EVOLUÇÃO DE REVESTIMENTOS SEM SOLVENTES PARA CONSTRUÇÃO METÁLICA DE FUNDAÇÕES EÓLICAS *OFFSHORE*

https://doi.org/10.68750/ctm.2026.38.2.08

João Azevedo[1], Neil Wilds[2]

1 Sherwin-Williams, joao.azevedo@sherwin.com

2 Sherwin-Williams, neil.wilds@sherwin.co

É apresentada uma abordagem de revestimentos sem solventes no seu trajeto, ao longo dos anos, para responder aos desafios da construção metálica de estruturas para exposição em ambientes offshore. O foco deste trabalho está na construção de estruturas metálicas para eólicas offshore, nomeadamente fundações, porque este tipo específico trouxe uma mudança marcante nas necessidades de proteção contra corrosão quando comparado com estruturas metálicas usadas na exploração offshore de petróleo e gás. O presente trabalho enfatiza como uma combinação de tecnologias de revestimentos sem solventes responde aos desafios combinados enfrentados por 1) expectativas crescentes de durabilidade; 2) múltiplos requisitos de pré-qualificação; 3) diferenças entre estruturas e respectivos métodos de construção para produção de energia eólica offshore e as estruturas usadas no contexto da indústria de petróleo e gás. São fornecidos detalhes sobre duas soluções de revestimento para a fase de construção e para a fase de reparação do revestimento após a construção. São adicionadas observações sobre duas tendências principais para o futuro próximo: 1) nova normalização da proteção anticorrosiva de estruturas metálicas para eólicas offshore, atualmente em desenvolvimento; 2) automatização das operações de pintura para remover as mesmas do caminho crítico da fabricação de fundações para eólicas offshore (monoestacas). Neste contexto, uma solução bem-sucedida de revestimentos para proteção anticorrosiva precisará de lidar com as novas tendências.

INTRODUÇÃO

O panorama das necessidades de fabricação de aço para estruturas *offshore* tem mudado. A principal fonte dessa mudança tem sido a indústria eólica *offshore*, que vem assumindo uma parcela cada vez maior do investimento em ativos *offshore*, no passado representado exclusivamente pela atividade de exploração e produção de petróleo e gás.

As mudanças nas necessidades estão a trazer desafios. A construção em aço estrutural para eólicas *offshore* está a exigir cada vez mais requisitos de proteção contra corrosão com durabilidade muito elevada (superior a 25 anos). Esta exigência está a expor lacunas nas ferramentas de normalização disponíveis para orientar as práticas de projeto e construção em direção a essa meta de durabilidade. O ritmo acelerado da construção de fundações eólicas *offshore* (monoestacas, jaquetas, peças de transição, etc.) está a adicionar novos desafios, com os operadores eólicos *offshore* a trazerem expectativas de durabilidade ainda mais elevadas e a pressionarem por soluções de construção mais sustentáveis, e os fabricantes a procurarem métodos mais rápidos de preparação de super-fície e pintura, para superar os estrangulamentos de capacidade de construção criados pelo rápido crescimento da indústria eólica *offshore*.

UMA CURVA DE APRENDIZAGEM

As partes interessadas na cadeia de valor da energia eólica *offshore*, desde proprietários a construtores de estruturas metálicas, têm tentado encontrar critérios de seleção de revestimentos de proteção anticorrosiva que correspondam às suas necessidades específicas: fabricar e proteger estruturas não tripuladas com uma durabilidade superior a 25 anos sob exposição a condições ambientais *offshore* adversas, com manutenção mínima ou nenhuma, usando revestimentos fáceis e rápidos de aplicar. Nessa busca, a indústria passou por uma curva de aprendizagem um tanto dolorosa.

PRIMEIRA TENTATIVA - O MÉTODO DO PETRÓLEO E GÁS

A primeira tentativa baseou-se na utilização de especificações de petróleo e gás e ferramentas de pré-qualificação como a norma ISO 20340

(posteriormente ISO 12944-9 [1]) e a Norsok M501-Rev.6 (posteriormente Rev.7 [2]). A combinação de sua utilização (especialmente versões mais antigas dessas normas) com métodos de fabricação específicos para energia eólica *offshore* e diferentes condições de exposição em ambiente *offshore* (Figura 1) gerou alguns casos de falhas prematuras, variabilidade de especificações e altos custos de construção. Otimizar simultaneamente essas três dimensões tem sido uma tarefa difícil.



FIGURA 1
Falha prematura em ambiente offshore

SEGUNDA TENTATIVA - ENSAIOS LABORATORIAIS DE PRÉ-QUALIFICAÇÃO DE PINTURA ESPECÍFICOS PARA ESTRUTURAS USADAS EM ENERGIA EÓLICA *OFFSHORE*

Uma norma conjunta VGBE-BAW [3] (a versão mais recente foi publicada em 2023) trouxe requisitos de ensaios de revestimentos específicos para energia eólica *offshore*. Como resultado, a indústria pode ter obtido uma maior correlação entre os ensaios de pré-qualificação e a durabilidade em condições reais, mas também gerou falsos negativos (tecnologias de revestimento com boas hipóteses de ter um bom desempenho no terreno, mas com dificuldades em passar nos critérios de pré-qualificação). Apesar das suas vantagens, trata-se ainda de uma norma de âmbito nacional (alemã), pouco utilizada fora de projetos em águas alemãs, acrescentando-se à multiplicidade de ferramentas de especificação às quais os fabricantes e produtores de revestimentos têm de se adaptar, com implicações económicas significativas.

TERCEIRA TENTATIVA - VÃS ESPERANÇAS...

Perante as limitações das abordagens acima descritas, um número crescente de especificadores desviou-se da estrita utilização de critérios de desempenho e optou por adicionar requisitos de composição dos revestimentos como critérios-chave. Infelizmente, declarações como "este revestimento com 20% de conteúdo de flocos de vidro dura 30 anos e temos um histórico para provar isso" atraíram especificadores e criadores de normas, que de forma crescente começaram a utilizar requisitos composicionais obrigatórios para a pre-qualificação de revestimentos. Não importou que os poucos exemplos de sucesso comprovado com tais produtos, aplicados há décadas, na maioria dos casos não correspondam aos requisitos atuais do sistema de revestimento padronizado (número de camadas, espessura, etc.), ou que respeitem a plataformas de E&P de petróleo e gás, ou que não tenham relevância estatística para serem usados como prova de desempenho, ou que os produtos usados possam ter mudado de formulação devido a alterações contingentes nas matérias-primas, à medida que as regulamentações mudaram ao longo dos anos. Um exemplo de uma "esperança vã" foi expressa na ISO 24656:2022 [4], uma excelente norma que rege a proteção catódica de estruturas metálicas para energia eólica *offshore (no melhor pano cai a nódoa)*. Esta norma inclui uma seção meramente informativa em que revestimentos com 20% de conteúdo de flocos de vidro lamelares são considerados superiores aos revestimentos que não contenham flocos de vidro ou os contenham em menor quantidade, embora passem nos testes de desempenho de pré-qualificação. Apesar de não ser uma norma para pre-qualificação de revestimentos, foi interpretada por muitos especificadores como uma indicação a seguir.

LIÇÕES APRENDIDAS

Com base na experiência da indústria com as abordagens anteriores, os autores propõem a adoção das seguintes medidas, ao especificar soluções de revestimentos de proteção anticorrosiva para eólicas *offshore*:

- **Evitar critérios de pré-qualificação de revestimentos baseados na sua composição.** Os critérios de desempenho devem ser preferidos. Os requisitos de composição restringem a inovação tecnológica e perpetuam soluções técnicas ultrapassadas.
- **As normas de conceção e pré-qualificação devem adaptar-se à realidade da energia eólica *offshore*.** Selecionar ensaios de pré-qualificação e métodos de inspeção adaptados à realidade da energia eólica *offshore*. A experiência prévia com revestimentos em projetos *offshore*, ainda que possa fornecer um grau adicional de confiança na avaliação técnica, não deve, por si só, ser adotada como critério de pré-qualificação, em particular quando transposta de outros setores, como o do petróleo e gás.
- **Considerar as características reais da aplicação do revestimento.** Os testes de pré-qualificação de revestimentos devem incluir uma medida da sua facilidade de aplicação e inspeção. Um desempenho eficaz em ensaios laboratoriais não se traduz necessariamente

em desempenho no terreno se o material apresentar dificuldades de aplicação ou de inspeção durante a fase de construção.

- **Critérios de sustentabilidade devem ser considerados na seleção dos métodos de prevenção da corrosão.** As Declarações de Desempenho Ambiental (EPD) ajudam, se forem definidos critérios comparativos claros. A proteção catódica, a construção com sobre-espessura do aço como "margem de corrosão" e os revestimentos de proteção podem ser combinados para alcançar uma durabilidade de muito elevada, mas a combinação ideal deve ser selecionada com base em critérios de sustentabilidade [6]. A utilização de revestimentos de uma forma que permita reduzir as necessidades de proteção catódica e eliminar a necessidade da "margem de corrosão" é provavelmente a opção mais sustentável.

REVESTIMENTOS SEM SOLVENTES PARA NOVA CONSTRUÇÃO: UM PERCURSO

Foram feitos avanços importantes em duas formulações sem solventes, uma à base de epóxi, para novas construções, e outra usando uma nova tecnologia de pintura para retoques de reparação após a construção e transporte (também usada para manutenção a um *offshore*)(Figura 2).

A ABORDAGEM EPÓXI SEM SOLVENTES PARA NOVAS CONSTRUÇÕES

Com mais de vinte anos de utilização em estruturas eólicas *offshore*, uma tecnologia de resina epóxi sem solventes (identificada como "NSFE" na Figura 3) evoluiu ao longo do tempo para a sua forma atual: sem álcool benzílico nem nonilfenol, com opções para diferentes níveis de conteúdo de flocos de vidro e propriedades de aplicação superiores. Esta abordagem permite uma solução de construção sem emissão de



FIGURA 2
O sucesso é possível - inspeção após 10 anos

componentes orgânicos voláteis (COV), de aplicação fácil (permitindo uma boa formação do filme de pintura, sem necessidade de diluição, incluindo nas versões com flocos de vidro) e aprovada de acordo com vários contextos de aprovação (Norsok M501 [2], ISO 12944 [1], VGB BAW [3], ISO 24656 [4]). Este tipo de solução está agora a revelar-se adaptável a métodos de aplicação automáticos, ajudando a remover a pintura do caminho crítico dos projetos de construção de eólicas *offshore*, nomeadamente para monoestacas.

SOBRE AS FORMULAÇÕES DE REVESTIMENTO COM FLOCOS DE VIDRO LAMELAR

A adição de flocos de vidro pode ter um impacto positivo ou negativo no desempenho geral do revestimento, dependendo da fórmula original. Flocos de vidro lamelar demasiado grandes ou adicionados em quantidade excessiva podem reduzir o desempenho anticorrosivo ou necessitar de uma espessura muito elevada para funcionar. A adição de flocos de vidro pode trazer desafios de aplicação: dificuldades de

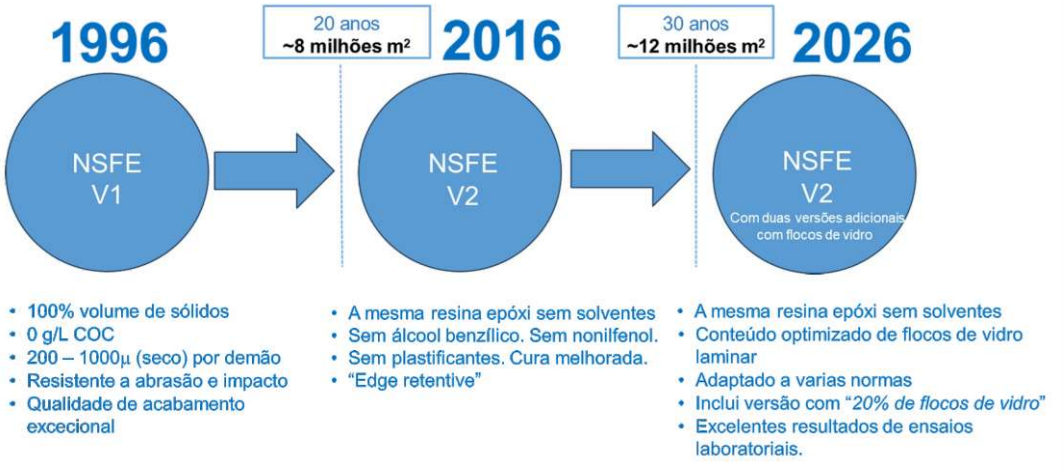


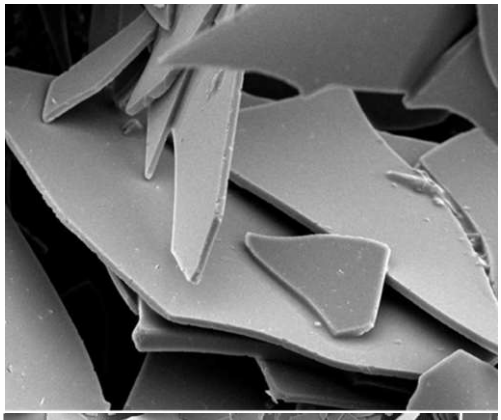
FIGURA 3
O caminho de décadas do "Novel Solvent-Free Epoxy" (NSFE) ao serviço das necessidades eólicas offshore

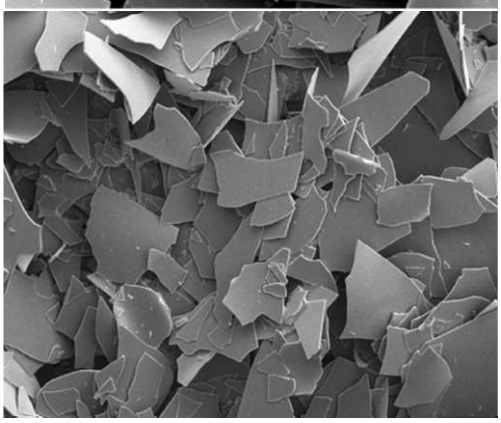
atomização por pulverização e má formação de película. A resistência ao impacto é reduzida com cargas mais elevadas de flocos de vidro.

As cargas ideais de flocos de vidro dependem de aspetos da formulação (por exemplo, tamanho dos flocos de vidro) e da fórmula do sistema de resina - o mais importante.

- Carga muito baixa = insuficiente para criar um caminho tortuoso para a migração de água através da película (para reduzir a permeabilidade).
- Carga demasiado alta = a má orientação das lamelas de vidro cria caminhos permeáveis.

Mais flocos de vidro não significam necessariamente melhor desempenho: veja-se a Figura 4, que ilustra o efeito das cargas de flocos de vidro na permeabilidade do filme de revestimento. A carga ideal depende do tamanho das partículas.





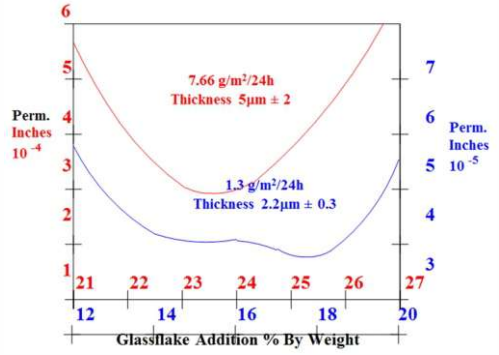


FIGURA 4
Ilustração de diferentes tamanhos de flocos de vidro e respetivo efeito na permeabilidade do filme de revestimento (Cortesia de Charles Watkinson [8])

Quando se alcança o equilíbrio certo na formulação, os resultados podem ser impressionantes. A Figura 5 compara os resultados dos testes de ciclo Norsok M-501 / ISO 12944-9 para a versão NSFE V2 com 20% de flocos de vidro com o material de revestimento de referência anterior para este tipo de formulação. O nível de desempenho alcançado com o NSFE V2 supera os resultados obtidos com o material de referência anterior para esta composição de flocos de vidro.



Referência corrente, "epóxi com 20% de flocos de vidro
Epoxi com solventes, ≥20% de flocos de vidro
Corrosão na incisão < 5 mm
Menor resistência ao impacto.
Qualidade de acabamento sofrível, pode necessitar de diluição com solventes para permitir pintura airless.



"Novel Solvent Free Epoxy" NSFE V2
Epoxi sem solventes, ≥20% GF
Corrosão na incisão < 3 mm
Maior resistência ao impacto. Adesão extraordinária
Excelente acabamento, facilidade de formação de película por pintura airless sem diluição.

FIGURA 5
Comparação de ensaios laboratoriais de pré-qualificação de formulações com 20% de flocos de vidro lamelares - paineis após ciclo de envelhecimento de acordo com a ISO 12944-9 (4200h). A) referência histórica, epóxi com solventes. B) tecnologia NSFE de epóxi sem solventes, versão com 20% de flocos de vidro lamelares

SOLUÇÃO DE REPARAÇÃO MONOCAMADA, SEM SOLVENTES E RESISTENTE AOS UV

Uma nova tecnologia de revestimento para reparação *offshore* foi lançada em 2016 ("Single-Coat UV resistant putty", aqui identificada como "SCUV"). Este revestimento introduziu um novo paradigma na reparação e manutenção de estruturas metálicas, rapidamente adotado no setor da energia eólica *offshore*. Essa abordagem é agora cada vez mais vista como a ferramenta ideal para a reparação pós-fabricação de danos ocorridos durante o transporte e manuseio de estruturas eólicas *offshore*, antes da

operação. O revestimento SCUV está disponível numa embalagem inovadora, um "cartucho" que permite a mistura da base e do endurecedor na ponta de um bico curto de mistura, eliminando as limitações de tempo de vida da mistura. O material, aplicável com espessura muito alta, pode ser usado de forma muito simples sobre pequenos danos causados por impacto ou erosão mecânica, por exemplo, no cais ou no local de montagem, para reparar danos precoces nesta fase, antes de entrar em serviço. As suas características combinadas de fácil aplicação (sem restrições de tempo de vida de mistura, cura ultra-rápida e imersão precoce), aplicação de uma única camada > 500 µm de espessura de película seca com pincel ou espátula e resistência à radiação UV (sem necessidade de demão de acabamento adicional) tornam o SCUV a tecnologia complementar ideal para um projeto de construção offshore rápido e bem-sucedido ou para manutenção no terreno (Figura 6).

Aplicado numa única camada com espessura de película seca de 500-800 mícrons, passou nos ensaios de envelhecimento cíclico de acordo com a norma EN ISO 12944-9 e nos testes de delaminação catódica de acordo com a norma EN ISO 15711:2005 [9], com resultados que supe-ram amplamente os requisitos mínimos da Norsok M501 Rev.7, Sistema 7A (zona de salpicos) para estas métricas (Figura 7).

O FUTURO

Duas tendências irão em breve moldar a construção de fundações para eólicas *offshore*: automatização e normalização.

A **Figura 8** mostra um exemplo de automatização das atividades de pintura na construção de monoestacas. A tecnologia NSFE V2 de epóxi sem solventes com flocos de vidro, apresentada acima, obteve um desempenho excelente em ensaios-piloto desta tecnologia emergente.

No que diz respeito à normalização, está a ser feita uma tentativa de fornecer aos especificadores uma norma única e consolidada para a proteção de estruturas eólicas *offshore* contra a corrosão: a NP ISO 25249 "Proteção contra a corrosão de estruturas eólicas *offshore*". O ISO TC 107 JWG6 é o grupo conjunto, atualmente



FIGURA 6
SCUV, manutenção offshore – preparação da superfície, aplicação, avaliação

Degree of blistering	Degree of rusting	Degree of cracking	Degree of flaking	Corrosion around scribe
0 (S0)	*Ri 0*	*0 (S0)*	*0 (S0)*	*≤ 8.0 mm*
0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	1.9 mm
0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	2.8 mm
0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	1.9 mm

← Requirement

< 3mm

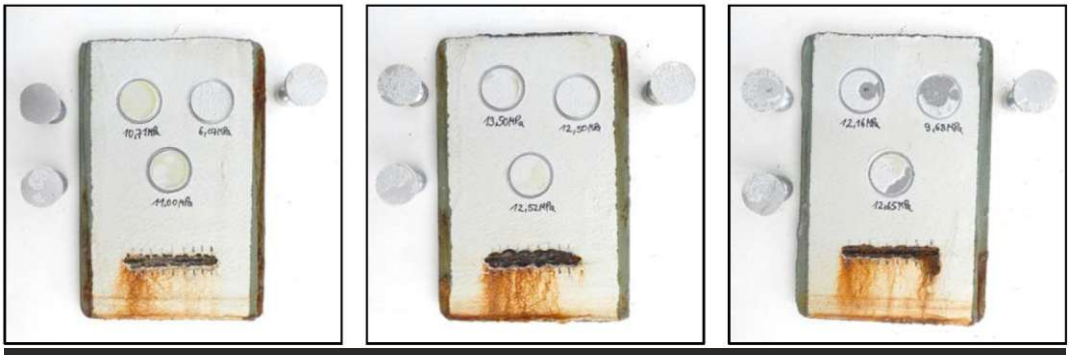


FIGURA7
Painéis SCUV e resultados de corrosão na incisão, após exposição ao envelhecimento cíclico de acordo com a norma EN ISO 12944-9

com mais de 80 membros, encarregado dessa tarefa. O JWG 6 é liderado pelo comité técnico ISO TC 107 "Revestimentos metálicos e outros revestimentos inorgânicos", com o comité técnico ISO TC 35 "Tintas e vernizes" como parceiro.

Partindo da situação atual (múltiplos documentos de projeto e execução e variação nos requisitos dos especificadores, um desafio mencionado acima), o objetivo da equipa ISO TC107 JW6 é permitir que a futura ISO 25249 cubra 80 a 90% dos requisitos (deixando 10 a 20% para os requisitos dos especificadores). Tal conquista trará benefícios para a aquisição e a cadeia de abastecimento, evitará aprovações diferentes e abordará partes do ciclo de proteção contra corrosão que atualmente não são bem cobertas, por exemplo, a manutenção.



FIGURA 8
Pintura automática num contexto de fabricação de monopilares, usando NSFE V2 com 20% de flocos de vidro (cortesia de Rodopi)

Birit Buhr [10] forneceu um bom resumo da cobertura das primeiras cinco partes da nova norma (Figura 9).

CONCLUSÕES

Contemplando a informação aqui partilhada, os autores extraíram as seguintes conclusões:

- As necessidades de proteção anticorrosiva no contexto da Energia Eólica offshore são diferentes das do Petróleo e Gás.
- O histórico de utilização de revestimentos anticorrosivos na energia eólica offshore pode ser valorizado como critério de seleção; contudo, a sua ausência não deve constituir um critério eliminatório, uma vez que soluções mais inovadoras e com bom desempenho estão a emergir atualmente.
- Deve olhar-se para a evolução de qualquer tecnologia de revestimentos ao longo do tempo, e não apenas inferir os méritos dessa tecnologia com base em aplicações décadas no passado.
- Uma nova normalização dos critérios de design de sistemas de proteção anticorrosiva, unificada e específica para a energia eólica offshore, será bem-vinda - se contribuir para uma maior clareza, consolidação e simplificação dos requisitos.

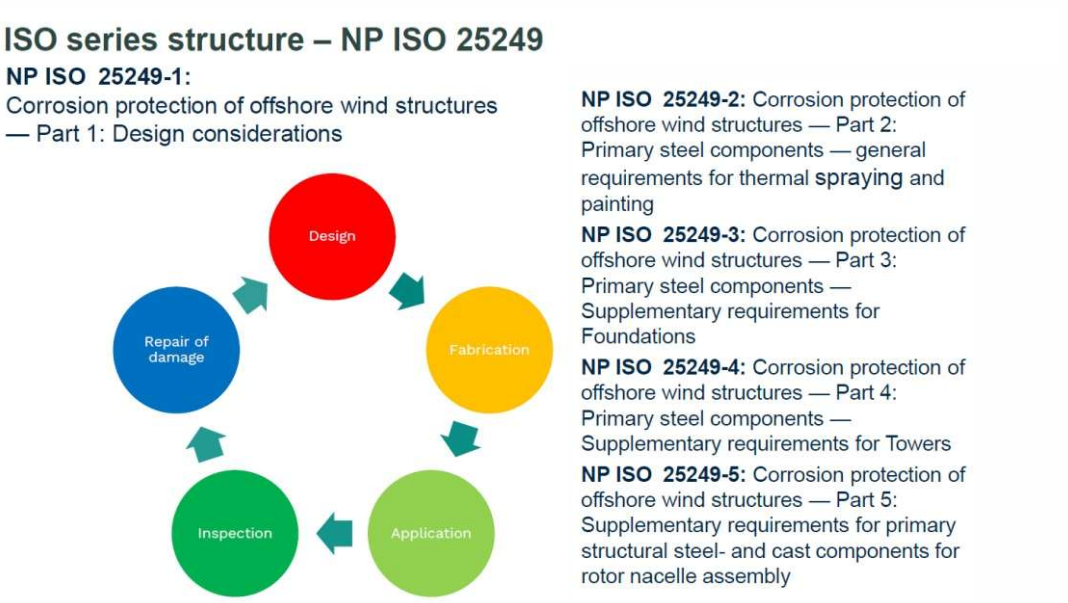


FIGURA 9
NP ISO 25241 Parte 1 a Parte 5: âmbitos pretendidos (cortesia de Birit Buhr)

- A pré-qualificação dos revestimentos deve centrar-se no desempenho no contexto da energia eólica *offshore*. Evitar requisitos de composição e exigir propriedades de aplicação conducentes a uma fácil utilização.
- As soluções de reparação e manutenção pós-fabricação devem ser rápidas, fáceis de aplicar, duráveis e sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a ajuda fundamental de Matthias Winkler, Dennis Macht e Claus Ackfeld, colegas da Sherwin-Williams, sem os quais este artigo não poderia ter sido produzido. Um sincero agradecimento também a Birit Buhr, da European Energy, pelas valiosas ideias sobre o objetivo comum de servir a indústria eólica *offshore* com melhores ferramentas para métodos de proteção contra corrosão economicamente eficientes, sustentáveis e duradouros.

REFERÊNCIAS

[1] EN ISO 12944-9:2018 Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures

[2] Norsok M501:2022 (Revision 7) Surface preparation and protective coating

[3] VGBE-S-021-01-2023-05-DE Corrosion Protection for Offshore Wind Structures

[4] ISO 24656:2022 Cathodic protection of offshore wind structures

[5] ISO/NP 25249 Corrosion protection of offshore wind structures

[6] Birit Buhr"How do you take sustainability into account during design?" , AMPP Italy, Genoa, 3rd conference & Expo 2024, June 2024

[7] Anthony Setiadi, "Benefits of Corrosion Protection In Offshore Wind" , ICorr CED Working Day, Teddington, 27 Apr 2023

[8] Charles Watkinson, "Glass Flake - Extraordinary Performance Improver", PCI Paints & Coatings Industry, July 2015

[9] EN ISO 15711:2005 Paints and varnishes - Determination of resistance to cathodic disbonding of coatings exposed to sea water

[10] Birit Buhr, "Status on the development of the new ISO 25249 series of standards Corrosion Protection of Offshore Wind Structures", ; AMPP Italy, Genoa, 3rd conference & Expo June 2024