

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E DE PROTEÇÃO À CORROSÃO DO AÇO CARBONO REVESTIDO COM TINTA EM PÓ BASE EPOXI CONTENDO MONTMORILONITA FUNCIONALIZADA COM SILANO

Paula Tibola Bertuoli¹
Veronica Perozzo Frizzo²
Diego Piazza³
Lisete Cristine Scienza⁴
Ademir José Zattera⁵

Resumo

No presente trabalho a argila montmorilonita sódica (MMT-Na⁺) foi funcionalizada com 3-aminopropiltrietóxisilano (γ -APS) e incorporada em uma formulação comercial de tinta em pó base epóxi na proporção de 8% em massa e aplicada em painéis de aço carbono 1008 por pulverização eletrostática. Foram realizados ensaios de aderência, flexibilidade, impacto e desempenho à corrosão em névoa salina. A presença da argila não afetou as propriedades mecânicas do filme, contudo uma maior migração subcutânea foi verificada após a realização do ensaio de névoa salina, o que pode comprometer a utilização das tintas obtidas como revestimento protetor.

Palavras-chave: Propriedade mecânica; Corrosão; Montmorilonita; Tinta em pó.

MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION PROTECTION OF CARBON STEEL COATED WITH AN EPOXY BASED POWDER COATING CONTAINING MONTMORILLONITE FUNCTIONALIZED WITH SILANE

Abstract

In the present work the MMT-Na⁺ clay was functionalized with 3-aminopropyltriethoxysilane (γ -APS) and incorporated in a commercial formulation epoxy-based powder coating in a proportion of 8 wt% and applied on 1008 carbon steel panels by electrostatic spray. Adhesion, flexibility, impact and corrosion performance in salt spray chamber tests were performed to evaluate the coatings. The presence of clay did not affect the mechanical properties of the film, however greater subcutaneous migration was assessed after the completion of salt spray testing, which can compromise the use of paints obtained as primers.

Keywords: Mechanical property; Corrosion; Montmorillonite; Powder coating.

1 INTRODUÇÃO

Revestimentos orgânicos têm sido utilizados como método de proteção à corrosão devido a sua facilidade de aplicação e custos razoáveis [1]. Dentre os revestimentos orgânicos mais utilizados estão os sistemas epóxis, que apresentam propriedades tais como excelente resistência química, boa resistência à corrosão e forte adesão [1,2].

Considerando a grande utilização de revestimentos de tinta em pó com finalidade protetora e estética de materiais metálicos, as necessidades tecnológicas tem-se tornado mais rígidas, exigindo produtos e processos mais

efetivos e menos poluentes. Isto torna a área de tintas em pó, juntamente com a de nanomateriais, um campo propício para o desenvolvimento de um novo segmento: tintas em pó nanoestruturadas.

Argilas, como a montmorilonita (MMT), têm sido utilizadas como cargas para a obtenção de revestimentos nanoestruturados. Esses minerais podem proporcionar melhorias significativas no desempenho à corrosão e propriedades de barreira em revestimentos orgânicos [1-6]. Para Huttunen-Saarivirta et al. [6] as partí-

¹Engenheira Química, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: paulabertuoli@hotmail.com

²Graduanda em Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: veronicaperozzo@gmail.com

³Tecnólogo em Polímeros, Professor, Universidade de Caxias do Sul – UCS, e Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: dpiazza1@ucs.br

⁴Engenheira Química, PhD. Professora, Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: lscienza@gmail.com

⁵Engenheiro Químico, Dr. Professor, Universidade de Caxias do Sul – UCS, Caxias do Sul, RS, Brasil. E-mail: ajzattera@terra.com.br

culas de argila em revestimentos epóxis podem melhorar tanto as propriedades mecânicas e de proteção à corrosão devido à elevada razão de aspecto das nanopartículas e do aumento da integridade do revestimento.

A MMT pertence a família dos filossilicatos 2:1, ou seja, sua estrutura consiste em duas folhas tetraédricas de silicato intercaladas por uma octaédrica de óxido de alumínio. As folhas estão ligadas umas as outras por oxigênios comuns a elas, formando uma lamela. As lamelas são fracamente ligadas entre si possibilitando a penetração de água e outras moléculas polares. A MMT possui um excesso de cargas negativas distribuídas na superfície da lamela que são compensadas pela presença de cátions trocáveis, tais como Na^+ , Ca^{2+} e Li^+ , fixados eletrostaticamente nas galerias da argila [7-9].

Devido a sua capacidade de troca catiônica, argilas naturais, tais como a MMT, podem ser modificadas organicamente a fim de melhorar sua compatibilidade com a matriz polimérica [7,10]. O principal método utilizado na modificação da argila é a troca iônica com sais de amônio, porém a baixa estabilidade térmica destes compostos tem limitado a sua utilização no processamento de nanocompósitos polímero/argila [11]. A fim de contornar este problema estudos têm sido realizados substituindo o processo de troca iônica com sais de amônio por processos de funcionalização com silanos [12-17].

Silanos são compostos químicos à base de silício que atuam como agentes de acoplamento e possuem reatividade orgânica e inorgânica na mesma molécula. A estrutura geral do silano é $(\text{RO})_3\text{SiCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-X}$, onde RO representa um grupo hidrolisável e X um grupo organofuncional não hidrolisável [18,19]. Os silanos assim como os sais de amônio, apresentam eficiência na modificação de cargas orgânicas [10]. Além disso, apresentam maior estabilidade térmica e possuem grupos reativos que proporcionam boa compatibilidade entre a carga e o polímero [19].

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e de proteção à corrosão de um revestimento nanoestruturado base epóxi e MMT funcionalizada com um silano.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a funcionalização da argila foram utilizados a argila montmorilonita sódica Cloisite[®]Na⁺ (Southern Clay Products Inc.), silano 3-aminopropiltriétoxisilano (γ -APS), fornecido pela Aldrich, álcool etílico 95% P.A. (Nuclear) e água destilada.

Para a obtenção da tinta em pó foram utilizados a resina epóxi (Araldite GT7007 ES - Huntsman); agente de cura (Casamid 710 Oiled – Thomas Swan & Co. Ltda.), agente alastrante (Resiflow PV-60 - Estron Chemical Inc.),

benzoína (Datiquim Produtos Químicos Ltda.) e a montmorilonita funcionalizada.

A tinta em pó foi aplicada sobre painéis de aço carbono AISI 1008 com dimensões de 70 mm x 120 mm x 0,75 mm.

2.2 Funcionalização da Argila

A argila Cloisite[®]Na⁺ foi previamente seca em estufa a 60°C por aproximadamente 24 horas. Dez gramas do silano γ -APS foram dispersos em 200 mL de solução hidroalcoólica 75% (v/v) e mantidos em agitação por 10 minutos a 50°C. Em outro recipiente, dez gramas de argila foram dispersos em 300 mL do mesmo solvente e mantidos em agitação até a completa dispersão da argila. A solução contendo silano foi adicionada à suspensão contendo argila e esta foi mantida em agitação magnética por 8 horas a 50°C. A argila foi separada da solução por decantação e o produto foi seco em estufa por 24 horas a 60°C obtendo-se a argila funcionalizada (S-MMT).

2.3 Obtenção do Revestimento

A formulação utilizada na obtenção do revestimento foi a de um verniz comercial em pó base resina epóxi, simbolizada por TE/0/SMMT, e a mesma formulação contendo 8% de S-MMT, simbolizada por TE/8/SMMT.

Inicialmente a argila S-MMT foi seca em estufa a 60°C por 8 horas antes de ser incorporada aos demais componentes da tinta em pó, previamente identificados e pesados. Os materiais foram misturados manualmente e após processados em uma extrusora duplarrosca co-rotante, marca MH Equipamentos Ltda., modelo MH-COR LAB, L/D 32, diâmetro de rosca 20 mm, na velocidade de 200 rpm e temperatura de processamento de 90°C. Após a remoção da extrusora o material foi nivelado manualmente e granulado na forma de *chips*. Os *chips* foram moídos em um moinho de facas e peneirados em peneira 200# (abertura de 75 μm).

2.4 Aplicação e Cura da Tinta em Pó

O revestimento em pó foi aplicado sobre painéis de aço carbono previamente lixados com lixas 320# e 400# e submetidos ao desengraxe alcalino em solução a 50°C por 10 minutos. A aplicação da tinta em pó foi realizada por pulverização eletrostática utilizando uma pistola tipo corona da marca TCA ECO Tecnoadvance modelo 301 em cabine de pintura Master. Os substratos pintados foram colocados em estufa por 10 minutos a 200°C para realizar a cura do revestimento aplicado.

2.5 Caracterização da Tinta em Pó Aplicada Sobre o Aço Carbono

As tintas em pó aplicadas sobre o aço carbono foram caracterizadas pelas técnicas de aderência do revestimento ao substrato metálico utilizando o método

B da norma ASTM D3359 [20]; flexibilidade pelo método do mandril cônico, seguindo a norma ASTM D522 [21], empregando o equipamento Gardner Conical Mandrel da BYK Gardner; resistência ao impacto conforme norma ASTM D2794 [22], utilizando o equipamento Heavy-Duty Impact Tester da BYK Gardner com força de impacto de 50 kg·cm.

O desempenho à corrosão em névoa salina foi baseado na norma ASTM B117 [23], utilizando solução de NaCl 5% (p/v), com pH de 6,5 a 7,2 e temperatura de $35 \pm 2^\circ\text{C}$. As amostras tiveram as bordas e o furo protegidos com cera de abelha e uma incisão em X foi realizada para verificação da migração subcutânea. As amostras foram posicionadas na câmara em um ângulo de entre 15° e 30° em relação à vertical, conforme as recomendações da norma. A migração subcutânea seguiu a norma ASTM D1654 [24], sendo realizada logo após o ensaio de névoa salina. As medidas foram realizadas a partir da incisão até a região onde o revestimento perdeu a aderência (um lado da raspagem) e perpendicular a incisão, sendo consideradas dez medidas ao longo de cada incisão.

3 RESULTADOS

3.1 Aderência

No ensaio de aderência, nenhuma das amostras testadas apresentou qualquer evidência de deslocamento, sendo classificadas como 5B (0% deslocamento) segundo a norma ASTM D3359 [20].

Os resultados apresentados no teste de aderência confirmam a formação de um revestimento com elevada resistência mecânica quando relacionado à aderência. Resultados similares foram observados por Piazza *et al.* [3,25] e Bagherzadeh e Mousavinejad [1] ao avaliar a incorporação da MMT- Na^+ e Cloisite®30B em um revestimento base epóxi. O sistema em estudo apresentou boa aderência mesmo sem aplicar o pré-tratamento de fosfatização, o que é comum para substratos pintados com tinta em pó.

3.2 Impacto

Na Figura 1 é apresentado o aspecto dos filmes de tinta em pó aplicados sobre aço carbono submetidos a uma força de impacto de 50 kg·cm. Os revestimentos não apresentaram deslocamento ou fissuras tanto na avaliação da deformação direta quanto na reversa.

Pela análise visual das amostras observou-se que os revestimentos apresentaram excelente resistência ao impacto. A forte coesão obtida após a cura também é evidenciada, uma vez que não houve a formação de fissuras no revestimento com a adição de 8% de S-MMT. Esse resultado pode estar associado a uma maior interação entre a argila S-MMT com a resina epóxi, proporcionado pela presença do silano, que estaria atuando como um agente de acoplamento entre a matriz polimérica e a argila.

Paiva, Morales e Guimarães [26] relataram que a presença da argila modificada Cloisite® 20A aumentou a resistência ao impacto do polipropileno. Contudo Piazza [25], ao analisar as tintas em pó contendo argila (Cloisite® 30B), verificou que todos os revestimentos contendo argila Cloisite® 30B (2 e 4% em massa) aplicados sobre o aço carbono fosfatizado apresentaram baixa resistência ao impacto. Isto demonstra que a natureza da matriz polimérica tem efeito marcante na compatibilidade com a carga utilizada de forma a comprometer a coesão moléculas e reduzir a resistência à ação de uma carga instantânea (impacto).

3.3 Flexibilidade

Na Figura 2 é apresentado o resultado do ensaio de flexibilidade realizado nos revestimentos base epóxi aplicados no aço carbono.

A análise qualitativa das amostras testadas indicou a inexistência de trincas, fissuras ou deslocamento, corroborando com os resultados de aderência e impacto.

Para Lakshmi, Narmadha e Reddy [27] o aumento da resistência à flexão dos nanocompósitos contendo argila ocorre devido a melhor propriedade interfacial proporcionada pela elevada área superficial das cargas modificadas organicamente, que aumentam a área de contato e interface com a matriz. Isso possibilita o aumento

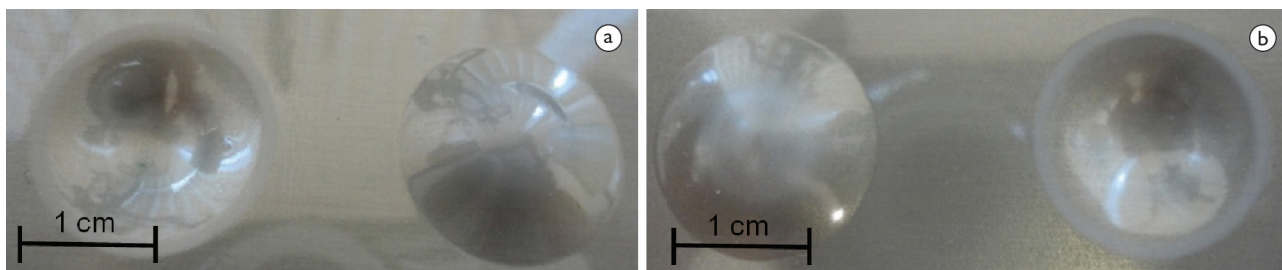


Figura 1. Aspecto das amostras submetidas ao ensaio de impacto: (a) TE/0/SMMT e (b) TE/8/SMMT.

da transferência de tensões entre a nanocarga e a matriz polimérica resultando em melhor resistência mecânica. Além disso, a S-MMT apresenta grupos aminas livres que podem reagir com as moléculas de epóxi. Através desta interação, a argila S-MMT pode ser quimicamente ligada às moléculas do polímero, aumentando as forças de interface entre a S-MMT e a resina epóxi, melhorando as propriedades mecânicas [28,29].

3.4 Névoa Salina

O ensaio de névoa salina foi realizado em triplicata a fim de avaliar o desempenho a corrosão dos revestimentos de tinta em pó base epóxi. Devido à constatação da migração do eletrólito através da região da incisão nos revestimentos contendo argila, o ensaio foi interrompido após 240 horas de exposição à névoa salina. Nas Figuras 3

e 4 é apresentado o aspecto das amostras de TE/0/SMMT e TE/8/SMMT, respectivamente, após 240 horas de exposição à névoa salina.

As amostras apresentaram corrosão vermelha na incisão após 48 horas de exposição à névoa salina e a formação de pontos esverdeados em torno da incisão após 96 horas de exposição. Segundo Gemelli [30] os pontos esverdeados podem ser atribuídos à formação de “ferrugem verde”, que ocorre durante a corrosão atmosférica do aço carbono em presença de sulfatos ou de cloreto. Todos os revestimentos contendo 8% da argila S-MMT apresentaram empolamento após 168 horas de exposição à névoa salina.

Decorridas as 240 horas de exposição à névoa salina, procedendo-se o ensaio de deslocamento da película próxima à incisão, seguindo a norma ASTM D1654 [24]. Na Figura 5 é apresentado o aspecto das amostras após a

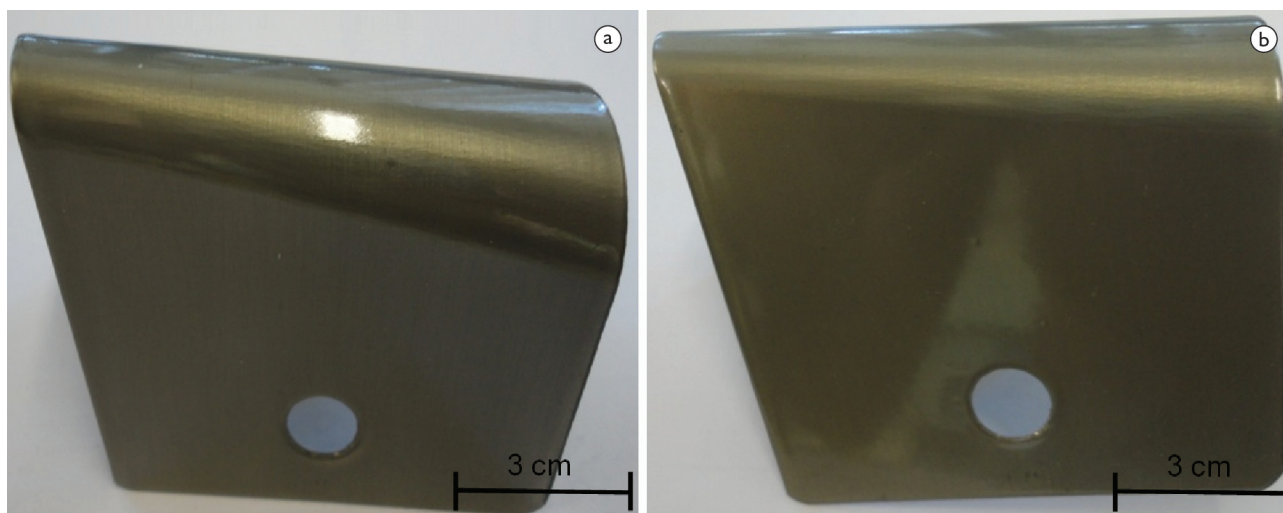


Figura 2. Aspecto das amostras submetidas ao ensaio de flexibilidade: (a) TE/0/SMMT e (b) TE/8/SMMT.

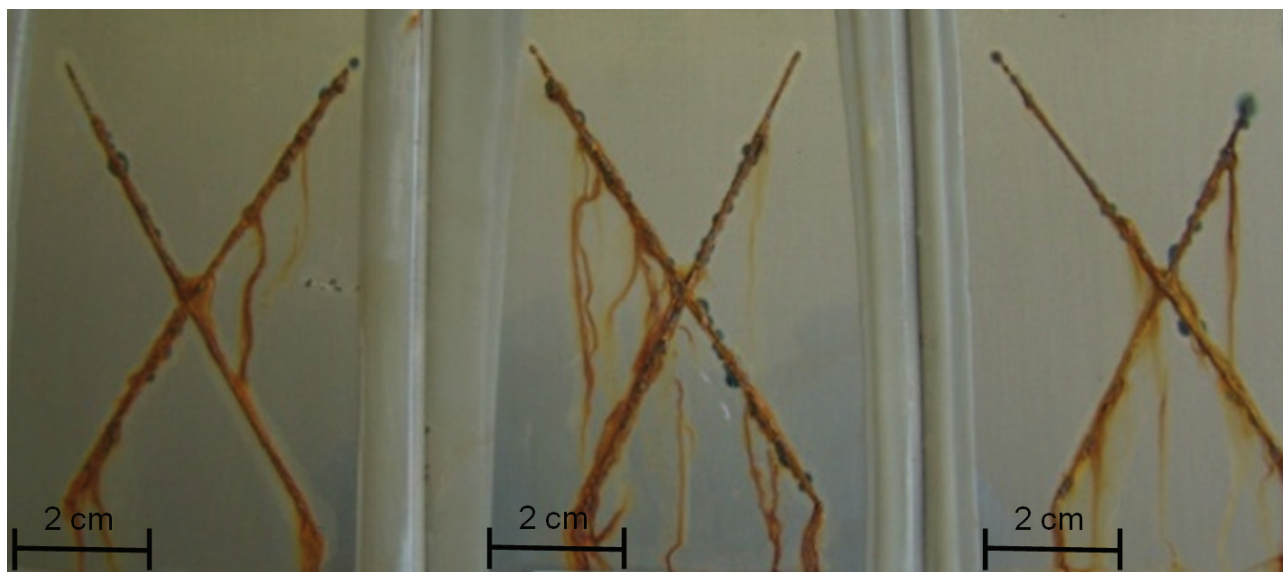


Figura 3. Aspecto das amostras TE/0/SMMT após 240 horas de exposição à névoa salina.



Figura 4. Aspecto das amostras TE/8/SMMT após 240 horas de exposição à névoa salina.

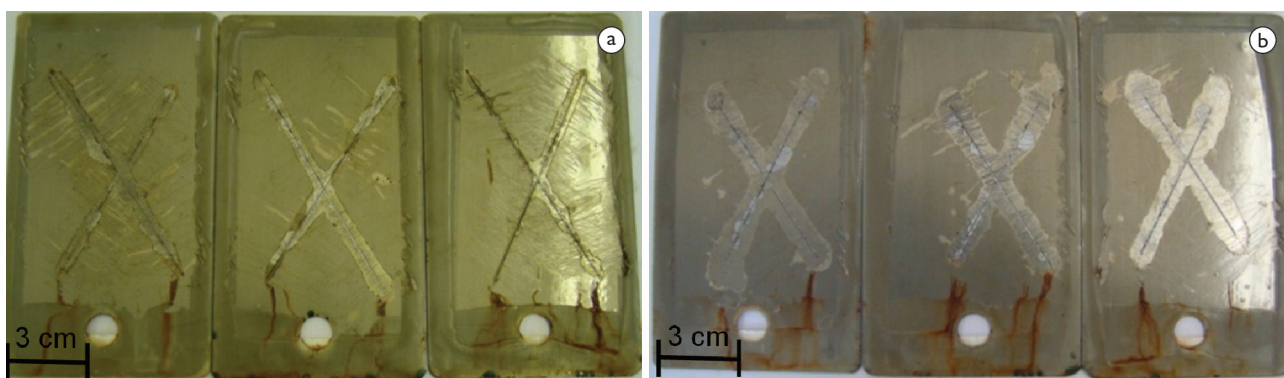


Figura 5. Aspecto das amostras após verificação da migração subcutânea da amostra: (a) TE/0/SMMT e (b) TE/8/SMMT.

Tabela I. Medida do deslocamento após 240 horas de exposição à névoa salina

Amostra	Média do deslocamento (mm)	Deslocamento mínimo (mm)	Deslocamento máximo (mm)
TE/0/SMMT	1,97	0,00	4,14
TE/8/SMMT	4,35	2,68	5,49

realização do deslocamento para verificação da migração subcutânea e na Tabela I são apresentadas as medidas do deslocamento das amostras de tinta em pó após 240 horas de exposição.

Embora tenham sido testados três painéis para cada amostra, o ensaio de névoa salina foi considerado representativo uma vez que apresentou boa reprodutibilidade. O deslocamento observado no revestimento contendo 8% de argila pode ter sido devido à presença da S-MMT que, com a ruptura do filme (incisão), absorve e propaga a umidade embaixo da película de tinta. Isso significa

que, uma vez rompido o revestimento, as nanopartículas de argila presentes atuam como pontos de absorção do eletrólito (propriedades de inchamento), permitindo que o mesmo possa migrar junto à interface com o substrato.

Para Bagherzadeh e Mousavinejad [1] a natureza hidrofílica da argila leva a um aumento na absorção e difusão da água, diminuindo a adesão do revestimento à superfície do metal. Já para Huttunen-Saarivirta *et al.* [6] o desempenho de revestimentos nanoestruturados base epóxi têm como fator crítico a formação de aglomerados de argila que podem comprometer o revestimento.

Assim, apesar de se esperar que a argila melhore as propriedades de barreira e de proteção à corrosão, no presente trabalho não foi verificada a melhora dessas propriedades possivelmente devido à pouca dispersão da argila (formação de aglomerados) e pelo fato de algumas partículas de argila terem interceptado a superfície do revestimento, ocasionando a retenção e absorção da solução.

4 CONCLUSÃO

Os ensaios mecânicos (flexibilidade, impacto e aderência) realizados no substrato pintado apresentaram resultados satisfatórios uma vez que nenhuma das amostras apresentou trincas, deslocamento ou fissuras. Além disso, ficou comprovada que a adição da argila S-MMT, na quantidade de 8% em massa, não prejudicou a coesão da tinta e sua adesão ao substrato.

A adição de 8% de argila S-MMT na tinta em pó base epóxi não conferiu proteção à corrosão ao aço carbono, apresentando desempenho inferior ao da tinta sem carga. Isso ocorreu provavelmente devido a formação de aglomerados de argila que interceptaram a superfície do filme e facilitaram a penetração do eletrólito no revestimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade de Caxias do Sul, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologia (PGEPROTEC) da Universidade de Caxias do Sul, aos órgãos de fomento FAPERGS, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro deste estudo e a empresa Pulverit do Brasil pelo fornecimento do material.

REFERÊNCIAS

- 1 Bagherzadeh MR, Mousavinejad T. Preparation and investigation of anticorrosion properties of the water-based epoxy-clay nanocoating modified by Na⁺-MMT and Cloisite 30B. *Prog Org Coat.* 2012;74:589-595. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2012.02.006>
- 2 Shi X, Nguyen TA, Suo Z, Liu Y, Avci R. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. *Surf Coat Technol.* 2009;204:237-245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.06.048>
- 3 Piazza D, Lorandi NP, Pasqual CI, Scienza LC, Zattera AJ. Influence of a microcomposite and a nanocomposite on the properties of an epoxy-based powder coating. *Mater Sci Eng, A Struct Mater: Prop Microstruct Process.* 2011;528(22-23):6769-6775. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.062>
- 4 Bagherzadeh MR, Mahdavi F. Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anti-corrosive behavior in epoxy coating. *Prog Org Coat.* 2007;60:117-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.07.011>
- 5 Hang TTX, Truc TA, Nam TH, Oanh VK, Jorcin JB, Pébère N. Corrosion protection of carbon steel by an epoxy resin containing organically modified Clay. *Surf Coat Technol.* 2007;201:7408-7415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.02.009>
- 6 Huttunen-Saarivita E, Vaganov GV, Yudin VE, Vuorinen J. Characterization and corrosion protection properties of epoxy powder coatings containing nanoclays. *Prog Org Coat.* 2013;76:757-767. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.01.005>
- 7 Paiva LB, Morales A R, Diaz FRV. Argilas organofílicas: características, metodologias de preparação, compostos de intercalação e técnicas de caracterização. *Cerâmica.* 2008;54:213-226. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132008000200012>
- 8 Alexandre M, Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Mater Sci Eng R, Rep.* 2000;28:1-63. [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00012-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00012-7)
- 9 Paul DR, Robeson LM. Polymer nanotechnology: nanocomposites. *Polymer.* 2008;49:3187-3204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017>
- 10 Lee SM, Tiwari D. Organo and inorgano-organo-modified clays in the remediation of aqueous solutions: an overview. *Appl Clay sci.* 2012;59-60:84-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2012.02.006>
- 11 Xie W, Xie R, Pan WP, Hunter D, Koene B, Tan LS, et al. Thermal stability of quaternary phosphonium modified montmorillonite. *Chem Mater.* 2002;14(11):4837-4845. <http://dx.doi.org/10.1021/cm020705v>
- 12 He H, Duchet J, Galy J, Gerard J-F. Grafting of swelling clay materials with 3-aminopropyltriethoxysilane. *J Colloid Interface Sci.* 2005;288:171-176. PMID:15927576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.02.092>
- 13 Piscitelli F, Posocco P, Toth R, Fermeglia M, Pricl S, Mensitieri G, et al. Sodium montmorillonite silylation: Unexpected effect of the aminosilane chain length. *J Colloid Interface Sci.* 2010;351:108-115. PMID:20719329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2010.07.059>

- 14 Shanmugaraj AM, Rhee KY, Ryu SH. Influence of dispersing medium on grafting of aminopropyltriethoxysilane in swelling clay materials. *J Colloid Interface Sci.* 2006;298: 854-859. PMID:16427648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2005.12.049>
- 15 Shen W, He H, Zhu J, Yuan P, Frost RL. Grafting of montmorillonite with different functional silanes via two different reaction systems. *J Colloid Interface Sci.* 2007;313:268-273. PMID:17512531. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2007.04.029>
- 16 Shen W, He H, Zhu J, Yuan P, Ma Y, Liang X. Preparation and characterization of 3-aminopropyltriethoxysilane grafted montmorillonite and acid-activated montmorillonite. *Chinese Sci Bull.* 2009;54:265-271. <http://dx.doi.org/10.1007/s11434-008-0361-y>
- 17 Bertuoli PT, Piazza D, Scienza LC, Zattera AJ. Preparation and characterization of montmorillonite modified with 3-aminopropyltriethoxysilane. *Appl Clay sci.* 2014;87:46-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.020>
- 18 Demirbas O, Alkan M, Dogan M, Turhan Y, Namli H, Turan T. Electrokinetic and adsorption properties of sepiolite modified by 3-aminopropyltriethoxysilane. *J Hazard Mater.* 2007;149:650-656. PMID:17532563. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.036>
- 19 Xie Y, Hill CAS, Xiao Z, Militz H, Mai C. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: a review. *Compos Part A.* 2010;41:806-819. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- 20 American Society for Testing and Materials. ASTM D 3359: Standard test methods for measuring adhesion by tape test. West Conshohocken: ASTM; 2002.
- 21 American Society for Testing and Materials. ASTM D 522: Standard test methods for mandrel bend test of attached organic coatings. West Conshohocken: ASTM; 2008.
- 22 American Society for Testing and Materials. ASTM D 2794: Standard test methods for resistance of organic coatings to the effects of rapid deformation (impact). West Conshohocken: ASTM; 2004.
- 23 American Society for Testing and Materials. ASTM B 117: Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. West Conshohocken: ASTM; 2011.
- 24 American Society for Testing and Materials. ASTM D 1654: Evaluation of painted or coated specimens subjected to corrosive environments. West Conshohocken: ASTM; 2008.
- 25 Piazza D. Obtenção e caracterização de nanocompósitos de resina epóxi/montmorilonita (MMT) aplicados em tinta em pó [dissertação de mestrado]. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul; 2011.
- 26 Paiva LB, Morales AR, Guimarães TR. Propriedades mecânicas de nanocompósitos de polipropileno e montmorilonita organofílica. *Polímeros.* 2006;16:136-140.
- 27 Lakshmi MS, Narmadha B, Reddy BSR. Enhanced thermal stability and structural characteristics of different MMT-Clay/epoxy-nanocomposite materials. *Polym Degrad Stab.* 2008;93:201-213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.005>
- 28 Choi YY, Lee EH, Ryu SH. Effect of silane functionalization of montmorillonite on epoxy/montmorillonite nanocomposite. *Polym Bull.* 2009;63:47-55. <http://dx.doi.org/10.1007/s00289-009-0068-5>
- 29 Mafi R, Mirabedini SM, Naderi R, Attar MM. Effect of curing characterization on the corrosion performance of polyester and polyester/epoxy powder coatings. *Corros Sci.* 2008;50:3280-3286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2008.08.037>
- 30 Gemelli E. *Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização.* Rio de Janeiro: LTC Editora; 2001.

Recebido em: 16/11/2013

Aceito em: 30/04/2014