

Optimización del recubrimiento anticorrosivo para un nuevo sistema de boat landing empleado en aerogeneradores offshore

Optimisation of a corrosion-protective coating for a new boat landing system used in offshore wind turbines

Sergio Cicero¹, Juan-Diego Fuentes¹, David Andrés¹, Xabier Mediavilla², Luis San-Segundo², Roberto Lacalle³, Javier Sarmiento⁴, Raúl Guanche⁴ y Carlos Polimón⁵

¹ LADICIM-Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (España)

² DEGIMA (España)

³ INESCO Ingenieros (España)

⁴ Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, IH Cantabria (España)

⁵ DRACE Infraestructuras (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9139>

INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía eólica marina está jugando un papel fundamental en el desarrollo de las energías marinas renovables, dando lugar a nuevas ubicaciones para parques eólicos en las que nunca antes se había considerado la explotación de la energía eólica. Hasta ahora, este desarrollo se ha centrado tanto en el Mar del Norte como en el Mar Báltico, donde la profundidad del agua en la zona en la que se ubican los parques eólicos es inferior a 50 metros, y donde la mayoría de las instalaciones completadas total o parcialmente utilizan subestructuras con monopilotes, *jackets* o de gravedad. Según *WindEurope* (anteriormente, Asociación Europea de Energía Eólica, EWEA), a finales de 2017 había 4.149 turbinas instaladas y conectadas a la red en 11 países europeos, lo que representa una capacidad eólica marina instalada de 15.780 MW [1].

Aunque el sector eólico marino hace uso de conocimiento y tecnologías desarrolladas y ampliamente validadas por otras industrias, han surgido varios problemas científicos y tecnológicos, la mayoría de ellos relacionados con el entorno agresivo (marino) en el que operan los aerogeneradores *offshore*. De este modo, el sector de la energía eólica marina está

haciendo grandes esfuerzos de I + D con el objetivo de reducir los costes operativos y aumentar la competitividad de una fuente de energía limpia y abundante.

En cuanto a la operación y explotación de los parques eólicos marinos, la experiencia ha revelado que el acceso a las plataformas eólicas es un punto crítico del proceso, ya que condiciona tanto la transferencia de personal y materiales, como la operación y el mantenimiento de las turbinas. La mayoría de las aproximaciones a las plataformas se realizan mediante una combinación de barcos de servicio y de *boat landing systems* (BLS) [2], dado que este sistema es el único que permite alcanzar una accesibilidad media anual a las mismas de al menos el 80% (umbral por debajo del cual la viabilidad económica del parque eólico se puede ver comprometida). Estos sistemas, los BLS, son estructuras secundarias unidas a la estructura principal (ver Figura 1a) que siguen diseños pobremente estandarizados según los procedimientos del promotor del parque eólico. La variabilidad espacial y direccional de las condiciones del oleaje, la diversidad de los barcos de servicio utilizados en las aproximaciones, junto con la importancia de los BLS para la gestión del parque eólico, hacen que estos sistemas deban diseñarse bajo dos condicionantes principales: seguridad y fiabilidad. Seguridad desde el punto de vista del personal involucrado en las operaciones (que se transfiere desde el barco al aerogenerador a través del BLS) y fiabilidad desde el punto de vista de la integridad estructural y de la durabilidad, dado que el BLS debe operar en ambientes agresivos con la menor cantidad posible de reparaciones.

Sin embargo, las condiciones reales en los parques eólicos están muy lejos de las condiciones ideales. Algunas de las razones son las siguientes:

- La seguridad, que también está relacionada con el clima marino, en muchas ocasiones está reñida con los límites o umbrales de acceso establecidos (por ejemplo, la altura de las olas puede ser mayor que la establecida por los procedimientos de seguridad), lo que limita la accesibilidad a las diferentes infraestructuras de los parques eólicos.
- Al emplear barcos de servicio, los mecanismos de acceso se basan en el contacto entre la embarcación y la plataforma para reducir el movimiento relativo entre una y otra. Esto hace que se produzca una gran fricción y unas elevadas cargas de impacto en el BLS que aceleran los procesos de deterioro.
- Los procesos de corrosión limitan significativamente la vida útil de los BLS, lo que conlleva reparaciones costosas y/o paradas de producción inesperadas (ver [3,4] para un análisis y una descripción más detallada de los procesos de corrosión).

Con el objetivo de desarrollar un diseño nuevo e innovador de los BLS que supere los problemas mencionados anteriormente, el proyecto ACCEDE (ver sección de agradecimientos) se desarrolló desde 2017 hasta mediados de 2019. El nuevo diseño del BLS se basa en dos características principales:

- Un análisis avanzado de la interacción fluido-estructura que permite la optimización de la geometría del BLS, mejorando la accesibilidad a las turbinas para un mayor rango de olas, vientos y corrientes.
- El empleo de materiales específicamente seleccionados, combinados con recubrimientos protectores adecuados que reducen las consecuencias de la corrosión, la fatiga y los procesos de *biofouling*.

Se debe tener en cuenta que este trabajo se centra en la optimización del recubrimiento protector frente a la corrosión, el impacto y la abrasión, algo que aumenta la fiabilidad y la durabilidad de todo el BLS. La información técnica y científica sobre las soluciones actualmente existentes es muy limitada, pudiéndose indicar tan solo que las soluciones más utilizadas en la práctica son aquellas que emplean un recubrimiento de epoxi de dos compo-

nentes pigmentado con escamas de vidrio lamelar (ver propuestas 2 y 6 en Sección 2), y que su aplicación en BLS no es del todo satisfactoria.

Finalmente, la selección del material estructural, las características estructurales y geométricas generales del BLS (ver Figura 1b), así como su análisis frente a

procesos críticos y subcríticos como fractura, colapso plástico, fatiga o corrosión bajo tensión, han sido obviamente cubiertas durante el proyecto, pero están fuera del alcance de este trabajo.

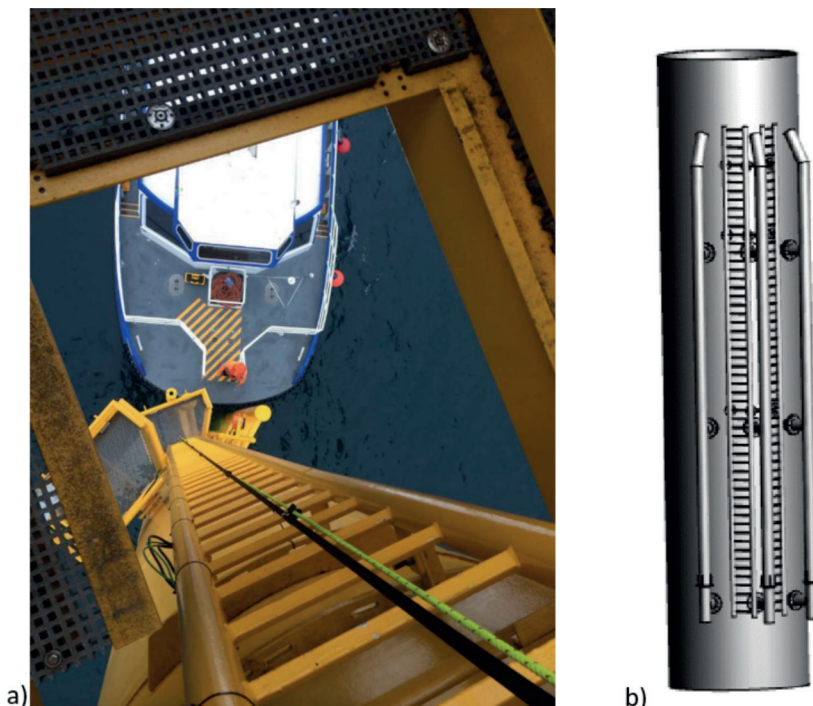


Figura 1: a) BLS típico para subestructuras de gravedad y monopilote. La figura también muestra un barco de servicio durante la aproximación al BLS; b) Esquema del BLS diseñado por el proyecto ACCEDÉ

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo recoge la investigación llevada a cabo con el objetivo de optimizar el recubrimiento protector empleado en los BLS. El recubrimiento debe ser estable en el ambiente agresivo, manteniendo su acción protectora, pero también debe ser capaz de resistir la abrasión y las cargas de impacto causadas por el barco de servicio durante las operaciones de aproximación. Tanto la abrasión como los impactos pueden eliminar el recubrimiento, exponiendo al metal de la estructura a la acción directa del ambiente marino. Esto, en materiales tales como los aceros estructurales convencionales, provoca un importante desarrollo de procesos corrosivos. Por estas razones, el comportamiento del recubrimiento se ha analizado en relación con los tres fenómenos: corrosión generalizada en ambientes agresivos, abrasión y cargas de impacto. Hay una serie de trabajos en la literatura que analizan los recubrimientos en ambientes marinos. Algunos trabajos [5-8] realizan análisis muy específicos del comportamiento de soluciones particulares contra la corrosión y/o *biofouling*, [9] proporciona una descripción teórica de los avances tecnológicos en relación a la protección frente a la corrosión empleando recubrimientos orgánicos, y [10] proporciona una revisión exhaustiva sobre las normativas offshore y una serie de especificaciones comerciales utilizadas en Alemania. Este último incluye un programa experimental que cubre corrosión, impacto, abrasión y ciclos de hielo/deshielo, entre otros, pero no está dirigido a las particularidades de los BLS y no proporciona ni sugiere una solución específica para aplicaciones particulares, como es el caso de este trabajo.

2.1. ENSAYOS DE CORROSIÓN

El primer bloque de ensayos de laboratorio se realizó con el fin de determinar los diferentes niveles de protección alcanzados mediante el empleo de 15 alternativas de recubrimientos protectores (ver Tabla 1). Estos recubrimientos se seleccionaron tras realizar una revisión de la literatura (ej. [11]), teniendo en cuenta la experiencia proporcionada por los socios del pro-

Propuesta de recubrimiento protector	Nº de probetas	Capas		
		Metalizado	Epoxi	Pintura
1	3	-	-	-
2	3	-	-	C ⁷
3	3	TSA (Proyectado metálico Aluminio), rugoso ¹ .	-	-
4	3		A ⁵	D ⁸
5	3		A ⁵ + B ⁶	E ⁹
6	3		-	C ⁷
7	3		-	-
8	3	TSA (Proyectado metálico Aluminio), normal ² .	A ⁵	D ⁸
9	3		A ⁵ + B ⁶	E ⁹
10	3	TSZ (Proyectado metálico Zinc), rugoso ³ .	-	-
11	3		A ⁵	D ⁸
12	3	-	A ⁵ + B ⁶	E ⁹
13	3	TSZ (Proyectado metálico Zinc), normal ⁴ .	-	-
14	3		A ⁵	D ⁸
15	3		A ⁵ + B ⁶	E ⁹

¹ Dos pasadas de TSA, 150 µm de espesor. 1ª pasada a 90°, 2ª pasada a 45°

² Dos pasadas de TSA, 150 µm de espesor. Dos pasadas a 90°

³ Dos pasadas de TSZ, 150 µm de espesor. 1ª pasada a 90°, 2ª pasada a 45°

⁴ Dos pasadas de TSZ, 150 µm de espesor. Dos pasadas a 45°

⁵ A: Recubrimiento epoxi puro de dos componentes, curado con poliaminas, 150 µm de espesor.

⁶ B: Recubrimiento epoxi vinílico de dos componentes, curado con poliamidas. A⁵ + B⁶: se aplican con un espesor conjunto de 150 µm.

⁷ C: Recubrimiento epóxico de dos componentes pigmentado con escamas de vidrio lamelar, 1000 µm de espesor.

⁸ D: Recubrimiento poliuretano acrílico alifático, curado químicamente, de dos componentes, 600 µm de espesor.

⁹ E: Anti-incrustante hidrolizable acrílico, de un componente basado en la tecnología de intercambio de iones, 300 µm de espesor.

Tabla 1: Descripción del programa experimental de corrosión, mostrando los 15 recubrimientos protectores iniciales

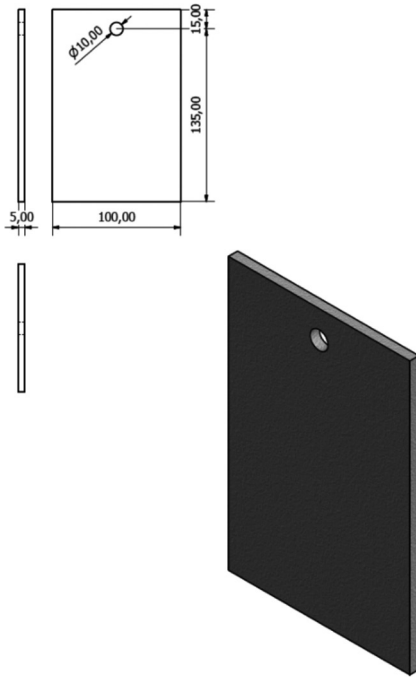


Figura 2: Geometría de las probetas empleadas en el programa experimental de niebla salina (dimensiones en mm)

yecto, y limitando los casos de estudio a aquellos cuya aplicación sea viable en la práctica desde el punto de vista técnico y económico. Se incluyen situaciones sin protección alguna (propuesta 1), y distintas combinaciones de metalizado, epoxi intermedio y pintura superficial, todas ellas aplicadas según las especificaciones del fabricante. Las propuestas 2 y 6 son las soluciones comúnmente utilizadas en la práctica, utilizando una capa de pintura (sin o con metalizado) sin capa de epoxi intermedia. La introducción de una capa de epoxi intermedia y de distintas pinturas superficiales busca mejorar el comportamiento de las soluciones actuales (propuestas 2 y 6) en unas condiciones de trabajo tan particulares y agresivas como las de los BLS..

Las 45 probetas obtenidas se ensayaron en cámara de niebla salina. Para definir las condiciones del ensayo, se simuló el entorno marino asumiendo unas condiciones C5M (según UNE-EN ISO 12944-2: 2018 [12]) durante 1440 horas (60 días). Esta duración del ensayo corresponde, según la norma UNE-EN ISO 12944-6: 2018 [13], a un requerimiento de alta durabilidad de los materiales ensayados. Los ensayos en cámara de niebla salina se realizaron siguiendo la norma UNE-EN ISO 9227: 2017 [14] ($35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \pm \text{gr/l}$ de NaCl disuelto en agua destilada, pH = 6.5-7.2, entre otras condiciones). Además, de acuerdo con la UNE-EN ISO 9227: 2017, Anexo C [14], se hicieron una serie de marcas con punzón en las probetas si-

guiendo las directrices proporcionadas por la UNE-EN ISO 17872: 2007 [15].

Todas estas condiciones y la duración de los ensayos garantizan una alta durabilidad del material en el medio marino para aquellos recubrimientos que proporcionan buenos resultados tras el ensayo. Por tanto, los ensayos en cámara de niebla salina son ensayos de corrosión acelerados llevados a cabo en un ambiente altamente agresivo. Los resultados obtenidos no aportan una relación directa entre el comportamiento del material en la cámara y el comportamiento en el ambiente marino, pero proporcionan evaluaciones cualitativas (por ejemplo, aquellas soluciones que devuelven buenos resultados en la cámara generalmente proporcionan buenos resultados en el ambiente marino), y permiten realizar una comparación en-

tre los resultados obtenidos para diferentes recubrimientos.

En la Figura 2 se muestran las dimensiones de las probetas utilizadas: geometría rectangular de 100 x 150 x 5 mm, con un orificio de 10 mm de diámetro en la parte superior. El orificio se realiza en el eje de simetría vertical a 15 mm del borde superior de la probeta.

Con el fin de comprobar la evolución de los procesos de degradación en las diferentes probetas, se tomaron fotografías de cada una de ellas cada 10 días. Así, la evolución del proceso queda recogida con 6 imágenes por probeta. Una vez terminados los ensayos, las probetas se limpiaron para eliminar los depósitos de sal, de tal forma que la inspección visual y el análisis correspondiente se pudieran hacer con mayor precisión.

Propuesta 1	
Día 0	Día 60 (tras limpieza)
Propuesta 15	
Día 0	Día 60 (tras limpieza)
Propuesta 4	
Día 0	Día 60 (tras limpieza)
Propuesta 6	
Día 0	Día 60 (tras limpieza)

Figura 3: Resultados experimentales de los ensayos en cámara de niebla salina. Propuestas 1, 15, 4 y 6

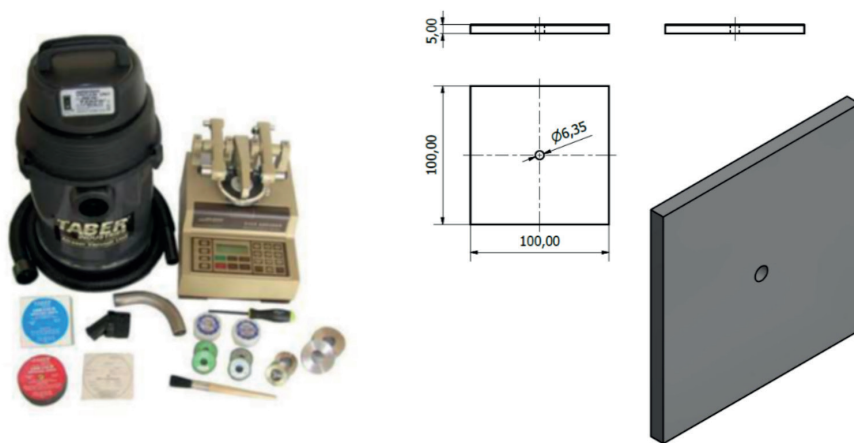


Figura 4: Abrasímetro y equipamiento auxiliar utilizado en los ensayos de abrasión (izquierda), y geometría de las probetas empleadas en el programa experimental de abrasión (dimensiones en mm) (derecha)

Las diferentes propuestas han proporcionado diferentes niveles de protección. Por razones de simplicidad, aquellas propuestas que no han proporcionado una protección adecuada frente a la corrosión (es decir, aquellas que presentan evidencias de corrosión) se han descartado como posibles soluciones de recubrimiento para el BLS. Este es el caso de las propuestas 1, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 13 y 15. La Figura 3 muestra los resultados obtenidos en el material base sometido a la acción directa del ambiente de la cámara de niebla salina (ausencia de recubrimiento, propuesta 1), y los resultados obtenidos con la propuesta 15, como ejemplo de las soluciones que ofrecen unos niveles de protección bajos.

El resto de las propuestas han proporcionado una buena protección frente a la corrosión (es decir, no hay evidencias de corrosión después del ensayo en cámara de niebla salina). Se pueden clasificar en dos grupos:

- Aquellos que combinan el recubrimiento de epoxi puro de dos componentes (A) curado con poliamina y el recubrimiento superior de poliuretano acrílico alifático de dos componentes y curado químico (D), con TSA y TSZ (normal y rugoso) (propuestas 4, 8, 11 y 14). En estos casos, tras 60 días de exposición en la cámara de niebla salina las muestras están intactas (ver Figura 3).
- Aquellos que emplean un recubrimiento de epoxi de dos componentes pigmentado con escamas de vidrio lamelar, aplicado sobre TSA (propuesta 6, ver Figura 3), o aplicado directamente sobre el material estructural (propuesta 2). Estas probetas no muestran signos de corrosión, y solo presentan un ligero cambio de color del recubrimiento. Estas dos opciones corresponden a las soluciones más empleadas

actualmente en la mayoría de los BLS. Ambas propuestas se ensayaron además a abrasión e impacto para comprobar si podían mantener su integridad (y, por lo tanto, su capacidad protectora) cuando se someten a tales demandas mecánicas,

mostrándose debajo el proceso seguido y los resultados obtenidos.

2.2. ENSAYOS DE ABRASIÓN

La abrasión generada en los BLS viene causada por el contacto que se produce entre el barco de servicio y el BLS durante las operaciones de mantenimiento. Esta abrasión puede eliminar el recubrimiento protector, exponiendo así al material a la degradación del mismo por acción directa del ambiente marino. Por lo tanto, la caracterización frente a la abrasión de los diferentes recubrimientos analizados es clave para seleccionar el mejor recubrimiento a emplear en los BLS.

Los ensayos de abrasión se llevaron a cabo utilizando un abrasímetro Taber, según UNE-EN ISO 7784-1: 2016 [16]. Los 6 recubrimientos ensayados son aquellos que previamente habían proporcionado un comportamiento adecuado en la cámara niebla salina: propuestas 2, 4, 6, 8, 11 y 14 (Tabla 1). Se ensayaron 3 probetas

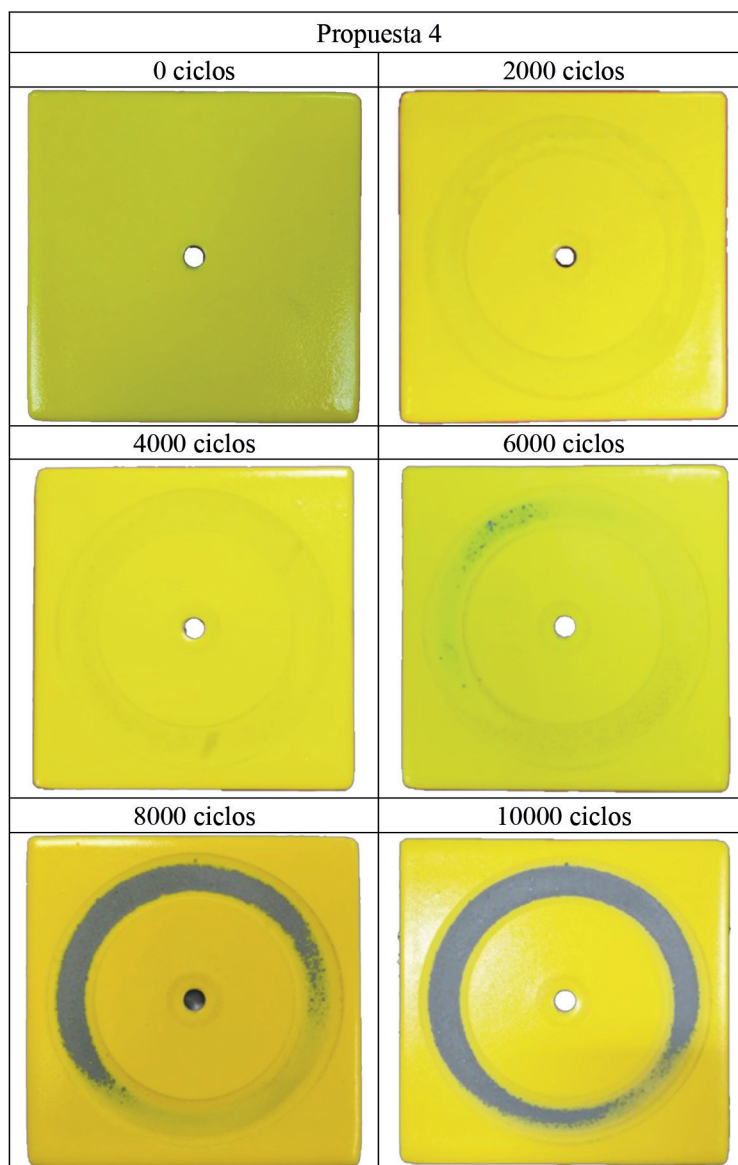


Figura 5: Resultados experimentales de un ensayo de abrasión. Propuesta 4

por propuesta de recubrimiento (18 en total). Las dimensiones de las probetas fueron de 100 x 100 x 5 mm, con un orificio de 6.35 mm de diámetro en el centro (ver Figura 4) para el acople de las probetas al abrasímetro.

Las probetas se sometieron al efecto de la abrasión en 5 bloques de 2000 ciclos cada uno, a 60 r.p.m. Cada ciclo consiste en un giro de 360° de la probeta, alrededor de su punto central, sujeto a la acción de dos muelas paralelas, que generan una huella circular en la probeta ensayada (ver Figura 5). Después de cada bloque, se midió la reducción del espesor del recubrimiento y se tomaron fotografías.

La Figura 5 muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la huella producida por la abrasión de las muelas en una de las probetas ensayadas (propuesta 4, ver Tabla 1). En este caso, se puede observar cómo la capa superior comienza a eliminarse tras 6000 ciclos, siendo la pérdida progresiva hasta que finaliza el ensayo. En cualquier caso, la capa de epoxi intermedia permanece en la probeta, con la capa TSA totalmente cubierta. La Figura 6a muestra la evolución del espesor a lo largo de uno de los ensayos realizados para la propuesta 4. Este comportamiento fue prácticamente similar para las propuestas que combinan el recubrimiento de epoxi puro de dos componentes curado con poliaminas y el recubrimiento de poliuretano acrílico alifático de dos componentes con curado químico (propuestas 8, 11 y 14).

Los resultados obtenidos para las propuestas 2 y 6 (revestimiento epoxi de dos componentes pigmentado con escamas de vidrio lamelar) son similares, en el sentido de que al final de los ensayos, el material se mantiene protegido. Sin embargo, la pérdida de espesor es aproximadamente la mitad de la observada en las propuestas 4, 8, 11 y 14 (300 μm frente a 600 μ, ver Figura 6b).

Además, 6 de las probetas ensayadas a abrasión (dos por cada revestimiento analizado, propuestas 2, 4 y 6) se ensayaron posteriormente en la cámara de niebla salina, en las mismas condiciones que las explicadas en la sección 2.1 [14]. Esto permite comprobar el comportamiento de las probetas en ambientes agresivos tras ser sometidas a un proceso de abrasión. En los tres casos se observó que la acción protectora permaneció intacta, sin signos de corrosión al finalizar los ensayos.

2.3. ENSAYOS DE IMPACTO

El programa experimental se completó con los ensayos de impacto. Como se ha mencionado anteriormente, la aproxima-

ción del barco de servicio al BLS también puede producir impactos con la estructura, eliminando así el revestimiento y exponiendo al material de la estructura a la degradación directa del ambiente marino. El ensayo *ad-hoc* desarrollado consiste en una maza de 15.9 kg que golpea a la

probeta ensayada tras una rotación de 90° (ver Figura 7a) alrededor de un eje de 850 mm. La probeta se coloca entre dos apoyos, lo que permite su doblado durante el impacto. Cada probeta fue sometida a 10 impactos. La geometría de las mismas (600 x 250 x 5 mm) se muestra en la Fi-

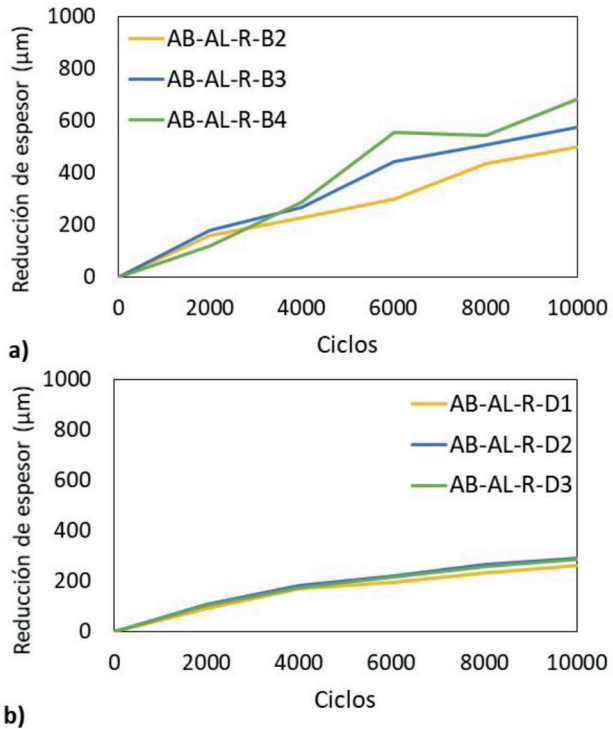


Figura 6: Resultados de los ensayos de abrasión (reducción de espesor): a) propuesta 4; b) propuesta 6

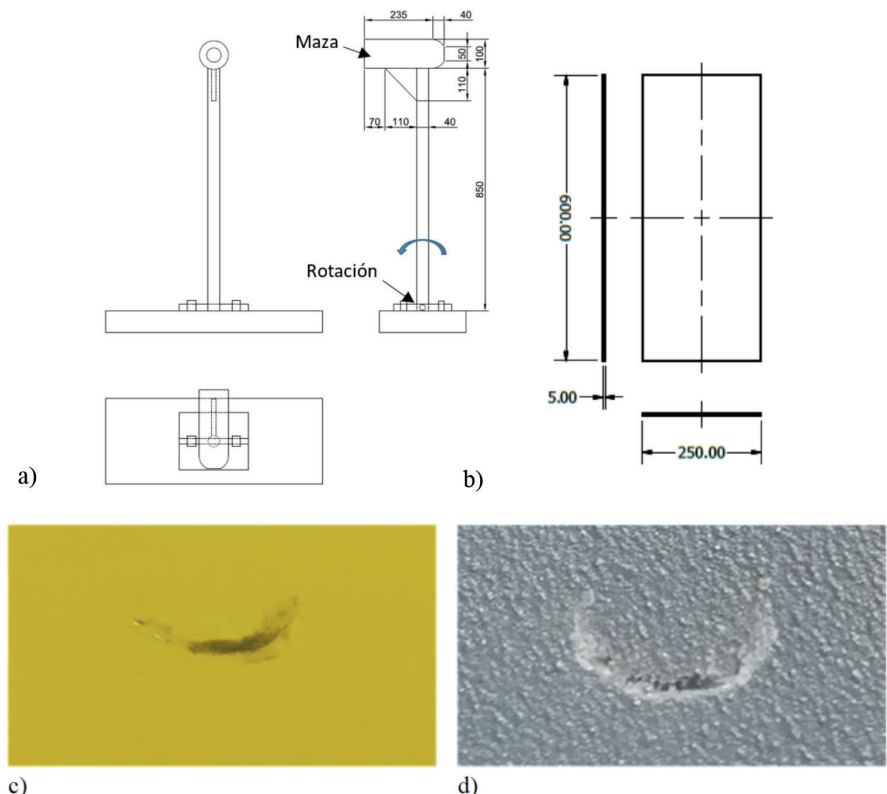


Figura 7: a) Esquema del dispositivo experimental empleado en los ensayos de impacto. Dimensiones en mm; b) Geometría de las probetas empleadas en los ensayos de impacto. Dimensiones en mm; c) propuesta 4 tras 10 impactos; d) propuesta 6 tras 10 impactos.

gura 7b. De esta manera, el ensayo, que no representa exactamente las condiciones del impacto entre el BLS y el barco de servicio, sí permite una comparación cualitativa entre las distintas soluciones de sistemas de protección ensayados.

Se ensayaron a impacto los mismos 6 recubrimientos ensayados frente a la abrasión (propuestas 2, 4, 6, 8, 11 y 14), ya que los resultados obtenidos de los ensayos de abrasión no fueron concluyentes (es decir, las 6 soluciones proporcionaron una respuesta adecuada frente a la abrasión). Se ensayaron dos probetas por propuesta: una de ellas se ensayó estableciendo contacto directo entre el metal (acero) de la maza y la capa de protección de cada muestra, y la otra se ensayó colocando un recubrimiento de goma sobre la maza (simulando así el contacto real entre el BLS y el barco de servicio).

Los resultados muestran que cuando se emplea la maza con la protección de caucho, la superficie de las probetas no mostraba evidencias significativas de los impactos en ninguna de las 6 propuestas de recubrimiento ensayadas.

Sin embargo, cuando el impacto se produce sin el caucho (situación extrema en campo), los resultados obtenidos para las probetas que combinan el recubrimiento de epoxi puro de dos componentes curado con poliamina (A) y la capa superior de poliuretano acrílico alifático de dos componentes con curado químico (D) (propuestas 4, 8, 11 y 14) fueron mucho mejores que los obtenidos para las propuestas 2 y 6, que solo usan un revestimiento epoxi de dos componentes pigmentado con escamas de vidrio lamelar (solución muy común empleada actualmente en los diseños de los BLS): el primer grupo de propuestas presentaban las marcas del impacto de la maza contra la probeta, pero el revestimiento se deformó plásticamente, manteniendo así la protección del material (ver Figura 7c), mientras que en el segundo grupo la pintura se desprendió debido a su comportamiento frágil, quedando así el metal (propuesta 2) o el TSA (propuesta 6, ver Figura 7d) expuesto a la hipotética acción directa del ambiente.

3. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido la definición de un revestimiento protector de los sistemas de *boat landing* (BLS) que proporcione, al mismo tiempo, una protección adecuada frente a la corrosión y una buena resistencia frente a la abrasión y a las cargas de impacto generadas por

los barcos de servicio utilizados en las operaciones de aproximación a las plataformas eólicas.

Inicialmente se establecieron 15 propuestas (incluida la propuesta 1, material sin protección), que posteriormente se sometieron a ensayos en cámara de niebla salina, de abrasión y de impacto. Los ensayos en la cámara de niebla salina redujeron el número de soluciones posibles a seis, dado que nueve de las propuestas tuvieron un comportamiento deficiente frente a estos ensayos de corrosión acelerada. Cuatro de estas soluciones restantes combinaron un recubrimiento por proyectado térmico seguido de un recubrimiento epoxi puro de dos componentes curado con poliaminas y un recubrimiento de poliuretano acrílico alifático, curado químicamente, de dos componentes, mientras que las otras dos propuestas utilizaron un único recubrimiento de epoxi de dos componentes pigmentado con escamas de vidrio lamelar (con y sin proyectado térmico de aluminio). Los ensayos de abrasión fueron favorables para estas seis propuestas, por lo que ninguna de ellas se descartó a pesar de que las soluciones que emplean una sola capa de epoxi experimentaron una menor reducción del espesor del recubrimiento. Finalmente, los ensayos de impacto revelaron que las cuatro soluciones que combinan el epoxi y la capa superior de poliuretano tenían un comportamiento mucho mejor frente a las cargas de impacto, debido a su capacidad para deformarse plásticamente sin desprenderse y, por lo tanto, mantener la integridad del revestimiento protector.

Con todo esto, la(s) solución(es) propuesta(s) para los recubrimientos a emplear en los BLS es la siguiente: un recubrimiento por proyectado térmico (TSA o TSZ) seguido de un recubrimiento epoxi puro de dos componentes curado con poliaminas y un recubrimiento de poliuretano acrílico alifático, curado químicamente, de dos componentes.

REFERENCIAS

- [1] Offshore Wind in Europe. "Key trends and statistics" 2017. WindEurope. Brussels. 2018
- [2] Stumpf HP, Hu B. "Offshore Wind Access 2018". ECN. Petten. Netherlands. 2018
- [3] Kaesche H. "Corrosion of Metals: Physicochemical Principles and Current Problems", Springer-Verlag. Berlin. Germany. 2003
- [4] Popov B. "Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems", Elsevier. Amsterdam. Netherlands. 2015
- [5] Shaterian M, Khoobi A, Enhessari M, Ozaee K. "A new strategy based on thermodiffusion of ceramic nanopigments into metal surfaces

- and formation of anti-corrosion coatings". Microporous and Mesoporous Materials. 2015. Vol.218. p.62-68. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.06.039>)
- [6] Förg A, Wolf G, Dotzler K, Libralesso L, Masset PJ. "Al-Mn thermally sprayed coatings as replacement of Cd-based coatings". Materials Science Forum. 2015. Vol.825-826. p.613-620. (doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.613>)
- [7] Mubarak F, Armada S, Fagoaga I, Espallargas N. "Thermally sprayed SiC coatings for offshore wind turbine bearing applications". Journal of Thermal Spray Technology. 2013. Vol.22. p.1303-1309. (doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9991-y>)
- [8] Yoshida K, Kanematsu H, Kuroda D, Ikigai H, Kogo T, Yokoyama S. "Biofouling of Cr-Nickel spray coated films on steel structures". Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol.352. Art.number.012031 (doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012031>)
- [9] Olajire AA. "Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures". Journal of Molecular Liquids. 2018. Vol.269. p.572-606. (doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.053>)
- [10] Momber AW, Marquardt T. "Protective coatings for offshore wind energy devices (OWEAs): a review". Journal of Coatings Technology and Research. 2018. Vol.15. p.13-40. (doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-017-9979-5>)
- [11] Schweitzer PA. "Paint and Coatings: Applications and Corrosion Resistance". Taylor and Francis. Boca Raton. FL. 2005
- [12] UNE-EN ISO 12944-2:2018. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 2: Clasificación de ambientes. AENOR. Spain. 2018
- [13] UNE-EN ISO 12944-6:2018. Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 6: Ensayos de comportamiento en laboratorio. AENOR. Spain. 2018
- [14] UNE-EN ISO 9227:2017. Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina. AENOR. Spain. 2017
- [15] UNE-EN ISO 17872:2007. Pinturas y barnices. Líneas directrices para la realización de incisiones a través de los recubrimientos aplicados sobre probetas metálicas para realizar ensayos de corrosión. AENOR. Spain. 2007
- [16] UNE-EN ISO 7784-1:2016. Pinturas y barnices. Determinación de la resistencia a la abrasión. Parte 1: Método de ruedas revestidas con papel abrasivo y panel de ensayo rotativo. AENOR. Spain. 2016.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo querían mostrar su gratitud a SODERCAN SA y FEDER por la financiación recibida del proyecto ACCEDE: DESARROLLO DE NUEVOS SISTEMAS DE ACCESO A PLATAFORMAS EÓLICAS OFFSHORE (RM16-XX-028 - SODERCAN/FEDER), en la que se basan los resultados de este artículo.