

PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS DE AÇO EM ATMOSFERAS INDUSTRIAIS E MARINHAS COM SISTEMA DE TINTA BASE AQUOSA ACRÍLICA

Data de aceite: 01/04/2021

Data de submissão: 03/01/2021

Idalina Vieira Aoki

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo/SP
<http://lattes.cnpq.br/6202929118529990>

Fernando Cotting

Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte/MG
<http://lattes.cnpq.br/3373558974232568>

Paulo Cezar Maziero Tiano

NOVAS TENDÊNCIAS Promoções e treinamento EIRELI
São Paulo/SP
<http://lattes.cnpq.br/4161942203950042>

RESUMO: As resinas acrílicas representam um dos polímeros mais utilizados em revestimentos de proteção de manutenção industrial. Os principais tipos de revestimento que utilizam a tecnologia de acrílico são poliuretanos acrílicos hidroxilados com dois componentes, que são frequentemente baseados em polióis acrílicos com excelente durabilidade exterior e tintas decorativas látex à base de água acrílico, que são frequentemente usadas pela facilidade de aplicação e por serem monocomponente. Esse artigo foca em acrílicos específicos e especiais com polímeros tipo auto-reticulante, em um sistema monocomponente, aplicado direto ao metal, avaliando suas propriedades de proteção

contra a corrosão para estruturas de aço, expostas sob condições atmosféricas agressivas. As avaliações das propriedades anticorrosivas foram realizadas seguindo a norma ISO 12944-6 com resultados de 1440 h em teste de névoa salina neutra (ISO 7253), 720h no teste de câmara úmida (ISO 6270) e 4200h no teste cíclico (névoa salina, UVB e temperatura -18°C) ISO 20340 e seguindo a norma ISO 16773 para a caracterização do comportamento à corrosão com a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica. Os resultados mostraram que com apenas uma única camada da proposta tinta à base de água acrílica DTM funciona como um sistema de pintura recomendado para ser aplicado no substrato de aço, apresentando uma elevada durabilidade em ambientes C4, C5-M e C5-I, o que indica que se pode substituir um sistema composto de primer de epóxi clássico e um acabamento PU com uma menor espessura e apenas 50 g/L de VOC.

PALAVRAS-CHAVE: Tintas à base água, ambientes agressivos C4 e C5, revestimento acrílico.

STEEL STRUCTURES CORROSION PROTECTION IN THE INDUSTRIAL AND MARINE ENVIRONMENT BY WATERBORNE ACRYLICS DTM (DIRECT TO METAL) PAINT SYSTEM

ABSTRACT: Acrylic resins represent one of the most used polymers in industrial maintenance protection coatings. The main types of coatings that use acrylic technology are two-component hydroxylated acrylic polyurethanes, which are often based on acrylic polyols with excellent

exterior durability and decorative acrylic water-based latex paints, which are often used for ease of application and be single component. This article focuses on specific and special acrylics with self-crosslinking polymers in a single component and DTM system and describes their corrosion protection properties for steel structures in aggressive atmospheric conditions. The anti-corrosion properties evaluations were carried out following the ISO 12944-6 standard with results of 1440h in the neutral salt spray test (ISO 7253), 720h in the wet chamber test (ISO 6270) and 4200h in the cyclic test (salt spray, UVB and freezer -18°C) ISO 20340 and following the ISO 16773 standard for the characterization of the corrosion behavior with the electrochemical impedance spectroscopy technique. The results showed that just as a single layer of this proposed ecological DTM acrylic water-based paint works as a paint system recommended to be applied on steel substrate with high durability for C4, C5-M and C5-I equivalent categories atmospheric corrosivity (ISO 12944-2) which indicates that a system consisting of a classic epoxy primer and a PU finish with a lower thickness and only 50 g/L VOC can be replaced.

KEYWORDS: Water-based coatings, aggressive environments C4 and C5, acrylic coating.

1 | INTRODUÇÃO

Os revestimentos à base de resinas acrílicas são uma categoria de produtos que abrange uma ampla variedade de aplicações e requisitos de desempenho. A primeira tinta decorativa tipo látex acrílico foi desenvolvida em 1953. Desde então, os acrílicos têm alcançado uma posição dominante no mercado de revestimentos arquitetônicos, onde eles oferecem benefícios como excelente retenção de brilho, cor e adesão a multi-substratos em revestimentos externos, e boa lavabilidade, resistência ao *blocking* e propriedades de aplicação em bricolagem em revestimentos internos. Algumas pessoas podem se surpreender, pois os acrílicos são utilizados também para manutenção industrial em substratos metálicos, com substratos de concreto cujo desenvolvimento se deu pela primeira vez na década de 1960 (Croll, 2007). Durante os anos 1970, as inovações nos polímeros e formulações de aditivos (por exemplo, pigmentos anticorrosivos) levou a uma melhor compreensão de como os revestimentos de acrílico à base de água podem ser mais bem formulados para evitar a corrosão de metais ferrosos promovendo assim à sua melhoria contínua (Gourke, 1977). Uma maior aceitação na indústria de tintas dos acrílicos à base de água ocorreu na década de 1980, devido à introdução de novos produtos com maior resistência à corrosão, bem como a introdução de acabamentos acrílicos aplicados direto ao metal (DTM), que foram utilizados como camadas de acabamento e anticorrosivas (Flynn, 1989). Grande parte do crescimento das tintas acrílicas à base de água tem sido à custa de sistemas base solvente substituindo tintas alquídicas, proporcionando ao usuário final uma melhora substancial à saúde humana e na segurança do meio ambiente. Hoje, acrílicos são muito utilizados em revestimentos de proteção para estruturas de aço e concreto, normalmente em ambientes de média agressividade. As tintas acrílicas representam de 15 a 20% em volume de revestimentos consumidos pelo setor de manutenção industrial

nos Estados Unidos da América (“Global Paint & Coatings Industry Market Analysis”, 2011) e são usadas em uma variedade de aplicações, tais como acabamento industrial geral do metal, madeira e substratos plásticos, tintas de demarcação viária e revestimentos de impermeabilização (Procopio, 2013).

Fabricantes de tintas e seus fornecedores de matérias-primas têm trabalhado frequentemente no desenvolvimento de tecnologias de revestimentos que oferecem propriedades múltiplas de desempenho que podem parecer ser difícil de realizar em um único revestimento. Atingir estas propriedades contrastantes pode ser ainda mais complicado em um revestimento à base de água em uma tinta mono componente termoplástica tal como um látex acrílico, em que a reticulação polimérica não está disponível para constituir propriedades tais como a resistência química e durabilidade exterior. Novos estudos com polímeros acrílicos e acrilato e derivações com cloreto de vinilideno (Fu *et al.*, 2015) demonstram excelente resistência no salt spray em até 800 horas, mas após esse tempo de envelhecimento a manutenção da aderência no sistema de DTM é muito importante para manter a integridade do metal. A dicotomia entre o baixo teor de compostos orgânicos voláteis (VOC) e boas propriedades de dureza é outro exemplo que está sendo ativamente desenvolvido em ambos os mercados de revestimentos arquitetônicos e industriais e é um alvo particularmente difícil para polímeros acrílico à base de água (Clamen *et al.*, 2011).

Para proteção anticorrosiva em ambientes extremamente agressivos, como sistemas de pintura industriais e marítimos, usam-se primer ricos em zinco, primer epóxi como revestimento intermediário e como proteção de barreira e acabamentos poliuretanos para terminar o sistema, que atualmente é a melhor tecnologia ainda em uso recomendada para aplicações em ambientes muito agressivos (Almeida *et al.*, 2006; Athawale e Nimbalkar, 2011; Murphy, 1995). Revestimentos ecológicos foram testados como tinta à base de água epóxi, tintas com alto teor de sólidos e outros sistemas com os resultados bons para ambientes C4 e C5-M (Almeida *et al.*, 2006).

Assim, este trabalho tem como objetivo estudar novas possibilidades de revestimentos acrílicos à base de água com o conceito DTM, avaliando suas propriedades de proteção contra corrosão.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A tinta foi aplicada com pistola de aplicação por pulverização sobre os corpos de prova de aço carbono jateado. Cada corpo de prova apresentou camada seca homogênea e aparência livre de escorrimentos, sujeiras, crateras, pinholes, empolamentos e over spray. A espessura da película seca foi em torno de 200 μm , medidos de acordo com a norma ISO 2808 (International Organization for Standardization, 2007a) e não excedeu em 20% o valor especificado. As condições de secagem dos corpos de prova pintados foram de quatro semanas em atmosfera natural (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ / (50 ± 5) % de umidade relativa do

ar, conforme definido na norma ISO 554 (International Organization for Standardization, 1976), antes do teste de envelhecimento. Os painéis foram cortados nas dimensões de 150 mm x 70 mm para ensaio UV seguindo a ASTM G154 (American Society for Testing and Materials, 2000) e para outros testes nas dimensões de 150 mm x 100 mm. Sua superfície foi preparada com jateamento abrasivo grau SA 2 ½ conforme definido na ISO 8501-1 (International Organization for Standardization, 1988) até perfil de rugosidade 50 a 70 μm . Foram utilizados três corpos de prova (triplicata) para cada condição de teste.

2.1 Métodos de teste para desempenho em laboratório

A coleção de normas - ISO 12944 - destina-se a dar informações sob proteção de estruturas metálica com pinturas, composta de 8 normas. Elas são escritas para profissionais que têm algum conhecimento técnico. Supõe-se também que o usuário das normas ISO 12944 está familiarizado com outras normas internacionais pertinentes, em particular aquelas que lidam com a preparação da superfície, como também com os regulamentos locais e relevantes. A parte ISO 12944-6 (International Organization for Standardization, 2018) especifica métodos de ensaio de laboratório e condições de ensaio para a avaliação dos sistemas de pintura para a proteção contra a corrosão de estruturas metálicas. Os resultados do teste devem ser considerados como uma ajuda na escolha de sistemas de tintas adequadas e não como informação exata para determinar a durabilidade. Alguns testes da norma ISO 12944-6 não são aplicáveis a muitos sistemas de pintura à base de água. No entanto, alguns sistemas de pintura à base de água são passíveis de teste e de avaliação, usando os procedimentos aqui descritos, e os seus resultados podem ser levados em conta. Para este projeto o objetivo é caracterizar essa tinta DTM acrílicas à base de água para a categoria de corrosividade C4, C5-I e C5-M e faixa de durabilidade alta (HIGH), conforme definido na norma ISO 12944-2 (International Organization for Standardization, 2017a). Os testes e a duração dos ensaios apresentados na Figura 1 são destinados para sistemas de tintas aplicadas em substratos de aço. Para sistemas de tintas destinadas à categoria de corrosividade C5-I da ISO 2812-1 (International Organization for Standardization, 2017b) procedimento pode ser substituída ou completada pela ISO 3231 [29] utilizando a duração do teste, 240 h (10 ciclos) para a durabilidade baixa, 480 h (20 ciclos) para a durabilidade “média” e 720 h (30 ciclos) para alta durabilidade.

Corrosivity category as defined in ISO 12944-2	Durability ranges	ISO 2812-1 ¹⁾ (chemical resistance)	ISO 2812-2 (water immersion)	ISO 6270 (water condensation)	ISO 7253 (neutral salt spray)
		h	h	h	h
C2	Low	—	—	48	—
	Medium	—	—	48	—
	High	—	—	120	—
C3	Low	—	—	48	120
	Medium	—	—	120	240
	High	—	—	240	480
C4	Low	—	—	120	240
	Medium	—	—	240	480
	High	—	—	480	720
C5-I	Low	168	—	240	480
	Medium	168	—	480	720
	High	168	—	720	1 440
C5-M	Low	—	—	240	480
	Medium	—	—	480	720
	High	—	—	720	1 440
Im1	Low	—	—	—	—
	Medium	—	2 000	720	—
	High	—	3 000	1 440	—
Im2	Low	—	—	—	—
	Medium	—	2 000	—	720
	High	—	3 000	—	1 440
Im3	Low	—	—	—	—
	Medium	—	2 000	—	720
	High	—	3 000	—	1 440

1) Use method 1 (see 5.6 for the chemicals used). The purpose of the chemical-resistance test is not the assessment of corrosion protection properties but to assess the ability of a system to withstand highly industrial environments. Thus, the test duration remains the same whatever the durability range is.
For corrosivity category C5-I, the ISO 2812-1 procedure can be replaced or supplemented by the ISO 3231 test (10 cycles, 240 h for "low" durability; 20 cycles, 480 h for "medium" durability; and 30 cycles, 720 h for "high" durability).

Figura 1 Procedimento de teste para tinta aplicadas sobre aço segundo ISO 12944-6 (International Organization for Standardization, 2018)

2.1.1 Avaliações antes do teste de envelhecimento

Antes dos painéis pintados serem colocados nos testes de corrosão acelerada ou envelhecimento, a tinta deve ser caracterizada pela sua aderência ao substrato. Antes do ensaio de envelhecimento, a aderência deve atender o requisito mínimo de $X_1 Y_1$ no ensaio de corte em X em conformidade com a norma ISO 16276-2 (International Organization for Standardization, 2007b), embora a recomendação de espessura seja superior a $250 \mu\text{m}$ para o corte em X, este teste foi usado porque é o mais adequado para a espessura de $200 \mu\text{m}$.

2.1.2 Avaliações depois dos testes de envelhecimento

Para a avaliação de defeitos nos painéis após o envelhecimento artificial, foi utilizada a coleção de normas ISO 4628. As normas ISO 4628 definem um sistema para indicar a quantidade e tamanho de defeitos e a intensidade das mudanças na aparência dos revestimentos e descreve os princípios gerais do sistema utilizado na norma ISO 4628. Esse sistema destina-se a ser utilizado, em particular, para defeitos causados por envelhecimento e às condições atmosféricas, e por mudanças uniformes, tais como mudanças de cor, por exemplo, o amarelecimento. As outras partes da ISO 4628 fornecem padrões de pictogramas ou outros meios para avaliar determinados tipos de defeitos. A Tabela 1 apresenta os requisitos de testes de avaliação após o envelhecimento artificial.

Teste	Tempo de avaliação	Requisitos	Norma	Referência
Adesão corte em X	24 horas depois do teste	X_1, Y_1 mínimo	ISO 16276-2	(International Organization for Standardization, 2007b)
Empolamentos	Avaliação imediatamente após o teste	0 (S0)	ISO 4628-2	(International Organization for Standardization, 2016a)
Corrosão	Avaliação imediatamente após o teste	Ri 0	ISO 4628-3	(International Organization for Standardization, 2016b)
Craqueamento	Avaliação imediatamente após o teste	0 (S0)	ISO 4628-4	(International Organization for Standardization, 2016c)
Esfolheamento	Avaliação imediatamente após o teste	0 (S0)	ISO 4628-5	(International Organization for Standardization, 2016d)
Corrosão ao redor da incisão	Avaliação imediatamente após o teste	1 mm máximo	ISO 4628-8	(International Organization for Standardization, 2012)

Obs.: qualquer defeito dentro de 1 cm das bordas do painel não deve ser considerado como defeito.

Tabela 1 – Avaliação depois dos testes de envelhecimento, normas e requisitos

2.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica - Avaliação da Tinta conforme ISO 16773 (International Organization for Standardization, 2009a)

Medidas eletroquímicas de espectroscopia de impedância eletroquímicas (EIS) foram utilizadas para avaliar o desempenho na proteção contra a corrosão das amostras revestidas com tinta acrílica DTM em solução eletrolítica com NaCl 3,5%. Medições de EIS foram realizadas no potencial de circuito aberto para diferentes tempos de imersão utilizando um analisador de frequência Gamry Referência 600 potenciostato/galvanostato controlado por software Gamry Framework. Foi adotada uma faixa de frequência de 100 kHz a 5 MHz, com um potencial de perturbação de amplitude sinusoidal de 10 mV rms.

2.3 Caracterização da Morfologia

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em um equipamento Philips XL 30 juntamente com um espectrofotômetro EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). As amostras pintadas após 48 h de imersão em 3,5% de NaCl foram analisadas e preparadas previamente com depósito por deposição a arco de carbono para torná-las condutoras e evitar a saturação da imagem. A análise por EDS- espectroscopia de energia dispersiva de raios X foi realizada em algumas regiões particulares.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Testes em câmara de névoa salina segundo a ISO 7253 (International Organization for Standardization, 2001)

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos após 720 horas e 1440 horas de teste. Nestas imagens pode-se ver que o painel branco revestido (à esquerda) e à direita da mesma área sem pintura (ele foi removido após ensaio) que tornam fácil de calcular o avanço de corrosão a partir da incisão. Não é possível observar por inspeção visual depois de 720 e 1440 horas, empolamentos, oxidação, fissuras ou descamação do revestimento. Ao calcular o avanço de corrosão seguindo a norma ISO 4628-8 (International Organization for Standardization, 2012), produtos de corrosão detectados não excedem 1 mm para ambos os lados a partir da incisão. Os resultados mostram que o revestimento é aprovado para categoria C5.

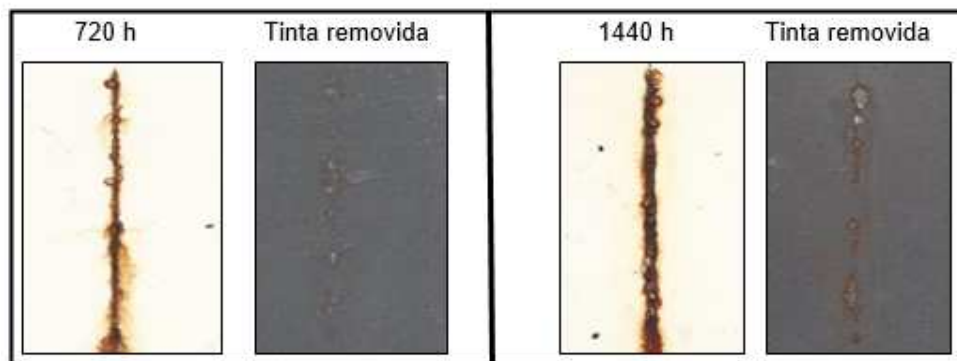


Figura 2 – Aspecto dos painéis depois de 720h e 1440h expostas na câmara de Salt Spray (revestida – à esquerda e revestimento removido - direita)

3.2 Testes em câmara de umidade saturada segundo a ISO 6270 (International Organization for Standardization, 1980)

A Figura 3 representa os resultados obtidos após 480 horas e 720 horas de teste. Nestas imagens podemos ver o painel branco (à esquerda) e à direita da mesma área sem pintura (removida). Não se pode notar por inspeção visual após 480 e 720 horas empolamentos, corrosão, rachaduras ou descamação no revestimento. Os resultados mostram que o revestimento é aprovado para categoria C5.

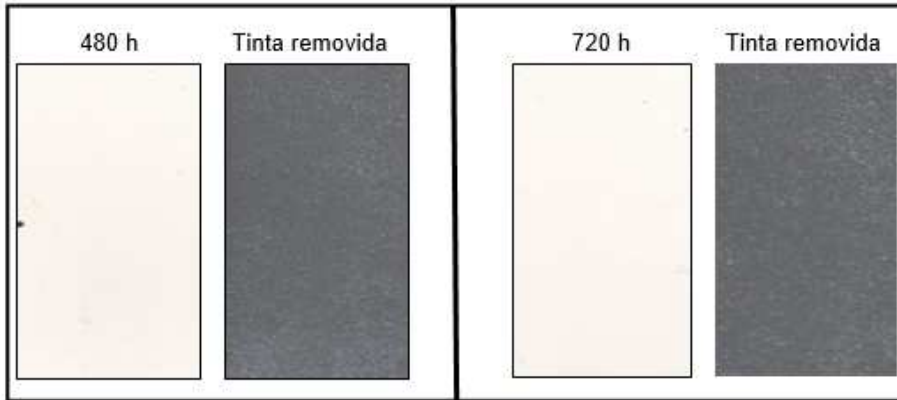


Figura 3 – Aspecto dos painéis depois de 480h e 720h expostas na câmara de umidade saturada (revestida – à esquerda e revestimento removido - direita)

3.3 Imersão para avaliação da Resistência Química conforme a ISO 2812-1 (International Organization for Standardization, 2017b)

Teste de estresse químico para C5-I Categoria empregando solução aquosa NaOH a 10% (m/m) e solução aquosa de H_2SO_4 a 10% (m/m) foram realizados em painéis revestidos. A Figura 4 apresenta os resultados de testes de resistência química em ambas as soluções, alcalina e ácida, após 168 horas de imersão. Nestas imagens o painel branco (à esquerda) e o painel à direita sem pintura (removida) podem ser observados. Por inspeção visual após 168 horas, não é possível observar empolamentos, corrosão, rachaduras ou descamação. Estes testes são importantes para testar metais para as estruturas que vão estar em contacto com agentes químicos.

Os resultados mostram que o revestimento é aprovado para categoria C5-I.

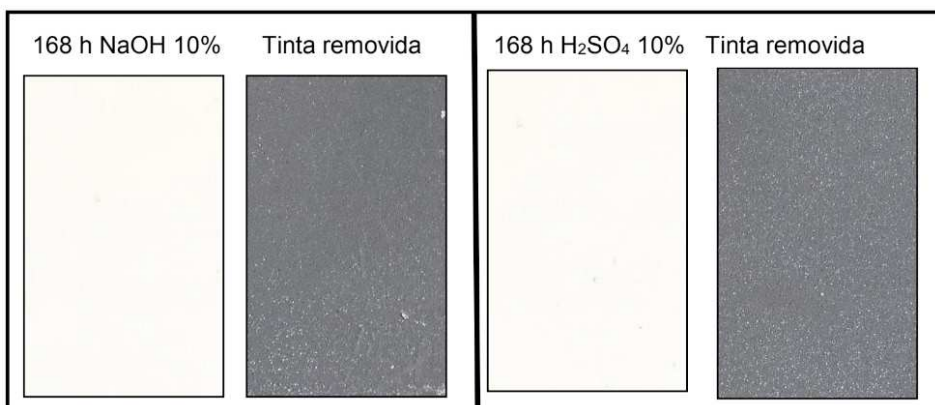


Figura 4 - Aspecto dos painéis após 168h imerso em NaOH 10% e 168h imerso em H_2SO_4 10% (revestida – à esquerda e revestimento removido - direita)

3.4 Estresse químico em atmosfera contendo dióxido de enxofre conforme ISO 3231 (International Organization for Standardization, 1993)

Foi realizado teste de estresse químico para C5-I categoria expondo painéis revestidos numa atmosfera contendo 17.067 ppm de SO_2 . A Figura 5 apresenta os resultados da exposição numa atmosfera contendo 2 L de dióxido de enxofre em um volume total de 300 L, após 240, 480 e 720 horas. Nestas imagens podemos ver o painel branco (à esquerda) e o mesmo à direita, da mesma área sem pintura (removida). Não é possível ver após 240 horas de exposição qualquer formação de empolamentos, corrosão, fissuras ou descamação do revestimento. Depois de 480 e 720 horas se pode ver produtos de corrosão (cor marrom). Os compostos de enxofre foram detectados por EDS na superfície do aço de carbono para os maiores tempos de exposição. Estes testes são importantes porque representam áreas poluídas como nas grandes cidades e complexos industriais e confirmou o bom desempenho do revestimento categoria o merecimento C5-I.

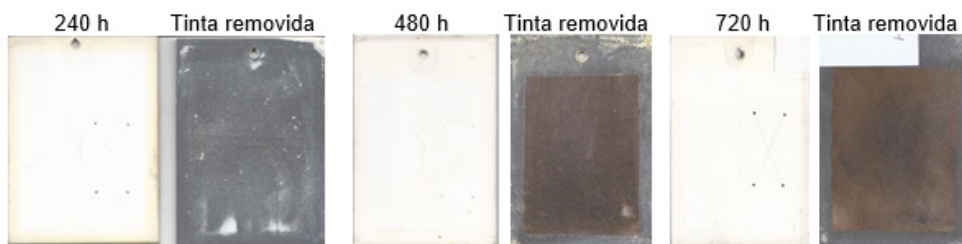


Figura 5 - Aspecto dos painéis depois de 240, 480 and 720 horas expostas na atmosfera com 17067 ppm de dióxido de enxofre (revestida – à esquerda e revestimento removido - direita)

3.5 Teste Adicional de desempenho – Estresse com radiação UV conforme ASTM D 4587-11 (American Society for Testing and Materials, 2019)

Considerou-se necessário para determinar a capacidade do sistema de pintura para fornecer proteção contra a corrosão, submetê-lo a um teste cíclico usando radiação ultravioleta (UV) e condensação. O teste cíclico foi realizado de acordo com a ASTM D 4587-11 (8 horas a radiação UVA a 60°C e 4 horas de condensação a 50°C para pinturas industriais). A Figura 6 apresenta os resultados ao fim de 500, 1000 e 1500 horas de exposição. O painel branco (à esquerda) e a mesma área com pintura removida, na direita, podem ser observados na Figura 6. Em todos os casos, pode-se notar a perda de brilho, mas o filme de tinta não apresentou escamação e manteve a excelente aderência. Sem empolamentos, corrosão e descamação. Apesar deste teste não ser classificado como um método de avaliação de desempenho de corrosão na norma ISO-12944-6 (International Organization for Standardization, 2018), os resultados mostraram uma película de revestimento com boa integridade porque não foi detectado gizamento.



Figura 6 – Aspecto dos painéis depois de 500, 1000 e 1500 horas expostas no teste ciclico de radiação UV (revestida – à esquerda e revestimento removido - direita)

3.6 Teste Adicional de desempenho – Estresse em corrosão severa conforme ISO 20340 (International Organization for Standardization, 2009b)

A tinta acrílica DTM foi testada para condições estressantes de corrosão normalmente empregadas para tintas que são aplicadas em estruturas offshore. Sabe-se que, para estas condições o sistema de tinta necessita utilizar primers com proteção catódica de zinco e a NDFT (espessura nominal de película seca) deve ser maior do que $280 \mu\text{m}$. A pergunta é: “O que acontece com uma tinta DTM acrílica com $200 \mu\text{m}$ em um teste severo de corrosão? Para responder a esta questão, a norma ISO-20340 foi empregada. Em cada ciclo de corrosão severa se expõem os corpos de prova a uma semana inteira (168h) que incluiu 72 horas em Salt spray, 72 horas de UV / condensação (UVA 4h 60°C /4h de condensação 50°C) e 24 horas de exposição em baixa temperatura de -20°C . Depois foram expostos durante 25 ciclos ou 4200h. Na Figura 7, o resultado do teste dos painéis expostos a 25 ciclos nota-se corrosão apenas nas bordas do corpo de prova. Podemos ver alguns empolamentos de tamanho médio perto das bordas. Analisando-se os painéis após remoção da tinta, o ataque de corrosão está próximo do zero na incisão e no resto da superfície do painel também, exceto em áreas próximas às bordas e conclui-se que houve uma boa proteção. O teste de aderência após 4200h mostrou bons resultados acima da tolerância de 5 Mpa.

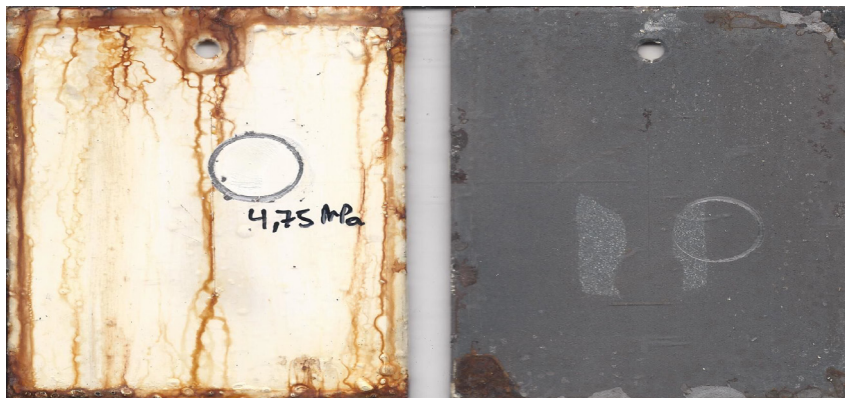


Figura 7 – Aspecto dos painéis depois de 4200h expostos no teste ciclico conforme ISO 20340 (revestida – à esquerda e revestimento removido - direita)

3.7 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica- EIS - avaliação do revestimento seguindo a norma ISO 16773-3 (International Organization for Standardization, 2009a)

A Figura 8 mostra os dados de EIS para amostras revestidas para tempos crescentes de imersão no eletrólito NaCl 3,5% em massa. Os diagramas de Nyquist (Figura 8a) mostram que, após 24 horas de imersão no eletrólito houve uma diminuição notável no módulo de impedância de revestimento, devido, provavelmente, a um estabelecimento de caminhos preferenciais para água e íons em alguns defeitos locais devido à presença de grandes partículas de inibidor de corrosão, apresentados na Figura 9-a. Após 48 h de imersão, o módulo de impedância aumentou novamente e a impedância tem aumentado progressivamente para os tempos de imersão ao longo do tempo, denotando que a tinta torna-se mais resistente, e este fato deve ser atribuído à ocorrência de reações autorreticulação na matriz polimérica. Os dados EIS são de muito boa qualidade, sem ruídos ou oscilações, mesmo em baixas frequências. Depois de 21 dias de imersão, uma das amostras foi retirada do eletrólito e por inspeção visual e por as imagens de microscópio ótico nenhuma corrosão ou formação de empolamento foi observada conforme ISO 4628-2 [24] grau 0S (0).

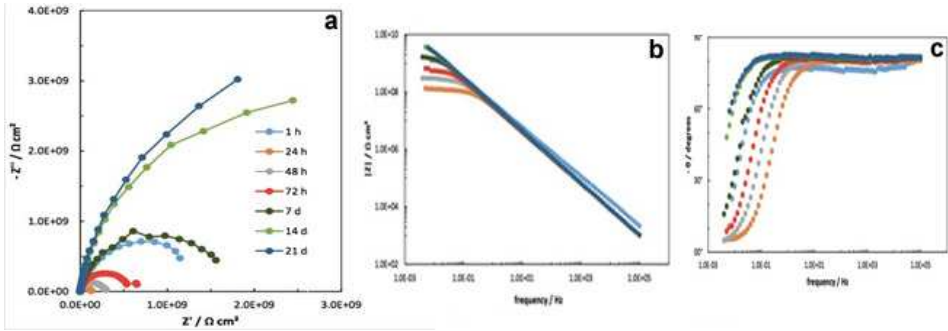


Figura 8 – Nyquist (a) e Bode (b) e Hz vs diagram de ângulo de fase (c) para amostras revestidas com tinta acrílica DTM depois de diferentes tempos de imersão em NaCl 3,5%.

3.8 Imagens com Microscópio Óptico

A Figura 9 apresenta o aspecto da amostra da tinta antes (A) e depois (B) da imersão por 25 dias no eletrólito.

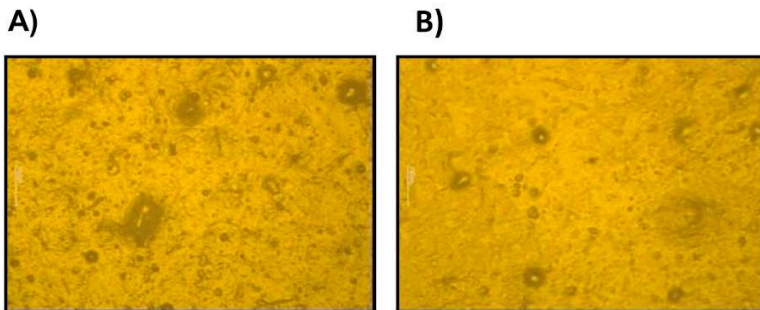


Figura 9 – Imagem da morfologia das superfícies obtida com microscópio óptico dos painéis pintados com a tinta acrílica DTM. (A) painel sem exposição e (B) painel depois de 25 imersos em um eletrólito 3,5% de NaCl.

A superfície antes da imersão apresenta algumas partículas incorporadas na tinta e após imersão parte das partículas parecem ter sido dissolvidas. Não há evidência de ataque para o substrato, depois de 25 dias de imersão em 3,5% de NaCl m/m.

3.9 Testes acelerados de corrosão ou testes cíclicos

Tabela 2 com resultados de aderência, empolamentos, craqueamento e esfoliação depois dos testes de envelhecimento acelerado.

Avaliações	ISO 16276 Aderência Antes	ISO 16276 Aderência Depois	ISO 4628-2 Empolamento	ISO 4628-3 Corrosão	ISO 4628-4 Craqueamento	ISO 4628-5 Esfoliação	ISO 4628-8 Corrosão ao redor da incisão	ASTM D523 Brilho
Testes								
Tolerâncias ISO-12944-6	Min X_1Y_1	Min X_1Y_1	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	Max 1mm	
ISO-7253 - 720h Salt Spray	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	0,5mm	
ISO-7253 - 1440h Salt Spray	X_0Y_0	X_0Y_1	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	0,75mm	
ISO-6270 - 480h Camara Úmida	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	
ISO-6270 - 480h Camara Úmida	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	
ISO-3231 240h SO2 2L	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	0 mm	
ISO-3231 480h SO2 2L	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 5	0(S0)	0(S0)	0 mm	
ISO-3231 720h SO2	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 5	0(S0)	0(S0)	0 mm	
ISO-2812-1 168h H ₂ SO ₄ 10% Imersão	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	
ISO-2812-1 168h NaOH 10% Imersão	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	
ASTM D4587-11 500h UV/Cond Test	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	30i/5f
ASTM D4587-11 1000h UV/Cond Test	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	30i/5f
ASTM D4587-11 1500h UV/Cond Test	X_0Y_0	X_0Y_0	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)	NA	30i/5f
ISO20340 4200h Teste Cíclico		X_0Y_1	2 (S4)	Ri 2	0(S0)	0(S0)	0,25 mm	

Tabela 2 – Resultado de testes

Os resultados da Tabela 2 indicam que a tinta é muito resistente e pode ser especificado para os ambientes C4 e C5 das categorias de agressividade.

4 | CONCLUSÕES

Os resultados do Salt Spray, câmara de umidade e de teste imersões aprovam esta Tinta DTM Acrílica para C4 (alto), C5-M muito alto marinho e C5-I muito alto industrial segundo a ISO-12944-6. No teste com SO₂ conforme ISO 3231 não está aprovada para 480 h e 720h.

No teste cíclico Offshore segundo a ISO 20340 a tinta demonstrou uma proteção muito boa ao metal. Pela técnica de espectroscopia de impedância electroquímica (EIS) a impedância diminuiu após 24 horas de imersão, mas após 48 horas aumentou progressivamente para tempos de imersão mais longos, denotando que a tinta se torna mais resistente com o passar do tempo e esta é uma prova de que as propriedades de autorreticulação funcionam no sistema de formação de película.

Os resultados apontam que esta tinta pode substituir um primer epóxi clássico e um acabamento PU com menor espessura e apenas 50 g/L de VOC.

Os resultados dos tryouts mostram que atende às necessidades de proteção em ambientes agressivos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. *et al.* Anticorrosive painting for a wide spectrum of marine atmospheres: Environmental-friendly versus traditional paint systems. **Progress in Organic Coatings**, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G154 - Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials**, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4587-11 — Fluorescent UV Condensation Exposure of Paint and Related Coatings**, 2019.

ATHAWALE, V. D.; NIMBALKAR, R. V. **Waterborne coatings based on renewable oil resources: An overview**JAOCS, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2011.

CLAMEN, G. *et al.* **Protection of metal with a novel waterborne acrylic/urethane hybrid technology**Progress in Organic Coatings. **Anais...**2011

CROLL, S. **Overview of developments in the paint industry since 1930**Modern Paints Uncovered: Proceedings from the modern paints uncovered symposium. **Anais...**2007

FLYNN, R. W. Improved formulation and performance for water-borne acrylic maintenance coatings. **Journal of Protective Coatings and Linings**, 1989.

FU, C. *et al.* Optimizing heavy-duty anticorrosive performances of coating films formed by acrylate-vinylidene chloride copolymer latexes through twice-painting technique. **Chinese Journal of Polymer Science (English Edition)**, 2015.

Global Paint & Coatings Industry Market Analysis. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, 2011.

GROURKE, M. J. FORMULATION OF EARLY RUST RESISTANT ACRYLIC LATEX MAINTENANCE PAINTS. **Journal of Coatings Technology**, 1977.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 554: Standard atmospheres for conditioning and/or testing — Specifications.**, 1976.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6270: Paints and varnishes – Determination of resistance to humidity (continuous condensation)**., 1980.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **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 (ed steel substrates and of steel substrates after over**, 1988.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3231 - Paints and varnishes Determination of resistance to humid atmospheres containing sulfur dioxide**, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7253: Paints and varnishes – Determination of resistance to neutral salt spray (fog)**, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2808: Paints and varnishes – Determination of film thickness**, 2007a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16276-2: Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Assessment of, and acceptance criteria for, the adhesion/cohesion (fracture strength) of a coating - Part 2: Cross-cut testing and X-cut testing**, 2007b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION . **ISO 16773-3: Paints and varnishes -- Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) on high-impedance coated specimens**, 2009a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 20340: Paints and varnishes -- Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures**, 2009b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-8: Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings – Designation of intensity, quantity and size of common types of defects – Part 8: Assessment of degree of lamination and corrosion around a scribe or artificial defect.**, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-2: Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings – Designation of intensity, quantity and size of common types of defect -- Part 2: Designation of degree of blistering**, 2016a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-3: Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings – Designation of intensity, quantity and size of common types of defects – Part 3: Designation of degree of rusting**, 2016b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-4: Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings – Designation of intensity, quantity and size of common types of defect – Part 4: Designation of degree of cracking.**, 2016c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4628-5: Paints and varnishes – Evaluation of degradation of paint coatings – Designation of intensity, quantity and size of common types of defects – Part 5: Designation of degree of flaking.**, 2016d.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12944-2: Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 2: Classification of environments**, 2017a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2812-1: Paints and varnishes — Determination of resistance to liquids — Part 1: General methods**, 2017b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12944-6, Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems — Part 6: Laboratory performance test methods and associated assessment criteria**, 2018.

MURPHY, M. **Waterborne coatings Metal Finishing**, 1995.

PROCOPIO, L. J. Waterborne acrylics for maintenance and protective coatings: Moving beyond light duty. **Journal of Protective Coatings and Linings**, 2013.