

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Proteção superficial e proteção catódica de transformadores elétricos subterrâneos

Adriana de Araujo^a, Clay M. Martins^b, Zehbour Panossian^c, Neusvaldo L. de Almeida^d,
Alberto S. Dias Junior^e

Abstract

Carbon steel structures for underground electrical transformers are often subject to severe corrosion due to exposure to contaminated and heated stagnated water found in underground chambers. Therefore, they are continually maintained which requires high costs and sometimes it affects the power supply. To overcome this problem, AES Eletropaulo and IPT are developing a study with the specific aim of establishing technical specifications for products and services to replace the current paint (coal tar epoxy) for higher performance and environmentally friendly paints. Additionally, the study includes the use of cathodic protection in conjunction with the selected painting systems. In this paper, the adopted methodology as well as the obtained results are presented and discussed. Four new organic paints were evaluated. For comparison, the current used painting system was included. Accelerated corrosion tests and immersion tests in water collected from the field and in a saline solution were performed to evaluate the performance of the selected painting systems. A specific test for the selection of a galvanic anode for the cathodic protection system was also performed. Among the tested painting systems, two were considered more appropriate for the replacement of the coal tar epoxy based system and an aluminum anode was identified as the best for sacrificial anodes. Currently, nonaccelerated tests are being conducted in the field to validate the results obtained in the laboratory.

Keywords: sacrificial anode, underground corrosion, performance test, cathodic protection, organic coating, underground transformer.

Resumo

A estrutura de aço-carbono de transformadores elétricos subterrâneos frequentemente sofre intensa corrosão decorrente da exposição à água (contaminada e aquecida) estagnada nas câmaras. Por esta razão, operações de manutenção dos transformadores são constantemente realizadas, o que gera custos e, às vezes, prejuízos ao abastecimento de energia. Com a preocupação de evitar tais consequências, a AES Eletropaulo e o IPT estão desenvolvendo um estudo com o objetivo específico de estabelecer especificações técnicas de produtos e serviços para a substituição da tinta atual orgânica (alcatrão de hulha) de proteção superficial dos

^a Mestre, pesquisadora do LCP - Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT (e-mail: aaaraujo@ipt.br).

^b Engenheiro elétrico, coordenador técnico - Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A. - AES Eletropaulo (e-mail: clay.martins@aes.com).

^c Doutora, pesquisadora responsável pelo LCP - IPT e professora convidada do Departamento de Metalurgia e Materiais da EPUSP (e-mail: zep@ipt.br).

^d Mestre, pesquisador do LCP - IPT (e-mail: neusval@ipt.br).

^e Técnico, técnico metalurgista do LCP - IPT (e-mail: albertojr@ipt.br).

transformadores por outra de elevado desempenho e ecologicamente correta, associada ao uso de proteção catódica. Nesse artigo, é apresentada a metodologia adotada e os resultados obtidos. Quatro tintas orgânicas de nova tecnologia foram avaliadas comparativamente com a tinta atual. Ensaio acelerados de corrosão e ensaios de imersão em água coletada em campo e em solução salina foram realizados em laboratório para avaliar o desempenho das tintas. Adicionalmente, um ensaio específico foi conduzido para a seleção de anodo de proteção catódica galvânica. Dentre os revestimentos ensaiados, dois se mostraram mais adequados e o alumínio foi identificado como metal mais adequado como anodo de sacrifício. Atualmente, ensaios não acelerados estão sendo conduzidos em campo, para validar os resultados obtidos em laboratório.

Palavras-chave: anodo de sacrifício, corrosão subterrânea, ensaio de desempenho, proteção catódica, revestimento orgânico, transformador subterrâneo.

Introdução

A confiabilidade na operação de transformadores elétricos subterrâneos está relacionada à sua capacidade de resistir à corrosão ao longo dos anos de exposição ao ambiente hostil (1). Esse ambiente é estabelecido pela inundação periódica das câmaras subterrâneas com águas contaminadas e aquecidas. As águas provêm de chuvas e de eventuais vazamentos de tubulações de água de abastecimento ou de esgoto ou ainda de infiltração de água de lençóis freáticos. Nas regiões urbanas, normalmente, essas águas trazem consigo sujeiras que podem torná-las muito agressivas. O aquecimento, por sua vez, é decorrente da dissipação de calor dos transformadores, o que pode aumentar ainda mais a agressividade da água. Cabe mencionar que, mesmo em períodos em que a superfície da água fica abaixo do nível dos equipamentos, a umidade relativa do ambiente das câmaras subterrâneas mantém-se elevada, favorecendo a continuidade do processo corrosivo. A Figura 1 apresenta um transformador instalado e detalhe da água residual em câmara subterrânea após drenagem.



Figure 1 - a) Transformador instalado em câmara subterrânea e b) Água residual contaminada com resíduos urbanos

Para garantir a mencionada confiabilidade, no Brasil, é usual a pintura da estrutura de aço-carbono (SAE 1020) dos transformadores com tinta à base de alcatrão de hulha. Esse tipo de tinta já foi banido em alguns países, devido ao alcatrão de hulha ser uma mistura complexa de

hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) que contém inúmeras substâncias tóxicas e potencialmente cancerígenas, como benzeno, tolueno e xileno (2).

Atualmente, o mercado dispõe de tintas de novas tecnologias e ecologicamente corretas. Algumas são apresentadas como adequadas para condições adversas de exposição, como as descritas anteriormente, podendo substituir as tintas à base de alcatrão de hulha. No entanto, para garantir o sucesso desta substituição, é imprescindível a avaliação do desempenho destas tintas em condições representativas das existentes nas câmaras subterrâneas.

Sabe-se que a corrosão ocorre quando há defeitos na pintura. Esses defeitos podem ser gerados durante o transporte e a instalação dos transformadores nas câmaras ou podem ser decorrentes da degradação da tinta ao longo dos anos. A corrosão pode ainda ser agravada nas imediações dos locais nos quais são instalados os cabos de aterramento de cobre dos transformadores. Nessa condição, forma-se um par galvânico cobre/aço exposto, que aumenta a taxa de corrosão do aço.

Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar tintas ecologicamente corretas, em comparação à tinta atualmente usada em condições que simulam as de exposição de transformadores subterrâneos. O estudo também considerou a adoção de proteção catódica, atualmente não adotada nas empresas de energia elétrica brasileira, para aumentar ainda mais a confiabilidade dos transformadores, visto que esta técnica é a única totalmente eficiente na proteção estruturas como as do presente estudo (3).

Na literatura (1), é citado o uso de proteção catódica em instalações subterrâneas em que é impraticável limpar e reparar defeitos na pintura. Quando associada ao uso de revestimento de boa qualidade, a proteção catódica é considerada a melhor maneira de proteção de transformadores em câmaras em que não é possível a drenagem contínua da água armazenada (4). No setor de distribuição de energia elétrica, essa associação representa em torno de 10 % do custo de aquisição dos equipamentos (5).

Normalmente, na proteção catódica de equipamentos de pequeno porte revestidos, como transformadores, o uso de anodos galvânicos é preterido em relação ao uso da corrente impressa. Isso é devido à baixa corrente requerida para a proteção do equipamento. A corrente impressa é mais vantajosa a partir de certas magnitudes de corrente de proteção (3,6).

Na proteção catódica galvânica, a corrente é fornecida pela força eletromotriz existente entre o metal a proteger e o metal ou liga escolhido como anodo de sacrifício. Na prática, ligas de alumínio, de zinco e de magnésio são os mais empregados como anodos, por apresentarem maior diferença de potencial em relação ao aço-carbono, metal usual nas estruturas, como a dos transformadores (7).

Metodologia

Tintas selecionadas para o estudo

Quatro tintas ecologicamente corretas foram estudadas além do alcatrão de hulha, que é a tinta usada atualmente pela AES Eletropaulo para a proteção de transformadores subterrâneos. As

características principais dessas tintas juntamente com a codificação e a espessura da película seca estão apresentadas na Tabela 1. As tintas selecionadas são consideradas de alto desempenho e de fácil aplicação e reparo. Cita-se que a tinta **B** é reconhecida no mercado brasileiro como substituta direta da tinta alcatrão de hulha (**A**).

Pela Tabela 1, observa-se que as tintas **C**, **D** e **E** apresentam os maiores teores de sólidos por volume, o que indica maior rendimento da pintura em relação às demais tintas. O alto teor de sólidos também é um indicativo da menor liberação de compostos orgânicos voláteis (VOC) na atmosfera. Essas tintas e a tinta **B** apresentam $VOC \leq 340$ g/L, que é o valor limite para revestimentos de manutenção industrial, segundo a *Environmental Protection Agency – EPA* (8).

Pela Tabela 1, observa-se também que as tintas **B**, **C** e **D** apresentam as maiores espessuras do filme seco por demão, o que permite obter espessuras elevadas com um número reduzido de demãos. As tintas **D** e **E** podem ser aplicadas sobre superfícies com produtos de corrosão aderentes (ST - *Surface Tolerant*) e sobre superfícies úmidas (DT – *Damp Tolerant*), sendo assim adequadas para aplicação em superfície com tratamento mecânico ou por hidrojateamento. Cita-se que o hidrojateamento não é uma técnica adotada atualmente na repintura dos transformadores.

As tintas **C** e **D** têm a propriedade de retenção de tinta nas arestas. Dessa forma, espera-se a obtenção de uma camada de tinta com espessura mais uniforme nas arestas dos equipamentos, as quais são regiões críticas para a ocorrência da corrosão. No caso de transformadores, essa propriedade é muito importante, haja vista a grande quantidade de aletas de refrigeração existentes em suas laterais.

Tabela 1 - Dados definidos no estudo e principais características das tintas selecionadas

| Dados definidos no estudo | | Características da tinta | | | | | |
|---------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|-------------|
| Sigla | Espessura média (µm) | Resina | Volume de sólidos (%) | Compostos voláteis (VOC, g/L) | Espessura máxima do filme seco por demão (µm) | Tinta de Fundo | Outras |
| A | 450 | Epóxi curada com poliamida | 70 | 377 | 140 | Epóxi fosfato de zinco (40 µm) | – |
| B | 400 | | 78 | 176 | 400 | – | – |
| C | 300 | Epóxi modificado | 85 | 143 | 1000 | – | ST/ER/CD |
| D | 300 | | 85 | 255 | 500 | – | ST/DT/CD |
| E | 300 | | 97 | 150 | 150 | – | ST/DT/ER/CD |

ST: aceita aplicação em superfície com tratamento mecânico (padrão St 3) e em superfícies reoxidadas (*flash rust*), comum após o hidrojateamento.

DT: aceita aplicação em condições de elevada umidade relativa e sobre superfícies levemente úmidas devido ao seu tratamento por hidrojateamento (*damp steel surface*)

ER: alta retenção de tinta nas arestas (*edge retentive*)

CD: resistência à perda de aderência catódica (*cathodic disbonding*).

Preparo e pintura dos corpos de prova para ensaios em laboratório

O preparo dos corpos de prova foi iniciado com o corte de chapas metálicas de aço-carbono SAE 1020 nas dimensões de 10 cm x 15 cm. Estas chapas tiveram suas bordas trabalhadas para eliminação de “cantos vivos” e, em seguida, foram limpas para remoções de sais solúveis e óleo.

As chapas cortadas foram submetidas à jateamento com utilização de granalhas de aço. Este tratamento teve como objetivo a remoção da carepa de laminação do metal e a obtenção de um acabamento de metal quase branco (padrão visual Sa 2 ½ de acordo com ISO 8501-1 (9)). Além disso, teve o objetivo de conferir perfil de rugosidade superficial (mínimo previsto de 40 µm). Com uso de medidor do tipo agulha deslizante (com precisão de 5 µm), pôde-se constatar a obtenção de uma rugosidade média em torno de 50 µm.

A pintura foi feita conforme orientações dos boletins técnicos dos fabricantes. Dentre as tintas (Tabela 1), as tintas **A** e **B** foram aplicadas com pistola convencional e as demais com pistola *air less*.

Após a pintura de ambas as faces, as bordas dos corpos de prova foram protegidas com uma camada de tinta tradicional. Foi preparado uma quantidade de corpos de prova superior do que a necessária para a realização de todos os ensaios programados. Com isso, foi possível selecionar aqueles mais adequados, de acordo com o seguinte critério:

- ausência de falhas no filme: as falhas visíveis foram detectadas por exame visual e as falhas invisíveis a olho desarmado foram detectadas de acordo com ASTM D 5162 (10);
- espessuras próximas as apresentadas na Tabela 1: a espessura do filme seco de cada corpo de prova foi medida de acordo com ASTM B 499 (11). A espessura média total do filme seco e o desvio padrão obtido são apresentados em conjunto com os resultados de cada ensaio.

Ensaio de laboratório para a avaliação de desempenho das tintas

Os ensaios de desempenho definidos para a avaliação dos revestimentos das tintas selecionadas foram os seguintes:

- névoa salina: de acordo com ASTM B117 (12). O período de exposição foi de 3000 h, com inspeções semanais dos corpos de prova, após a sua limpeza com água destilada. Os corpos de prova foram posicionados na câmara com inclinação de 30° em relação à direção horizontal. O desempenho dos revestimentos foi avaliado por exame visual e avanço de corrosão a partir da incisão de acordo com ISO 4628 (13, 14) e por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE);
- imersão em solução salina: este ensaio objetivou a avaliação indireta da permeabilidade de revestimentos. Para isto, corpos de prova revestidos foram imersos na solução de cloreto de sódio (NaCl) 5 % durante 2880 h (4 meses). Periodicamente foram levantadas curvas de impedância (EIE);
- imersão em água contaminada: para simular a condição agressiva de imersão em água contaminada e aquecida e de umidade ambiental elevada, os revestimentos foram expostos 3600 h (5 meses) à imersão parcial em amostra de água contaminada selecionada dentre uma série de outras amostras coletadas em campo. O desempenho dos revestimentos foi avaliado periodicamente por exame visual de acordo com ISO 4628 (13). Ambas as faces dos corpos de prova foram avaliadas. Como na prática, os

transformadores estão constantemente sujeitos a imersão, esse ensaio foi considerado fundamental e o principal na seleção do revestimento;

- descolamento catódico: de acordo com ASTM G8 (15), método B (corrente impressa). O período de ensaio foi de 30 dias. O furo adotado foi de 6,35 mm de diâmetro e profundidade equivalente à espessura do revestimento. O monitoramento do potencial foi feito com multímetro Fluke, modelo 287/289;

Três corpos de prova foram usados para cada ensaio, com exceção do de névoa salina. Nesse último, foram usados quatro corpos de prova, dois deles com incisão horizontal com exposição do aço (2 mm de abertura e 70 mm de comprimento). A incisão teve por objetivo avaliar a propagação da corrosão, sendo feita para simular os defeitos no revestimento durante o transporte e a instalação dos transformadores nas câmaras subterrâneas. Devido a esse fato, a avaliação do avanço da corrosão foi considerada fundamental na seleção do revestimento.

O ensaio de espectroscopia de impedância (EIE) foi realizado em três dos quatro corpos de prova expostos à névoa salina e nos três corpos de prova imersos em solução salina. Para esse ensaio foi feita a determinação da espessura total do filme seco do revestimento na área delimitada por cilindro de vidro (16 cm²), o qual foi fixado à superfície de uma das faces do corpo de prova.

No ensaio de imersão em solução salina (NaCl 5 %), a primeira medida de EIE foi feita após 24 h da imersão dos corpos de prova. Os resultados obtidos nessa primeira medida foram adotados como referência tanto para avaliação dos de desempenho à névoa salina como à imersão em solução salina. Ao término do ensaio de névoa salina, a medida de EIE também foi realizada após 24 h de imersão dos revestimentos à solução salina. A Figura 2 ilustra a realização desta medida.

O ensaio de EIE foi realizado com amplitude de perturbação de potencial de 20 mV, numa faixa de frequência de 10⁵ Hz a 10⁻³ Hz para a obtenção do diagrama de Bode (módulo total de impedância, |Z|). O ensaio foi realizado em células convencionais de três eletrodos. O eletrodo de calomelano saturado foi utilizado como referência e, como contraeletrodo, uma rede de platina de área estimada de 54 cm². A área do eletrodo de trabalho (corpos de prova revestidos) foi de 16 cm², delimitada por um cilindro de vidro colado na superfície da placa. Um multipotenciostato/galvanostato BioLogic Science Instruments, modelo VMP3 foi utilizado.

Ao término do ensaio EIE, parte do revestimento ensaiado foi removida para o exame visual da superfície do substrato. Com isso, pôde-se verificar a presença ou não de produtos de corrosão no substrato.

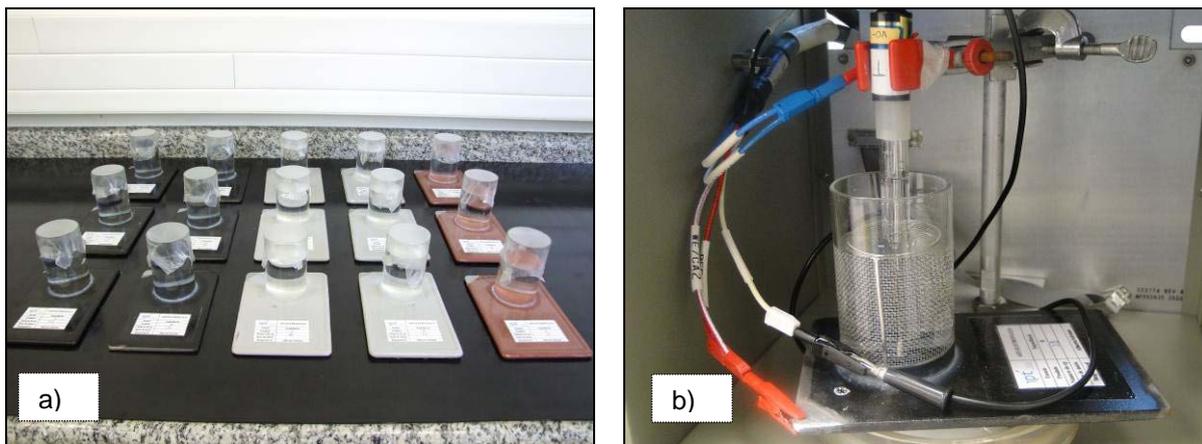


Figure 2 - Ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica. a) Etapa de 24 h de exposição dos corpos de prova de referência à solução de NaCl 5 % e b) Realização do ensaio em um dos corpos de prova

Quanto ao ensaio de imersão em água contaminada, a Figura 3 ilustra o arranjo experimental adotado e a Tabela 2 (água 1) apresenta as características da água selecionada para simular as condições de campo. O ensaio foi realizado em béqueres tipo Berzelius com capacidade de 5 L, objetivando manter um espaço vapor acima do nível de água. Em cada béquer foram usados 2 L de água contaminada. Os corpos de prova foram fixados em suportes de politetrafluoretileno (Teflon[®]) instalados na base do béquer e foram parcialmente imersos, objetivando manter parte de sua superfície exposta ao espaço vapor. A água foi mantida aquecida entre 70 °C e 75 °C, o que foi feito com uso de chapas aquecedoras com sistema de controle de temperatura.

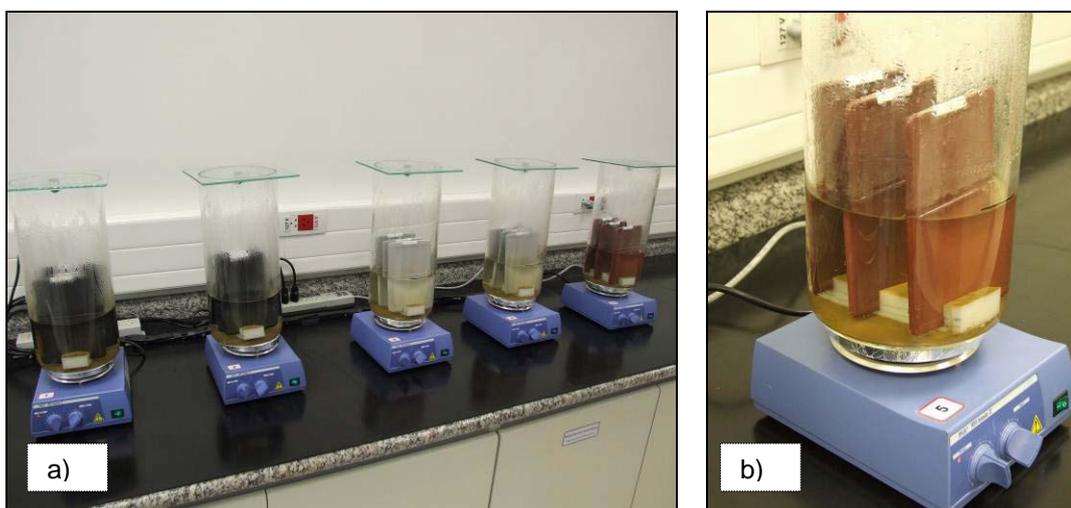


Figure 3 - a) Ensaio de imersão em água contaminada e aquecida em curso nos cinco revestimentos em estudo e b) Detalhe do ensaio

Tabela 2 - Principais características das amostras de águas coletadas em campo e utilizadas em ensaios de laboratório

| Caracterização | Água utilizada em ensaio de imersão em água contaminada e em ensaio de seleção de anodo (água 1) | Ensaio de seleção de anodo (água 2) |
|--|--|-------------------------------------|
| Condutividade, em $\mu\text{S/cm}$ | 54 | 73 |
| pH ($^{\circ}\text{C}$) | 7,8 (25) | 4,5 (25) |
| Alcalinidade ao metilorange, em mgCaCO_3/L | 83,3 | 105,5 |
| Dureza total, em mgCaCO_3/L | 75,7 | 37,9 |
| Sólidos totais, em mg/L | 98 | 99 |
| Sólidos dissolvidos, em mg/L | 140 | 110 |
| Íons cloreto (Cl^-), em mg/L | 2 | 22 |
| Íons sulfato (SO_4^{2-}), em mg/L | 6 | 5 |
| Nitrato (NO_3^-), em mg/L | 1,97 | 1,01 |
| Oxigênio consumido, em mg/L | 1,3 | 2,3 |
| Bactérias redutoras de sulfato (após 28 dias, NMP/mL) | $4,5 \times 10^2$ | $7,5 \times 10^3$ |
| Bactérias redutoras de ferro (NMP/mL) | $2,5 \times 10^1$ | $>1,4 \times 10^8$ |
| Potencial Redox (mV) | 140,1 | 160,9 |
| Índice de Larson-Skold | 0,1 | 0,3 |
| Índice de Langelier | -0,26 | -0,61 |

Ensaio de laboratório para a seleção de anodo de sacrifício

Um reator foi desenvolvido especialmente para a avaliação de anodos para o sistema de proteção catódica a ser implantada em campo. Foram avaliados ligas de alumínio, de zinco e de magnésio. As dimensões dos anodos foram definidas em torno de 18 mm diâmetro e 25 mm de altura. Para cada ensaio, foram utilizados cinco corpos de prova de aço-carbono, um deles com diâmetro em torno de 60 mm e os demais com diâmetro em torno de 30 mm.

Duas séries de ensaio foram realizadas, uma delas com a mesma água usada no ensaio de imersão (água 1). A Tabela 2 apresenta as características das águas.

O reator foi projetado de modo a ser possível monitorar potencial de eletrodo dos corpos de prova revestidos e protegidos catodicamente. Além do potencial, foi monitorado o fluxo de corrente estabelecido entre os corpos de prova e o anodo de sacrifício. Essas medidas foram realizadas com multímetro Fluke, modelo 287/289.

Como valor mínimo de potencial de proteção, do sistema aço-anodo/meio, adotou-se -850 mV (vs Ag/AgCl). Este é o potencial de equilíbrio eletroquímico da reação $\text{Fe}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Fe}$ em meio sem adição de íons de ferro ($a_{\text{Fe}^{2+}} = 10^{-6}$ mol/L), calculado com a aplicação da equação de Nernst.

A Figura 4 apresenta o projeto do reator desenvolvido para a avaliação de anodos. Pela Figura, pode-se visualizar na vista frontal o posicionamento do anodo e a distância (H1)

estabelecida entre a base do reator e a ponta do anodo. Essa distância foi mantida em 20 mm na primeira série de ensaios e em 40 mm na segunda série de ensaios.

Pela Figura 4 também se pode visualizar o capilar de Luggin, que era posicionado sobre um dos corpos de prova quando da medida de potencial. No Corte AA, podem-se visualizar os cinco corpos de prova de aço-carbono fixados à base do reator, sendo o de maior diâmetro localizado ao centro e os demais corpos de prova distribuídos simetricamente no entorno. A Figura 5 apresenta o ensaio em curso e detalhe do arranjo experimental adotado.

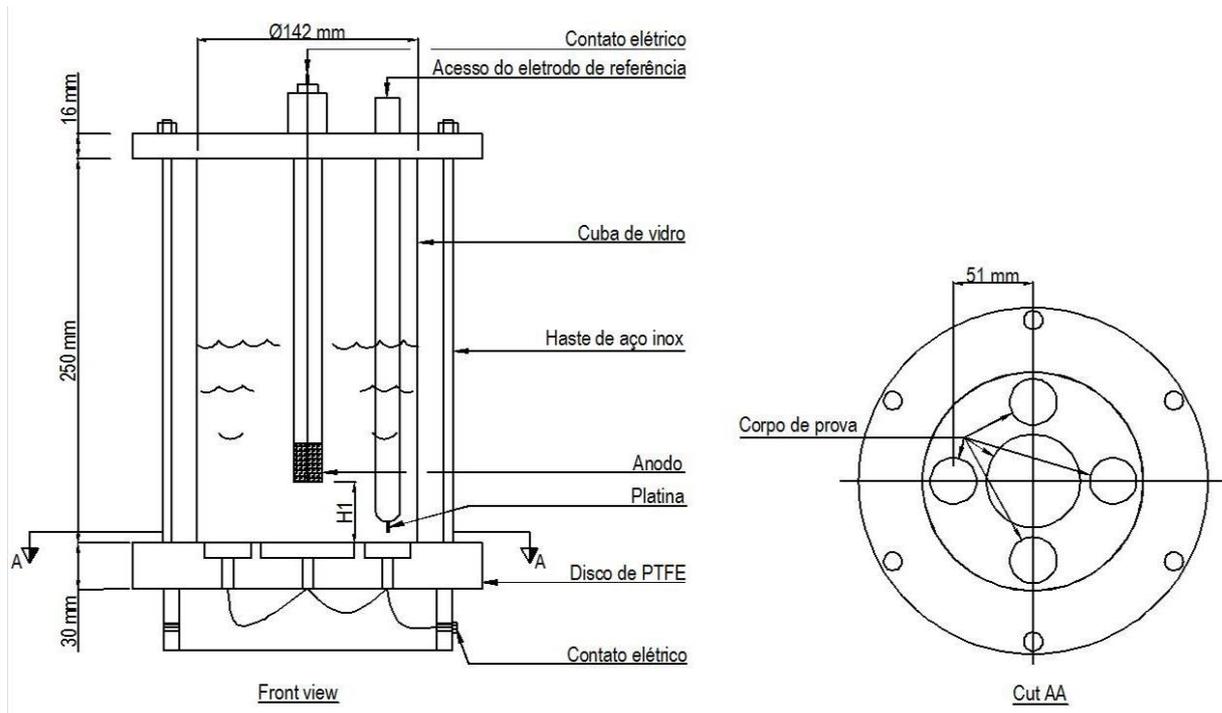


Figure 4 - Projeto do reator de avaliação de anodo galvânico

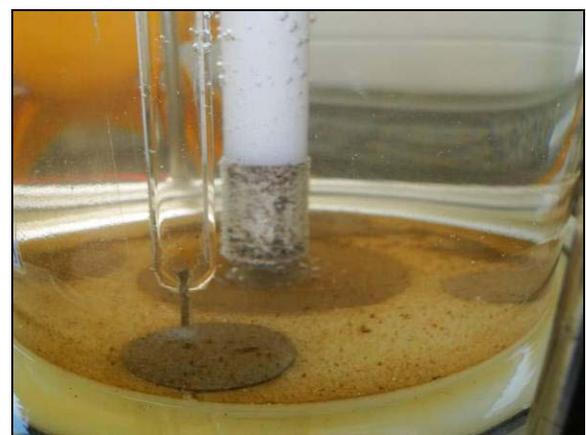
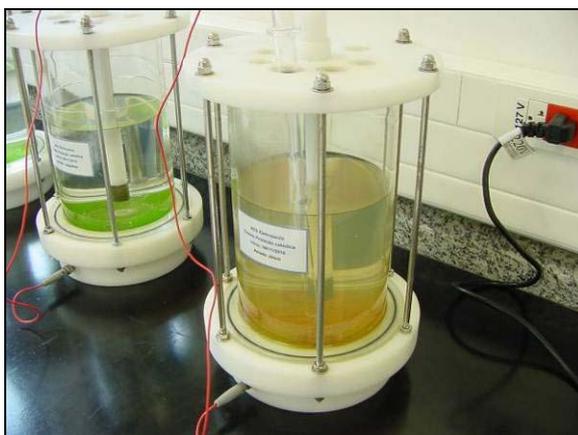


Figure 5 - a) Ensaio de seleção de anodo em curso e b) Detalhe do posicionamento fixo do anodo e do Capilar de Luggin (próximo a corpo de prova)

Resultados e discussão

A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados obtidos nos ensaios de desempenho.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de desempenho.

| Tinta | Névoa salina | | | Imersão em solução salina | Imersão em água contaminada | | Descolamento catódico | |
|----------|-----------------|-------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | Inspeção visual | Avanço médio da corrosão (mm) | log do módulo de impedância ($ Z $, Ohm/cm ² em 0,01 Hz) | | | Inspeção visual | | Diâmetro equivalente médio (ECD) |
| | | | Valor de referência | Valor médio final névoa | Valor médio final imersão | Área emersa | Área imersa | |
| A | Sem alteração | 4,8 | 8,021 | 8,066 | 7,997 | Sem alteração | Empolamento (4(S4)) após 240 h | 15,0 |
| B | Sem alteração | 6,3 | 7,880 | 7,886 | 7,887 | Sem alteração | Empolamento (3(S3)) após 240 h | 11,8 |
| C | Sem alteração | 4,0 | 7,889 | 8,869 | 7,896 | Sem alteração | Nenhuma alteração após 3600 h | 17,7 |
| D | Sem alteração | 6,2 | 8,310 | 8,503 | 7,879 | Sem alteração | Empolamento (2(S4)) após 864 h | 19,1 |
| E | Sem alteração | 6,8 | 7,837 | 8,359 | 7,854 | Sem alteração | Empolamento (2(S4)) após 672 h | 34,2 |

Pela Tabela 3, observa-se que, ao término do ensaio de névoa salina, nenhum dos revestimentos se degradou, visto que não se detectou nenhuma alteração visual dos revestimentos. Houve avanço de corrosão pela incisão, sendo esta maior para o revestimento **E**, seguido dos **B**, **D**, **C** e **A**.

Para os revestimentos **A**, **B** e **D**, módulo total de impedância obtido ao término do ensaio de névoa salina foi praticamente o mesmo ao de referência. Esse resultado aponta claramente o bom desempenho desses a exposição à névoa salina. O mesmo não pode ser dito para os revestimentos **C** e **E**, que apresentaram módulo maior do que ao de referência. Ao término do ensaio, o exame visual do substrato da área ensaiada mostrou que não havia sinais de corrosão o que indicou o bom desempenho de todos os revestimentos a névoa salina, Tais resultados estão em concordância com os obtidos no exame visual da superfície dos revestimentos.

Quanto ao módulo total de impedância obtido ao término do ensaio de imersão em solução salina, somente o revestimento **D** apresentou valor inferior ao de referência. Os revestimentos **A**, **B**, **C** e **E** apresentaram praticamente o mesmo valor do de referência. O exame visual do substrato da área ensaiada ao término dos ensaios confirmou o bom desempenho de todos os revestimentos à solução salina, não sendo visualizado nenhum indício de corrosão no substrato.

Pela Tabela 3, observa-se que, no ensaio de imersão em água contaminada, nenhuma alteração foi observada na área emersa dos corpos de prova. Na área imersa, ocorreu empolamento nos revestimentos **A** e **B** após 240 h de exposição, seguido dos revestimentos **E** e **D** que apresentaram empolamento após 672 h e 864 h, respectivamente. O revestimento **C** não apresentou empolamento após 3600 h de ensaio, portanto é o revestimento de melhor desempenho à condição imersão.

Ao longo do ensaio de imersão, houve aumento da densidade e tamanho do empolamento apresentado na Tabela 3. Além disso, pontos de enferrujamento foram visualizados na área imersa dos revestimentos **A** e **D**. Esse defeito também foi visualizado no revestimento **C**, no entanto, a sua presença limitava-se à região de borda. Isso indicou falha na pintura de reforço de borda. A Figura 6 apresenta o aspecto visual dos revestimentos ao término do ensaio (3600 h).

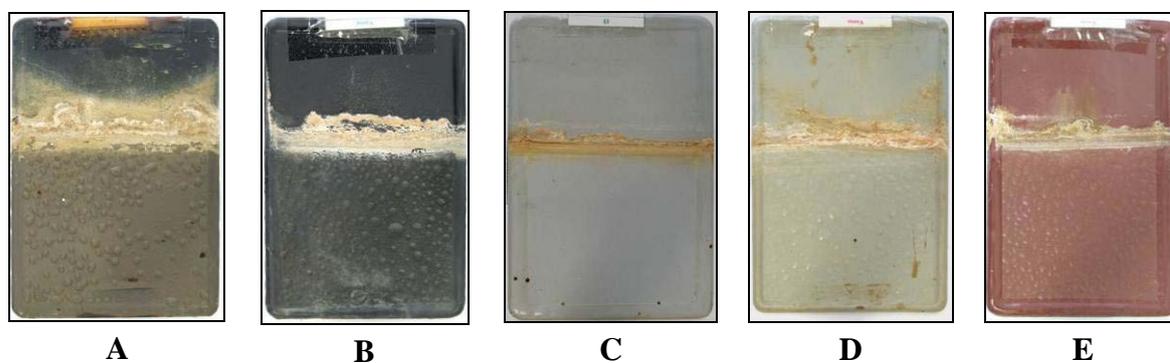


Figure 6 - Aspecto visual dos revestimentos ao término do ensaio de imersão (3600 h) em água contaminada coletada em campo

Pela Tabela 3, observa-se que, no ensaio de descolamento catódico, o revestimento **E** apresentou o maior diâmetro equivalente de descolamento. Os demais revestimentos apresentaram valores aproximados, inferiores a 20 mm (ECD) que foi considerado nesse trabalho como valor limite para aplicação de revestimento associado a sistema de proteção galvânico. Portanto, com exceção do revestimento **E**, acredita-se que todos teriam desempenho similar na proteção dos transformadores. Conforme indicado na Tabela 1, os revestimentos **C**, **D** e **E** são apresentados como resistentes à perda de aderência catódica, no entanto, isso não foi confirmado no ensaio para o revestimento **E**.

Com base no exposto e considerando os resultados obtidos no ensaio de imersão em água contaminada e de avanço de corrosão pela incisão, como os ensaios mais relevantes, o revestimento **C** pode ser considerado o mais apropriado para a proteção anticorrosiva dos transformadores subterrâneos. O uso do revestimento **D** é uma alternativa, no entanto, a sua aplicação deve implicar em menor desempenho na condição de imersão em relação ao revestimento **C**.

Conforme indicado na Tabela 1, o revestimento **C** pode ser aplicado sobre substrato com tratamento mecânico (ST). Essa característica é de grande importância nas operações de reparo de revestimento em transformadores instalados nas câmaras. O revestimento **D**

apresenta a mesma característica, no entanto, este se diferencia por também poder ser aplicado sobre substrato levemente úmido (DT). Tal condição pode ser vantajosa caso o tratamento superficial dos transformadores seja feita por hidrojateamento. Atualmente, a repintura é feita pelo jateamento abrasivo.

Ainda quanto às características do revestimento **C**, este apresenta alta retenção de tinta nas arestas (ER). No caso de transformadores, essa propriedade é muito importante, haja vista a grande quantidade de aletas de refrigeração existentes em suas laterais. Além disso, tanto esse revestimento, com o **D**, apresentou resistência adequada à perda de aderência no ensaio de descolamento catódico.

Os revestimentos **A** e **B** foram considerados inapropriados. O primeiro, especialmente devido à presença de alcatrão de hulha em sua composição. O segundo, especialmente devido ao seu desempenho insatisfatório no ensaio de imersão. O revestimento **E** foi considerado inapropriado devido ao seu baixo desempenho nos ensaios.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados com a água 1 e 2 para a seleção de anodo de sacrifício.

Tabela 4 - Resultados dos Ensaios 1 e 2 de seleção de anodo de sacrifício

| Elemento | Tempo (h) | Potencial médio de eletrodo do sistema aço-anodo (mV, Ag/AgCl) | Taxa média de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$) | Fluxo médio de corrente (mA) | Tempo (h) | Potencial médio de eletrodo do sistema aço-anodo (mV, Ag/AgCl) | Taxa média de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$) | Fluxo médio de corrente (mA) |
|-----------------|-----------|--|---|------------------------------|-----------|--|---|------------------------------|
| | | | | | | | | |
| Anodo alumínio | 936 | -1106 | 1224 | 3,146 | 912 | -936 | 941 | 0,615 |
| Corpos de prova | | | 8 | | | | 24 | |
| Anodo zinco | 936 | -922 | 12 | 0,183 | 912 | -610 | 15 | 0,021 |
| Corpos de prova | | | 8 | | | | 118 | |
| Anodo magnésio | 336 | -1115 | 2750 | 6,626 | 912 | -933 | 53 | 0,694 |
| Corpos de prova | | | 33 | | | | 15,1 | |

Pela Tabela 4, observa-se que, no ensaio realizado com a água 1, o potencial médio de eletrodo para os três sistemas foi inferior ao mínimo calculado (-850 mV, vsAg/AgCl), indicando a eficiência de todos os anodos na proteção catódica do aço-carbono para a condição do ensaio. A taxa de corrosão obtida para o anodo de magnésio e respectivos corpos de prova foi muito elevada, indicando que a sua utilização como anodo de sacrifício não é adequada. Isto porque, haveria um consumo muito rápido do anodo, sendo requerida

uma massa muito mais elevada do que os demais anodos para garantir a sua eficiência em igual período.

Pela Tabela 4, observa-se que, no ensaio realizado com a água 2, o potencial médio de eletrodo foi inferior (mais negativo) ao mínimo estabelecido somente para o anodo de alumínio e de magnésio. Para o anodo de zinco o potencial de eletrodo foi superior (mais positivo) ao mínimo estipulado. A taxa de corrosão do anodo de alumínio foi mais elevada em relação aos demais. No entanto, essa taxa foi inferior ao valor obtido para o mesmo anodo e o de magnésio no ensaio realizado com a água 1. Acredita-se que o caráter ácido do meio (pH 4,5) impactou na taxa de corrosão dos anodos no Ensaio 2, bem como no desempenho do zinco como anodo de sacrifício.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4, conclui-se que o anodo de alumínio seria o mais indicado para utilização em campo, tanto em meio ligeiramente alcalino (água 1) como ácido (água 2).

Conclusões

Considerando todos os resultados obtidos, conclui-se que:

- a metodologia proposta atendeu as expectativas do estudo, sendo os ensaios de desempenho e de imersão adequados na avaliação de revestimentos em estudo. Dentre os ensaios, o de imersão foi o que melhor permitiu classificar a eficiência dos revestimentos;
- o revestimento **C** foi considerado o mais apropriado para a proteção anticorrosiva dos transformadores subterrâneos. Como alternativa a sua utilização, tem-se o revestimento **D**. Os revestimentos **A**, **B** e **E** foram considerados inapropriados;
- o anodo de liga de alumínio foi considerado o mais adequado para a proteção galvânica dos transformadores na condição de exposição à água contaminada com diferentes características.

Referências bibliográficas

- (1) C. N. Gordon, "Fundamentals of Corrosion and Corrosion Control for Residential Subsurface Transformers", IEEE, V.PAS-88, No.3, March, 1969. p.207-218
- (2) B. Mahjoub, E. Jayr, R. Bayrd, R. Gourdon, "Phase Partition of Organic Pollutants Between Coal Tar and Water Under Variable Experimental Conditions", Water Research, V.34, No.14, p.3551-3560, 2000
- (3) J.H. Morgan, "Cathodic Protection; its Theory and Practice in the Prevention of Corrosion", London: Leonard Hill, 1959. p.325
- (4) P. Mayer, "Diagnosis of Corrosion Problems in Underground Electricity Distribution Equipment", Acta Metallurgica Slovaca, No.2, 2000. p.151-163
- (5) G. H. Koch, "Electrical Utilities: summary and analysis of results" In: G. H. Koch,

M. P. H. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani, J.H. Payer, Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States, Houston: NACE, 2001, APPENDIX L, p.L1-L24

- (6) IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão, “Proteção Catódica” 1981
- (7) C. Dutra, L. de P. Nunes, “Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão”, 5.ed., Rio de Janeiro: Ed.Interciência, 2011. 343 p.
- (8) EPA - Environmental Protection Agency. Department of environmental, bureau of air quality control protection, Chapter 151: Architectural and industrial maintenance. Disponível em:<http://www.epa.gov/region1/topics/air/sips/me/2006_ME_ch151.pdf> Acesso em: 21 nov. 2010.
- (9) ISO - International Organization for Standard, “ISO 8501-1: Preparation of Steel Substrates before Application of Paints and Related Products - Visual Assessment of Surface Cleanliness - Part 1: Rust Grades and Preparation Grades of uncoated Steel Substrates and of Steel Substrates and of Steel Substrates and Steel substrates after Overall Removal of Previous Coatings”, Geneva: ISO, 2007. 8 p.
- (10) ASTM – American Society for Testing and Materials, “D5162-08: Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates”, Pennsylvania: ASTM, 2009. 5 p
- (11) ASTM – American Society for Testing and Materials, “B499-09: Standard Testing Method for Coating Thicknesses by the Magnetic Method: Nonmagnetic Coatings on Magnetic Basis Metals”, Pennsylvania: ASTM, 2010. 5 p
- (12) ASTM – American Society for Testing and Materials, “B117-09: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus”, Pennsylvania: ASTM, 2010. 9 p
- (13) ISO - International Organization for Standard. “ISO 4628-2: Paints and Varnishes – Evaluation of Degradation of Paint Coating: Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect, Part 2: Designation of Degree of Blistering”, Switzerland: ISO 2003. 7 p.
- (14) DIN – Deutsches Institut. “DIN ISO 4628-8: Paints and Varnishes - Evaluation of Degradation of Coatings - Designation of Quantity and Size of Defects, and of Intensity of Uniform Changes in Appearance - Part 8: Assessment of Degree of Delimitation and Corrosion Around a Scribe. Berlin: DIN, 2008. 11 p.
- (15) ASTM – American Society for Testing and Materials, “G8-96: Standard Test Methods for Coating Disbonding of Pipeline Coatings”, Pennsylvania: ASTM, 2011. 9 p