



**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES
- GTM**

**REVESTIMENTOS INTELIGENTES COM PODER DE AUTORREPARAÇÃO APLICADOS NA PINTURA
ANTICORROSIVA DE MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS DO SETOR ELÉTRICO**

**FELIPE GARCIA NUNES(1); ELBER VIDIGAL BENDINELLI(1); IDALINA VIEIRA AOKI(2)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1); ESCOLA POLITÉCNICA(2)**

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a tecnologia de revestimentos inteligentes com propriedades de autorreparação aplicados na pintura anticorrosiva de aço carbono no setor elétrico. A tinta epóxi mastique alumínio foi aditivada com microcápsulas contendo óleo de mamona desidratado. O efeito autorreparador das microcápsulas e sua influência nas propriedades anticorrosivas da pintura foram avaliados em diferentes tratamentos de superfície através de ensaios acelerados de corrosão, técnicas eletroquímicas, ensaios de aderência e ensaios em filmes livres. Os resultados obtidos demonstram que os revestimentos autorreparadores são tecnologias promissoras capazes de reduzir a frequência de manutenções da pintura anticorrosiva no setor elétrico.

PALAVRAS-CHAVE

Aço carbono, Pintura de manutenção, Revestimento autorreparador, Microcápsula, Óleo de mamona desidratado

1.0 INTRODUÇÃO

O aço carbono é um dos materiais mais empregados para confecção de estruturas e equipamentos metálicos no setor elétrico, podendo-se citar seu uso em transformadores de subestações. Devido à sua suscetibilidade de sofrer corrosão, esquemas de pintura anticorrosiva são as alternativas mais empregadas para preservar a integridade dos equipamentos em aço carbono (1). Todavia, por conta da vulnerabilidade física da película de tinta, podem surgir defeitos no revestimento devido à ocorrência de danos mecânicos, destruindo a barreira protetora e permitindo o início da corrosão do substrato na região da falha. Nesse sentido, a manutenção e repintura periódica das estruturas são essenciais para garantir a integridade dos ativos do setor. Como tais práticas estão associadas a uma série de gastos para as empresas que atuam no setor elétrico, buscam-se tecnologias capazes de estender a vida útil de esquemas de pintura e diminuir a frequência de manutenções ao longo do tempo de serviço. Com esse intuito, o desenvolvimento de revestimentos inteligentes com poder de autorreparação vem se tornando uma realidade no cenário mundial (2).

O efeito de autorreparação está relacionado à capacidade do revestimento de proteger o substrato metálico após a tinta sofrer danos, sem que haja a necessidade da intervenção humana, aumentando o intervalo entre as manutenções da estrutura (2). Para alcançar esta proteção, a incorporação de aditivos a base de microcápsulas poliméricas contendo em seu interior óleos vegetais secantes é uma das abordagens mais exploradas nesse âmbito. Na ocorrência de defeitos na película seca da tinta, as microcápsulas contidas no interior do revestimento sofrem ruptura, liberando o óleo armazenado na região comprometida. Por suas propriedades secantes, tais óleos formam um filme polimerizado ao entrar em contato com o oxigênio do ar atmosférico, cicatrizando a falha no revestimento e reduzindo o avanço de corrosão a partir da área danificada (3).

Apesar dos avanços tecnológicos na área de revestimentos autorreparadores, os estudos nesse âmbito consideram condições de tratamento de superfície que nem sempre refletem a realidade do setor elétrico brasileiro (2, 4). Sabe-se que, na manutenção de transformadores em subestações, como a operação envolve uma série de estruturas energizadas, nem sempre é possível a realização dos melhores tratamentos de superfície previamente a aplicação da pintura. Por questões de segurança, a preparação da superfície com jateamento abrasivo seco ou hidrojateamento é, muitas vezes, inviável, devendo-se recorrer ao uso de ferramentas manuais e mecânicas (5), fato que produz um grau de limpeza do substrato muito inferior aos outros métodos citados, impactando diretamente no desempenho do esquema de pintura anticorrosivo que será aplicado. Com efeito, atualmente, não se sabe como os revestimentos inteligentes atuariam em nesta condição de tratamento de superfície. Nesse contexto, o presente trabalho contempla o estudo de revestimentos autorreparadores aplicados em substratos de aço carbono com diferentes tratamentos de superfície, incluindo o preparo precário com ferramentas manuais e mecânicas, simulando um cenário de pintura anticorrosiva de manutenção do setor elétrico brasileiro.

2.0 – METODOLOGIA

2.1 Materiais

Chapas de aço carbono AISI 1020 com dimensões de 100 mm x 150 mm x 6 mm foram empregadas para avaliação das propriedades anticorrosivas das tintas convencionais e aditivadas. Foram utilizados tanto corpos de prova com Grau A de intemperismo segundo a ISO 8501-1 (carepa de laminação intacta), quanto no grau C (corrosão generalizada e isento de carepa de laminação) (6). Para atingir o grau C, parte das chapas foi exposta ao intemperismo natural na estação de corrosão atmosférica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), por um período de 15 meses, apresentando corrosividade C3 (média) para aço carbono.

As tintas que compõem os esquemas de pintura foram selecionadas com base no normativo Eletrobras de pintura anticorrosiva (7). Como tinta de fundo, foi empregada uma tinta, disponível no mercado, epóxi mastique alumínio curada com poliamina. Já como tinta de acabamento foi empregado um poliuretano acrílico alifático. O óleo de mamona desidratado foi selecionado como agente autorreparador a ser encapsulado para aditivação das tintas em etapas prévias do estudo a partir da comparação das propriedades de barreira e de secagem de diferentes óleos vegetais secantes (8).

2.2 Tratamento de superfície

As chapas de aço carbono novas com grau A de intemperismo foram desengraxadas com tolueno e submetidos ao jateamento abrasivo seco com granalha de aço angular, até atingir o grau Sa3 de limpeza (6) e um perfil de rugosidade médio de 50 μm . Para o tratamento com ferramentas manuais e mecânicas, foram empregadas chapas de aço carbono envelhecidas com grau C de intemperismo. As chapas oxidadas foram inicialmente lavadas com água corrente para remover o excesso de contaminantes solúveis. Posteriormente, os corpos de prova foram lixados com escova de aço e lixadeira elétrica até atingir o grau St3 (6), seguido de desengraxe com tolueno.

2.3 Encapsulamento do óleo de mamona desidratado

Microcápsulas de poli(ureia-formaldeído-melamina) contendo óleo de mamona desidratado foram sintetizadas por polimerização in situ em emulsão óleo em água, seguindo procedimentos adaptados da patente WO2014/032130 A1 (9). Ureia, cloreto de amônio, resorcina, cloreto de sódio, melamina e goma arábica foram dissolvidos em água destilada, correspondendo à fase água da emulsão. Óleo de mamona desidratado contendo octoato de cobalto como secante foi adicionado à fase água enquanto o sistema era vigorosamente agitado com o dispersor T-25 Ultra-Turrax, formando uma emulsão com gotículas de óleo de tamanho apropriado. O pH do sistema foi acidificado empregando solução de HCl, sendo a emulsão transferida para um banho térmico aquecido sob agitação lenta com agitador mecânico. Formaldeído foi adicionado à emulsão, dando início à formação da casca polimérica das microcápsulas sobre as gotículas de óleo. Ao final da polimerização, as microcápsulas foram recuperadas por filtração à vácuo e lavadas com solventes orgânicos para remover óleo não encapsulado. As microcápsulas secas foram armazenadas no diluente da própria tinta epóxi, em proporção mássica de aproximadamente 1:1.

2.4 Aplicação das tintas

Foram aplicados esquemas de pintura contendo microcápsulas (MC) e sem microcápsulas (REF) em superfícies tratadas por jateamento abrasivo (Sa) e através de ferramentas manuais e mecânicas (St), resultando em quatro sistemas a serem avaliados no presente trabalho, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Sistemas estudados no presente trabalho e suas respectivas codificações.

| Codificação | Grau de limpeza | Tinta de fundo | Tinta de acabamento |
|-------------|-----------------|---|--------------------------------|
| REF_Sa | Sa3 | Epóxi mastique alumínio | Poliuretano acrílico alifático |
| REF_St | St3 | | |
| MC_Sa | Sa3 | Epóxi mastique alumínio contendo 15% m/m de microcápsulas | Poliuretano acrílico alifático |
| MC_St | St3 | | |

A aditivação da tinta de fundo foi feita adicionando a pasta de microcápsulas dispersas no diluente ao componente A (resina epóxi) da mistura. A quantidade de microcápsulas incorporadas representou 15% m/m em relação ao teor de sólidos da tinta. Os aditivos foram dispersos manualmente com o auxílio de uma espátula, sendo o componente B (agente de cura) adicionado posteriormente ao sistema. As tintas foram aplicadas com auxílio de uma trincha. A tinta de fundo foi aplicada em uma única demão de forma que fossem obtidas espessuras de película seca de aproximadamente 120 μm para os revestimentos com e sem microcápsulas. A tinta de acabamento foi aplicada em duas demãos com espessuras de película seca de 60 μm cada. Os revestimentos permaneceram curando nas condições ambientes do Laboratório de Corrosão do Cepel por 15 dias. Foi realizada uma incisão em parte dos corpos de prova revestidos até a exposição do substrato, com o intuito de avaliar a capacidade do sistema autorreparador de conter o avanço da corrosão na região do defeito, em comparação ao sistema tradicional. O

entalhe foi realizado com o auxílio de um buril até exposição do substrato metálico. Após a confecção dos defeitos, esperou-se 72 h para que qualquer óleo liberado no defeito do sistema com microcápsulas pudesse secar e curar, antes de dar prosseguimento à análise do efeito autorreparador.

2.5 Ensaios de corrosão

As propriedades de autorreparação e anticorrosivas foram avaliadas ao submeter os corpos de prova tradicionais e aditivados, com e sem defeito, ao ensaio cíclico de corrosão. Este foi adaptado da norma ISO 12944-9 (10), consistindo na exposição alternada a condições de UV/condensação de umidade, névoa salina e freezer. Cada ciclo correspondeu às seguintes condições: 72 h de exposição a condições alternadas de 8 h a radiação UV-B (irradiância de $0,49 \text{ W/m}^2$ a 310 nm e 70°C) e 4 h de condensação de umidade (100% umidade relativa a 50°C) em câmara QUV da marca Q-Lab; 72 h de exposição à névoa salina (concentração de NaCl 5% m/v e temperatura de 35°C) em câmara QFOG da marca Q-Lab; e 24 h de exposição em freezer da marca Consul modelo CHA31C em temperatura de $(-25^\circ \pm 5)^\circ \text{C}$.

Os sistemas estão sendo avaliados também por ensaio de exposição atmosférica natural na estação de corrosão atmosférica do Cepel. Os corpos-de-prova com defeito foram dispostos em racks com inclinação de 45° em relação ao plano horizontal, em triplicata para cada sistema. Para acelerar este ensaio, foi realizada a pulverização de solução de NaCl 3,5% m/v na superfície das chapas revestidas duas vezes por semana. Por fim, amostras sem incisão também foram expostas em triplicata a uma câmara contínua de condensação de umidade modelo QCT da marca Q-Lab a 40°C e com 100% de umidade relativa.

2.6 Ensaio com filmes livres

Filmes livres foram confeccionados apenas com a tinta de fundo epóxi mastique alumínio contendo microcápsulas (MC) e sem microcápsulas (REF) para caracterização de suas propriedades de barreira. Os filmes foram aplicados em duas demãos com auxílio de extensor em folhas de acetato para posterior destacamento das películas, resultando em películas de espessura seca de aproximadamente $240 \mu\text{m}$. A permeabilidade ao vapor d'água dos filmes livres foi determinada seguindo a norma ASTM D1653 (11). Foram empregadas células de permeabilidade contendo água destilada e seladas com as películas de filme. A massa inicial do conjunto (célula, água e filme) foi determinada (M_i). As células foram armazenadas ao longo de um período de 90 dias em dessecador contendo sílica gel. Periodicamente, as células eram retiradas do dessecador para pesagem da massa do conjunto ao longo do tempo ($M(t)$), retornando ao dessecador após a pesagem. Desta forma, determinou-se a perda de massa ($M_i - M(t)$) através dos filmes ao longo do tempo.

De forma complementar, a cinética de envelhecimento dos filmes livres foi avaliada por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). A impedância foi realizada em célula eletroquímica com dois compartimentos contendo solução de NaCl 0,1 mol/L separados pela película de filme, com duas redes de platina idênticas posicionadas em cada lado da célula. A célula eletroquímica foi acoplada ao potenciostato da Metrohm modelo PGSTAT 302N. Foi utilizado o software NOVA 2.1 para configurar os parâmetros do ensaio. A faixa de frequência analisada foi de 100 kHz até 10 mHz, com 10 medidas por década logarítmica de frequência, e amplitude de perturbação senoidal de 30 mV rms em torno do potencial de circuito aberto do sistema. Medidas de impedância foram conduzidas periodicamente até 18 semanas de imersão no eletrólito. Ambos os ensaios com filmes livres foram realizados em triplicata.

2.7 EIS dos esquemas de pintura

Também foram conduzidos ensaios de EIS nos esquemas de pintura (com camada de acabamento de poliuretano) aplicados nos substratos metálicos. Foram utilizados tubos de vidro fixados nas chapas com cola de silicone de cura neutra em três regiões distintas do revestimento. Foi empregada uma célula convencional de três eletrodos, sendo o eletrodo de trabalho a chapa de aço carbono revestida, o eletrodo de referência o de calomelano em solução saturada de KCl e o contra eletrodo consistiu de uma rede de platina. A célula foi preenchida com solução de NaCl 0,1 mol/L e a cinética de envelhecimento dos revestimentos foi acompanhada com o tempo, realizando-se a impedância periodicamente até 18 semanas de imersão com os mesmos parâmetros de ensaio da seção 2.6.

2.8 Aderência por resistência à tração

Ensaio de aderência por resistência à tração (pull-off) foram conduzidos baseados na norma ASTM D4541 (12). Para este ensaio, foram empregados corpos-de-prova sem incisão expostos a 25 ciclos (4200 h) do ensaio cíclico, 4600 h à câmara de condensação de umidade QCT e amostras não ensaiadas armazenadas em dessecador. Três carretéis de alumínio foram fixados nas chapas revestidas com cola de aderência e estes submetidos a uma tensão de arrancamento empregando equipamento da marca Defelsko modelo POSITEST AT-A. A tensão de ruptura e a natureza da falha foram avaliadas após o ensaio.

2.9 Determinação do avanço de corrosão

Foram realizadas retiradas com três tempos de ensaio distintos - 11, 18 e 25 ciclos - para os corpos-de-prova com incisão expostos ao ensaio cíclico, com o intuito de determinar o avanço de corrosão em função do tempo de ensaio. Após as retiradas, as películas de tinta foram removidas com solução de diclorometano e fenol com relação em volume de 3:1. A área correspondendo ao avanço de corrosão no entorno da incisão foi quantificada com auxílio do software Image J. Para os corpos-de-prova expostos na estação de corrosão atmosférica, o avanço de corrosão foi avaliado qualitativamente de forma visual com inspeção intermediária durante o ensaio após 8 meses de exposição.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Permeabilidade e EIS dos filmes livres da tinta de fundo

A análise da influência das microcápsulas nas propriedades de barreira dos revestimentos será conduzida pela avaliação dos resultados de permeabilidade e impedância em baixa frequência dos filmes livres, dispostos na Figura 1. Sabe-se que as tintas epóxi mastique alumínio empregadas neste trabalho possuem mecanismo de proteção anticorrosiva por barreira, isolando o metal e dificultando a passagem dos agentes agressivos até o substrato metálico. A permeabilidade representa a oposição imposta pelos filmes à passagem de vapor d'água, sendo uma medida direta da qualidade da barreira formada e sua resistência ao transporte do meio agressivo (13). Observa-se que a permeabilidade dos filmes contendo microcápsulas foi consideravelmente superior aos filmes sem microcápsulas. Tal diferença aumentou em função do tempo de ensaio, já que a permeabilidade de REF tendeu a um amortecimento, enquanto a perda de massa através de MC manteve comportamento aproximadamente linear ao longo do ensaio. Ao final de 90 dias, a permeabilidade de MC foi cerca de duas vezes superior que a de REF, sugerindo que as microcápsulas influenciam negativamente nas propriedades de barreira da tinta de fundo.

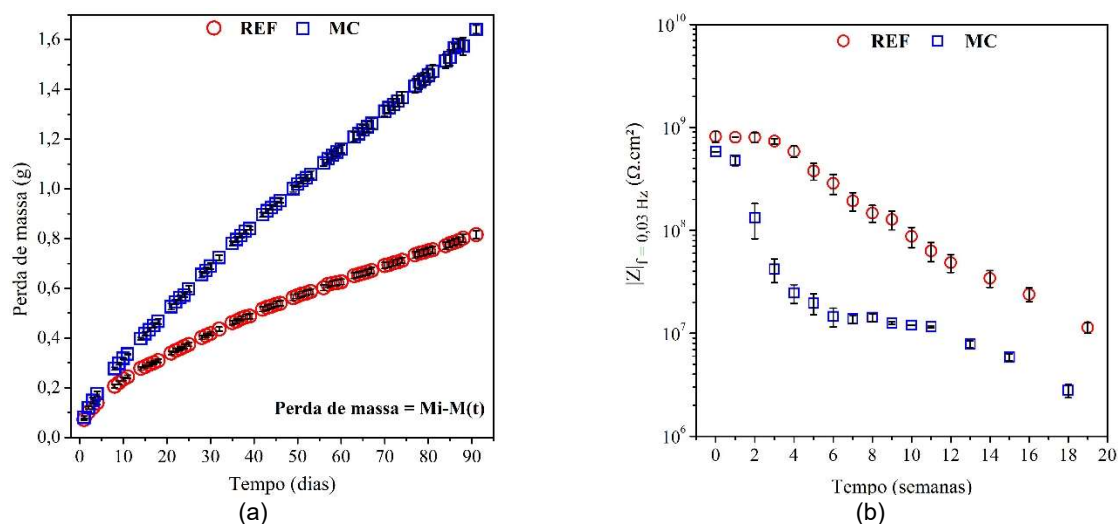


FIGURA 1- Permeabilidade ao vapor d'água (a), e módulo de impedância em baixa frequência ($f = 0,03 \text{ Hz}$) dos filmes livres sem microcápsulas (REF) e com microcápsulas (MC).

Na interpretação de diagramas de impedância de revestimentos orgânicos, a variação (queda) relativa do módulo de impedância em baixa frequência é atribuída à cinética de envelhecimento dos revestimentos e à degradação de suas propriedades de barreira (13). Com isso em mente, até 3 semanas de imersão, a impedância de REF tendeu a ser manter constante, enquanto a de MC obteve queda superior a uma ordem de grandeza. Após esse período, os filmes sem microcápsulas apresentaram queda suave e gradativa da impedância até 18 semanas, enquanto que os filmes aditivados com microcápsulas continuaram com queda acentuada até atingir um período de estabilização da impedância de 6 a 11 semanas, seguido novamente de queda após 13 semanas. De uma forma geral, assim como foi observado nas medidas de permeabilidade, as microcápsulas prejudicaram as propriedades de barreira da tinta de fundo, quando comparado aos filmes REF, demonstrando cinética de envelhecimento mais acelerada.

As propriedades de barreira da tinta epóxi mastique alumínio dependem de uma série de fatores, citando-se a porosidade do revestimento, as propriedades da matriz epóxi em si; a presença de pigmentos lamelares de alumínio; e a interação entre as demais cargas presentes na formulação da tinta com a resina (13, 14). Quando uma quantidade considerável de microcápsulas é incorporada ao revestimento, os parâmetros pretendidos pela formulação original da tinta podem estar sendo alterados, justificando a perturbação nas suas propriedades de barreira. Esta perturbação pode ser oriunda de caminhos preferenciais formados pela incorporação de microcápsulas com maior tamanho de partícula; pelo desalinhamento das lamelas de alumínio como consequência do volume ocupado por microcápsulas, reduzindo a complexidade do caminho a ser percorrido pelo eletrólito; e/ou pelo processo de umectação das microcápsulas pela resina, caso se comportem como carga, restando menos resina livre para atuar como barreira.

3.2 EIS dos esquemas de pintura

Os resultados de impedância dos esquemas de pintura estão ilustrados na Figura 2 na forma de diagramas de Bode, após 1 e 18 semanas de imersão no eletrólito. Observa-se que a impedância inicial (1 semana) de todos os esquemas de pintura foi muito similar, com os gráficos de módulo de impedância essencialmente sobrepondo uns aos outros. O módulo de impedância em baixa frequência foi o mesmo para todos os sistemas, por volta de $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$, valor este extremamente alto e compatível com os esquemas de pintura empregados de alta espessura (240 μm) e de elevado desempenho anticorrosivo. Mesmo após 18 semanas de imersão em solução salina, o módulo de impedância de todos os sistemas não sofreu alteração significativa. Isso indica que todos os revestimentos estudados, independente do tratamento de superfície e da presença de microcápsulas, foram capazes de preservar suas propriedades de barreira e de proteção anticorrosiva, mesmo após longo tempo de imersão em meio agressivo. Este resultado ressalta a importância de se empregar esquemas de pintura completos, pois mesmo havendo perturbação das propriedades de barreira da tinta de fundo pela incorporação das microcápsulas, a presença de uma camada de alta espessura extremamente impermeável (neste caso, poliuretano) garante a proteção anticorrosiva a longo prazo.

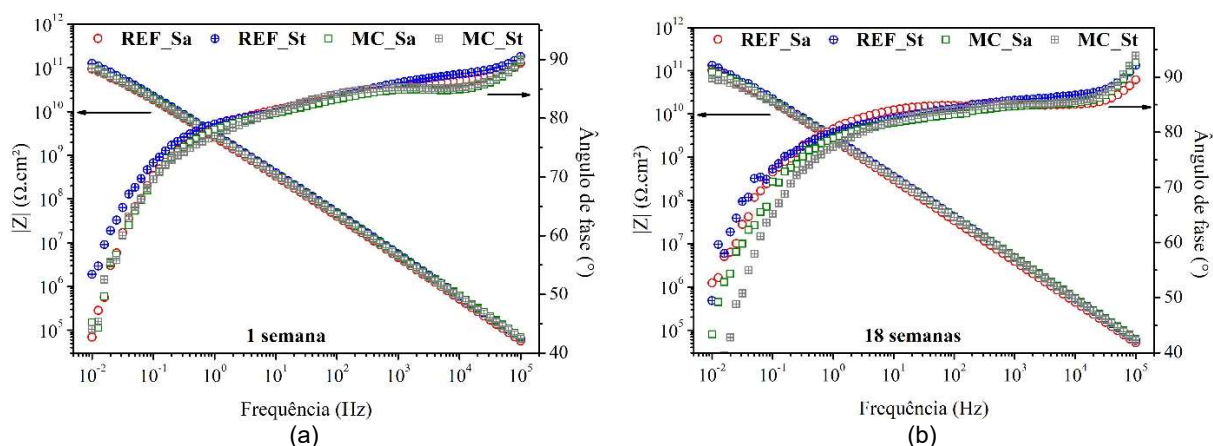


FIGURA 2- Diagramas de Bode dos esquemas de pintura estudados após 1 semana (a) e 18 semanas (b) de imersão em solução de NaCl 0,1 mol/L.

3.3 Aderência por resistência à tração

Os valores da tensão de ruptura e as naturezas de falha para os esquemas de pintura estudados estão apresentados na Figura 3. Avaliando os resultados de tensão de ruptura, observa-se que a aderência inicial dos revestimentos sem microcápsulas foi bastante elevada, mesmo nos substratos com grau de limpeza St3. Isto é uma característica da resina epóxi mastique modificada para conferir alta molhabilidade (14) e poder de penetração da tinta através da camada de óxido residual do tratamento St3, fornecendo aderência química ao revestimento. A incorporação das microcápsulas reduziu a aderência inicial dos revestimentos, em ambos os tratamentos de superfície. Entretanto, os valores obtidos ainda são superiores a 10 MPa, aderência esta satisfatória e que atende aos requisitos do normativo Eletrobras de pintura anticorrosiva (7). Avaliando os valores de aderência após os ensaios de desempenho, observa-se uma tendência de queda para a grande maioria dos revestimentos estudados. De uma forma geral, as microcápsulas enfraqueceram a aderência tanto das amostras ensaiadas quanto das não ensaiadas.

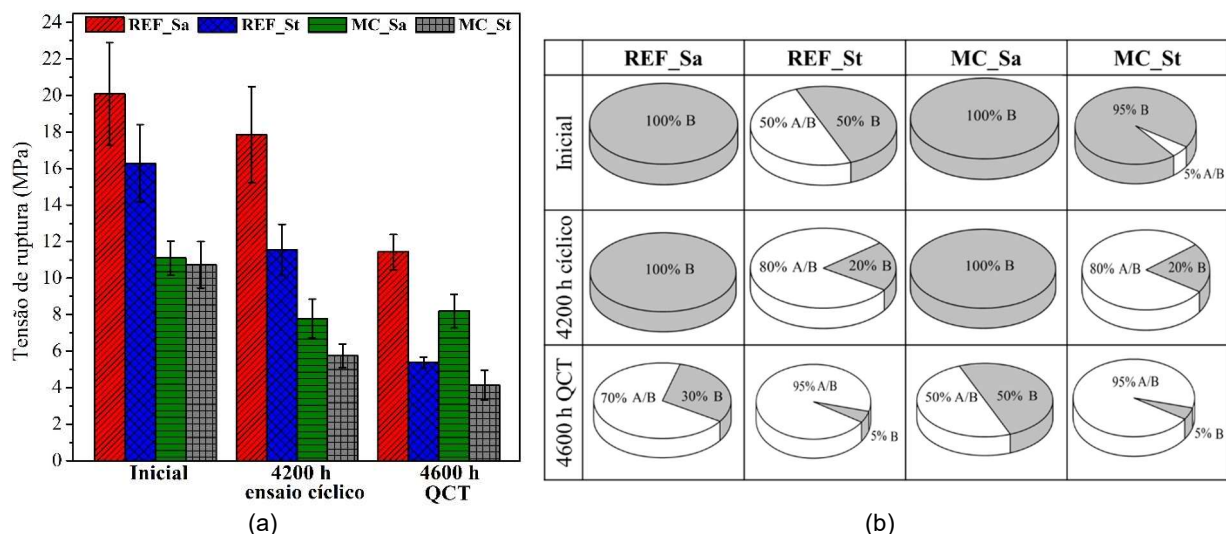


FIGURA 3- Tensões de ruptura médias (a) e natureza de falha predominante (b) para os esquemas de pintura estudados em condições não ensaiadas (inicial), após 4200 h de ensaio cíclico e após 4600 h de câmara de condensação de umidade (QCT).

Todavia, isto não significa que a aderência do revestimento é comprometida pela presença das microcápsulas. A análise da natureza da falha é tão importante quanto, se não mais importante que a avaliação da tensão de ruptura apenas. Em relação à natureza da falha, falhas do tipo A/B (adesiva entre o substrato e a tinta de fundo) são indesejadas, visto que, em uma situação de dano na tinta, há uma maior tendência de o metal ficar completamente desprotegido. Já falhas do tipo B (coesiva na tinta de fundo) são satisfatórias por restar uma camada de tinta após o dano. Com isso em mente, observa-se pelas naturezas de falha iniciais que as microcápsulas não prejudicaram esta propriedade em substratos jateados, preservando uma falha 100% coesiva B nos sistemas REF_Sa e MC_Sa. Já o sistema REF_St apresentou 50% de falha adesiva A/B, falha esta esperada para a condição de tratamento de superfície St3. Já a parcela de falha adesiva no esquema MC_St inicial foi expressivamente reduzida, tendo as microcápsulas papel benéfico nesse sentido, possuindo falha essencialmente coesiva. Após ensaio cíclico de corrosão, os sistemas REF_Sa e MC_Sa preservaram uma falha totalmente coesiva, enquanto a parcela de falha adesiva dos esquemas REF_St e MC_St aumentou. O ensaio em câmara de condensação de umidade foi mais agressivo neste quesito, aumentando em maior proporção a parcela de falha adesiva para os substratos com tratamento St3, e demonstrando falha parcialmente adesiva também nos substratos jateados. Entretanto, a parcela de falha adesiva no sistema MC_Sa foi menor que em REF_Sa após ensaio em câmara de condensação de umidade, demonstrando novamente que a incorporação de microcápsulas pode trazer benefícios à natureza de falha. Em suma, a incorporação das microcápsulas demonstrou papel deletério na tensão de ruptura dos revestimentos; entretanto não prejudicou, ou inclusive possuiu função benéfica, na natureza de falha dos esquemas de pintura.

3.4 Avanço de corrosão após ensaio cíclico

O aspecto visual dos corpos-de-prova com incisão expostos a 11, 18 e 25 ciclos, após remoção de película, está representando na Figura 4.



FIGURA 4 – Aspecto visual após remoção de película dos esquemas REF_Sa, REF_St, MC_Sa e MC_St em diferentes tempos de ensaio cíclico de corrosão.

Observa-se que, em todos os casos, a corrosão se limitou apenas ao redor do risco, preservando o aspecto de metal branco jateado dos sistemas REF_Sa e MC_Sa e o aspecto do tratamento St3 dos esquemas REF_St e MC_St. Isso reforça que, mesmo com as propriedades de barreira da tinta de fundo perturbadas pela presença das microcápsulas, os sistemas de pintura MC demonstram ainda excelentes propriedades anticorrosivas, conforme visto nos ensaios de impedância dos esquemas de pintura. Comparando o avanço de corrosão entre diferentes tratamentos de superfície, observa-se que a extensão da corrosão é muito superior para os revestimentos aplicados sobre substratos St3 do que aqueles aplicados sobre Sa3, reforçando a importância de se realizar um bom tratamento de superfície previamente a aplicação da pintura. Mesmo empregando tintas epóxi mastique que toleram condições de tratamento pobre de superfície, o desempenho do sistema aplicado sobre St3 não se equipara ao esquema com melhor preparo do substrato.

Avaliando a corrosão no entorno do risco dos revestimentos REF_Sa e MC_Sa, observa-se uma diminuição notável no avanço de corrosão ao longo do ensaio cíclico pela presença das microcápsulas. Além de reduzir o avanço de corrosão, fica claro que as microcápsulas uniformizam a corrosão ao longo do risco, enquanto que o sistema REF_Sa apresenta pontos preferenciais para o avanço da corrosão. Isso indica que as microcápsulas sofreram ruptura quando solicitadas mecanicamente no ato do dano mecânico, liberando o óleo encapsulado na região do defeito. O óleo de mamona desidratado, dada suas propriedades secantes, polimerizou ao entrar em contato com o oxigênio do ar atmosférico, formando um filme reticulado na região comprometida que selou e reduziu o avanço de corrosão.

Fazendo a mesma comparação agora para os esquemas REF_St e MC_St, percebe-se que não houve atuação significativa das microcápsulas na diminuição do avanço de corrosão em ensaio cíclico de corrosão no tratamento de superfície St3. A presença do perfil de rugosidade e ausência da camada de óxido em MC_Sa possivelmente promoveu uma ligação mais forte entre o substrato e o filme autorreparador, selando de forma mais eficiente a região danificada. Já para MC_St, o óxido residual pode ter dificultado o contato efetivo entre o filme do óleo e o substrato metálico, fornecendo uma ação protetora mais fraca. Soma-se a isso o tempo de exposição prolongado a um ensaio extremamente agressivo, dificultando a atuação do óleo de mamona desidratado na cicatrização do sistema MC_St. Isto é um indicativo de que um tratamento de superfície precário pode limitar o emprego dos revestimentos autorreparadores em atmosferas extremamente agressivas.

Na Figura 5 consta os resultados da quantificação da área corroída de todas as réplicas ensaiadas com defeito ao longo do ensaio cíclico. Estes resultados confirmam as tendências vistas pela análise visual. Comparando as mesmas tintas em diferentes tratamentos de superfície, o esquema REF_St produziu avanços de corrosão aproximadamente o dobro de REF_Sa; enquanto que o sistema MC_St demonstrou áreas corroídas cerca de três vezes superiores que MC_Sa. Não houve benefício na adição de microcápsulas aos revestimentos aplicados sobre superfícies St3 em ensaio cíclico. Já os revestimentos MC_Sa produziram avanços de corrosão cerca de 30% inferiores ao REF_Sa, representando aumento de vida útil considerável à substratos de aço carbono jateados, mesmo em condições de extrema agressividade.

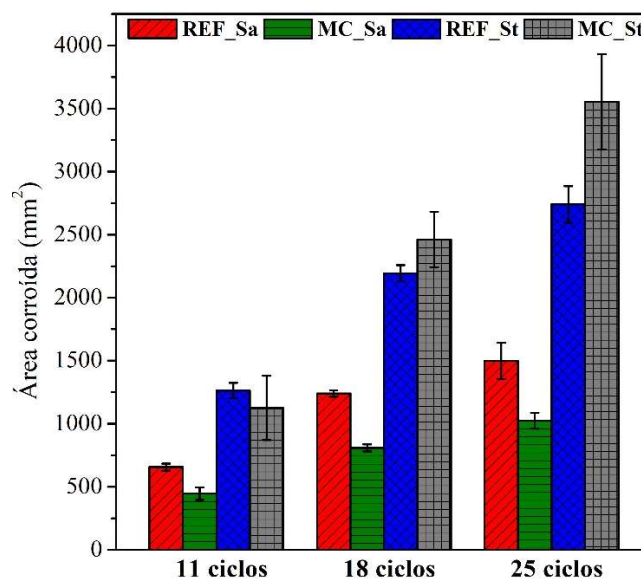


FIGURA 5 – Área corroída no entorno da incisão quantificada pelo software ImageJ após remoção de película dos esquemas REF_Sa, REF_St, MC_Sa e MC_St em diferentes tempos de ensaio cíclico de corrosão.

3.5 Exposição à estação de corrosão atmosférica

O aspecto visual dos corpos-de-prova com incisão expostos durante 8 meses a atmosfera natural acelerada pelo borrifamento de solução salina está representando na Figura 6.

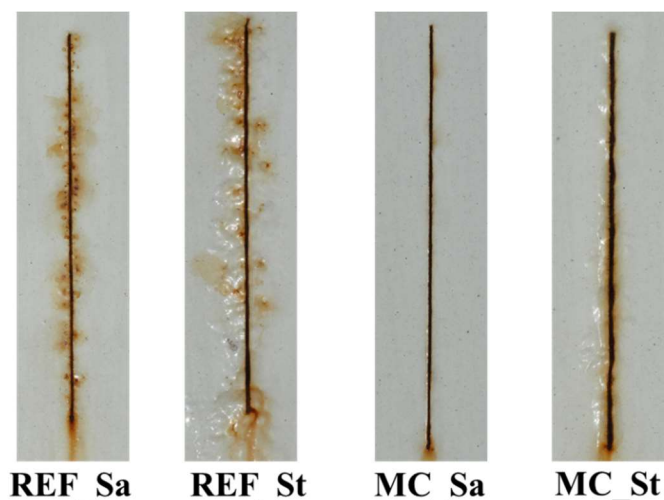


FIGURA 6 – Aspecto visual da corrosão no entorno da incisão dos esquemas REF_Sa, REF_St, MC_Sa e MC_St após 8 meses de exposição à estação de corrosão atmosférica com borrifamento de solução de NaCl 3,5% m/v.

Novamente, o revestimento aplicado sobre o substrato jateado apresentou avanço de corrosão inferior ao tratado com ferramentas mecânicas e manuais. Inclusive, no caso do sistema MC_Sa, não é possível constatar avanço de corrosão até o presente momento, mostrando um processo de oxidação contido apenas na região do risco. Por sua vez, para o sistema MC_St, nota-se indícios do processo de empolamento no entorno do defeito, mas em intensidade muito menor que no corpo de prova sem aditivação, sugerindo avanço de corrosão menor que em REF_St. Isto é um resultado de extrema importância, mostrando que os revestimentos autorreparadores também podem atuar em um tratamento precário de superfície, especialmente em atmosferas menos agressivas. Isso incentiva o uso desta tecnologia não somente em um cenário de pintura nova, como também em um cenário de pintura anticorrosiva de manutenção. Entretanto, assim como a vida útil de revestimentos tradicionais, a durabilidade dos revestimentos autorreparadores, bem como a eficiência de autorreparação, são fortemente influenciadas pela qualidade do tratamento de superfície. Estes resultados preliminares de autorreparação em atmosfera natural acelerada são promissores para o desenvolvimento de tecnologias capazes de estender a vida útil de ativos do setor elétrico em um cenário de pintura de manutenção. Todavia, cabe ressaltar que estes ainda devem ser confirmados após ao menos 2 anos de exposição nestas condições, especialmente levando em consideração que não foi observado

benefício na adição das microcápsulas em revestimentos aplicados sobre substratos St3 após longo período de ensaio cíclico de corrosão.

4.0 - CONCLUSÃO

As microcápsulas poliméricas contendo óleo de mamona desidratado pioraram as propriedades de barreira da tinta de fundo epóxi mastique alumínio. Entretanto, ao empregar um esquema de pintura completo com camada de acabamento altamente impermeável de poliuretano, a função anticorrosiva e de barreira da tinta permanece duradoura. As microcápsulas reduziram a tensão de ruptura das tintas, todavia não prejudicaram, ou inclusive, apresentaram papel benéfico na natureza de falha de aderência dos revestimentos. As microcápsulas reduziram cerca de 30% do avanço de corrosão no entorno da incisão após ensaio cíclico de corrosão dos revestimentos aplicados sobre substratos com grau de limpeza Sa3, em comparação aos revestimentos sem aditivação com mesmo tratamento de superfície. Por outro lado, não houve benefício aparente na adição de microcápsulas aos revestimentos aplicados sobre substratos com grau de limpeza St3 expostos ao ensaio cíclico de corrosão. Os resultados preliminares de exposição por 8 meses em uma atmosfera natural de forma acelerada comprovaram a autorreparação em substratos jateados, demonstrando ainda diminuição notável no avanço de corrosão inclusive em substratos com tratamento precário de superfície. Os resultados obtidos consolidam o uso de revestimentos autorreparadores no setor elétrico em condições de jateamento abrasivo seco, mesmo em atmosferas extremamente agressivas e indicam a possibilidade do uso desta tecnologia em um cenário de pintura de manutenção com tratamento precário em atmosferas com corrosividade moderada. Desta forma, este trabalho gerou subsídios para que empresas do setor elétrico implementem novas tecnologias capazes de aumentar a vida útil da pintura anticorrosiva de ativos metálicos, reduzindo a frequência de manutenções ao longo de sua vida útil.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SÁ, M. M. et al. Avaliação de sistemas de proteção anticorrosiva para manutenção de estruturas enterradas em aço galvanizado. Intercorr 2016, Búzios, 2016.
- (2) AOKI, I. V. Revestimentos inteligentes com propriedades de autorreparação, Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- (3) ATAEI, S.; KHORASANI, S. N.; NEISIANY, R. E. Biofriendly vegetable oil healing agents used for developing self-healing coatings: a review. Progress in Organic Coatings, v. 129, p. 77–95, 2019.
- (4) NESTEROVA, T. et al. Microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings: capsule size, coating formulation, and exposure testing. Progress in Organic Coatings, v. 75, n. 4, p. 309–318, 2012.
- (5) SILVA, I. M. A. et al. Influência dos graus de limpeza de superfície no desempenho anticorrosivo de tinta rica em zinco. Intercorr 2018, São Paulo: 2018.
- (6) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8501-1: preparation of steel substrates before application of paints and related products - visual assessment of surface cleanliness. Geneva, 2007.
- (7) NORMAS ELETROBRAS DE PINTURA ANTICORROSIVA. NE-002: guia prático para serviços de pintura anticorrosiva. Rio de Janeiro, 2018.
- (8) NUNES, F.G. et al. Selection of vegetable drying oils as active agents to produce a self-healing effect in anticorrosive coatings. Intercorr 2021. São Paulo, 2021.
- (9) AOKI, I. V. et al. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. Aditivos para autorregeneração de revestimentos epóxi. WO20140321, 2014.
- (10) INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12944-9: Paints and varnishes - corrosion protection of steel structures by protective paint systems - protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures. Geneva, 2018.
- (11) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1653: Standard test methods for water vapor transmission of organic coating films. West Conshohocken, 2021.
- (12) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM D4541: Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion. West Conshohocken, 2017.
- (13) BENDINELLI, E. V. Aspectos cinéticos e desempenho anticorrosivo de HDL dopado com inibidor de corrosão. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- (14) SØRENSEN, P. A. et al. Anticorrosive coatings: a review. Journal of Coatings Technology and Research, v. 6, p. 135–176, 2009.

DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Química (2019) pela UERJ. Atua na área de corrosão desde 2014, iniciando sua trajetória como bolsista de iniciação científica no Laboratório de Eletroquímica e Corrosão da UERJ. Estagiou no Laboratório de Corrosão (2017-2019) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Atualmente, é bolsista de doutorado do Cepel e aluno de doutorado direto do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da USP, desenvolvendo sua tese no Laboratório de Corrosão do CEPEL, em parceria com o Laboratório de Eletroquímica e Corrosão da USP, no tema revestimentos inteligentes com poder de autorreparação.

(2) ELBER VIDIGAL BENDINELLI

Engenheiro Químico, graduado pela UFRRJ; Engenheiro de Processos CAE pelo PROMINP/UFF; Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ; Doutorando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ; Pesquisador concursado no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Responsável pelo Laboratório de Materiais e Mecânica do Cepel. Áreas de atuação: Atuação direcionada para pesquisa e desenvolvimento de revestimentos anticorrosivos inteligentes, corrosão em solo, técnicas eletroquímicas, ensaios acelerados de corrosão, modelos de vida remanescente. Principais prêmios profissionais: I Olimpíada Eletrobras de Inovação, 2020. V Prêmio CREA-RJ de Trabalhos Científicos e Tecnológicos 2017, CREA; Prêmio INTERCORR 2014, ABRACO;

(3) IDALINA VIEIRA AOKI

Graduada em Química pelo Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP). Mestre e doutora em Engenharia Química. É a responsável pelo LEC – Laboratório de Eletroquímica e Corrosão. Professora Associada do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da USP. Atualmente, é bolsista de pesquisa do CNPq. Sua principal linha de pesquisa é em desenvolvimento de tintas anticorrosivas com poder de autorreparação. Já publicou mais de 85 trabalhos com mais de 1450 citações. Índice h = 24.