificar a qualidade do revestimento metalizado e fornece um comparativo da ductibilidade da camada indicando sua maior ou menor aderência ao substrato. As metodologias utilizadas foram às recomendadas pela norma Petrobras N-2568 [08].

Este ensaio de dobramento consiste em dobrar a chapa em um ângulo de 180°. Os corpos de prova aspergidos neste trabalho apresentaram resultados classificados como ideais (vide Tabela 4), pois não houve presença de trincas e micro trincas.

Tabela 4 – Critérios de avaliação dos ensaios de dobramento da chapa em um ângulo de 180° para aprovação dos revestimentos.

Aparência da superfície	Condição
Sem microtrincas ou microtrincas superficiais	Ideal
Contém microtrincas, sem desgarramento ou delaminação da camada	Marginal
Contém trincas e fendas com desgarramento e delaminação da camada	Rejeitada

2.3 MICROSCOPIA ÓTICA

Na microscopia ótica obtida após o processo de aspersão foi possível obter a espessura do revestimento. O valor da espessura dos revestimentos é o menor valor encontrado na camada aspergida. Nesta pesquisa as espessuras dos revestimentos foram de 80 a 180 μm , para os compósitos analisados.

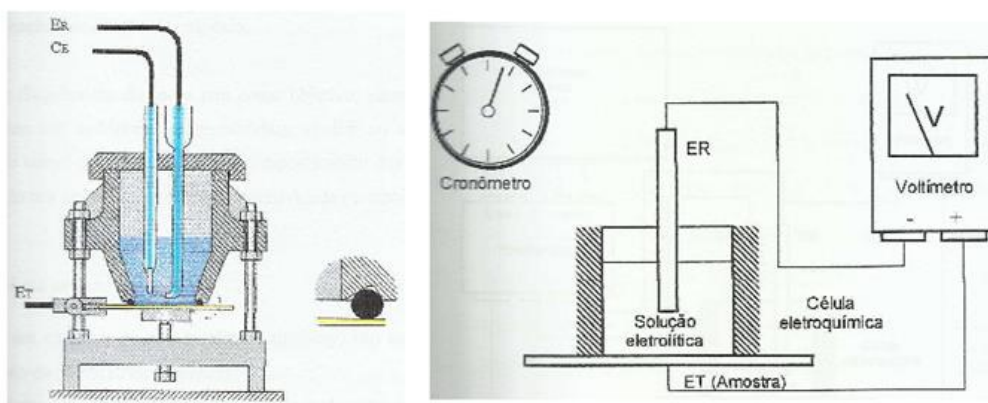
2.4 MICROSCOPIA DOS REVESTIMENTO PELO “MEV”

Neste trabalho utilizou-se o MEV marca TESCAN modelo VEGA 3 – XMU localizado no laboratório de microscopia eletrônica dos Institutos Lactec. A análise da composição química, semi-quantitativa, foi realizada por microanálise de energia dispersiva (EDS), acoplado ao microscópio eletrônico de varredura, marca OXFORD, modelo SDD DETECTOR – X – ACT.

2.5 CARACTERIZAÇÃO POR TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

Para realizar as medidas dos parâmetros obtidos pelas técnicas eletroquímicas usou-se corpo de prova no formato de chapas. A área metálica de estudo foi de 1 cm^2 . Para trabalhar com essa chapa usou-se uma célula eletroquímica de aperto conforme mostra a Figura 1. Esta Figura mostra em detalhe, como foram feitas as conexões entre os eletrodos da célula com o equipamento PG39 da OMNIMETRA EQUIPAMENTOS.

Figura 1 – Célula eletroquímica para trabalhar com chapas.



A Figura 1 mostra a célula usada além de mostrar as conexões entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho juntamente com um multímetro para obter o potencial de repouso da amostra previamente ao início das medições eletroquímicas. O processo consiste basicamente em monitorar a evolução (ou regressão) espontânea do potencial de repouso (Erep) das amostras em relação ao eletrodo de referência com o passar do tempo (Erep vs tempo), com auxílio de um voltímetro. A leitura se inicia no instante que a amostra é mergulhada na solução e usa como tempo de estabilização das leituras os valores de potenciais após, pelo menos, 3 minutos de exposição da amostra no eletrólito estudado (solo saturado com água).

2.6 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A amostra deformada de solo utilizada para realização dos ensaios em laboratório, foi coletada, levando em conta a profundidade e a forma da coleta da amostra. Esta amostra foi armazenada no laboratório em câmara úmida, com temperatura constante e umidade controlada, e somente foi removida deste ambiente para a realização dos ensaios em que ela foi submetida. Antes dos ensaios, a amostra foi seca e destorroada conforme norma ABNT NBR 6457:1986 [09].

Para a obtenção da resistividade mínima do solo estudado utilizou-se a norma ABNT NBR 16254:2014 [10], sendo o resultado expresso em Ω m quando o solo está saturado com água. Para a obtenção da resistividade mínima do solo em laboratório, inicialmente determina-se a equação da reta que representa a resistência do solo em função da corrente pelo potencial aplicado. Para isso, transfere-se o solo previamente separado para uma caixa padrão "soil box". Com o auxílio de um voltímetro de alta impedância e fonte de corrente alternada aplica-se ao solo em estudo, uma faixa de diferentes potenciais (10 000 a 90 000 mV) e determina-se a corrente resultante para cada potencial aplicado. Após a medição, o solo contido na caixa padrão deve ser colocado juntamente com o outro solo que se encontra dentro da cápsula grande dentro da bandeja. Adiciona-se água destilada na proporção de 8% (80 ml) em volume, em relação ao volume do solo seco, homogeneiza-se o solo com as mãos, transfere-se parte desse solo para a caixa padrão, aplica-se novamente uma faixa de diferentes potenciais e obtém-se as diferentes correntes resultantes. Após a medição, o solo contido na caixa padrão deve ser colocado juntamente com o outro solo que se encontra dentro da cápsula grande dentro da bandeja. Efetuam-se novas adições de água destilada com incremento de 8% (80 ml), e se faz o mesmo procedimento anterior. Com os valores da variação do potencial e da

corrente obtida para cada uma das situações do solo analisado é plotado um gráfico e é determinada a equação da reta para cada situação. Estas retas representam a resistência do solo em função da corrente pelo potencial aplicado. Com as equações da reta do solo seco e dos incrementos de água, calcula-se a resistividade do solo para cada situação através da multiplicação do coeficiente angular pelo fator geométrico da caixa “Soil Box” e plota-se um gráfico com os valores de resistividade assim obtidos, em função do teor de umidade. Neste gráfico, obtém-se a resistividade mínima quando os valores de resistividades não variam com o aumento da quantidade de água. O solo estudado apresentou uma resistividade mínima de $25 \Omega \text{ m}$, e portanto, foi classificado como solo agressivo, de acordo com a norma ABNT NBR 16254:2014 [10].

2.7 PH DO SOLO

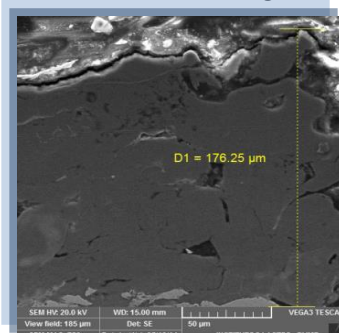
Para a determinação do pH do solo [11] utilizou-se a norma ASTM G-51: 1995. O valor do pH no solo é usado como complemento do parâmetro “resistividade do solo”, pois com este valor é possível classificar o solo quanto a sua corrosividade. Além da resistividade, o pH tem relação com a condutividade do solo, com o potencial redox, com a quantidade de cloretos, com a quantidade de oxigênio dissolvido e com o potencial de repouso do aço no solo. A medida do pH foi realizada no pH-metro Stik TM pH 100. O solo estudado apresentou uma pH de 6,67 e foi classificado como solo pouco agressivo por este parâmetro, de acordo com a norma ABNT NBR 16254:2014 [10].

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO POR TÉCNICAS DE SUPERFÍCIES

Na caracterização superficial dos revestimentos aspergidos foram utilizadas, as seguintes técnicas de caracterização superficial: microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

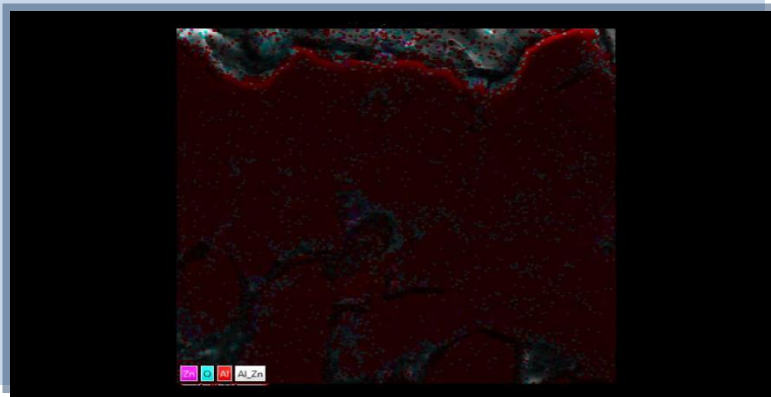
Figura 2 – Espessura do revestimento da liga 70% Al – 30%Zn [12].



Na microscopia ótica obtida após o processo de aspersão foi possível obter a espessura do revestimento, conforme mostrado na Figuras 2.

Para a microscopia eletrônica MEV usou-se o equipamento marca TESCAN modelo VEGA 3 – XMU localizado no laboratório de microscopia eletrônica dos Institutos Lactec e verificou-se a composição química dos revestimentos conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Composição química do revestimento da liga 70% Al – 30% Zn [12].



No Quadro 1 foi feito um resumo dos resultados obtidos pelas técnicas de superfícies.

Quadro 1: Resumo dos parâmetros de aspersão térmica dos revestimentos.

Material	Espessura	Ferro	Composição	Oxigênio
Zinco	81µm	80 %	12 % Zn	8%
Alumínio	116µm	85 %	8 % Al	7%
Liga AlZn (70%Al e 30%Zn)	176µm		89% Al e 8% Zn	3%

Ao analisar o revestimento 70% Al – 30% Zn por MEV, foi observado, em cortes transversais dos revestimentos depositados, a existência de poros/óxidos e duas fases distintas, alumínio e zinco. Utilizando o programa computacional “Clemex Professional Edition 2000”, verificou-se que as frações relativas de áreas de óxidos/poros obtidas no revestimento, pelo processo “FS” para o compósito 70% Al – 30% Zn, ficaram em torno de 3%, corroborando com os resultados encontrados na literatura e cuja faixa se encontra entre 3 e 15% [13]. A baixa porcentagem de poros na deposição de Al é explicada pela conversão do Al em Al₂O₃. Esta conversão possui a máxima energia molar de formação (1668 KJ/mol), o que provoca uma elevação adicional da temperatura das gotas metálicas e, este aumento de energia, causa uma melhora da aderência, propiciando uma menor

porcentagem de poros [02]. As fases presentes na liga Al/Zn ficaram em torno de 8 % de Zn e 89 % de Al (vide Quadro 1).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO POR TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS

A obtenção da resistência de polarização linear [14] foi obtida variando-se, em incrementos negativos (para a direção catódica), o potencial entre os eletrodos e medindo a densidade de corrente correspondente a cada um destes incrementos após um tempo de estabilização pré-determinado. O potencial inicial foi idêntico ao Erep medido pelo voltímetro. O potencial final após construção da curva de polarização catódica foi de 30mV mais catódico em relação ao potencial de repouso e a velocidade de varredura foi de 1 mV/s.

A obtenção da corrente de corrosão [15] foi obtido após realizar a curva de polarização catódica. O potencial inicial foi idêntico ao Erep medido pelo voltímetro. O potencial final após construção da curva de polarização catódica foi de 200 mV mais catódico em relação ao potencial de repouso e a velocidade de varredura foi de 1 mV/s. É comum o uso da curva potenciodinâmica catódica para realizar uma avaliação quantitativa da corrosão de um material metálico imerso em uma determinada solução. Essa avaliação corrosiva é feita a partir da obtenção da densidade de corrente no potencial de repouso pela extrapolação da região linear de Tafel do ramo catódico (aproximação de altos potenciais). Conforme descrito na literatura [15], a aproximação de altos potenciais, sugere que a intersecção da extrapolação da reta (na região linear da curva potenciodinâmica catódica) ao potencial de repouso, possibilita a obtenção da densidade de corrente de corrosão no potencial de repouso, desde que a região linear esteja pelo menos 100 mV mais catódico que o potencial de repouso e que garanta, pelo menos, uma década de linearidade. Ao extrapolar a região linear da reta de Tafel até o encontro com a reta perpendicular relacionada com o potencial de repouso, ou potencial de estabilidade ou potencial onde a corrente externa é zero, obtém-se a corrente de corrosão. A partir da corrente de corrosão obteve-se a taxa de corrosão por intermédio de cálculo matemático. Os parâmetros eletroquímicos para o aço sem revestimento estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Parâmetros eletroquímicos do aço sem revestimento.

Parâmetros	Solo ER 23; $\rho=25 \Omega \text{ m}$; $\text{pH}=6,67$; $E_{\text{redox}}=435 \text{ mV}$	
	Valores obtidos	Classificação
E_{rep} (mV)	-730	Zona ativa
R_p ($\text{k}\Omega \text{ cm}^2$)	2	Agressivo
I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	10	Agressivo
T_x ($\mu\text{m}/\text{ano}$)	100	Agressivo

Ao analisar os parâmetros R_p , i_{corr} e T_x apresentados no quadro 2, constata-se que o aço apresenta uma grande corrosão quando exposta ao solo estudado (ER23), pois a taxa de corrosão foi de $100 \mu\text{m}/\text{ano}$ [16].

Com o objetivo de verificar o desempenho dos revestimentos novos sobre o aço, construiu-se o quadro 3.

Quadro 3: Parâmetros eletroquímicos do aço sem revestimento e do aço revestido.

Parâmetros	Solo ER 23; $\rho=25 \Omega \text{ m}$; $\text{pH}=6,67$; $E_{\text{redox}}=435 \text{ mV}$			
	Aço	Al Asp	Zn Asp	AlZn Asp
E_{rep} (mV)	-730	-630	-810	-1080
R_p ($\text{k}\Omega \text{ cm}^2$)	2	23	2,6	2,4
I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	10	0,7	15	10
T_x ($\mu\text{m}/\text{ano}$)	100	7	150	100

Ao analisar os potenciais de repouso ou potenciais de corrosão (vide Quadro 3) em termos relativos, verifica-se que os potenciais de repouso da amostra de zinco aspergido e da liga 70% Al – 30% Zn aspergida são mais negativos que o potencial de corrosão do aço. Estes valores evidenciam o carácter de proteção catódica oferecido pelo zinco. Também verifica-se que o potencial de repouso da amostra de alumínio aspergido é mais positivo que o potencial de corrosão do aço. Este valor evidencia o carácter de proteção por barreira oferecido pelo alumínio.

A amostra revestida com alumínio apresenta valor de corrosão bem menor que a taxa de corrosão do aço. Ao comparar a amostra de Zn aspergido com a liga 70% Al – 30% Zn aspergida, verifica-se que o desempenho da liga 70 % Al – 30 % Zn foi melhor que o revestimento de Zn aspergido puro devido ao fornecimento da proteção catódica ao aço. Em relação ao desempenho corrosivo pode-se prever comportamento similar entre a amostra de Zn aspergida e a liga 70% Al – 30% Zn aspergida.

A liga de 70% Al – 30% Zn aspergida revelou-se que o efeito sinérgico dos metais componentes da liga estão presentes, isto é, a proteção catódica do Zn está atuando, pois o potencial de repouso foi o que ficou mais negativo entre as amostras realizadas e somou-

se o efeito da proteção por barreira oferecido pelo Al ao apresentar uma taxa de corrosão menor que a taxa de corrosão da amostra aspergida com zinco puro.

Ao comparar a amostra de alumínio aspergido verificou-se o grande desempenho da proteção por barreira da amostra de alumínio, fazendo com que a amostra de aço com comportamento agressivo (100 $\mu\text{m}/\text{ano}$) passou a ter um comportamento não agressivo (7 $\mu\text{m}/\text{ano}$) [16].

O potencial de repouso mais nobre para o alumínio que o potencial envolvendo os revestimentos de zinco, parece indicar que os revestimentos de alumínio apresentam melhor aderência que nos revestimentos de zinco, possivelmente pelo fato de existir mais Queda Ohmica nos revestimentos de alumínio [06].

Embora a quantidade de zinco no revestimento da liga 70% Al – 30% Zn seja próximo de 8 % (vide quadro 1), o revestimento 70% Al – 30% Zn carrega as características do zinco, exercendo a proteção catódica do zinco sobre o aço e o desempenho catódico da liga 70% Al – 30% Zn é superior ao desempenho do zinco puro aspergido. A explicação para isto, pode estar na maior solubilidade do zinco existente na liga.

Finalmente, pode verificar-se que o revestimento da liga 70% Al – 30% Zn foi o que apresentou menor formação de óxido durante o trabalho de aspersão, pois nesta liga vê-se 3 % de oxigênio (vide Quadro 1) já que nos outros revestimentos, verificou-se próximo de 8 % de oxigênio (vide Quadro 1). Por isso, a liga 70% Al – 30% Zn aparenta ser menos porosa que o zinco puro aspergido e aparenta ser menos porosa que o alumínio puro aspergido. Isto parece indicar que a liga 70% Al – 30% Zn possa ter um tempo de vida maior que o Zn puro aspergido e maior que o alumínio puro aspergido[06].

4 CONCLUSÕES

Na liga 70% Al – 30% Zn à temperatura ambiente, a estrutura em equilíbrio compreende uma fase α , rica em alumínio e uma fase β , rica em zinco, não ocorrendo formação de compostos intermetálicos no sistema binário Al-Zn.

A densidade do alumínio é cerca da metade da densidade do zinco, sendo assim, a porcentagem em volume do alumínio será muito maior que a sua porcentagem em peso. Portanto seja qual for a composição da liga Al-Zn, na microestrutura do revestimento predominará sempre a fase rica em alumínio (fase α), por dois motivos: pela natureza do diagrama de fase binário e pelas densidades dos dois elementos envolvidos.

A solubilidade do alumínio no zinco, a temperatura ambiente, é de 0,05%, enquanto a do zinco no alumínio é muito mais elevada. Isso explica por que o zinco encontra-se uniformemente distribuído no revestimento, enquanto o alumínio concentra-se em certas partículas. Esta estrutura heterogênea do material encontra-se fora do equilíbrio e a fase rica em alumínio apresenta-se supersaturada em zinco.

Tendo em conta que se usa o valor de 25 $\mu\text{m}/\text{ano}$ como valor a ser garantido durante uma instalação de proteção catódica em estruturas enterradas. Tendo em conta os critérios de corrosão apresentados na norma ABNT NBR 16 254 -1. Tendo em conta o critério de corrosão apresentado pela NACE e tendo em conta os parâmetros acima mencionados, conclui-se que a afirmação de que estamos trabalhando com um solo agressivo, respalda um adequado critério de classificação do solo em estudo.

A liga 70% Al – 30% Zn aspergido revelou-se que o efeito sinérgico dos metais componentes da liga estão presentes, isto é, a proteção catódica do Zn está atuando, pois o potencial de repouso foi o que ficou mais negativo entre as amostras realizadas. Somou-se o efeito da proteção por barreira oferecido pelo Al, pois o desempenho corrosivo da liga 70% Al – 30% Zn aspergida (100 $\mu\text{m}/\text{ano}$) foi melhor que o desempenho corrosivo da amostra de zinco aspergido (150 $\mu\text{m}/\text{ano}$).

Embora a quantidade de zinco no revestimento da liga 70% Al – 30% Zn seja próximo de 8 % (vide quadro 1), o revestimento 70% Al – 30% Zn carrega as características do zinco, exercendo a proteção catódica do zinco sobre o aço e o desempenho catódico da liga 70% Al – 30% Zn é superior ao desempenho do zinco puro aspergido. A explicação para isto, pode estar na maior solubilidade do zinco existente na liga.

O zinco aspergido apresenta melhor aderência que a liga AlZn, pois o zinco aspergido apresenta maior Queda Ohmica, já que seu $E_{\text{rep}} = -810 \text{ mV}$, é mais nobre que o potencial de repouso da liga 70% Al – 30% Zn ($E_{\text{rep}} = -1080 \text{ mV}$). Finalmente, pode verificar-se que o revestimento da liga 70% Al – 30% Zn foi o que apresentou menor formação de óxido durante o trabalho de aspersão, pois nesta liga vê-se 3 % de oxigênio (vide Quadro 1) já que nos outros revestimentos, verificou-se próximo de 8 % de oxigênio (vide Quadro 1). Por isso, a liga 70% Al – 30% Zn aparenta ser menos porosa que o zinco puro aspergido e aparenta ser menos porosa que o alumínio puro aspergido. Isto parece indicar que a liga 70% Al – 30% Zn possa ter um tempo de vida maior que o Zn puro aspergido e maior que o alumínio puro aspergido.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, à Companhia paranaense de energia elétrica, aos coautores e ao Instituto LACTEC pelo apoio recebido, confiança depositada, liberação de recursos financeiros e disponibilização da infraestrutura, para a realização deste trabalho.

À todos os profissionais que, de forma direta e indireta, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [01] SUCHARSKI, G. B. , Deposição de Revestimentos Tipo Barreira Térmica por Aspersão Térmica, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- [02] PAREDES, R. S. C. Estudo de Revestimentos de Alumínio depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha. Tese de Doutorado – Depto. de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis/SC, Abril de 1998, 246p.
- [03] BUTLER, J.T. e MORROW, H. Corrosion performance of thermal sprayed zinc-aluminium alloys. Report by zinc institute inc., New York, (1988), 19p.
- [04] HORTON, J.B. Alumínio-zinc alloys as sacrificial coatings. In: LEIDHEISER H. Ed. Corrosion control by coatings. Princeton, Science Press, (1978), pp. 59-73.
- [05] Assiel. A. Adada.; Tiago S. de Matos.; Mariana D’Orey Gaivão Portella Bragança.; Luiz A. de Lacerda e Larissa M. de Almeida. **Corrosion grade on anchor rods of guied transmission tower applying machine committee**. Brazilian Journals of development (BJD). Volume 6. Número 10. Outubro (2020).
- [06] Zaupa, J.C., Paredes, R.S.C., Silva, J.M., Pinheiro, R.F., Poletto, E.S., Santos, A.T., Buras, M., Tonetti, M. **Relação entre a redução do filme de óxido de ferro com a chegada do fenômeno de impedimento dessa redução**. Brazilian Journals of development (BJD). Volume 6. Número 12. Dezembro (2020), p.99793-99817.
- [07] Silva, J.M., Paredes, R.S.C., Pinheiro, R.F., Poletto, E.S., Buras, M., Tonetti, M., Medeiros B.L., Rodrigues, J.L. **Aplicação da teoria de semicondutores na interpretação de corrosão pelo solo em pés de torres de linhas de transmissão**. Brazilian Journals of development (BJD). Volume 8. Número 1. Janeiro (2022), p.1698-1717.
- [08] Norma Petrobras, nº 2568, Revestimentos anticorrosivos aplicados por aspersão térmica, Rio de Janeiro, 2003.
- [09] Norma ABNT NBR 6457: 1986. Obtenção da umidade do solo em laboratório.
- [10] Norma ABNT NBR 16254: 2014. Materiais para sistemas de aterramento – Parte 1: Requisitos gerais.
- [11] ASTM G51-95. Standard test method for measuring pH of soil for use in corrosion test.
- [12] ZAUPA, J. C. Desempenho anticorrosivo do revestimento da liga alumínio (70 %) zinco (30 %) aspergido sobre aço carbono 1020, imersos em solo, por intermédio de técnicas eletroquímicas. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Dezembro (2020).
- [13] Shaw, A. B., Moran, P. J.; Corrosion/85-The International Corrosion Forum Devoted Exclusive to The Protection and Performance of Materials, Boston, USA. 1985.

[14] ASTM G59-97 (REAPPROVED 2014). Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements.

[15] ASTM G3-13. Standard practice for conventions applicable to electrochemical measurements in corrosion testing.

[16] NACE. Nace corrosion engineer's reference book. Library of congress. Critério de Nelson. Number (1980) 79-67175. Edited by R.S.Treseder. Houston Texas 77084.