



Investigação de proteção contra corrosão em torres eólicas offshore

Parte 2: Resultado dos testes locais

Nota do editor: Este artigo é a segunda 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, realizada entre 15 e 18 fevereiro de 2009, em Nova Orleans. (Veja também a história "Prêmios", pp 57-59, desta edição.)

A Parte 1 descreveu a lógica por trás do programa de teste dos autores, bem como a sua configuração. Além de aparecer na edição impressa do JPCL de abril de 2008, a Parte 1 também pode ser acessada na edição online do JPCL de abril de 2008, na seção "Publications" (publicações) da página inicial do JPCL, em www.paintsquare.com. A Parte 3 do relatório será publicada na próxima edição do JPCL.

ste artigo é a segunda parte de um relatório sobre um projeto financiado nacionalmente sobre o teste de diferentes métodos de proteção contra corrosão em torres eólicas offshore conduzidos no local e em laboratório. A Parte 1, publicada no JPCL de abril de 2008, informou sobre a lógica por trás do programa de testes e sua configuração. O presente artigo discute os resultados do teste.

Histórico

Os testes foram realizados para medir o desempenho de revestimentos nas zonas subaquáticas, intermediárias e de respingo. Seis sistemas de revestimento foram testados, embora nem todos os sistemas tenham sido testados nas três zonas. Os revestimentos foram aplicados sobre aço limpo com granalha de aço e de acordo com a norma ISO 8504-2. O aço não revestido, mas com proteção catódica, também foi testado. Os sistemas testados estão listados na caixa localizada na página ao lado.

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

Sistemas de revestimento testados (composição e dtf)*					
Sistema	Base	2. Camada	3. Camada	4. Camada	DFT total
1	Zn-EP (80 µm)	EP (300 µm)	EP (300 µm)	PUR ¹⁾ (70 µm)	750
2	Zn-EP (80 µm)	EP (450 µm)	EP (450 µm)	-	980
3	Zn/Al (85/15) ²⁾ (100 µm)	EP ³⁾ (20 µm)	EP (450 µm)	EP (450 µm)	1,020
4	Zn/Al (85/15) ²⁾ (100 µm)	EP ³⁾ (20 µm)	EP ⁴⁾ (450 µm)	EP ⁴⁾ (450 µm)	1,020
5	EP ⁵⁾ (1,000 µm)	-	-	-	1,000
6	Al/Mg (95/05) ²⁾ (350 µm)	EP ⁶⁾ (40 µm)	-	-	390

*µm÷25.4=mils ¹⁾ acabamento; ²⁾ metalização; ³⁾ base + massa para enchimento de poros; ⁴⁾ partícula reforçada; ⁵⁾ aplicado em uma camada; ⁶⁾ (massa para enchimento de poros)

Incrustações e crescimento biológico

As incrustações em estruturas offshore são um fenômeno bem conhecido. No setor de extração de gás e petróleo offshore, vários estudos foram realizados.^{1, 2, 3} Alguns estudos sobre a incrustação em torres de energia eólica offshore também foram relatados.^{4, 5, 6}

O tipo e a quantidade de espécies incrustantes dependerão de certas condições ambientais, ou seja, da temperatura, da composição e da cinemática da água. A concentração de nutrientes, em particular, é afetada pela estação do ano.



Fig. 1: Incrustação em zona subaquática (UZ) espécimen
 Fotos e figuras cortesia dos autores

Portanto, os resultados da avaliação das incrustações podem, até certo ponto, depender da estação do ano.

As amostras do estudo foram

divulgadas no verão (julho).

Algumas condições ambientais aplicáveis ao local de teste estão listadas na tabela 1.

As incrustações podem afetar a corrosão

Tabela 1: específico do local
Condições ambientais (Ref. 3)

Parâmetro	Faixa
Salinidade	29 – 33 PSU
Turbidez	Low – moderate
Luz (PAR)	100 – 2,000 mol/m ² s
Exposição a ondas	Exposto
Velocidade do fluxo	0,3 – 1,5m/s
Specific wave Height	0,5 – 4m
Temperatura	2 – 20 C



Fig. 2: Grande caranguejo, domiciliado na zona subaquática (UZ).

Tabela 2: Aparência das amostras subaquáticas (UZ) em várias condições

Condição	Sistema				
	3 (+ 5) ¹⁾	4 (+ 5) ¹⁾	1 (+ 5) ¹⁾	2 (+ 5) ¹⁾	6
Após 5 meses (incrustação total)					
Após 13 meses (incrustação total)					
Após 36 meses (incrustação total)					
Após 36 meses (primeira limpeza)					
Após 36 meses (limpeza final par avaliação)					

¹⁾ A seção inferior da amostra é o sistema 5 (vermelho, respectivamente cinza)

do aço de várias maneiras: criação de áreas de água retida; células de concentração de oxigênio; locais para bactérias aeróbias; remoção de metal⁷. Não está claro, no entanto, se as incrustações e o crescimento marinho podem afetar o desempenho dos revestimentos de proteção.

Incrustações na zona subaquática (UZ)

Todas as amostras da zona subaquática foram fortemente incrustadas (como mostrado nas três linhas acima da tabela 2). Entre as espécies encontradas nas amostras de teste estavam algas marrons (Laminaria) com grandes folhas marrons de até 2 metros de comprimento. Elas apareceram predominantemente na região superior da zona subaquática. Mais adiante, as algas verdes (Ulva) foram encontradas, assim como pelo menos três espécies de algas vermelhas, que não foram classificadas (Fig. 1). Além disso, foram identificados os seguintes tipos de espécies: esponjas, mexilhões (mexilhão comum, mexilhão do tipo ostra), anêmonas, briozoários (muito presente estava a espécie Bugula neritina) e abetos do mar. Um tipo especial de craca (Balanus crenatus) foi encontrado somente na zona subaquática. Esta espécie apresenta uma placa basal de calcário, que não pode ser desalojada por completo, mesmo quando as cracas foram removidas dos espécimes (tabela 2). Esta espécie foi relatada como provável de ocorrer na zona subaquática de torres eólicas no mar do norte.⁴ Espécies móveis também foram detectadas, entre as quais vermes, alguns caranguejos (Fig. 2), e um peixe pequeno (até 20 cm de comprimento). As numerosas espécies de caranguejos e peixes em seções de torres eólicas submersas no mar do norte também foram relatadas.⁶ Algas não foram detectadas no lado de trás das placas de amostra por causa da falta de luz solar naquela área.

Incrustações na zona intermediária (IZ)

Todas as amostras da zona intermediária foram fortemente incrustadas (veja as duas linhas superiores da tabela 3). Entre as espécies detectadas estão as algas verdes (Enteromorpha) e algas marrons (entre outras, Ventricaria ventricosa). Algas não foram detectadas no lado de trás das placas de amostra por causa da falta de luz solar naquela área. Duas espécies de cracas

Tabela 3: Aparência das amostras nas zonas intermediárias (IZ) em várias condições

Condição	3		4		1		2	
	3a	3b	4a	4b	1a	1b	2a	2b
Após 5 meses (área frontal com incrustação total)								
Após 36 meses (área frontal com incrustação total)								
Após 36 meses (área frontal, algas removidas)								
Após 36 meses (parte traseira)								
Após 36 meses (área frontal, limpeza para avaliação)								

res incrustações, ao passo que a amostra 1b foi tão fortemente contaminada quanto os sistemas com o acabamento à base de EP. Notou-se, no entanto, que as áreas traseiras dos painéis foram muito menos incrustadas em comparação com as dianteiras. Basicamente, apenas cracas depositadas nas áreas traseiras (linha 4, Tabela 3), provavelmente devido à ausência de luz UV.

Desempenho do revestimento na zona subaquática

Desempenho após 5 e 13 meses

As amostras foram avaliadas após 5 meses e após 13 meses. Os resultados dessas avaliações foram relatados em outros lugares.^{8,9}

Os resultados obtidos após 13 meses são brevemente recapitulados neste documento. Um evento bastante inesperado foi a pesada incrustação nas amostras subaquáticas (duas linhas superiores, Tabela 2). A incrustação consistiu em pequenas cracas e um biofilme escuro (algas, esponjas). A gravidade da incrustação diferia notavelmente. A amostra com o Sistema 6 mostrou a fixação mais severa, foi quase completamente coberta por cracas. O sistema 5 exibiu a cobertura menos severa de cracas, mas foi coberto extensivamente por biofilmes. O desempenho do revestimento não pode ser avaliado em detalhes. Em algumas pequenas áreas, a incrustação foi cuidadosamente removida e os revestimentos foram inspecionados visualmente. Não foram detectados sinais de deterioração.

Desempenho após 36 meses

As amostras foram limpas mecanicamente com um raspador de madeira e, posteriormente, com lavagem com água a alta pressão para avaliar visualmente as condições dos revestimentos (Tabela 2).

O Sistema 3 mostrou ligeira delaminação na frente após a limpeza, talvez devido a danos mecânicos e deterioração posterior. A interface aço/base de revestimento exibiu delaminação inicial. O Sistema 4 não mostram nenhum dano à superfície. Foi notada ligeira delaminação inicial na interface aço/base de revestimento.



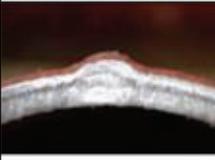
Fig. 3: Delaminação de revestimento no Sistema 5 após 36 meses de exposição UZ.

também cresceram intensamente sobre as amostras (linha 3, tabela 3). Uma espécie foi o *Elminius modestus* (pequena espécie), que é conhecida por se prender a estruturas artificiais. Esta espécie foi relatada como provável de ocorrer na zona interme-

diária de torres eólicas no mar do norte.⁴

A outra espécie foi a *Semi Balanus* (maior, bem fixada). Esta espécie é conhecida por ser muito bem alinhada com as marés, mas não consegue sobreviver em condições permanentemente submersas. Em contraste com as cracas encontradas na zona subaquática, esta espécie apresenta uma placa basal membranosa. Algumas espécies móveis (vermes, caranguejos) também foram encontradas. Não houve relação entre a incrustação e o tipo de pintura genérico. Para o Sistema 1, o qual tem um acabamento de PU, a amostra 1a apresentou as meno-

Tabela 4: Avaliação de ligação entre o aço (cordão de solda) e os sistemas de revestimento aplicado, Com base nas seções cruzadas polidas

Sistema	Imagem	Observações
1	Nenhuma imagem disponível	Excelente vínculo ao longo de toda a extensão.
2		Excelente vínculo ao longo de toda a extensão. Redução de DFT na seção de solda direita.
3		Excelente vínculo ao longo de toda a extensão.
4		Excelente vínculo ao longo de toda a extensão. Redução de DFT na seção de solda direita.
5		Excelente vínculo ao longo de toda a extensão. Revestimento parcialmente quebrado devido a corte.
6		O revestimento falhou.

Os sistemas 1 e 2 desenvolveram o mesmo que o sistema 4.

O sistema 6 exibiu bolhas em grande escala e severa delaminação do revestimento.

Esta amostra não pôde ser devidamente limpo, porque a lavagem de alta pressão teria removido o revestimento deteriorado. A amostra apresentou produtos de corrosão brancos, que foram identificados como o produto de corrosão da metalização.

O sistema completo pôde ser removido raspando-o um pouco com a unha (Fig. 3). Devido ao fato de que a metalização com selantes adequados (pelo menos metalização por Al/Zn) é geralmente um método eficaz e comprovado para proteger estruturas de aço offshore, 10, 11, 12, o resultado foi surpreendente. Nenhuma explicação conclusiva pôde ser entregue no momento, e esta

Tabela 5: Esquema de avaliação da zona subaquática (UZ) Amostras após 36 meses de exposição

Avaliação							Observações ¹⁾
Sistema	Revestimento geral (bolhas, defeitos)	Revestimento em cordão de solda ¹⁾	Delaminação aço/base	Delaminação base/acabamento	Adesão (teste de resistência) ²⁾		
1a	+++	+++	++	+++	4,18 MPa B/C 70% C 30%	Interface aço/base: delaminação muito preliminar Transição para o revestimento único: Sem delaminação Sem dano na superfície	
2b	+++	+++	++	+++	7,41 MPa A/B 100%	Interface aço/base: leve delaminação inicial Transição para o revestimento único: Sem delaminação Sem dano na superfície	
3a	+++	+++	++	+++	6,31 MPa A/B 70% B 30%	IA laminação na superfície da frente, após a limpeza (talvez devido a danos mecânicos com posterior corrosão e delaminação) Interface aço/base: delaminação inicial Transição para o revestimento único: Sem delaminação	
4b	+++	+++	++	+++	9,41 MPa A/B 80% Y/Z 20%	Interface aço/base: Sem delaminação Transição para o revestimento único: Sem delaminação Sem dano na superfície	
5	+++	+++	++	Não se aplica	Não medido	Interface aço/revestimento: leve delaminação inicial Sem dano na superfície	
6	-	-	-	-	Não medido	A avaliação foi realizada somente em pontos fixos Bolhas em grande escala e delaminação do revestimento ³⁾	

Condições: - ruim; + aceitável, ++ bom; +++ muito bom¹⁾ Ver Tabela 4²⁾ Média das três medições (ISO 4624);³⁾ Ver Fig. 3

questão será o tema de um estudo posterior. Não está claro se os efeitos incrustantes contribuíram para esse fracasso.

A compatibilidade deste sistema de revestimento com a proteção catódica em condições de laboratório foi boa.

As amostras da zona subaquática foram cortadas em dois pedaços e as seções transversais dos cortes foram inspecionadas em termos de revestimento.

Exemplos de cortes transversais são mostrados na Tabela 4. Mesmo no intervalo crítico sobre o cordão de solda, mostrado nas imagens da Tabela 4, a maior parte dos revestimentos mostrou adesão boa e firme ao substrato de aço. A exceção foi o sistema 6, que fracassou totalmente.

A tabela 5 relaciona os resultados de testes de resistência.

Os valores de resistência ficaram entre 4,18 MPa e 9,41 MPa. Com exceção do sistema 1, os valores ainda estão muito acima do valor de 6,0 MPa, o que é recomendado na ISO 20340 para revestimentos recém-aplicados para serviço de imersão. 13 Por outro lado,

apenas o sistema 1 apresentou fraturas apenas no sistema de revestimento, e não na interface aço/base de revestimento.

As áreas internas, originalmente preenchidas com água do mar, também foram inspecionadas.

Elas mostraram sinais de oxidação, mas, em geral, a corrosão não era severa, e corrosão por pites não foi detectada. Os sinais de oxidação mais severos foram reconhecidos ao longo de uma faixa que corria exatamente ao longo do cordão de solda (veja a imagem do sistema 4, tabela 4). Esta característica foi interessante porque o cordão de solda foi ligado somente à superfície externa.

Alterações metalúrgicas do aço, provenientes do processo de solda, podem ter causado o fenômeno.

Os resultados do procedimento de avaliação são apresentados na tabela 5, que mostra que eles não permitiram uma classificação confiável dos sistemas em termos de desempenho do revestimento (exceto para o sistema 6).

Tabela 6: Esquema de avaliação da zona intermediária (IZ) Amostras após 36 meses de exposição

Avaliação					
Sistema	Revestimento geral	Escreba: corrosão ¹⁾	Escreba: delaminação ¹⁾	Adesão (teste de resistência) ²⁾	Observações ¹⁾
1a	++	-	-	9.78 MPa B/C, C, C/Y	Nem delaminação nem bolhas na área. Corrosão notável e delaminação no escriba e bolhas (até 10 mm de distância do escriba).
1b	++	+	+	6.70 MPa A/B 20% B 80%	Nem delaminação nem bolhas na área. Corrosão notável e delaminação (ca. 1mm) no escriba.
2a	++	+	+	11.9 MPa B 30% C/Y 70%	Nem delaminação nem bolhas na área. Corrosão limitada e delaminação (ca. 2mm) no escriba.
2b	++	+	+	Não medido	Nem delaminação nem bolhas na área. Corrosão limitada e delaminação notável (ca. 3mm) no escriba.
3a	++	+++	+++	8.99 MPa B 80% B/Y 20%	Nem delaminação nem bolhas.
3b	++	+++	+++	11.6 MPa B 10% B/Y 90%	Nem delaminação nem bolhas.
4a	++	+++	+++	2.35 MPa B/C 100%	Nem delaminação nem bolhas. Comparado com a zona de respingo, sem gizamento e menos aparência metálica.
4b	++	+++	+++	Não medido	Nem delaminação nem bolhas.

Condições: - ruim, +aceitável, ++bom, +++muito bom¹⁾ Ver tabela 7, ²⁾ Média de três medições (ISO 4624)

Desempenho do revestimento na zona intermédia (IZ)

Desempenho após 5 e 13 meses

As amostras foram avaliadas após 5 meses e após 13 meses. Os resultados dessas avaliações foram relatados em outros lugares. Os resultados obtidos após 13 meses são brevemente recapitulados nesse documento. Semelhante às amostras da zona subaquática, as amostras expostas à imersão alternativa mostraram forte deposição de espécies biológicas (com incrustações), como algas, cracas e outras espécies (primeira linha, tabela 3).

A intensidade e tipo de espécie variaram bastante, em função do sistema de revestimento e do tempo de imersão.

As explicações para este último efeito são a influência da estação do ano em que foram avaliadas as

amostras e os ciclos de vida e crescimento individual das espécies. O desempenho do revestimento não pôde ser avaliado em detalhes. Em algumas pequenas áreas, a incrustação foi cuidadosamente removida e os revestimentos foram inspecionados visualmente. Não foram detectados sinais de deterioração.

Desempenho após 36 meses

As amostras foram limpas mecanicamente com um raspador de madeira e, posteriormente, com lavagem com água a alta pressão para avaliar visualmente as condições dos revestimentos. A tabela 6 relaciona os resultados do processo de avaliação. Geralmente, as áreas revestidas das amostras estavam em boas condições, sem sinais de corrosão severa, degradação ou delaminação.

Os efeitos de corrosão e degradação foram observados apenas nas seções em torno dos escribas artificiais. A

delaminação do escriba artificial foi medida com imagens de alta resolução do microscópio óptico, retiradas de seções transversais polidas (por exemplo, imagens inferiores, Tabela 7).

Efeitos notáveis foram encontrados nos sistemas 1 e 2. A delaminação do escriba foi de cerca de 2 mm na amostra 1a e de cerca de 1 mm na amostra 1b. A amostra 1a exibiu corrosão severa no escriba (tabela 7). A delaminação de escriba foi de cerca de 2 mm na amostra 2a e de cerca de 3 mm na amostra 2b. Ambas as amostras do sistema 2 apresentaram corrosão limitada no escriba artificial.

A amostra 1a exibiu bolhas até uma distância de 10 mm do escriba.

Como mostrado na tabela 6, os valores de resistência variaram de 2,35 MPa a 11,9 MPa. Com exceção do sistema 4, os valores foram superiores aos valores estimados para as amostras da zona subaquática (tabela 5), e estão bem acima do valor de 4 MPa, que é o recomendado pela norma ISO 20340 para sistemas de revestimento recém-aplicados em serviço C5-M. Tipos de fraturas típicas foram fraturas no sistema de pintura e na cola. Essas fraturas estão em contraste com as observações das amostras da zona subaquática, onde as fraturas foram principalmente aderentes.

De acordo com os resultados da avaliação, resumidos na tabela 6, o desempenho de revestimento entre os sistemas pode ser classificado como a seguir: 3, 4, 2, 1.

Desempenho de revestimento na zona de respingo (SZ)

Desempenho após 5 e 13 meses

Após 13 meses de imersão, as amostras da zona de respingo estavam em boas condições em termos de degradação e corrosão (segunda linha, tabela 8). A parte dianteira da superfície metalizada dos flanges ficou acinzentada, devido ao desenvolvimento de uma camada protetora de óxido, típica do zinco. De modo geral, a metalização na seção traseira dos flanges estava em boas condições. Não foi observada nenhuma interação negativa com os parafusos de alta liga. Além disso, os painéis de aço em ângulo não contribuíram para nenhum efeito negativo notável.

Tabela 7: Corrosão (imagem superior) e delaminação de tinta (imagem inferior; vista de seção transversal) no escriba artificial das amostras da zona intermediária

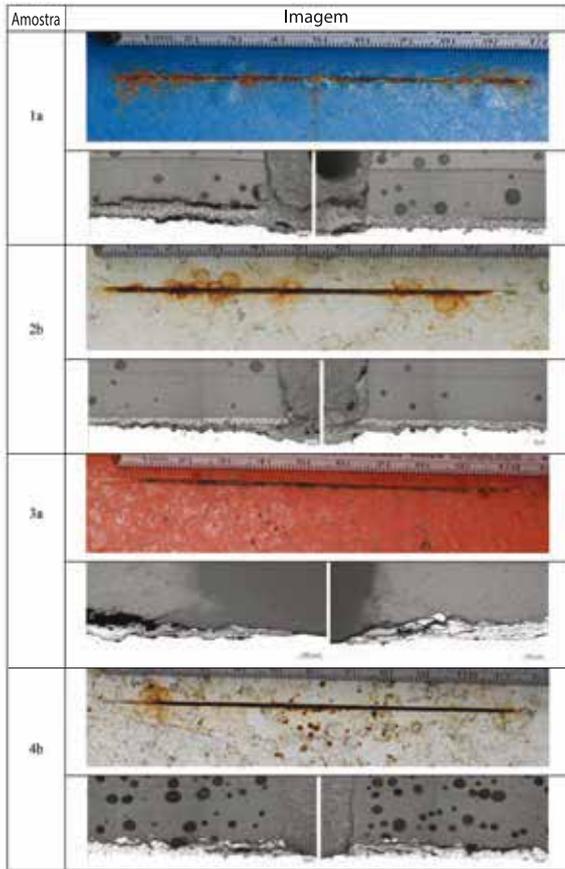


Tabela 8: Aparência das amostras nas zonas de respingo (SZ) em várias condições

Condição	Sistema 3		Sistema 4		Sistema 1		Sistema 2	
	3a	3b	4a	4b	1a	1b	2a	2b
1								
2								
3								
4								

Desempenho após 36 meses

A tabela 8 relaciona os resultados da avaliação visual. Todos os sistemas de revestimento estavam, em geral, em bom estado. O gizamento foi observado em quase todas as amostras, com exceção do sistema 1, que contou com o acabamento à base de PU. O gizamento foi mais severo no sistema 4.

O amarelecimento do acabamento foi observado nas duas amostras. A amostra 1a mostrou um pouco de perda de brilho.

Nenhum efeito grave de corrosão ou de degradação foi detectado. Não foi observada delaminação no revestimento orgânico ou na zona de transição entre a camada orgânica e o metal pulverizado. Observou-se apenas uma ligeira formação de ferrugem branca na camada de metal pulverizado. Como os resultados da avaliação dos revestimentos da tabela 9 mostram, os sistemas não podem ser distinguidos em termos de uma classificação clara.

Os lados traseiros das seções de flange metalizadas exibiram corrosão (Tabela 8).

A forma como os flanges foram afixados à estrutura promoveu corrosão intersticial.

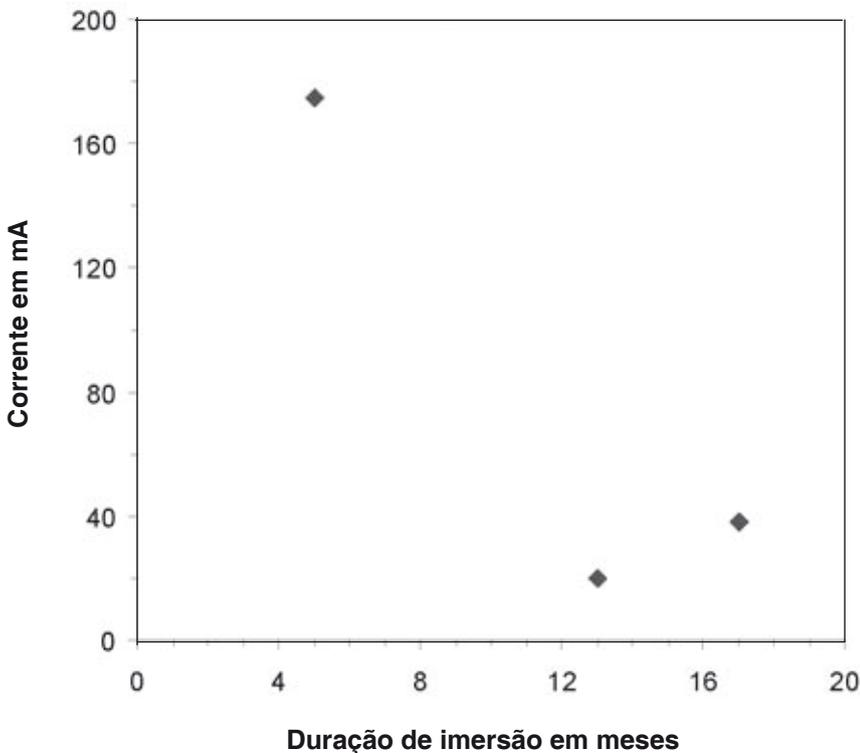


Fig. 4: Consumo de corrente de proteção catódica de amostras da zona subaquática

Tabela 9: Esquema de avaliação da zona de respingo (SZ) Amostras após 36 meses de exposição

Avaliação						
Sistema	Revestimento	Metalização de zinco parte da frente do flange	Parafusos	Áreas de flanges	Metalização de zinco seção traseira do flange ¹⁾	Observações
1a	+++	+++	+++	++	-	Perda de brilho Sem gizamento
1b	++	+++	+++	++	-	Amarelecimento do revestimento Boa adesão na faixa de lascas de tinta
2a	++	+++	+++	++	-	Leve gizamento
2b	+++	+++	+++	++	-	Sem gizamento; ligeiro amarelecimento Boa adesão na faixa de lascas de tinta
3a	++	+++	+++	++	-	Leve gizamento
3b	++	+++	+++	++	-	Leve gizamento
4a	++	+++	+++	++	-	Gizamento Notável
4b	++	+++	+++	++	-	Gizamento Notável

Condições: - Ruim, +aceitável, ++bom, +++muito bom ¹⁾ Veja as duas últimas linhas da tabela 8

A corrosão foi caracterizada essencialmente pela formação de ferrugem branca, mas a formação de ferrugem vermelha com o substrato também foi observada em locais. Pode ser mostrado que a quantidade de corrosão depende da localização nos flanges e no sistema. Áreas críticas foram as fendas entre as seções de flange individuais, em frente aos cordões de solda, onde a corrosão mais severa foi observada em todas as amostras. Mais uma vez, a corrosão intersticial pode ter causado o fenômeno. A corrosão sempre foi mais grave na parte inferior do flange, onde se desenvolveram grossas camadas soltas de ferrugem branca, bem como de ferrugem vermelha (tabela 8, última linha). As duas faces de encosto com porcas inseridas não mostraram corrosão severa. A formação de ferrugem branca leve foi observada em alguns lugares.

Os parafusos de aço AISI 304 apresentaram boa compatibilidade com as camadas de metal pulverizado. Os furos para os parafusos estavam geralmente em boas condições, embora a formação de ferrugem branca tenha ocorrido em alguns locais. As arruelas e porcas de parafuso estavam em boas condições.

Proteção catódica das seções não revestidas

A figura 4 mostra os resultados das medi-



Fig. 5: A seção desprotegida de uma amostra da zona subaquática após 36 meses de exposição

ções de proteção catódica.

Durante os primeiros meses, a amostra permaneceu sem proteção por motivos técnicos. A corrente tinha valores muito elevados, que podem ter sido causados por corrosão inicial das amostras desprotegidas. Após a proteção catódica ter sido introduzida, o valor da corrente caiu, ficando constante durante toda a fase de exposição. A cobertura por incrustação e o precipitado de sais alcalino-terrosos são duas razões prováveis para os contínuos valores baixos da corrente protetora. Infelizmente, parte do dispositivo de proteção catódica foi destruída devido à carga pesada de ondas após 17 meses, e não funcionou corretamente. Portanto, a proteção catódica falhou,

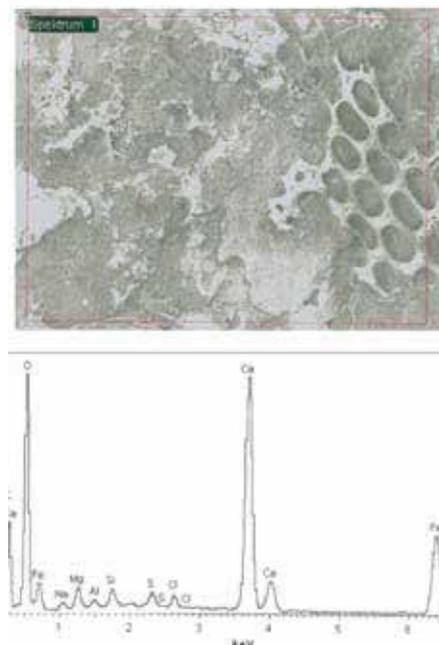


Fig. 6: Imagem SEM (imagem superior, largura da imagem: 5 mm) e imagem EDX (diagrama inferior) da parede externa corroída de amostra da zona subaquática após a exposição 36 meses

e as seções não revestidas das amostras começaram a ser corroídas.

As seções não revestidas apresentaram duas camadas de produtos de corrosão (Fig. 5).

A camada próxima do aço estava preta e pouco aderente, o que foi identificado como Fe-óxido, mais especificamente, Fe-hidróxido com um baixo número de oxidação. A camada superior estava com a ferrugem vermelha típico, também pouco aderente. A figura 6 apresenta uma imagem SEM e um espectro EDX da própria parede externa corroída da seção não revestida de uma amostra da zona subaquática. Pode ser visto que a ferrugem já foi rompida. Os comprimentos de fissura variaram de 0,25 a 1,5 mm.

Flocos de ferrugem foram parcialmente separados e aderiram mal ao aço. A estrutura em favo de mel na região da extrema direita da fotografia é um resíduo de incrustações, e pode ser a origem de Si e, em parte, de S e Na, que ocorrem no espectro EDX. Os picos de Fe no espectro se originaram dos produtos de corrosão formados na superfície. Os elementos Al, Cl, Ca, Mg, S e Na são constituintes da água do mar.

Resumo

- A incrustação não parecia afetar o desempenho da proteção contra corrosão dos sistemas de revestimento. Do ponto de vista dos efeitos sobre o habitat nas proximidades das torres, as incrustações na zona subaquática e na zona intermediária se tornaram um problema na execução de torres de energia eólica offshore no mar do norte.
- Os resultados dos testes locais em longo prazo deu a seguinte ordenação da capacidade de proteção dos sistemas de revestimento: 3, 4, 2, 1. Assim, a metalização de Zn/Al, seguida por duas camadas intermédias de tinta à base de PE é uma boa escolha. A avaliação baseia-se principalmente nos resultados obtidos a partir das amostras da zona intermediária artificialmente danificadas.
- Na zona de respingos, a conexão do flange era uma parte estrutural crítica em termos de corrosão. Notável corrosão intersticial foi observada em alguns lugares. Portanto, um material vedante adequado entre as faces encostadas pode ser considerado para uma proteção adicional contra a corrosão.
- As zonas de corrosão não mostraram nenhum efeito sobre o desempenho dos sistemas de revestimento. Em contraste com o aço liso, que mostrou corrosão acelerada na zona de respingo de estruturas offshore, 14, 15 os revestimentos tiveram desempenhos igualmente bons, já que as áreas não danificadas das amostras foram consideradas.
- Os danos mecânicos ao revestimento iniciou a delaminação e a corrosão da pintura. Um sistema de revestimento recomendado, portanto, deve ser muito resistente a impactos ou capaz de compensar a corrosão do aço.
- A proteção catódica de seções não revestidas da zona subaquática é uma alternativa interessante para sistemas de revestimento passivos.

Agradecimentos

A classificação da incrustação biológica foi realizada pelo Dr. Maja Wiegemann, Instituto Alfred-Wegener de Pesquisa Polar e Marinha, Bremerhaven, Alemanha.

Referências

1. A. Wolfson, G. van Blaricom, N. Davis, G.S. Lewbel, "The marine life on an offshore oil platform," *Marine Ecology*, Vol. 1, pp. 81-89 (1979).
2. P. Whomersley, G.B. Picken, "Long-term dynamics of fouling communities found on offshore installations in the North Sea," *J. of the Marine Biological Assn. of the UK*, Vol. 83, pp. 897-901 (2003).
3. B.H. Buck, C.M. Buchholz, "The offshore-rig: a new system design for the open ocean aquaculture of macroalgae," *J. of Appl. Phycology*, Vol. 16, pp. 355-368 (2004).
4. K. Hiscock, H. Tayler-Walters, H. Jones, "High level environmental screening study for offshore wind farm developments – marine habitats and species project," Project Report W/35/00632/00/00, AEA Technology, Harwell, UK (2002).
5. J. Birklund, A.H. Petersen, "Development of the fouling community on turbine foundations and scour protections in Nysted offshore wind farm," Survey Report, Energi E2 A/S, Copenhagen, Denmark (2004).
6. R. Frederiksen, M. Bech, S.B. Leonhard, "Hard bottom substrate monitoring Horns Rev offshore wind farm," Survey Report No. 1, Elsam Engineering A/S, Fredericia, Denmark (2004).
7. R.G. Edyvean, "The influence of marine macrofouling on corrosion," *Bioextraction and Biodeterioration of Metals* (Eds.: C.C. Gaylarde, H.A. Videla), Cambridge University Press, pp. 169-196 (1995).
8. M. Schneider, V. Stenzel, A.W. Momber, "Vergleichende Untersuchungen von Korrosionsschutzkonzepten für Offshore-Windenergieanlagen," Proc. Workshop Korrelation von Labortests mit Praxisbedingungen im schweren Korrosionsschutz, DECHEMA, Frankfurt, pp. 81-97 (2005).
9. A.W. Momber, V. Stenzel, P. Plagemann, M. Schneider, "Combined field-laboratory studies on corrosion protection conceptions for offshore wind energy towers," *Proc. 4th International Symposium on Protective Coatings*, Mumbai, pp. 62-70 (2006).
10. M. Cornago, "Improving performance using thermal spray coatings for offshore structures," *Protect. Coatings Europe*, Vol. 4, No. 9, pp. 28-32 (1999).
11. Li, Y., Liu, J., Duan, J., Hou, B., "Thermally sprayed aluminium and zinc coatings for tidal zone cathodic protection of offshore platform pile legs," *Materials Perform.*, Vol. 45, No. 12, pp. 16-19 (2006).
12. K.P. Fischer, W.H. Thomason, T. Rosbrook, J. Murali, "Performance history of thermal sprayed aluminium coatings in offshore service," *Materials Perform.*, Vol. 34, No. 4, pp. 27-35 (1995).
13. ISO 20340, "Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures," International Organisation for Standardisation, Geneve (2005).
14. M. Smith, C. Bowley, L. Williams, "In situ protection of splash zones," *Materials Perform.*, Vol. 41, No. 10, pp. 30-33 (2002).
15. P. Ault, "The use of coatings for corrosion control on offshore oil structures," *Protect. Coatings Europe*, Vol. 11, No. 4, pp. 42-46 (2006).

Os autores podem ser contatados através do Dr. Andreas Momber,