

Investigação de proteção contra corrosão em torres eólicas offshore



Parte 3: Resultados das análises laboratoriais

Nota do editor: Este artigo é a terceira parte do relatório dos autores sobre o desempenho do revestimento de teste em torres eólicas offshore. A primeira parte, "Investigação da proteção contra corrosão em torres eólicas offshore", foi publicada em abril de 2008, JPCL (pp. 30-43) e conquistou a maior honraria da SSPC editorial, o Prêmio Outstanding Paper, que foi anunciado na PACE 2009.

A Parte 1 descreveu a lógica por trás do programa de teste dos autores. A Parte 2 "Resultados dos testes locais", que descreveu incrustações nos painéis de aço revestidos no local de teste de campo, bem como o desempenho do revestimento nos painéis, foi publicada em abril de 2009 JPCL (pp. 24-34).

Além de aparecer na edição impressa de JPCL, as partes 1 e 2 também podem ser acessadas nos arquivos JPCL em www.paintsquare.com.

Por Andreas W. Momber, Muehlhan AG, Hamburg, Alemanha;
Peter Plagemann, Volkmar Stenzel, Instituto Fraunhofer de Fabricação e
Pesquisa Aplicada de Materiais, Bremen, Alemanha e Michael Schneider,
Instituto Fraunhofer de Tecnologias e Sistemas de Cerâmica, Dresden, Alemanha

Este artigo é a terceira parte de um relatório sobre um projeto financiado nacionalmente sobre o teste de diferentes sistemas de proteção contra corrosão em torres eólicas offshore conduzidos no local e em laboratório.^{1,2}

A parte 3 lida principalmente com a tensão corrosiva, embora os pesquisadores tenham descoberto que a tensão biológica pode também desempenhar uma função nas condições offshore, conforme descrito na Parte 2 (abril de 2009 JPCL, pp. 24-34).

A tensão corrosiva inclui características como a exposição à água do mar, ciclos de umidade/secura, variações de temperatura, detalhes de construção (juntas, parafusos, soldas) e materiais de construção (combinações de materiais).

A parte 3 do estudo discute os resultados das análises laboratoriais de diversos revestimentos em torres eólicas offshore e os compara com os testes locais dos mesmos sistemas.

Justificativa do teste

A justificativa para o programa de teste baseia-se no seguinte. A localização de estruturas de aço a várias milhas da costa não é uma situação nova. Plataformas de exploração e extração de petróleo e gás operam nessas áreas há décadas. Há, no entanto, diferenças críticas entre plataformas e torres, sendo o mais significativo que as torres de energia eólica offshore são estruturas não tripuladas com acesso altamente restrito. Em plataformas de petróleo e gás, os sistemas de proteção contra a corrosão estão, geralmente, em inspeção permanente, o que não é o caso em torres de energia eólica offshore. Assim, enquanto em



istockphoto.com

plataformas de petróleo e gás as áreas de revestimento deteriorado podem ser reconhecidas e reparadas com relativa facilidade, esses reparos não são viáveis em torres de energia eólica offshore.

Amostras de testes laboratoriais

Foram fabricados três tipos de amostras laboratoriais. O primeiro tipo tratou das amostras para testes de degradação de acordo com a norma ISO 20340, "Requisitos de desempenho para sistemas de pintura de proteção e cenários de teste atuais". As amostras revestidas foram fornecidas com dois escribes artificiais que simulam danos mecânicos localizados. O segundo tipo tratou das amostras para os testes de descolamento catódico. A amostra foi composta por uma seção principal e uma seção superior secundária e menor, enquanto que a parte superior da seção superior permaneceu não revestida. Um furo com uma seção transversal controlada (\varnothing 10 mm) foi perfurado através do revestimento até o aço plano no centro da amostra. A terceira amostra, usada para medições EIS, era uma placa simples revestida de 30 mm x 30 mm. Descrições mais detalhadas das amostras laboratoriais e testes realizados podem ser encontrados na Parte 1 desta série (abril de 2008 JPCL, pp. 30–43).

Resultados dos testes de envelhecimento acelerado

Os revestimentos testados são mostrados no quadro abaixo. Os resultados dos testes de envelhecimento acelerado, de acordo com a norma ISO 20340, estão apresentados na Tabela 1 (p. 40). Os vários sistemas de revestimento responderam diferentemente às tensões aplicadas. Como esperado, o número de ciclos de envelhecimento teve um efeito notável sobre os sistemas de revestimento, embora os efeitos reais dependessem do sistema de revestimento particular. Em termos de desempenho da proteção contra corrosão, a tendência de um revestimento formar bolhas e descamar e, como resultado do processo de corrosão, a ocorrência de produtos de corrosão, como ferrugem branca e vermelha, foram tomadas como referência para o processo de avaliação. O gizamento foi considerado um problema secundário da degradação dos revestimentos de polímeros.

A fila superior de fotografias da Tabela 1 ilustra a aparência das amostras após quatro ciclos de envelhecimento (tempo total de exposição de 1 mês). O sistema 1 exibiu traços notáveis de oxidação vermelha em ambos os escribes. Ocorreu a formação de bolhas, a partir das bordas do escribe horizontal. O gizamento não pôde ser observado devido ao acabamento de PU. O

sistema 2 apresentou ligeiros vestígios de ferrugem vermelha e leve gizamento. No escribe horizontal, os sistemas 3 e 4 mostraram formação notável de ferrugem branca resultante da proteção catódica do aço a partir da camada de metalização. O sistema 4 começou a apresentar gizamento. O sistema 6 não mostrou nenhuma corrosão nos escribes. O sistema 5, o revestimento espesso de uma única camada, não fazia parte dos testes de laboratório.

A inspeção visual dos sistemas de revestimento após 18 ciclos de envelhecimento (tempo total de exposição de 4, 5 meses) apresentou os seguintes resultados. O sistema 1 mostrou delaminação maciça nos escribes e bolhas ao redor dos escribes. A corrosão do substrato foi severa em ambos os escribes.

O sistema 2 exibiu corrosão severa nos escribes, combinada com sinais de ferrugem por baixo do acabamento. O sistema 3 apresentou ferrugem vermelha, uma indicação de que a capacidade de proteção catódica da metalização estava começando a se deteriorar. Fissuras começaram a formar-se nas bordas do escribe horizontal. As fendas foram provavelmente causadas pela expansão do volume de produtos de

corrosão. O sistema 4 ainda mostrou ferrugem branca, evidência de que a proteção catódica da metalização ainda estava ativa. O gizamento foi severo no sistema 4. O sistema 6 exibiu corrosão moderada apenas no escribe horizontal. A segunda linha da tabela 1 ilustra a aparência dos sistemas de revestimento depois de 25 ciclos de envelhecimento (um tempo de exposição total de 6,25 meses). O sistema 1 foi severamente deteriorado. Ele mostrou notável corrosão de substrato

Sistemas de revestimento testados (composição e dft)*

Sistema	Base	2. Camada	3. Camada	4. Camada	DFT total
1	Zn-EP (80 μ m)	EP (300 μ m)	EP (300 μ m)	PUR ¹⁾ (70 μ m)	750
2	Zn-EP (80 μ m)	EP (450 μ m)	EP (450 μ m)	-	980
3	Zn/Al (85/15) ²⁾ (100 μ m)	EP ³⁾ (20 μ m)	EP (450 μ m)	EP (450 μ m)	1,020
4	Zn/Al (85/15) ²⁾ (100 μ m)	EP ³⁾ (20 μ m)	EP ⁴⁾ (450 μ m)	EP ⁴⁾ (450 μ m)	1,020
5	EP ⁵⁾ (1,000 μ m)	-	-	-	1,000
6	Al/Mg (95/05) ²⁾ (350 μ m)	EP ⁶⁾ (40 μ m)	-	-	390

* μ m÷25,4=mils 1) acabamento; 2) metalização; 3) base + massa para enchimento de poros; 4) partícula reforçada; 5) aplicado em uma camada (não fez parte dos testes laboratoriais); 6) (massa para enchimento de poros)

Teste de revestimentos para torres eólicas

em ambos os escribes, ferrugem por debaixo do acabamento, bolhas em torno de ambos os escribes e delaminação parcial do sistema de revestimento. O sistema 2 teve um desempenho apenas um pouco melhor. Ele exibiu corrosão em ambos os escribes, juntamente com a formação de bolhas em torno dos escribes e ferrugem por debaixo do acabamento. O sistema 3 mostrou ferrugem por debaixo do acabamento, com corrosão nos escribes dominada por formação de ferrugem vermelha, indicando que a capacidade de proteção catódica da metalização estava exaurida. As fissuras, provenientes das bordas do escriba horizontal, foram estendidas. O sistema 4 teve bom desempenho. Notou-se apenas ferrugem por baixo do acabamento, a corrosão no escriba foi dominada pela formação de ferrugem branca. O sistema 6 ainda estava em muito bom estado com apenas ligeira formação de corrosão no escriba horizontal.

Os resultados foram interpretados em termos de "efeito anticorrosivo" (AE), como sugerido pela referência 3:

$$AE = \frac{(A+B+2 \cdot C)}{4}$$

Aqui, AE significa efeito anticorrosivo. A é um termo relacionado com o grau de bolhas (de acordo com a designação ASTM), B é um termo relacionado com a delaminação do escriba e C é um termo relacionado com o grau de ferrugem (de acordo com a designação SSPC). Um valor de AE=100 caracteriza melhor desempenho.

Os parâmetros de A a C devem ser avaliados de acordo com um processo de matriz.³

Os valores AE estimados são apresentados na Tabela 1.











Com base no procedimento acima, a classificação dos sistemas após o teste de envelhecimento de acordo com a norma ISO 20340 é a

seguinte (do melhor para o pior): 6, 4, 3, 2, 1. A classificação corresponde muito bem com a classificação obtida a partir dos resultados dos testes locais. Outro resultado que vale a pena ser mencionado é que o dano para o revestimento foi muito mais severo após o procedimento de envelhecimento artificial em comparação com o envelhecimento em condições locais.

Resultados dos testes de compatibilidade catódica

As Figuras 1 e 2 (p. 43) mostram os resultados dos testes de compatibilidade. Os gráficos mostram duas linhas para a maioria dos sistemas porque duas amostras foram investigadas para cada sistema (exceto para o sistema 6). O consumo atual é um critério para avaliar a compatibilidade dos sistemas com proteção catódica. Se ocorrer descolamento catódico e uma parte do substrato de aço for exposto, o consumo de corrente aumenta para tentar proteger o substrato.

Tabela 1: A aparência visual e os valores AE dos Sistemas de revestimento após envelhecimento acelerado segundo a norma ISO 20340

Número de ciclos de envelhecimento	Sistema de revestimento				
	1	2	3	4	6
4 ciclos (1 mês)					
25 ciclos (6,25 meses)					
Valor AE* (após 25 ciclos)	65	82	85	87	100

*See Eq. (1)

Teste de revestimentos para torres eólicas

A Figura 1 mostra os resultados do teste de compatibilidade de acordo com a norma ASTM G8.

(veja as condições de teste na Parte 1 do documento2). Pode ser visto que o consumo de corrente nos sistemas de 1 a 4 se manteve em um nível estável ao longo de todo o período de teste de 30 dias. Não foi observado nenhum deslocamento durante um exame visual após os testes. Assim, esses sistemas eram compatíveis com a proteção catódica.

O sistema 6 consumiu uma grande quantidade de corrente imediatamente depois do início do teste e foi observada a delaminação de revestimento durante a avaliação visual das amostras após o teste. Assumiu-se que a causa para esses fenômenos foi a dissolução de metal em vez do descolamento catódico. O potencial de -1,450 mVSCE, aplicado durante o teste, foi inferior ao potencial da dissolução do metal.

A Figura 2 mostra os resultados dos testes de compatibilidade de acordo com a norma ISO 15711-2.

(veja as condições de teste na Parte 1 do documento2) As diferenças na escala do consumo de corrente (compare com a fig. 1) são devidas ao diferente potencial de polarização aplicado e ao eletrólito. No primeiro período de polarização, a corrente diminuiu devido à precipitação de sais menos solúveis (sais de Mg, Ca) na superfície do metal, como consequência da polarização catódica. Nenhuma delaminação do revestimento foi observada, quer por aumento do consumo de corrente quer através de exame visual após o teste. Assim, todos os sistemas passaram no teste e foram compatíveis com a proteção catódica.

Resultados dos testes de impedância eletroquímica

A partir dos espectros EIS, propriedades ôhmicas e capacitivas do revestimento orgânico podem ser obtidas através da aplicação de circuitos equivalentes ao modelo. (Para uma discussão sobre a interpretação dos espectros EIS de revestimentos orgânicos, ver ref. 4.) A resistência ôhmica de um revestimento sem defeito é interpretada como resistência

Tabela 2: Classificação dos sistemas de revestimento para diferentes condições de teste

Condições de Teste		
Testes locais em Helgoland*	ISO 20304	EIS
Classificação de sistema de revestimento		
-	6	-
3	4	1
4	3	2
2	2	3
1	1	4

*veja ref. 1

de barreira, o que é considerado uma das propriedades de proteção contra corrosão de um revestimento.^{5,8} Os parâmetros para interpretação incluem impedância e ângulo de fase. Como exemplo, estes dois parâmetros são representados graficamente em comparação com a frequência da tensão impressa nas Figs. 3 (p. 44) e 4 (p. 45) para o sistema 4, em termos de um diagrama de Bode. A Figura 3 mostra a impedância comparada com a frequência para diferentes períodos de tempo. A relação quase linear de $t=0$ dias caracteriza um revestimento virgem e intacto. O gráfico não é completamente linear (ver frequências mais baixas), o que indica que a resposta do revestimento não é simplesmente capacitiva. O revestimento provavelmente já tinha absorvido um pouco de água.

Após 7 dias, a forma do gráfico se alteraram, no qual os valores de frequências baixas diminuíram. Esta diminuição aconteceu devido a uma redução na resistência de revestimento, a qual resulta da absorção de água do revestimento. Estes efeitos se tornaram mais fortes com o tempo de imersão prolongado. Esta interpretação é válida para a situação na figura 4, onde o ângulo de fase é comparado com a frequência.

Para uma resposta capacitiva simples, o ângulo de fase deve ser de -90° sobre a faixa de frequência completa para $t=0$ dia. Este não era o caso de frequências mais baixas.

Para os períodos de imersão mais longos, o ângulo de fase já não era constante com a frequência, e o valor foi de -90° apenas em altas frequências. Os diagramas de Bode para os outros sistemas de revestimento mostraram tendências qualitativas iguais. A Figura 5 (p. 46) resume os resultados das medições EIS. No início dos testes, os

revestimentos exibiam uma elevada resistência. Ao longo do tempo, a resistência da barreira dos revestimentos diminuiu, enquanto que o grau de redução dependeu do sistema de revestimento particular.

Depois de certo período de imersão (cerca de 40 dias), os valores de resistência se aproximaram dos níveis de saturação.

A principal causa para a redução dos valores de resistência é a penetração do eletrólito (água), criando um caminho para a superfície do aço subjacente. Os níveis dos valores de saturação (entre 10^9 e $10^{12} \Omega \text{cm}^2$)

ainda ultrapassaram um valor crítico

de $10^7 \Omega \text{cm}^2$, o que é sugerido como limite para um bom desempenho de proteção.⁵ Os diagramas na fig. 5 permitem uma classificação original dos sistemas de revestimento de acordo com a sua resistência final de barreira. A classificação é a seguinte (do melhor para o pior): 1, 2, 3, 4.

Comparação entre os resultados dos testes locais e testes laboratoriais

A relação entre resultados de testes laboratoriais acelerados e as condições reais tem sido um problema em pesquisas de revestimento por décadas. Trabalhos recentes em relação às construções marítimas, respectivamente com construções offshore, incluem uma série de estudos.^{9,12} Mostrou-se, entre outros resultados, que os testes cíclicos são mais preditivos em termos de desempenho do revestimento do que os testes de corrosão não cíclicos tradicionais em certas condições. A umidificação e a secagem cíclicas durante os testes acelerados são particularmente importantes para se obter uma boa correlação com a exposição de campo.⁹ Ciclos térmicos também permitem que as durações de teste sejam reduzidas consideravelmente.⁷

A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes realizados no presente estudo, em termos de classificação do sistema. Os resultados obtidos durante os testes cíclicos acelerados estão de acordo com os dos testes locais em longo prazo para as amostras na zona intermédia (IZ). Os resultados das análises EIS, no entanto, mostram uma tendência oposta. Sistemas de revestimento que tiveram um bom desempenho durante o teste acelerado e o teste local não mostraram bons resultados em termos de resistência (EIS).

Teste de revestimentos para torres eólicas

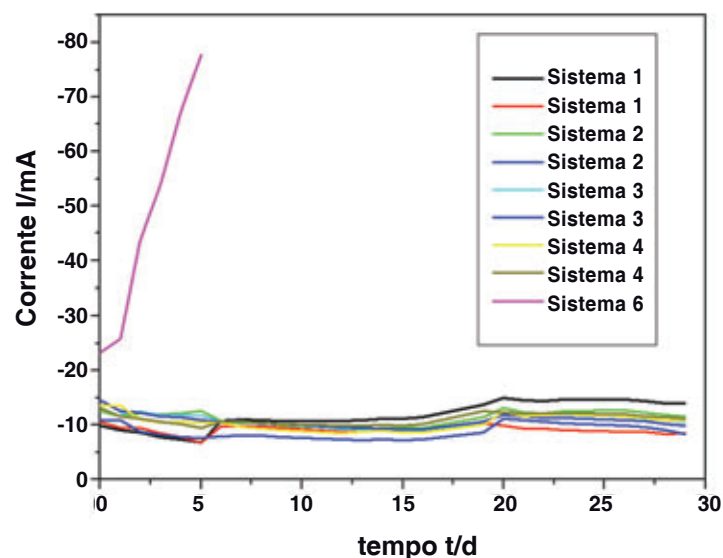


Fig. 1: Consumo de corrente de amostras revestidas e pré-danificadas, estimado de acordo com a norma ASTM G8

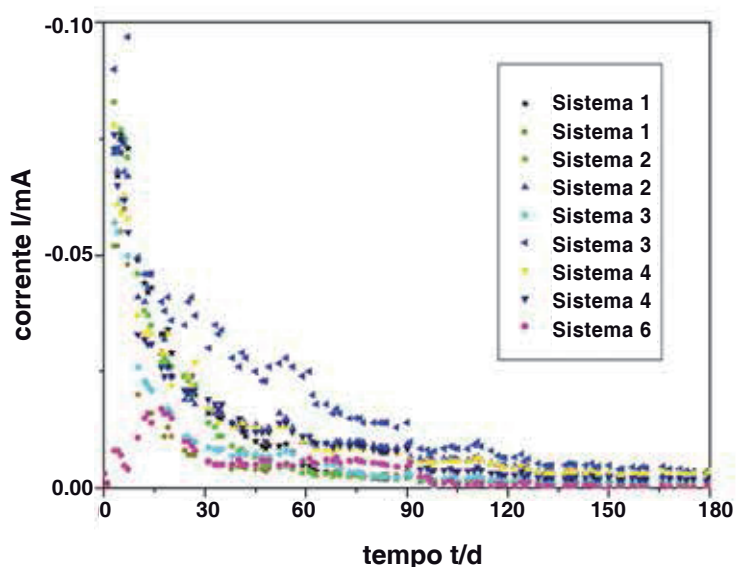


Fig. 2: Consumo de corrente de amostras revestidas e pré-danificadas, estimado de acordo com a norma ISO 15711-2

Este resultado surpreendente é indicativo de que uma boa resistência de barreira, medida em condições climáticas constantes (temperatura estável, composição de eletrólitos estável, ausência de ciclos úmidos/secos), não garante necessariamente um bom desempenho de proteção dos revestimentos em condições de carga cíclica (mudanças na temperatura e na composição de eletrólitos, ciclos úmidos/secos). Uma explicação para este fenômeno pode ser a pigmentação de alguns dos sistemas investigados. Investigações descritas na Ref. 13 sugerem que determinados pigmentos afetam o equilíbrio de água em um revestimento orgânico, especialmente no caso de alterações súbitas nas condições climáticas. Este efeito pode ser provocado por núcleos de condensação formados em partículas de pigmento. Por isso, um bom desempenho de proteção a partir desse sistema em condições cíclicas não seria resultado de uma resistência de barreira superior, mas, sim, devido à fuga de "micropulverização", 13 que é a geração de excesso de cavernas de água no revestimento

Teste de Revestimentos para Torres Eólicas

pela condensação de água molecular dispersada no revestimento devido a alterações na temperatura. Este fenômeno será o tema de futuras análises.

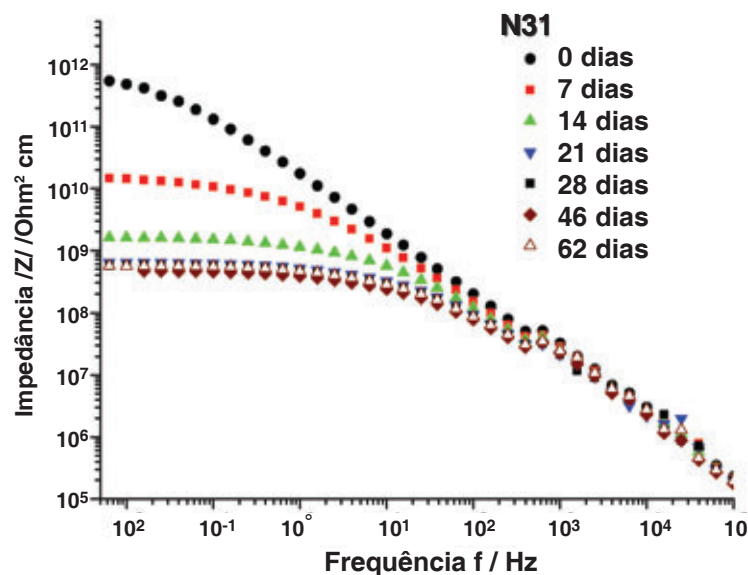


Fig. 3: Diagrama de Bode para o sistema 4. Impedância comparada com a frequência

Sumário

- As torres eólicas offshore são submetidas a forças ambientais complexas. Foi feita uma abordagem para reproduzir as forças através de exames laboratoriais acelerados com condições de tensão definidas e através de testes locais com condições de tensão reais.
- Um sistema de proteção especial precisa ser aprovado em todos os testes de laboratório, em que são estimadas as propriedades individuais, como a durabilidade sob carga ambiental cíclica e a compatibilidade catódica.

Teste de revestimentos para torres eólicas

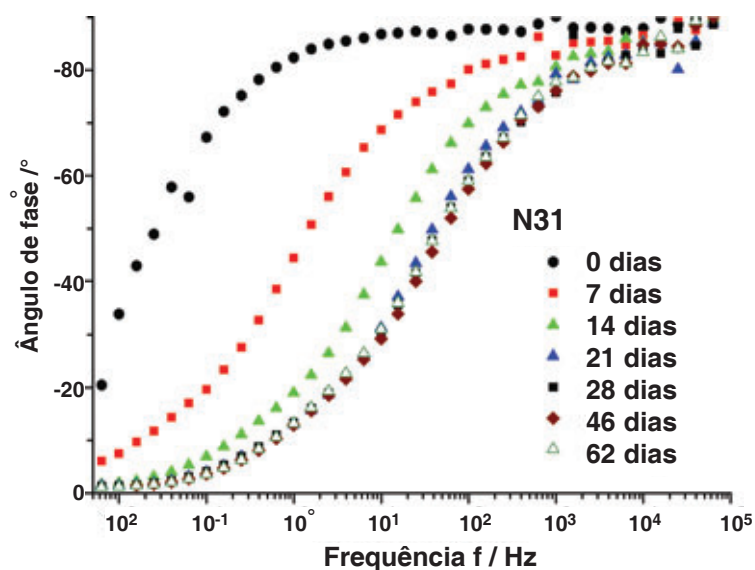


Fig. 4: Diagrama de Bode para o sistema 4. Ângulo de fase comparado com a frequência

Devido ao fato de que cada teste individual permite uma classificação dos sistemas, um "perfil de desempenho de proteção" (PPP) de qualquer sistema de revestimento individual pode ser gerado no final da análise. Com base no PPP, o melhor sistema pode, então, ser selecionado.

- As amostras locais e as outras amostras após os testes de envelhecimento acelerado (ISO 20340) podem ser igualmente classificadas. No entanto, após 25 ciclos de envelhecimento, a deterioração dos revestimentos das amostras de laboratório foi notavelmente mais severa do que as amostras locais.
- EIS é um método promissor para uma avaliação rápida e confiável da resistência de barreira de sistemas de revestimento de proteção. No entanto, a alta resistência da barreira não garante necessariamente um bom desempenho de proteção dos revestimentos em condições cíclicas de carga. O EIS ajuda a compreender os princípios de proteção detalhados de revestimentos e pode, portanto, fornecer informações fundamentais para os procedimentos de otimização do revestimento.
- Os resultados do teste de descolamento catódico como ASTM G8 mostram que os limites existem para uma aceleração artificial de testes de proteção contra corrosão. A aceleração é útil apenas se o processo geral de corrosão não for alterado devido aos efeitos de aceleração.

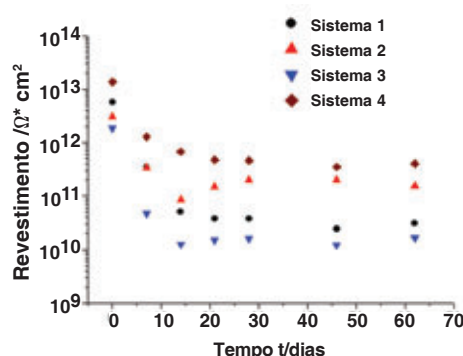


Fig. 5: Desenvolvimento de resistência de barreira, conforme determinado pelo EIS

Agradecimentos

Este projeto de pesquisa foi financiado pelo Estado de Bremen. Os autores agradecem ao Bremer Innovations-Agentur GmbH (BIA) pelo apoio financeiro e administrativo. Agradecimentos também ao Muehlhan Bremen GmbH pela fabricação das amostras.

Referências

1. A.W. Momber, P. Plagemann, V. Stenzel, M. Schneider, "Investigating Corrosion Protection of Offshore Wind Towers. Part 2: Results of the Site Tests," *Journal of Protective Coatings & Linings*, Vol. 26, No. 4 (April 2009), pp. 24–34.
2. A.W. Momber, P. Plagemann, V. Stenzel, M. Schneider, "Investigating Corrosion Protection of Offshore Wind Towers. Part 1: Background and Test Program," *Journal of Protective Coatings & Linings*, Vol. 25, No. 4 (April 2008), pp. 30–43.
3. L. Hochmannova, "Study of anti-corrosion efficiency of various pigments," presentation at the 3rd Ecodock User Group Meeting, Odensee, Denmark, November 1, 2005.
4. D. Loverday, P. Peterson, B. Rodgers, "Evaluation of organic coatings with electrochemical impedance spectroscopy. Part 2: Application of EIS to coatings," *JCT Coatings Tech.*, No. 10, pp. 88–93 (2004).
5. M. O'Donoghue, R. Garrett, V.J. Datta, I. S. Osborne, P. Roberts, "Windmills—Fast Production Scheduled with Novel Zinc Primers and Polyaspartic Topcoats," *PACE* 2005, Las Vegas, NV, January 23–26, 2005, Conference Proceedings, Pittsburgh, PA: SSPC: The Society for Protective Coatings, and St. Louis, MO: Painting and Decorating Contractors of America, 2006.
6. Y. Korobov, D.P. Moore, "Performance testing methods for offshore coatings: cyclic, EIS and stress," *Proceedings, NACE Corrosion* 2004, New Orleans, LA, Paper No. 04005 (2004).
7. S. Touzain, Q. LeThu, G. Bonnet, "Evaluation of thick organic coatings degradation in seawater using cathodic protection and thermally accelerated tests," *Progress in Organic Coatings*, Vol. 52, pp. 311–319 (2005).
8. N. Wilds, "Surface Tolerant coatings for offshore maintenance," *PACE* 2006, Tampa, FL, February January 29–February 1, 2006, Conference Proceedings, Pittsburgh, PA: SSPC: The Society for Protective Coatings, and St. Louis, MO: Painting and Decorating Contractors of America, 2006.
9. O. Knudsen, U. Steinsmo, M. Bjordal, S. Nijjer, "Correlation between Four Accelerated Tests and Five Years of Offshore Field Testing," *Journal of Protective Coatings & Linings*, Vol. 18, No. 12 (December 2001), pp. 52–56.
10. G. Binder, "Examination of laboratory tests for corrosion protection," *Protective Coatings Europe*, Vol. 8, No. 11 (November 2003), pp. 8–16.
11. P. Le Calve, J.M. Lacam, N. LeBolzec, "Evaluating Coating Performance in Severe Marine Environments: Investigating the Test Methods," *Journal of Protective Coatings & Linings*, Vol. 22, No. 7 (July 2005), pp. 29–38.
12. D. Ward, "Correlation of accelerated corrosion testing with natural exposure after 6+ years in a coastal environment," *NACE Corrosion* 2008, New Orleans, LA, Paper

No. 08003 (2008).

13. J. Vogelsang, U. Eschmann, G. Meyer, W. Strunz, "Eisenglimmer in Korrosionsschutzbeschichtungen— neue Erkenntnisse zum Wirkmechanismus," Farbe + Lack, Vol. 104, No. 5, 28–41 (1998).

The authors can be contacted through Dr. Andreas Momber, momber@muehlhan.com.