

# Estructuras de hormigón armado en ambiente marino. Armaduras alternativas a las convencionales de acero al carbono

## Reinforced Concrete Structures in Marine Environment. Alternative Reinforcing Bars to Conventional Carbon Steel Rebar

Laura Juárez<sup>1</sup>, Laura Rodríguez<sup>2</sup>, Asunción Morales<sup>3\*</sup>

### Resumen

Los requisitos de sostenibilidad de las estructuras que hoy día se demandan hacen que sea necesario buscar soluciones a los problemas que más afectan a su durabilidad. En el caso de las estructuras de hormigón armado, esos problemas van fundamentalmente ligados a la corrosión de las armaduras de acero. Pueden ser varias las causas que originen este proceso, pero, en todo caso, los cloruros de ambiente marino son uno de los principales motivos que provocan y desarrollan la corrosión de las armaduras y los consecuentes efectos negativos sobre la estructura de hormigón.

En este artículo se resumen las características y propiedades de algunas alternativas que pueden sustituir al acero al carbono en las estructuras de hormigón armado: materiales resistentes a la corrosión (acero inoxidable y polímeros reforzados con fibras de vidrio) y revestimientos resistentes a la corrosión (acero galvanizado); y se presentan como ejemplos algunas obras, principalmente en el ámbito costero español, en las que se han empleado este tipo de armaduras.

Finalmente, se hace un estudio de la importancia que tiene el incorporar las operaciones de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras dañadas por corrosión en el análisis del ciclo de vida. Recogiendo datos disponibles en la bibliografía, se ha podido valorar como los costes operacionales (económicos, medioambientales y sociales), en los que se incurre durante la vida en servicio de una estructura de hormigón dañada por la corrosión, son determinantes en el resultado comparativo de los análisis del ciclo de vida (LCC y LCA) de las distintas alternativas, en beneficio siempre de las armaduras de materiales menos corrosibles.

**Palabras clave:** acero galvanizado, acero inoxidable, GFRP, sostenibilidad, durabilidad, LCC, LCA.

### Abstract

*The sustainability requirements of structures that are demanded today make it necessary to seek solutions to problems that affect the most their durability. In the case of reinforced concrete structures, these problems are fundamentally linked to the corrosion of the steel reinforcements. There may be several causes that lead to this process, but, in any case, chlorides in the marine environment are one of the main reasons that cause and develop corrosion of the reinforcement and the consequent negative effects on the concrete structure.*

*This article summarizes the characteristics and properties of some alternatives that can replace carbon steel in reinforced concrete structures: corrosion-resistant materials (stainless steel and glass-fibre reinforced polymers) and corrosion-resistant coatings (galvanized steel); and some works, mainly in the Spanish coastal area, in which this type of reinforcement has been used are presented as examples.*

*Finally, a study of the importance of incorporating maintenance and rehabilitation operations of structures damaged by corrosion in the life cycle analysis is made. By collecting data available in the bibliography, it has been possible to assess how the operational costs (economic, environmental, and social), which are incurred during the service life of a concrete structure damaged by corrosion, are determining factors in the result of the comparison of the life cycle analysis (LCC and LCA) of the different alternatives. It always benefits reinforcements made of less corrodible materials.*

**Keywords:** Galvanized steel, stainless steel, GFRP, sustainability, durability, LCC, LCA.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El problema de deterioro más frecuente y grave de las estructuras de hormigón armado, que dificulta garantizar su durabilidad, es la **corrosión de las armaduras** de acero al carbono tradicional, lo que supone la pérdida de sección resistente de las barras y alambres, así como la aparición de tensiones internas, debido al aumento de volumen originado por los subproductos de corrosión con la consiguiente fisuración y desconchado o exfoliación del hormigón de recubrimiento.

Para evitar las consecuencias derivadas de la corrosión de las barras de acero, se ha trabajado fundamentalmente

\* Autora de contacto: [lc.productos.de.construccion@cedex.es](mailto:lc.productos.de.construccion@cedex.es)

<sup>1</sup> Ingeniera de caminos, canales y puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM), del CEDEX.

<sup>2</sup> Doctora en Ciencias Físicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM), del CEDEX.

<sup>3</sup> Doctora por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM), del CEDEX.

en la dosificación de los hormigones, buscando conseguir una mayor compacidad en la masa, para impedir tanto la entrada de humedad y CO<sub>2</sub> atmosférico como la entrada de agentes agresivos. Los primeros, disminuyen la alcalinidad del hormigón originada por el cemento y, por tanto, su protección pasivante, y los segundos, provocan o coadyuvan a desencadenar el proceso corrosivo.

Dado que los cloruros son uno de los agentes más dañinos, debido a que destruyen la capa pasivante que protege la superficie del acero, la exposición de las armaduras será más crítica en ambientes donde la presencia de estos compuestos sea mayor y más probable; como es el caso de las estructuras portuarias, por la exposición al agua marina, y el de los tableros de puentes en zonas de frecuentes heladas, por la exposición a las sales para el deshielo. También puede ser un problema importante en cualquier otro tipo de estructura de hormigón armado expuesta a cloruros, sulfatos u otros elementos agresivos.

Este artículo está enfocado a la problemática de la corrosión de las estructuras de hormigón armado en ambiente marino, aunque muchos de sus comentarios y conclusiones son aplicables a cualquier otro tipo de estructura.

La protección de las armaduras frente a la corrosión obliga a diseñar elementos estructurales con recubrimientos mayores, dosificaciones que eviten la pérdida de alcalinidad del hormigón y mezclas con componentes de mejores prestaciones, usando mayores cantidades de cemento, aditivos o adiciones especiales. Como alternativa o, si fuera el caso, complemento a estas medidas anticorrosivas, se plantea la posibilidad de **uso de armaduras distintas a las de acero al carbono convencional**. En concreto, en este artículo se revisan las propiedades y situación práctica de las siguientes tipologías:

- Armaduras galvanizadas de acero al carbono.
- Armaduras de acero inoxidable.
- Armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP).

El planteamiento de este artículo se basa en una revisión bibliográfica con los objetivos de:

- Analizar las propiedades físico-mecánicas de cada tipología de armadura y ponerlas en comparación con las de las armaduras de acero tradicional.
- Exponer las mejoras que aportan las armaduras alternativas a la durabilidad del hormigón, y su influencia en el coste e impacto medioambiental durante la vida útil de las estructuras, considerando tanto la fase de construcción como la de servicio.
- Reseñar algunas estructuras relevantes y conocidas, ubicadas en ambiente marino, en su mayoría en territorio español, en las que se hayan empleado alguna de las mencionadas tipologías de armaduras alternativas.

## 2. ARMADURAS GALVANIZADAS DE ACERO AL CARBONO

El galvanizado consiste en el recubrimiento de la barra de armadura, normalmente de acero al carbono convencional, por varias capas de aleación hierro-cinc, en las que

el contenido de cinc aumenta con la proximidad a la superficie exterior. El proceso de galvanización se produce en un baño de cinc fundido entre 440 y 465 °C, durante el cual se produce la reacción superficial entre el hierro y el cinc, resultando varias capas de aleaciones metalúrgicamente unidas al acero base.

El galvanizado puede ser parte del proceso integral de fabricación de la barra o realizarse en barras ya terminadas y elaboradas según su respectiva norma de producto, en función del acero base de que se trate. En ambos casos, es fundamental garantizar la adherencia del acero con su revestimiento galvánico.

Las características del acero base influyen notablemente en la calidad de los revestimientos galvanizados; y entre ellas, la rugosidad superficial, que afecta a la reactividad y a la adherencia con el sustrato, y las tensiones internas previas al galvanizado, que se pueden liberar durante el proceso y producir deformaciones; pero la característica más influyente es la composición química y, en concreto, los contenidos de silicio y fósforo, y, en menor medida, de carbono, que son los que determinan la reactividad entre hierro y cinc y, por tanto, el espesor final de las capas de aleación. Contenidos de silicio entre 0,03 y 0,14 %, o superiores a 0,25 %, producen revestimientos más gruesos que pueden llegar a desprenderse del sustrato de acero; el efecto es similar en aceros con alto contenido de fósforo y contenido de silicio inferior a 0,03 %.

La galvanización en caliente cuenta con normativa específica en la que se establecen sus requisitos mínimos. Las normas más significativas son la UNE-EN ISO 1461 [1], que define las propiedades generales y los métodos de ensayo de los recubrimientos aplicados por inmersión de productos de hierro y acero y también las especificaciones relativas a la composición del baño de cinc, aunque no es de aplicación, entre otros productos, a alambres galvanizados en continuo o, en general, a aquellos para los que existan normas específicas; y la UNE-EN ISO 14713-2 [2], que ofrece directrices y recomendaciones respecto a los principios generales de diseño adecuados a las piezas que van a ser galvanizadas en caliente después de su fabricación; como por ejemplo, los aceros para armaduras, elaborados según UNE-EN 10080 [3] o UNE-EN 10348-2 [4], y las piezas fabricadas según la norma UNE-EN ISO 1461 [1].

### 2.1. Características de las armaduras de acero galvanizado

El **acero base** de las armaduras galvanizadas es normalmente el mismo tipo de acero que el de las armaduras tradicionales. Dicho acero no sufre modificaciones sustanciales durante el proceso de galvanización, por lo que su **comportamiento físico-mecánico** y requisitos exigibles a las armaduras son también los mismos. Así, al coincidir prácticamente con las barras convencionales, las características mecánicas de las barras de acero galvanizado son muy conocidas, y su uso deja poco margen a la incertidumbre. Como característica adicional, únicamente debe controlarse la continuidad, el espesor y la composición de las capas de aleación. El Código Estructural [5] señala que las armaduras galvanizadas deben cumplir los mismos requisitos, tanto mecánicos como de adherencia, que los prescritos para las armaduras pasivas de acero al carbono. Una vez montadas las armaduras galvanizadas, también deben

cumplir las mismas exigencias que las prescritas para las armaduras pasivas convencionales.

La **adherencia con el hormigón** es similar a la del acero sin recubrimiento, siempre y cuando se evite durante el galvanizado la acumulación de cinc en la zona de contacto de la corruga con la superficie circular de la barra. Respecto a la acumulación de cinc, la norma UNE-EN 10348-2 [4], dedicada al acero galvanizado para armaduras, indica que los resaltos superficiales, tanto corrugas como grafilas, no deben ver disminuida su altura o profundidad en más de un 95 % tras el proceso de galvanizado. Este efecto podría perjudicar tanto a la adherencia como a la resistencia a cortante.

Respecto a la posible pérdida de adherencia a edades tempranas del hormigón, cuando está aún fresco, hay que tener en cuenta que los álcalis del cemento pueden disolver el cinc debido a la reacción de éste con el agua alcalina de los poros. Durante el proceso de fraguado, puede existir una fase activa de corrosión del cinc, en la que combinado con el agua formaría hidróxido de cinc y se desprendería hidrógeno. El hidróxido de cinc formado no tiene capacidad adecuada para proteger contra la corrosión y el resultado puede ser una pérdida uniforme de cinc de unas 5 a 10  $\mu\text{m}$ . Con el aumento del pH, cuando los cementos son más alcalinos, aumenta el tiempo de disolución y corrosión antes del endurecimiento y el metal de cinc podría no resultar suficientemente pasivado durante un tiempo largo, lo que podría provocar, además de la pérdida de espesor, la disminución de la adherencia con el hormigón y la resistencia a cortante. En una segunda fase, el hidróxido de cinc se combinaría con hidróxido cálcico, resultando como segundo producto de corrosión una película protectora de hidroxincato cálcico. Estos productos sí pasivan el metal de cinc y detienen la pérdida del revestimiento y el desprendimiento del hidrógeno.

Respecto al **doblado de las armaduras galvanizadas**, no se recomienda realizarlo tras la galvanización, ya que se puede producir fisuración, especialmente si los revestimientos son de gran espesor. El galvanizado, se realiza generalmente después del doblado, si bien es cierto que se puede producir la fragilización del acero en la zona que ha sido estirada en frío, debido al gradiente térmico durante la galvanización. La norma UNE-EN 10348-2 [4] indica los diámetros mínimos de doblado para disminuir la susceptibilidad a este fenómeno. El beneficio de reducción de recubrimientos mínimos de hormigón que otorga el Código Estructural [5] cuando se emplean armaduras galvanizadas, no aplica cuando el doblado se realiza después del proceso de galvanización.

En cuanto a la **soldabilidad**, las barras corrugadas de acero galvanizado se pueden soldar de la misma forma que las barras de acero al carbono, pero conviene tomar una serie de precauciones con relación a la velocidad de soldeo, que, en general, debe ser más baja de lo normal para que no se generen poros debido al cinc y gases evaporados que no tienen tiempo de eliminarse antes de que se produzca la solidificación del metal.

Puede ser recomendable galvanizar después de soldar, o retirar la capa de cinc antes. En este segundo caso, y especialmente si la parte eliminada es grande, sería necesario su restauración mediante pintura epoxi, pintura rica en cinc o mediante otros medios de protección adicionales.

## 2.2. Durabilidad de las armaduras de acero galvanizado

La **durabilidad** de las barras con recubrimiento galvanizado es mayor que la correspondiente a las de acero convencional. Los revestimientos en base cinc protegen de la corrosión mediante el efecto barrera, la protección catódica y el efecto autocicatrizante. A pesar de esta triple protección, el mayor problema de durabilidad que pueden presentar las armaduras galvanizadas sería el ocasionado por la falta de continuidad del revestimiento, bien por defectos de ejecución o por daños debidos a su pérdida o deterioro posterior. La posibilidad de que ocurra este tipo de daños es la que limita las operaciones de elaboración de la ferralla después del galvanizado.

La protección es directamente proporcional al espesor, siendo la velocidad de corrosión del cinc inferior a la del acero, entre 15 y 50 veces. Mientras hay cinc, el acero no se corroe. Además, los productos de corrosión del cinc son menos voluminosos y más solubles que los del acero al carbono, por lo que la exfoliación y el desconchado del hormigón son también menos acusados.

El dato más relevante es el valor medio del espesor de revestimiento, que suele estar en el rango de 85 a 87  $\mu\text{m}$ , lo cual equivale a 600 a 610  $\text{g}/\text{m}^2$  de masa de recubrimiento. En algunos países se limita además el espesor máximo en el orden de unas 200  $\mu\text{m}$ . En el Código Estructural [5], se indica exclusivamente que el espesor de galvanizado no podrá ser menor de 70  $\mu\text{m}$ , equivalente a 505  $\text{g}/\text{m}^2$ . Además, para garantizar la durabilidad, se puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón en sólo 10 mm, siempre que la galvanización se haya producido posteriormente a la elaboración de la ferralla; y, en todo caso, se debe evitar el contacto con armadura convencional de acero al carbono y así garantizar que no se formen pilas galvánicas. Durante el fraguado, el cinc está activo y su potencial de corrosión es bajo, pero al conectar las dos armaduras, la velocidad de corrosión del cinc aumenta. Una vez formada la capa protectora de cinc, aumenta su potencial y la diferencia de potencial de ambos metales disminuye con lo que el riesgo de efectos nocivos de la conexión galvánica se reduce, pero sólo si el hormigón está libre de cloruros [6].

En un **hormigón carbonatado**, las pérdidas por corrosión de las barras de acero galvanizado son menores que las que se producen en el acero al carbono; ya que la pérdida de la capa de cinc es bastante uniforme y se produce a una velocidad muy baja; por tanto, se ralentiza la aparición de fisuras y el desconchado de hormigón. Cuanto menos denso sea el hormigón y más pequeño el recubrimiento de la armadura, más ventajoso puede llegar a ser el empleo de armaduras galvanizadas.

La **corrosión por cloruros** en un acero galvanizado es en forma de picaduras. Las capas de aleación cinc-hierro son ligeramente menos resistentes al ataque por cloruros que la capa de cinc puro, por lo que los revestimientos de cinc que no tuvieran esa capa externa se disociarían más rápidamente. Entre los iones cloruro que pueden atacar el revestimiento de cinc hasta llegar a despasivarlo se pueden distinguir aquellos añadidos en la mezcla, que estarán presentes durante la formación de la capa pasivante, y los que penetran en el hormigón desde exterior. Los primeros son más perjudiciales, ya que pueden atacar el revestimiento

antes y durante la formación de la citada capa protectora. En cambio, los segundos, penetrarán desde el exterior una vez formada esta capa, por lo que serán menos agresivos. El Código Estructural [5], para obras de hormigón armado expuestas a ambiente marino, limita la aportación del ion cloruro de todos los componentes del hormigón al 0,2 % del peso del cemento.

El contenido crítico de cloruros para el inicio de la corrosión es, en el caso de las barras corrugadas de acero galvanizado, mayor que en el caso de las barras de acero al carbono. En algunas publicaciones [7] se ha indicado como valor de referencia de 2 a 2,5 veces mayor; o incluso hasta 3 o 4 veces. En todo caso, tal y como se comenta en el Código Estructural [5], para conocer el límite máximo de cloruros en cada caso particular, se deben llevar a cabo trabajos experimentales según UNE 83992-2 [8], realizados con los componentes del hormigón con los que se vayan a emplear cada tipo de armaduras. La mejora resultará especialmente significativa en hormigones carbonatados y no muy densos.

Los beneficios que otorga la reglamentación a las armaduras galvanizadas no son muy significativos, principalmente debido a que la mejora de durabilidad es muy sensible a defectos en el recubrimiento de cinc. Cualquier causa que produzca su fisuración podría mermar su protección frente a la corrosión.

### 2.3. Estructuras más relevantes en el ámbito costero español con armaduras galvanizadas

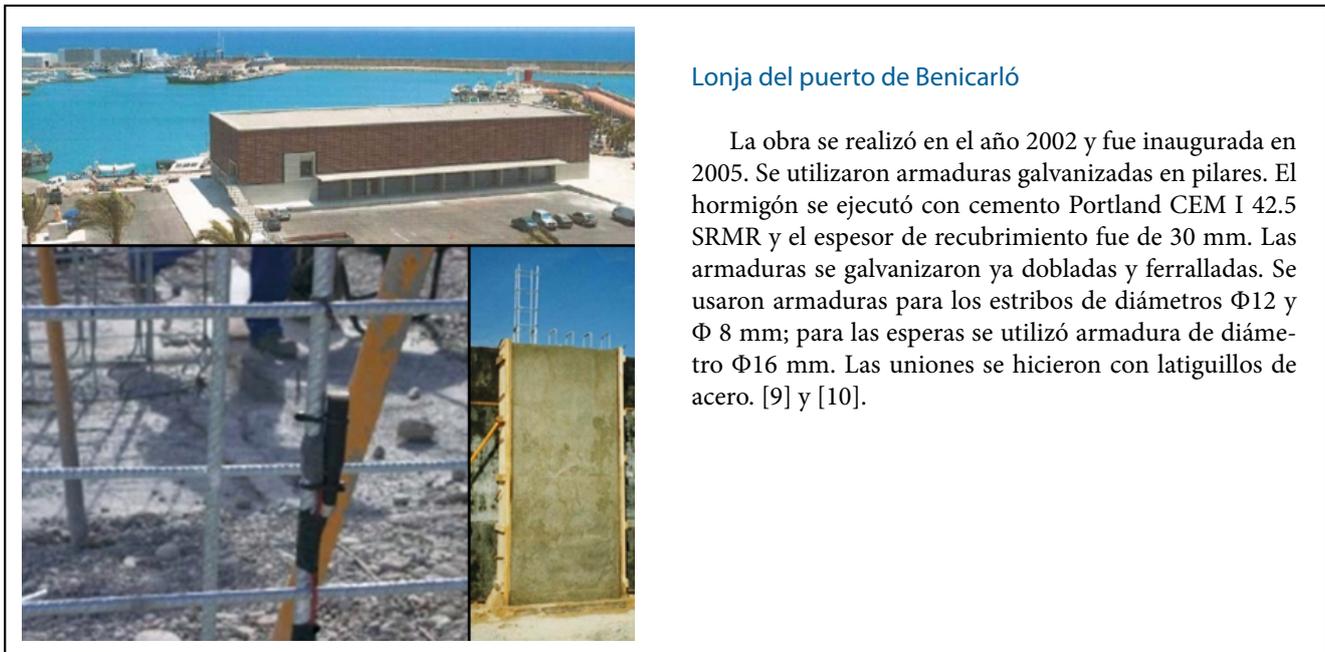
En general, a nivel internacional, las realizaciones más numerosas se han identificado en estructuras costeras y marinas como muelles y rompeolas; infraestructuras de transporte, tableros de puentes, dársenas y puertos deportivos; instalaciones para el tratamiento de agua, postes de iluminación y centrales eléctricas. Como ejemplo de estructuras de hormigón armado representativas del refuerzo con este tipo de armaduras en España se presentan a continuación algunas construcciones realizadas en puertos de la Generalitat Valenciana.



#### Estación marítima de Denia

La obra se realizó en el año 2011 y fue inaugurada en marzo de 2013. Se trata de una edificación con un total de 54.845 m<sup>2</sup> de los cuales 2.300 m<sup>2</sup> corresponden al propio edificio de tres alturas y el resto a tres muelles de atraque, campa, aparcamientos y superficies contiguas. Se utilizaron armaduras de acero al carbono en su mayor parte, y se destinaron las galvanizadas exclusivamente para las zonas de exposición más agresiva, principalmente en los pilares. Además, el hormigón (HA-50/F/20/IIIa) se dosificó con un inhibidor de la corrosión (CHRYSO Cl dosificado: 6,4 l/m<sup>3</sup>). [9] y [10].

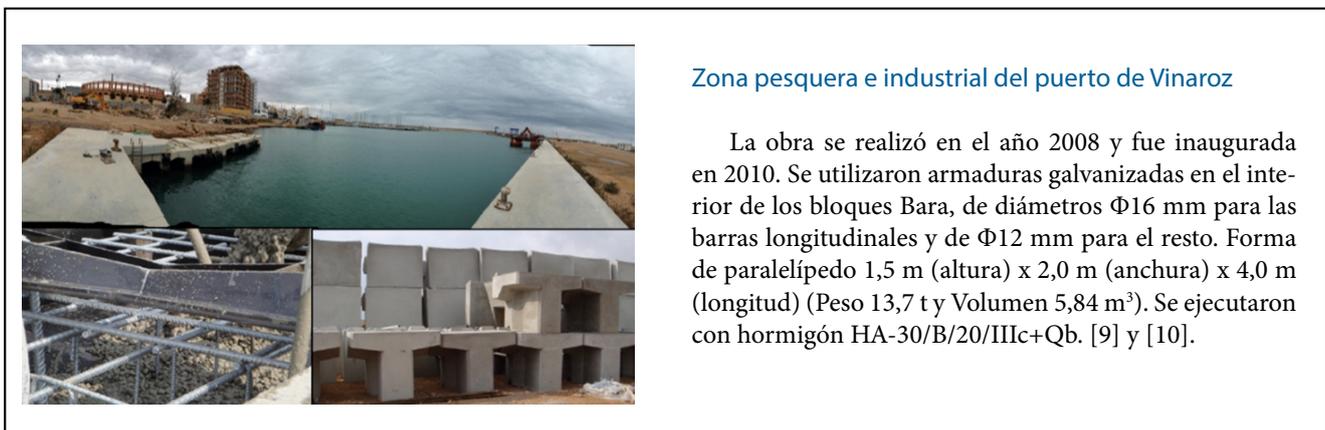
**Figura 1.** Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes del hormigonado y del estudio de durabilidad realizado por el IETcc-CSIC © [9].



### Lonja del puerto de Benicarló

La obra se realizó en el año 2002 y fue inaugurada en 2005. Se utilizaron armaduras galvanizadas en pilares. El hormigón se ejecutó con cemento Portland CEM I 42.5 SRMR y el espesor de recubrimiento fue de 30 mm. Las armaduras se galvanizaron ya dobladas y ferralladas. Se usaron armaduras para los estribos de diámetros  $\Phi 12$  y  $\Phi 8$  mm; para las esperas se utilizó armadura de diámetro  $\Phi 16$  mm. Las uniones se hicieron con latiguillos de acero. [9] y [10].

Figura 2. Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes y después del hormigonado © [9].



### Zona pesquera e industrial del puerto de Vinaroz

La obra se realizó en el año 2008 y fue inaugurada en 2010. Se utilizaron armaduras galvanizadas en el interior de los bloques Bara, de diámetros  $\Phi 16$  mm para las barras longitudinales y de  $\Phi 12$  mm para el resto. Forma de paralelepípedo 1,5 m (altura) x 2,0 m (anchura) x 4,0 m (longitud) (Peso 13,7 t y Volumen 5,84 m<sup>3</sup>). Se ejecutaron con hormigón HA-30/B/20/IIIc+Qb. [9] y [10].

Figura 3. Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes y después del hormigonado © [9].

## 3. ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

Según la norma UNE-EN 10088-1 [11], los aceros inoxidables son aquellos que contienen al menos un 10,5 % de cromo y un máximo de 1,2 % de carbono. Este contenido de cromo permite la formación de una capa muy fina de óxido que los autoprotege. En la tabla 1, se incluye el porcentaje de los elementos principales de aleación de los aceros inoxidables según su microestructura, incluyendo exclusivamente los tipos que interesan para el armado del hormigón: ferríticos, austeníticos y austenoferríticos (dúplex).

Tabla 1. Aceros inoxidables. % aproximado de composición química [11]

TIPO	% Cromo	% C	% Níquel	% Molibdeno
Ferrítico	10,5 - 30	< 0,08	0,3 - 2,5	0,2 - 4,5
Austenítico	14 - 28	< 0,15	0,5 - 35	0,2 - 8
Austenoferrítico	18 - 30	< 0,05	1,0 - 9,5	0,1 - 5

Los aceros inoxidables se fabrican como los tradicionales de acero al carbono; tanto mediante laminación en

caliente para los diámetros entre  $\Phi 6$  y  $\Phi 40$  mm, reduciendo el diámetro aprovechando la ductilidad del material a altas temperaturas; como mediante laminación en frío para diámetros más pequeños entre  $\Phi 4$  y  $\Phi 16$  mm, reduciendo el diámetro a temperatura ambiente. En cuanto a la normativa específica en España para armaduras de acero inoxidable, únicamente se dispone de la UNE 36067 [12] para alambres corrugados o grafilados para hormigón armado. El comité de normalización CTN 036/SC 04 está actualmente elaborando la norma prEN 10370 [13], que regulará los productos de acero inoxidable para el armado del hormigón, incluyendo tanto barras como alambres.

### 3.1. Características de las armaduras de acero inoxidable

El Código Estructural [5] contempla el uso de aceros inoxidables soldables en las estructuras de hormigón armado, en forma de barras, rollos y alambres, todos ellos corrugados o grafilados como medida especial de durabilidad. Los tipos de acero contemplados son los ferríticos, austeníticos y dúplex. Sus propiedades en cuanto a **características mecánicas, resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad**, varían según el tipo y la

**Tabla 2.** Tipos de acero y composición química sobre producto (porcentajes máximos en masa y rangos mínimo/máximo)

TIPO	C	S	P	N	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
1.4003	0,03	0,015	0,040	0,03	1,00	1,5	10,5/12,5	0,3/1,0	---	---
1.4301	0,07	0,015	0,045	0,10	1,00	2,00	17,5/19,5	8,0/10,5	---	---
1.4482	0,03	0,030	0,035	0,05/0,20	1,00	4,0/6,0	19,5/21,5	1,5/3,5	0,10/0,6	1,0
1.4362	0,03	0,015	0,035	0,05/0,20	1,00	2,00	22,0/24,5	3,5/5,5	0,10/0,60	0,10/0,60
1.4462	0,03	0,015	0,035	0,10/0,22	1,00	2,00	21,0/23,0	4,5/6,5	2,5/3,5	---

composición química. Los productos de acero inoxidable deben cumplir los mismos requisitos que se especifican en la reglamentación para las barras, rollos y alambres de acero al carbono, salvo lo relativo a su composición química.

Los aceros inoxidables citados en el Código Estructural [5] se han recogido en la tabla 2. El tipo EN 1.4003 es un acero inoxidable ferrítico muy usado, que tiene una buena resistencia a la corrosión y a la tracción y también buena soldabilidad. El tipo EN 1.4301 es un acero inoxidable austenítico base que posee buenas propiedades de resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad. El tipo 1.4482 es un acero inoxidable de baja aleación (lean dúplex) con límite elástico dos veces superior al anterior y buena conformabilidad y resistencia a la corrosión. El acero inoxidable 1.4362 es también dúplex de baja aleación y se comporta como el anterior. El tipo 1.4462 es un acero inoxidable dúplex con una alta resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión.

Las **características mecánicas** de las armaduras de acero inoxidable son superiores a las del acero convencional, desde el punto de vista de las tensiones: carga máxima y límite elástico, y también de la deformación bajo carga máxima; tanto para el inoxidable laminado en caliente como en frío. Aun así, en el caso de las armaduras laminadas en frío la deformación es menor que en las laminadas en caliente, por lo que el uso de las primeras estaría restringido a los casos en los que no existen exigencias específicas de ductilidad. En todo caso, la ductilidad depende, en gran medida, del tipo de acero inoxidable de que se trate en cada caso.

Las armaduras de acero inoxidable se **cortan y doblan** igual que las de acero al carbono. El atado en los procesos de colocación debe hacerse con alambre también de acero inoxidable del mismo grado o de una aleación superior.

Todos los **aceros inoxidables son soldables**, pero su soldabilidad no es ilimitada, por lo que, cuando sea necesario, el suministrador debe facilitar los procedimientos recomendados para realizar las soldaduras y asegurarse que éstas sean igualmente inoxidables y resistentes a la corrosión atmosférica. Es recomendable usar electrodos del mismo grado o de un grado más alto. En la zona afectada térmicamente se debe eliminar la capa de óxido que se forma por las altas temperaturas para reducir así la probabilidad de corrosión.

El Código Estructural [5] indica que el contacto entre acero convencional y armaduras de acero inoxidable está permitido, y que para soldar ambos aceros se recomienda usar un material de aportación sobre-aleado, para que se pueda garantizar una buena resistencia a la corrosión de la unión y unas propiedades mecánicas apropiadas.

### 3.2. Durabilidad de las armaduras de acero inoxidable

Las armaduras de acero inoxidable tienen una gran resistencia a la corrosión; se oxidan formando en la

superficie de las barras una fina capa de óxido de cromo muy densa que constituye una barrera contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de cubrición, se vuelve a formar inmediatamente, por combinación del cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente. Existen opciones de acero inoxidable totalmente resistentes a la corrosión, que garantizan la mayor durabilidad de las estructuras en ambientes muy agresivos. Durante su vida en servicio no se produce pérdida de sección, ni merma de su resistencia a la corrosión. Su deterioro es prácticamente inexistente.

El Código Estructural [5] incluye las armaduras inoxidables soldables como **medida especial de durabilidad** en las estructuras de hormigón armado. En el caso particular de estructuras de obra civil en ambiente marino, con o sin heladas, o de estructuras de obra civil en zona de mareas, los grados recomendados por las diferentes normativas y fabricantes de armaduras de acero inoxidable son: EN 1.4362 o EN 1.4301 para ambiente marino sin heladas, y EN 1.4462 para ambiente marino con heladas y para zona de mareas.

Cuando se proyecta con armadura de acero inoxidable se pueden tener en cuenta ciertas consideraciones sobre los requisitos de durabilidad del hormigón:

- El valor límite de la anchura de fisura puede ser menor o igual a 0,30 mm, independientemente de la clase de exposición en la que esté ubicado el elemento.
- El contenido límite de cloruros a partir del que se inicia la corrosión es mayor que con las armaduras de acero convencional, aunque depende del tipo de acero inoxidable.
- El recubrimiento mínimo de hormigón se puede reducir hasta un valor de 30 mm.

### 3.3. Estructuras más relevantes en el ámbito costero español con armaduras de acero inoxidable

El acero inoxidable es una de las opciones más seguras y que más fuerza ha ganado en proyectos donde se exige una mayor durabilidad. Se usa tanto para estructuras nuevas como para rehabilitaciones, pero su empleo, aunque es abundante, no se ha generalizado, ni siquiera en ambientes muy agresivos. Sus aplicaciones son variadas: puentes, aparcamientos, túneles, pasos subterráneos, muros de contención, estructuras marinas y portuarias o, en general, estructuras costeras. En España se conocen muy pocas aplicaciones en obras portuarias ejecutadas con acero inoxidable; a continuación, se cita como obra de referencia la extensión de Mónaco hacia el mar, mediante cajones portuarios ejecutados con material de origen español [14].

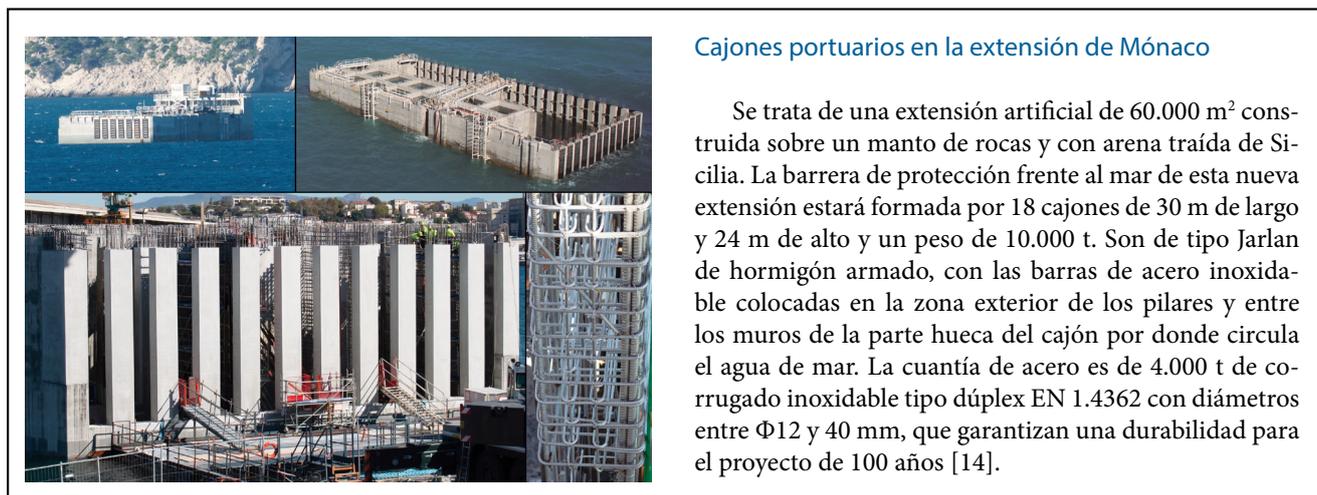


Figura 4. Arriba, desplazamiento de los cajones; abajo, fabricación de los cajones y detalle de armadura © CEDINOX [14].

#### 4. ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE VÍDRIO (GFRP)

Los polímeros reforzados con fibras (FRP) están formados por fibras continuas impregnadas de resina polimérica. Las fibras tienen alta resistencia y rigidez y son la columna vertebral del material, y la matriz polimérica ata y protege a las fibras, las mantiene separadas y transfiere las tensiones. La resina debe ser química y térmicamente compatible con las fibras, y juega un papel importante en el control del comportamiento tenso-deformacional y en la resistencia en ambientes corrosivos. Para el hormigón armado en ambiente agresivo, las barras de polímero reforzado más usadas como armadura son de fibras de vidrio (GFRP), y las resinas más habituales, por sus buenas prestaciones para el ambiente alcalino del hormigón, son las de viniléster, que se encuentran dentro del grupo de las resinas termoestables.

El proceso de fabricación más habitual de las barras de FRP es la pultrusión. Se trata de un proceso productivo por medio del cual se obtienen de forma continua materiales compuestos de sección constante. Durante el mismo, se somete a las materias primas a arrastre, para formar la barra, y parado, para realizar operaciones de impregnado, conformado, curado y corte. Para mejorar la adherencia con el hormigón de las barras, hay varias técnicas, como imprimir deformaciones en la superficie, aplicación de un revestimiento de arena, sobreposición de una nueva superficie o combinación de varias.

Este material tiene poca trayectoria de uso en España, no existe normativa a nivel nacional y su uso no está contemplado implícitamente en la reglamentación. Aun así, se están multiplicando su investigación y desarrollo tecnológico, ya que tiene notables ventajas de durabilidad, principalmente en ambientes muy agresivos, lo que además está suponiendo un notable incremento de su empleo a nivel internacional, tanto en Norteamérica como en Europa. Países como Estados Unidos, Japón, Noruega, Italia, Brasil y Canadá cuentan con guías de diseño y recomendaciones para el proyecto y ejecución de estructuras armadas con FRP; otros países están trabajando en la elaboración de documentos similares.

Una de las primeras **publicaciones de referencia** [15], se debe a la FIB (Fédération Internationale du Béton); se trata de un informe técnico que repasa las principales

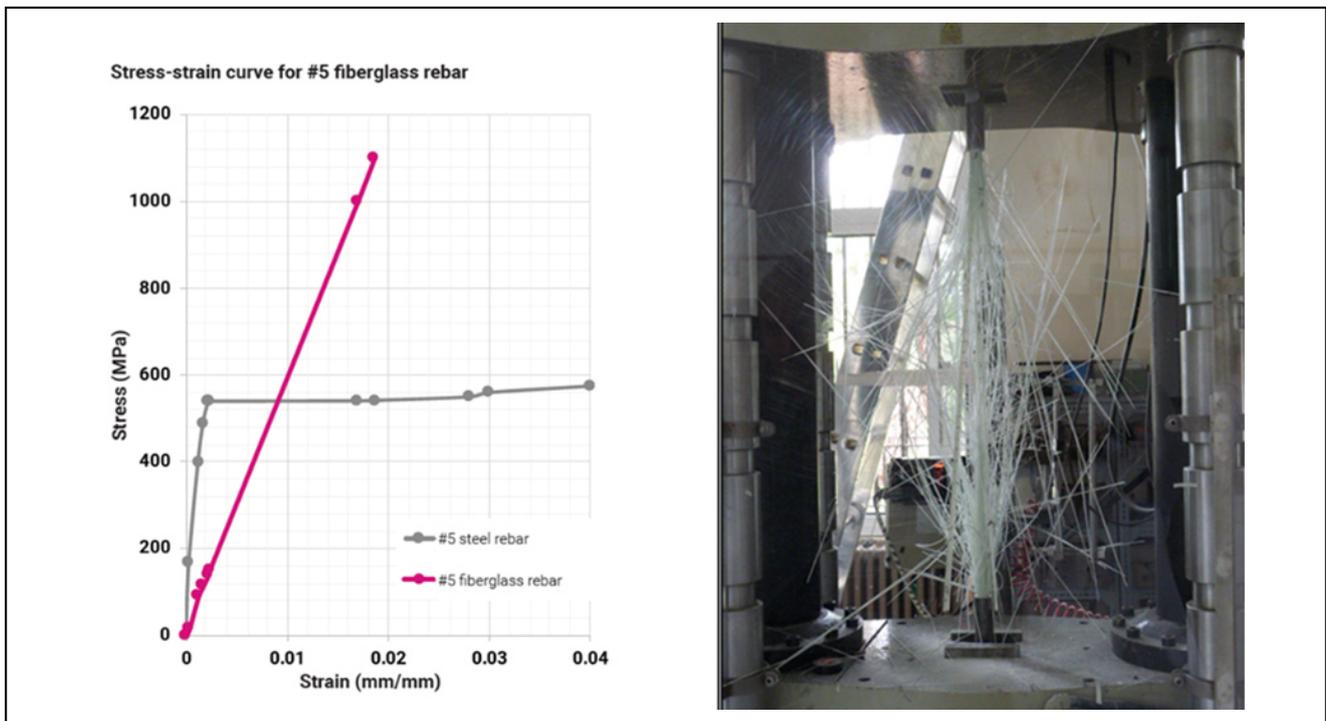
#### Cajones portuarios en la extensión de Mónaco

Se trata de una extensión artificial de 60.000 m<sup>2</sup> construida sobre un manto de rocas y con arena traída de Sicilia. La barrera de protección frente al mar de esta nueva extensión estará formada por 18 cajones de 30 m de largo y 24 m de alto y un peso de 10.000 t. Son de tipo Jarlan de hormigón armado, con las barras de acero inoxidable colocadas en la zona exterior de los pilares y entre los muros de la parte hueca del cajón por donde circula el agua de mar. La cuantía de acero es de 4.000 t de corrugado inoxidable tipo dúplex EN 1.4362 con diámetros entre  $\Phi 12$  y 40 mm, que garantizan una durabilidad para el proyecto de 100 años [14].

propiedades de las barras de FRP haciendo especial énfasis en la durabilidad y mostrando también diferentes modelos y filosofías de diseño. Actualmente, este documento está en proceso de revisión, ya que el conocimiento del material y de las estructuras armadas con él ha aumentado notablemente en los últimos años. Son muchas las publicaciones más recientes que han ido incorporando esos avances. Del mismo corte, en cuanto al tipo de documento, es el publicado en 2021 por la AFGC (Association Française de Génie Civil), que supone una guía completa o estado del arte acorde al conocimiento actual [16].

En cuanto a **códigos y normativa**, el conjunto más completo y actualizado se encuentra en el seno de la ACI (American Concrete Institute) y de la ASTM (American Society for Testing and Materials) norteamericanos. La ACI tiene numerosas publicaciones, entre las que se pueden destacar, por considerarlas suficientes para el diseño de una estructura armada con FRP, la guía de diseño ACI 440.1R-15 [17] y el código ACI CODE-440.11-22 [18]; el primero es más general y se podría aplicar en todo tipo de estructuras armadas con barras poliméricas, mientras que el segundo se centra en estructuras de edificación y armaduras de fibra de vidrio. La ASTM ha desarrollado un acervo completo de normativa de ensayo para determinar las propiedades específicas de estas armaduras y también dispone de una norma de producto, la D7957/D7957M-22 [19], que incluye las propiedades mínimas que deben cumplir las armaduras FRP.

A **nivel europeo**, se está en proceso de redacción de una nueva generación de eurocódigos estructurales. En concreto, el proyecto de revisión de la norma *UNE-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures*, incluye, entre otras novedades, un anejo informativo dedicado a las reglas específicas de aplicación cuando se emplea la alternativa de armaduras FRP para el refuerzo interno de estructuras sometidas predominantemente a cargas estáticas. Además, aunque estas armaduras no están cubiertas por ninguna norma armonizada, recientemente se ha aprobado, al amparo del Reglamento de Productos de Construcción (UE) 305/2011, el Documento de Evaluación Europea EAD 260023-00-0301 [20], que permitirá y fomentará la libre comercialización de este producto de construcción en el mercado único europeo, mejorará la información de sus características y prestaciones y,



**Figura 5.** Izquierda, resistencia a tracción: comparativa entre acero y GFRP (©2021 OwensCorning, all right reserved, used with permission); derecha, rotura por tracción en el Laboratorio del CEDEX.

finalmente, cuando se publique dicho documento en el Diario Oficial de la Unión Europea los fabricantes podrán obtener el marcado CE de su producto y acompañarlo de la correspondiente declaración de prestaciones.

#### 4.1. Características de las armaduras GFRP

Las **características físico-mecánicas** de las armaduras poliméricas **difieren notablemente de las de acero** y, por tanto, así sucede también con las propiedades resistentes del hormigón armado resultante. Las barras GFRP tienen respuesta elástica hasta el fallo, son frágiles y no avisan antes de la rotura. La resistencia a tracción de las barras de GFRP normalmente disminuye al aumentar el diámetro. Se trata de un material anisótropo, caracterizado por una alta resistencia a tracción en dirección de las fibras, pero bastante más débil en lo que respecta a la resistencia a cortante. Su coeficiente de dilatación es diferente en dirección longitudinal y radial. Su módulo de elasticidad es bajo, lo que hace que el diseño de los elementos estructurales esté gobernado por la deformación. Las barras de GFRP presentan el fenómeno denominado fatiga estática o rotura por fluencia (*creep*); es decir, sometidas a carga constante pueden fallar después de un cierto periodo de tiempo conocido como durabilidad.

La **adherencia con el hormigón** de las barras GFRP dependen de la composición resina-fibra, del proceso de fabricación, de las condiciones medioambientales y, sobre todo, del tipo de superficie de acabado de las armaduras. La interacción de la unión de las barras de GFRP con el hormigón es diferente a la del acero en muchos aspectos. En el caso de las barras de acero corrugadas, la interacción surge principalmente de la acción mecánica de la corruga de la barra contra el hormigón. En el caso de las barras de GFRP, con un módulo elástico más bajo



**Figura 6.** Distintas superficies de acabado en armaduras GFRP.

y ondulaciones superficiales menos prominentes que las corrugas de las barras de acero, la interacción en el contacto tiene un carácter más friccional. El fallo de la adherencia en las barras de acero se debe al aplastamiento del hormigón en la zona cercana a las corrugas, mientras que en el GFRP se debe principalmente al fallo parcial en el hormigón y a posibles daños en el acabado superficial de la armadura GFRP [15].

Respecto a la **fatiga**, o degradación de los materiales por estar sometidos a ciclos de carga, el comportamiento de las armaduras GFRP es bastante bueno, pero puede haber factores que lo deterioren, como el aumento de la temperatura o la humedad, o cualquier otro que provoque la degradación medioambiental de la resina. Como en el caso de otros materiales, también influyen la frecuencia de los ciclos de carga, la tensión media y la ratio de fatiga

(relación entre las tensiones mínima y máxima). Algunas guías recomiendan actuar con criterios muy conservadores por la gran cantidad de factores que afectan a su comportamiento y por la escasez de investigación del efecto de las cargas cíclicas sobre la adherencia con el hormigón. Como se ha comentado, el proyecto de revisión del Eurocódigo 2 limita el uso de armaduras GFRP a estructuras sometidas a cargas predominantemente estáticas.

Otras características en las que difieren notablemente de las estructuras de acero serían:

- Su peso es considerablemente más ligero, lo que beneficia su transporte y colocación en obra. Su densidad oscila entre 1,25 y 2,1 g/cm<sup>3</sup>.
- Estas armaduras facilitan la demolición cuando se emplean en estructuras temporales.
- Son materiales que tienen transparencia magnética y aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico.

Existen algunas características de las armaduras GFRP que no son, a priori, ventajosas con relación a las de acero, o, al menos, necesitarían un **mayor trabajo de experimentación** para alcanzar un conocimiento más detallado. Por ausencia de experiencia en su uso no está recomendada su utilización en algunos elementos estructurales donde la redistribución de momento sea requerida, ni en elementos que deban resistir principalmente compresión [17]. Es un material susceptible al fuego y que se degrada con las altas temperaturas, perdiendo propiedades mecánicas y adherencia. Las armaduras no pueden doblarse en obra y en su colocación puede haber pérdidas por rotura. Los elementos curvos de las barras de GFRP presentan una resistencia a la tracción menor que la de los elementos rectos (alrededor del 40 % en primera aproximación). El material se degrada con la radiación ultravioleta, por lo que no debe almacenarse a la intemperie.

#### 4.2. Durabilidad de las armaduras GFRP

Los factores que afectan a la **durabilidad de las armaduras poliméricas** embebidas en el hormigón y el modo en que lo hacen son muy diferentes a los del acero; lo más significativo es que no se ven afectadas ni por la carbonatación del hormigón ni por la presencia de cloruros. No obstante, las características de las barras de GFRP pueden verse modificadas antes, durante y después de colocadas en obra, tanto disminuyendo como aumentando. Ambientes con agua, radiación ultravioleta, elevadas temperaturas, y soluciones alcalinas, ácidas o salinas, pueden afectar a la resistencia y/o rigidez de este tipo de armaduras.

Uno de los factores más significativos, por lo que supone en cuanto a la pérdida de propiedades resistentes a largo plazo, es el fenómeno de **fluencia o creep**. Cuanto mayor es la carga sostenida, menor es el llamado límite de durancia o tiempo que transcurre hasta el fallo. El límite de durancia también se ve muy afectado por condiciones medioambientales como las altas temperaturas, la exposición a radiación ultravioleta, la alcalinidad, los ciclos humedad sequedad, y los ciclos hielo deshielo. Fruto de los datos de numerosas investigaciones se ha llegado a la conclusión de que existe una relación lineal entre la tensión de rotura y el logaritmo del tiempo transcurrido

hasta el fallo por creep. Cuantificar esa relación, exige la realización de trabajos experimentales en cada tipo de concreto de material.

Las fibras de vidrio son sensibles a la **degradación en medio alcalino**, por lo que, a priori, el hormigón sería un ambiente intrínsecamente agresivo para este tipo de barras. Los álcalis pueden provocar cambios en apariencia, en masa y en ciertas propiedades mecánicas, como la resistencia a tracción o al corte interlaminar. En todo caso, la mayoría de los estudios de durabilidad existentes hasta la fecha se han realizado mediante envejecimiento acelerado en soluciones más agresivas que el medioambiente que proporciona el hormigón, por lo que el enfoque resultante se puede considerar muy conservador.

En el proyecto de estructuras de hormigón armado con GFRP se podrían tener en cuenta ciertas consideraciones debido a la ausencia de corrosión electroquímica y el consiguiente aumento de la durabilidad del hormigón:

- Utilizar espesores de hormigón de recubrimiento menores, que podrían reducirse hasta 50 mm en ambiente marino con cloruros [21] y [22].
- Prescindir de dosificaciones de hormigón especialmente diseñadas para prevenir la corrosión del acero.
- Proyectar para una anchura de fisura mayor en ambientes agresivos.
- Poner en contacto y usar de modo combinado con cualquier tipo de armadura de acero.

#### 4.3. Estructuras más relevantes en el ámbito costero español con armaduras GFRP

En general, el empleo de esta tipología de armaduras a nivel internacional está casi siempre asociado a la problemática de la corrosión en ambientes agresivos por cloruros, a la necesidad de una fácil demolición o a la conveniencia de lograr transparencia magnética en las armaduras. También se usan cada vez más en rehabilitación del patrimonio histórico.

- Hormigón expuesto a ambiente marino: diques, muelles, construcciones en la costa, desalinizadoras, plataformas en mar abierto, etc.; hormigón expuesto a sales de deshielo: tableros de puentes, barreras y pavimentos de hormigón, etc.; y hormigón expuesto a otros ambientes agresivos: plantas de tratamiento de aguas residuales, depósitos, en industrias químicas, en piscinas cubiertas, canalizaciones, etc.
- Aplicaciones que requieren baja conductividad eléctrica o neutralidad electromagnética: cámaras de resonancia magnética en hospitales, instalaciones de radares, torres de control de aeropuertos, ferrocarril con sistema de levitación electromagnética, etc.
- Estructuras temporales: muros pantalla y chimeneas que tienen que ser demolidos, por ejemplo, en trabajos realizados mediante tuneladora.
- Rehabilitación de patrimonio histórico, elementos prefabricados y elementos arquitectónicos con poco espesor de recubrimiento y/o combinados con hormigones de cal.



### Bloques dique Langosteira (A Coruña)

El refuerzo del manto principal del dique de abrigo de Punta Langosteira, en el puerto de A Coruña consistió en la fabricación y colocación de 35 bloques cúbicos de 4 m de lado, de hormigón HM-30/20/I+Qb+E: 31 de ellos de densidad  $2,66 \text{ t/m}^3$  y los 4 restantes de densidad  $2,82 \text{ t/m}^3$ , armados en ambos casos con 60 barras de GFRP de diámetro  $\Phi 32 \text{ mm}$ . La obra se ejecutó en 2017 (Información y figuras facilitadas por la Autoridad Portuaria de A Coruña y Galaicontrol).

**Figura 7.** Armadura GFRP en distintas fases del proceso de fabricación de los bloques.



### Espaldón del dique suroeste de Escomberas, Cartagena (Murcia)

A los 15 años de su puesta en obra, el hormigón presentaba problemas severos de corrosión. La reparación se ejecutó en 2015 y consistió en la demolición del espaldón de 400 m de longitud y recrecido con hormigón HA-35 desde la cota +8 a la +10, ya que además del daño por corrosión, se producían rebases en esa zona del dique. El armado se ejecutó con barras de acero al carbono, en la cara interna, y de polímero reforzado con fibras de vidrio, en la cara externa. Se colocaron 9 barras GFRP  $\Phi 32$  por metro lineal. Aplicando la normativa italiana, la armadura transversal debía ser del 20 % de la vertical; así se emplearon 5 barras  $\Phi 20$  por metro lineal (Información facilitada por la Autoridad Portuaria de Cartagena y RTHp) [23].

**Figura 8.** Arriba, armadura GFRP durante una de las fases de hormigonado; abajo, croquis de la intervención y armadura interior © [23].

## 5. REPERCUSIONES ECONÓMICAS Y MEDIOAMBIENTALES DEL EMPLEO DE ARMADURAS ALTERNATIVAS RESISTENTES A LA CORROSIÓN

Para impulsar el desarrollo de innovaciones tecnológicas en obras de construcción, hoy día es fundamental cuantificar las **implicaciones económicas y medioambientales** que conllevan, así como los impactos que producen. Está demostrado que el hormigón armado con barras alternativas a las de acero al carbono es una solución válida para evitar, o retrasar, la **corrosión** en ambiente marino, y por tanto aumentar la **durabilidad del hormigón**. Ese aumento en la durabilidad repercute directamente en

algunos aspectos relativos a la valoración económica y medioambiental, siempre y cuando se considere en dicha valoración el **ciclo de vida**<sup>1</sup> completo de las estructuras, y, por tanto, repercute directamente en la **sostenibilidad** de las estructuras. Es importante entonces realizar estudios que cuantifiquen esta repercusión en estructuras marítimas y portuarias, como pueden ser cajones, diques, losas, vigas cantil, pantalanés, etc. y, en general, en cualquier

<sup>1</sup> Según la versión corregida de 2021 de la norma UNE-EN ISO 14040 [35], el ciclo de vida se define como las *etapas consecutivas e interrelacionadas, desde la adquisición o generación de materia prima a partir de recursos naturales hasta la disposición final*.

estructura que se ubique en ambiente especialmente susceptible a la corrosión.

El estudio de cada alternativa, en cuanto al empleo de materiales y/o procesos constructivos, y de sus alcances económicos y medioambientales durante el ciclo de vida ayudará a la toma de decisiones teniendo en cuenta, no sólo el resultado de la evaluación en el momento de la construcción, sino también el resultado completo en todo el periodo de servicio hasta el fin de su vida útil. Estos enfoques forman parte de la perspectiva global de evaluación de la sostenibilidad y están dentro del marco de la Directiva Europea 2014/24/UE sobre contratación pública [24], [25].

Para el **análisis de los costes del ciclo de vida** (LCC - *Life-Cycle Cost*) existe normativa internacional que recoge metodología estandarizada. Se pueden citar como más significativas las normas ISO 15686-5 [26] y UNE-EN 17472 [27]. La esencia del procedimiento consiste en valorar, tanto los costes iniciales, como todos aquellos en los que se puede incurrir con cada alternativa durante un periodo de referencia dado (por ejemplo, 100 años). Un análisis de este tipo puede tener como objetivo elegir entre diferentes alternativas de diseño para el conjunto, o para una parte, de una obra en la etapa de proyecto y construcción de ésta, o en la etapa de uso (por ejemplo, ante la necesidad de una rehabilitación estructural). Las operaciones y costes en los que se incurre con cada alternativa deben garantizar en todo momento el cumplimiento de los estándares mínimos de funcionamiento del activo bajo análisis, así como que las soluciones son equivalentes a nivel usuario y que la unidad funcional a que se referencian los costes es siempre la misma.

Los costes a tener en cuenta incluirían al menos los siguientes aspectos:

- **La etapa de producción de los materiales.** Todas las alternativas de armado consideradas en este trabajo resultan de mayor coste en la etapa de fabricación del material. Este encarecimiento inicial depende de la tipología: las galvanizadas son menos gravosas que las de acero inoxidable o GFRP. Respecto a estas últimas, habría que tener en cuenta que no se puede comparar directamente el precio del kg, debido a que las densidades son muy distintas (aproximadamente 1:4), pero además habría que considerar, si fuera el caso, la diferente cuantía necesaria de armadura GFRP en una misma sección resistente; por ejemplo, entre ser aproximadamente igual [21] [28] o estar en una relación de 1,5 veces superior a la del acero [22]. Así, el precio por kilo podría ser incluso más de 14 veces superior [28], pero, teniendo en cuenta la relación de densidades, ese aumento se reduciría a aproximadamente 3,6.

El encarecimiento inicial de los materiales, para cualquiera de estas alternativas, podría ser menor si, además de su diferencia de coste, se tuvieran en cuenta en el análisis los posibles ahorros en otros componentes del hormigón, como podrían ser los debidos al empleo de una menor cantidad de cemento, adiciones, inhibidores de corrosión, etc. Otras diferencias para analizar, podrían ser la disminución del espesor de recubrimiento de hormigón, como se

ha mencionado en los apartados anteriores, o las derivadas del empleo de áridos reciclados o incluso de agua de mar para el amasado del hormigón, en las soluciones no corrosibles (por ejemplo, descontando los costes de desalinización), que podrían llegar a ser muy significativos en países con escasos recursos hídricos [29] [28]; por el contrario, en este tipo de hormigones habría que considerar costes adicionales debidos al empleo de plastificantes u otros aditivos, o a la necesidad de un aumento del contenido de cemento para conseguir la resistencia mínima deseada. En todo caso, la diferencia de costes debida a la dosificación del hormigón parece que es despreciable frente a la influencia del cambio de armaduras [28].

Como ejemplos, respecto a las armaduras galvanizadas en la construcción de edificios, su empleo puede suponer un aumento del 6 al 10 % en el coste del hormigón, y del 1,5 al 3 % del coste total de la obra [7]. Para el caso del acero inoxidable, se ha llegado a valorar que, aunque éste resulta entre 6 y 10 veces más caro que el convencional, el coste total de hormigón se incrementaría menos de un 20 %, al poder rebajar su calidad, recubrimiento, etc. [30]; en otras referencias, en las que se han evaluado diferentes alternativas para el refuerzo del hormigón de un tanque de cloración de agua, esta valoración podría llegar a más del 80 %, teniendo en cuenta diferencias geográficas y coyunturales [21].

Otra alternativa, para reducir los costes iniciales manteniendo una alta durabilidad, consistiría en el empleo de armaduras combinadas de distinta tipología en una misma sección de hormigón, reservando las armaduras no corrosibles a las zonas más expuestas al ataque por corrosión y dejando las convencionales de acero en el resto. Como se ha mencionado, esta fue la solución que se adoptó en el dique de Escombreras en Cartagena, donde el estudio de costes de ejecución material concluyó que la alternativa con barras GFRP resultaba un 26 % más costosa, mientras que la solución mixta con este mismo tipo de barras elevaba el coste tan sólo un 4 % con relación a las armaduras convencionales [23].

- **La etapa de construcción.** Para cada alternativa se tendrían en cuenta las diferencias de coste debidas a aspectos tales como el transporte (menor para las armaduras GFRP, si sólo dependiera del peso), la productividad de los procesos de colocación y conformado en obra de las armaduras, la cuantía necesaria de cada tipología, y las diferencias en la fabricación y puesta en obra del hormigón y en la gestión de los residuos de construcción. Un análisis completo y exhaustivo valoraría también la diferencia de coste de control de calidad. Los costes de construcción se podrían valorar en función de los de los materiales y, a priori, considerarlos iguales para todas las alternativas que empleen acero.

Como ejemplo, en el caso de las armaduras GFRP, este tipo de costes resultará, en general, menor en cuanto a transporte y montaje [28]; pero su empleo también puede implicar algunos sobrecostes de construcción, por ejemplo, debidos a que necesi-

ten más atado ante la posibilidad de que, por su menor peso, puedan flotar en el hormigón [21].

- La **etapa de uso**. Para cada tipología de armadura, habría que considerar los costes de mantenimiento y reparación durante todo el tiempo de referencia considerado. Estos costes dependerán del tipo de hormigón armado que se haya ejecutado y de la exposición a la que vaya a estar sometido; en definitiva, dependerán de cada estructura concreta, pudiendo variar entre aquellas que únicamente necesiten mantenimiento preventivo durante toda su vida útil y aquellas que, teniendo una vida de servicio inferior al tiempo de referencia, necesiten operaciones de mantenimiento periódicas para recuperar los estándares mínimos requeridos, e incluso reparaciones o rehabilitaciones completas.

En la primera situación se podrían considerar las estructuras ejecutadas con acero inoxidable y con armaduras GFRP, y entre las segundas, las armaduras de acero al carbono y probablemente también las galvanizadas, ya que aunque retrasen la corrosión, y puedan admitir un límite de cloruros mayor que las convencionales, son muy sensibles a los defectos superficiales y no se puede garantizar que los revestimientos permanezcan intactos durante todo el periodo de referencia, principalmente en la fase de ejecución, pero también en la fase de uso cuando el ambiente es muy agresivo (por ejemplo, zona de salpicaduras o carrera de marea de las obras portuarias).

Además, habría que considerar los costes de inspección y mantenimiento rutinario; y adicionalmente, para aquellas alternativas que tengan una vida útil inferior al periodo de referencia, también habría que incluir los costes de inspecciones detalladas y de reparaciones para recuperar los estándares mínimos exigidos. Existen programas y modelos probabilísticos para determinar si se producirán episodios de corrosión durante el periodo de referencia (y, por tanto, si se incurrirá en dichos costes), que tienen en cuenta, además de la tipología de armado, el tipo de hormigón, el recubrimiento y la estrategia de reparación que se emplee [21] [28] [30] [31].

- La **etapa de demolición**. Al final de la vida útil habría que considerar los costes de demolición y vertido, y, si fuera el caso, descontar el beneficio obtenido del reciclado de los materiales. Todos los tipos de acero son reciclables y se puede estimar que hasta el 90 % del material es recuperable. La cuantía econó-

mica obtenida de la chatarra dependerá del tipo de acero y será mayor para el inoxidable. Según la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG), el cinc es considerado un material 100 % recuperable y casi un 30 % de su producción total se lleva a cabo con material reciclado. En el caso del material polimérico, aunque existen investigaciones que tratan de desarrollar metodologías de reciclado y reutilización, no están a un nivel como para que se pueda considerar algún beneficio por su aprovechamiento tras la demolición. Si al final del periodo de referencia, alguna alternativa tiene una vida remanente de servicio, ésta podría contabilizarse como un beneficio [28] [31].

Cuando se realiza un análisis de costes de diferentes partidas que se suceden a lo largo del tiempo, es necesario referir dichos costes a su **valor actual** para que la comparación sea válida. Como es bien conocido, el coste actual neto (NPC – Net Present Cost) se obtiene mediante la fórmula:

$$NPC = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

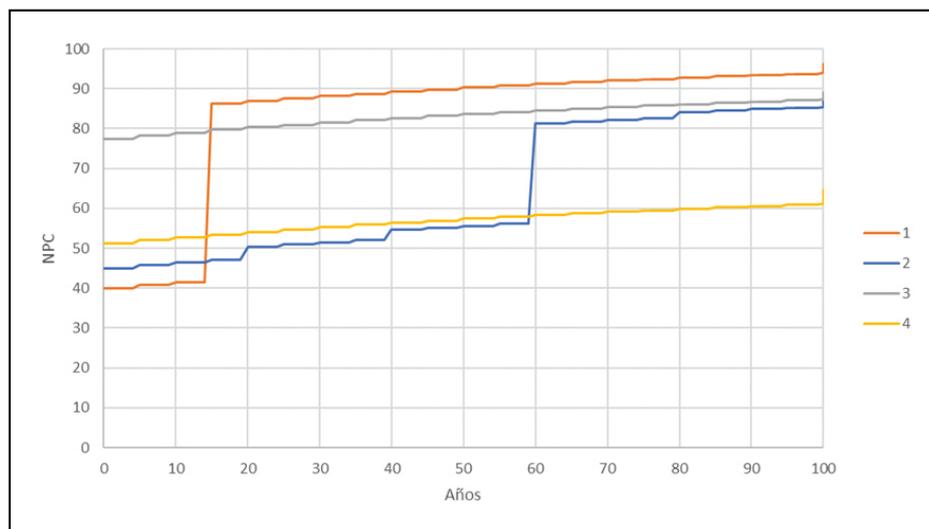
Siendo  $n$  el año enésimo,  $N$  el periodo de referencia,  $C_n$  los costes en el año  $n$  y  $r$  la tasa de descuento. Respecto a esta última, además de ser difícil de prever, los resultados de estos estudios siempre son muy sensibles a ella, de modo que, cuanto mayor sea  $r$ , menor repercusión tendrá la elección de las alternativas más durables en la disminución relativa del valor NPC. Esto es debido a que las alternativas que requieren menos mantenimiento apenas variarán su resultado al variar la tasa de descuento, mientras que las que sí requieren costes diferidos en el tiempo, éstos tendrán menos peso en el resultado final a medida que aumenta el valor de  $r$ . Por ello, la mayoría de los análisis de este tipo incluyen una evaluación de la sensibilidad de los resultados a la tasa de descuento. Tasas superiores entre 1,3 y 5 % para acero inoxidable, y entre 4 y 10 % para armaduras FRP, pueden servir de referencia como límite de eficacia económica de estas alternativas [21], [22], [28], [29], [31].

En todo caso, cada estructura tiene que ser analizada independientemente y no es posible extrapolar resultados de una construcción a otra. En la decisión sobre la solución más ventajosa, principalmente cuando existe una incertidumbre alta sobre la futura fluctuación de la tasa de descuento real, habrá que tener en cuenta que una alternativa puede suponer una eficacia de coste menor que otra, para una determinada tasa de descuento, pero que dicha

**Tabla 3.** Estudio bibliográfico % (años) [%] – GS: armaduras galvanizadas; ES: armaduras recubiertas de resina epoxi; SS: armaduras de acero inoxidable; GFRP armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio

Referencia	GS	ES	SS	GFRP	r (%)
[21]	---	11 [6,0]	25 (50) [1,95]	43 (35) [5,15]	0,6
[22]	---	0,75 [2]	10,37 (75) [2]	20 (40) [4]	1
[31]*	---	---	28,8 (50) [3-5]	---	0,01
[29]	---	---	---	30 (50) [10]	0,7
[28]	---	---	15 (50) [1,35]	≈50 (20) [5,9]	0,7

\* Periodo de referencia 79 años.



**Figura 9.** Ejemplo de curva comparativa de los costes actualizados del ciclo de vida de una estructura de hormigón armado con 4 alternativas de armaduras, para un periodo de referencia de 100 años.

eficacia puede seguir siendo de signo positivo hasta tasas de descuento más altas. Igualmente será necesario realizar análisis de sensibilidad con relación a cualquier otro factor que aporte incertidumbre en el tiempo, como pueden ser la posibilidad de retardo o aceleración de los procesos de corrosión, la variación de los costes de los materiales y de la mano de obra, etc.

Simplemente como referencia, en la tabla 3 se recogen algunos casos concretos de estudios de este tipo obtenidos de la bibliografía, para un periodo de referencia de 100 años, y que se han considerado representativos de la temática de este artículo. Se recoge el porcentaje de disminución del NPC de cada alternativa con relación a la opción de acero al carbono, indicando entre paréntesis el número de años necesario para que el NPC de las distintas alternativas sea inferior al que se obtendría empleando armaduras de acero al carbono y entre corchetes, la tasa de descuento a partir de la cual las soluciones no son económicamente ventajosas para el periodo de referencia de 100 años.

En la figura 9 se ilustra a modo de ejemplo los resultados que se podrían obtener para el valor NPC en función de la influencia de la tipología de las armaduras en la durabilidad de una estructura de hormigón armado.

La curva 1 de la figura 9 trata de representar la situación real de algunos diques en el ámbito costero español, construidos con armadura de acero al carbono tradicional y que han tenido que sufrir reconstrucciones importantes en un periodo de tiempo inferior a 20 años, la reconstrucción modelizada en la figura supone su ejecución con armaduras no corrosibles. La curva 2 representaría un hormigón armado, con acero protegido con algún tipo de revestimiento, que podría ser galvanizado o de otro tipo (por ejemplo, recubrimiento mediante resina epoxi), capaz de retrasar el fenómeno de la corrosión, pero no de evitarla durante todo el periodo de referencia.

Las curvas 3 y 4 corresponderían a alternativas cuyo tiempo previsto de vida útil es superior al tiempo de referencia del estudio; como sería el caso de las armaduras de acero inoxidable o de FRP. En ambos casos, el valor actual de los costes se movería entre ambas curvas, siendo mayor o menor en función del precio de mercado de cada material, de la coyuntura económica general y de la ubicación

geográfica. Como se puede apreciar, en estos casos el coste más significativo sería el inicial, y, a pesar de que ambas alternativas se corresponden con los costes más altos de este tipo, pueden llegar a ser muy ventajosas cuando se considera el coste completo del ciclo de vida.

La comparativa del resultado económico de cada alternativa cambiará sustancialmente en los casos en los que se produzcan actuaciones de rehabilitación completa, por lo que, respecto a lo comentado en el análisis de sensibilidad, parece claro que el estudio se verá singularmente afectado por el programa de mantenimiento y rehabilitación previsto para cada una de las alternativas de armado, y, en último término, será singularmente sensible a la previsión que se haya hecho sobre la propagación de cloruros en el hormigón e inicio de la corrosión. Las diferencias en el incremento del NPC de cada alternativa durante el periodo de referencia se deberán fundamentalmente a los trabajos de inspección, mantenimiento, reparación y rehabilitación que requiera cada una.

Una vez valorados todos los costes asociados a cada alternativa, un paso más consistiría en el estudio de la **contribución de cada alternativa a la sostenibilidad y al desarrollo sostenible**. En este sentido, el análisis del coste del ciclo de vida es sólo una parte que valora los aspectos económicos, a los que habría que añadir los **medioambientales** e incluso **sociales**. En general, la evaluación medioambiental y de costes se estudia separadamente, aunque parece claro el interés que tendrá integrar ambos tipos de estudios para poder comparar todos los costes asociados a cada alternativa, incluyendo las llamadas *externalidades medioambientales* [25]. Dicha integración se podría realizar si se cuantificaran los aspectos medioambientales en términos monetarios [32], por ejemplo, si existe un pago o tasa real por la emisión de CO<sub>2</sub> o cuando existen costes asociados al cumplimiento de la legislación vigente en materia de construcción sostenible, como podrían ser los debidos al tratamiento de desechos al final de la vida útil de los productos de construcción.

En cuanto a los costes **sociales**, se podrían considerar, por ejemplo, los costes del usuario relacionados con la interrupción del servicio, total o parcialmente, durante las etapas de construcción y mantenimiento de la estructura.

O incluso otros impactos de aún más difícil valoración objetiva, como podrían llegar a ser las consideraciones estéticas en obras de rehabilitación de construcciones singulares con valor patrimonial, en las que evitar la afluencia de manchas en la superficie del hormigón debidas a los productos de corrosión puede llegar a ser una de las causas determinantes en la elección de una alternativa [33].

Para la **valoración medioambiental del ciclo de vida** (LCA - *Life-Cycle Assessment*) también existe normativa que recoge metodología estandarizada y criterios para su valoración. Se pueden citar como más representativas las normas UNE-EN ISO 14040 [34], [35], UNE-EN ISO 14044 [36], [37], [38] y UNE-EN 15804 [39], [40]. En nuestro caso, el objetivo sería valorar, para posteriormente decidir, las distintas alternativas de armado del hormigón teniendo en cuenta sus repercusiones medioambientales durante el ciclo de vida, planteando cada alternativa con suposiciones y contexto equivalentes. Para el análisis es necesario definir la unidad funcional del sistema y el periodo de referencia; así como prever el programa de mantenimiento y rehabilitación que necesitará cada opción de armado en función de los materiales empleados y el avance previsto de la corrosión, garantizando siempre estándares mínimos de funcionamiento. La metodología propuesta por las normas referenciadas detalla las distintas fases (que podrían ser iterativas) para la realización de un estudio completo y que consistirían en:

- Definición del **objeto** y del **alcance**. Para la temática que se plantea, sería la comparación de alternativas de armado desde el punto de vista de sus implicaciones medioambientales, considerando las mismas fases del ciclo de vida que se han planteado en el análisis económico, y preferiblemente también la misma unidad funcional y periodo de análisis. Dadas las dificultades de realizar este análisis en el ciclo completo de vida, principalmente por la dificultad de encontrar datos fiables y por las muchas incertidumbres que se pueden plantear, muchos estudios se limitan a las fases de producción de los materiales, transporte y construcción (*cradle to gate*) y es más difícil encontrar otros que incluyan además las fases de mantenimiento y fin de vida de la estructura (*cradle to grave*).
- Análisis del **inventario** del ciclo de vida, donde se trata de recopilar y validar los datos de entrada y salida del sistema. Dichos datos procederían de los flujos elementales e incluirían la utilización de recursos (consumo de materias primas: cemento, agua, etc. y consumo de energía: transporte, amasado del hormigón, etc.) y las emisiones al aire y los vertidos al agua y al suelo. Los flujos elementales se producirán durante todo el ciclo de vida y, una vez más, las alternativas que requieran mayores actuaciones de reparación tendrán que asumir flujos adicionales en determinados momentos del ciclo, debido a la demolición y reciclado de materiales dañados, a la producción y transporte de nuevos materiales y a la ejecución de las obras necesarias.
- Evaluación del **impacto** del ciclo de vida, indicando las categorías de impacto, sus indicadores y los modelos de caracterización. Se asignarían los resulta-

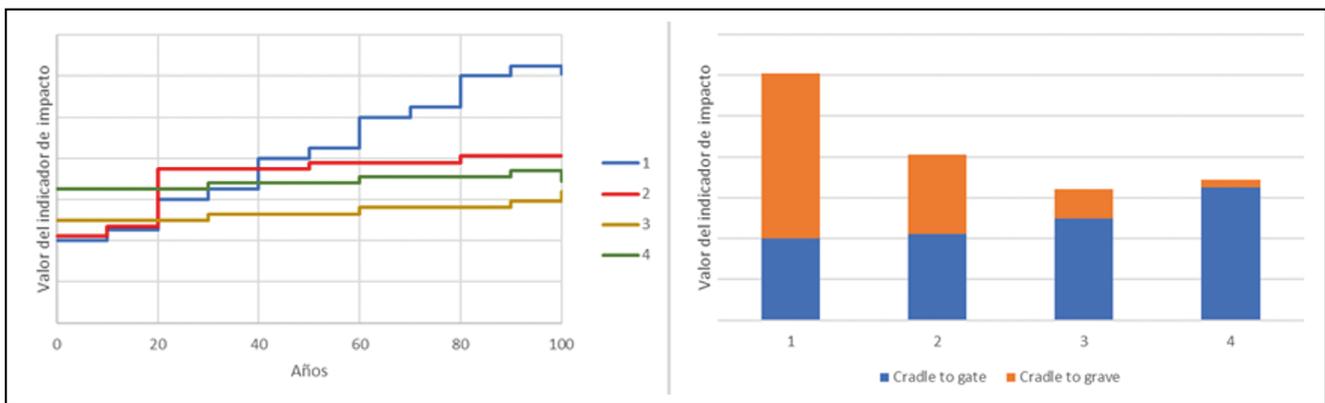
dos del inventario a cada categoría para calcular los resultados de cada indicador y poder conocer y evaluar los impactos potenciales, así como determinar cuáles son más significativos. Existen algunas referencias de estos estudios para comparar estructuras ejecutadas con distintos tipos de armaduras, que han recogido como categorías de impacto el calentamiento global, la formación de oxidantes fotoquímicos, la acidificación y la eutrofización; la reducción de la capa de ozono también se ha considerado en algún caso, pero, en general, resultando poco relevante en términos globales [22], [31].

- Interpretación del **análisis**, evaluando los resultados de las dos fases anteriores con relación al objetivo y alcance, para obtener conclusiones y poder emitir recomendaciones. Para establecer confianza en los resultados, la evaluación incluiría las verificaciones de los análisis de integridad, de coherencia y de sensibilidad. Normalmente, en el momento de la construcción, los impactos resultan mayores para armaduras no corrosibles, pero puede ser de modo muy poco significativo, contrariamente a lo que ocurriría con los costes, ya que el mayor peso de esos impactos se debe al propio hormigón (hasta el 93 % de los impactos) y no a las armaduras [31]. El hormigón en sí, además, podría ser medioambientalmente más sostenible, por ejemplo, cuando se emplea árido reciclado o incluso agua de mar junto a armaduras GFRP [28].

Teniendo en cuenta los beneficios de durabilidad y sostenibilidad que aportan las armaduras no corrosibles en las estructuras de hormigón, y los ahorros en operaciones de mantenimiento y rehabilitación que suponen, es previsible que para estas armaduras los impactos apenas aumenten desde el momento de la construcción, mientras que los aumentos sean muy notables en las armaduras que requieran mayor esfuerzo en estas operaciones; entre aproximadamente un 40 % [22] o más de un 70 % dependiendo de la categoría de impacto [31]. Este aumento de los impactos invierte el signo de la valoración del ciclo de vida para la mayoría de las categorías, previsiblemente en el momento en el que se produzcan las primeras operaciones importantes de rehabilitación, como ocurría también en el análisis económico.

Los resultados del análisis del ciclo de vida para cada estructura de hormigón con diferentes alternativas de armaduras pueden ser muy distintos y dispares entre sí, en beneficio de unas u otras alternativas según las distintas categorías de impacto; pero, en todo caso, las alternativas que necesiten mayores labores de mantenimiento y actuaciones extraordinarias de reconstrucción o rehabilitación verán aumentados considerablemente los valores de todos los indicadores de impacto a medida que dichas actuaciones van siendo necesarias.

La curva 1 de la figura 10 correspondería a una estructura ejecutada con armaduras corrosibles que necesitaran importantes labores de rehabilitación y además éstas se ejecutarían con el mismo tipo de armaduras, por lo que las intervenciones y reparaciones se sucederían a lo largo de todo el ciclo de vida. La curva 2 correspondería también a



**Figura 10.** Ejemplo de gráficos comparativos de análisis LCA para una determinada categoría de impacto, de una estructura de hormigón con diferentes tipologías de armaduras y estrategias de mantenimiento y reparación.

una estructura ejecutada con armaduras corrosibles, pero en este caso la primera reparación importante se ejecutaría con armaduras resistentes a la corrosión. Las curvas 3 y 4 representarían estructuras ejecutadas con armaduras no corrosibles, que podrían suponer impactos mayores hasta la etapa de construcción, pero que apenas serían significativos en las etapas de uso.

El resultado de este tipo de estudios no es extrapolable de una construcción a otra, por lo que debe hacerse para cada caso particular incluyendo un análisis de sensibilidad para estimar el efecto sobre el resultado de los métodos y datos elegidos. Por último, debe indicarse que no existe base científica para reducir el análisis del ciclo de vida a un único valor o puntuación global, ya que la ponderación entre las categorías de impacto requeriría de juicios de valor o consideraciones subjetivas [34].

## 6. CONCLUSIONES

Se han expuesto las características de distintas tipologías de armaduras para el hormigón, diferentes a las de acero convencional, todas ellas con la característica común de aumentar la durabilidad de las estructuras, retrasando o incluso eliminando el fenómeno de la corrosión.

Dichas alternativas son económicamente más costosas, y dependiendo de las categorías de impacto que se consideran, podrían ser también más gravosas desde el punto de vista medioambiental en el momento de la construcción. Cuando se analiza la sostenibilidad de las mismas, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, para un análisis del ciclo de vida en un periodo de referencia medio-largo, las estructuras con armaduras no corrosibles, es decir, con mayor durabilidad, apenas ven incrementados sus costes e impactos, mientras que las otras lo llegan a hacer de modo muy significativo.

Las estructuras marítimas y costeras están singularmente expuestas a desarrollar fenómenos de corrosión a edades muy tempranas, por lo que el empleo de armaduras no convencionales puede mostrarse singularmente eficiente, incluso a corto plazo, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Parece claro que la incidencia mayor en el resultado de los estudios pertinentes se da cuando es necesaria una operación extraordinaria de reparación o rehabilitación de la estructura. Prever con la mayor exactitud y realismo esta circunstancia, es la clave para que los resultados sean válidos en la toma de

decisiones. Sería importante aprovechar datos históricos reales para parametrizar y ajustar los modelos de predicción de los daños por corrosión, ya que muchas estructuras se deterioran antes de lo previsto y no siempre los beneficios esperados de la protección del hormigón se cumplen en la realidad. Factores ajenos a los trabajos de investigación, relacionados con la elaboración, colocación y puesta en obra del hormigón, podrían estar detrás de estos fallos prematuros.

Se concluye que una planificación estratégica que garantice la sostenibilidad de las obras marítimas, y, en general, de todas aquellas estructuras de hormigón armado singularmente expuestas a la corrosión, requerirá análisis del ciclo de vida para evitar el traslado de las cargas económicas y medio ambientales a etapas posteriores a la de ejecución de la obra.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean agradecer a las personas, organismos e instituciones que han contribuido a la realización de este artículo. En primer lugar, a Puertos del Estado por el Encargo solicitado del cual ha surgido este escrito. Quisiéramos, asimismo, mostrar nuestra gratitud a las autoridades y otras entidades portuarias, a la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG) y a la Asociación para la Investigación y Desarrollo del Acero Inoxidable (CEDINOX) por la información facilitada. Igualmente, queremos agradecer a los autores de la referencia [9] que nos hayan hecho llegar su informe y nos hayan permitido hacer uso del mismo.

## 8. REFERENCIAS

- [1] AENOR (2023). UNE-EN ISO 1461 Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo.
- [2] AENOR (2020). UNE-EN ISO 14713-2 Recubrimientos de cinc. Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Parte 2: Galvanización en caliente.
- [3] AENOR (2006). UNE-EN 10080 Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades.
- [4] AENOR (2019). UNE-EN 10348-2 Acero para el armado del hormigón. Acero galvanizado para armaduras. Parte 2: Productos de acero galvanizado para armaduras.

- [5] MITMA (2021). *Código Estructural*.
- [6] Fib: CEB-FIP (2009). Corrosion protection of reinforcing steels, Bulletin nº 49.
- [7] EGG A (2023). Galvanized Reinforcement in Concrete Structures. An Introduction for Engineers and Designers. <https://www.galvanizingeurope.org/wp-content/uploads/2021/07/Version-2.1-Feb-2022.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [8] AENOR (2012). UNE 83992-2 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado.
- [9] Martínez, I., y Alonso, M.C. Estudio de la durabilidad de armaduras galvanizadas en estructuras portuarias de la Generalitat Valenciana. IETcc, CSIC.
- [10] Alonso, M.C., Martínez, I., Ibarra, V., y Molines, O. (2011). Empleo de armadura galvanizada para proteger frente a la corrosión en estructuras marítimas, de *XI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Gran Canaria, 5-6 de mayo*, 2011.
- [11] AENOR (2015). UNE-EN 10088-1 Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables.
- [12] AENOR (2017). UNE 36067 Alambres de acero inoxidable para armaduras de hormigón armado.
- [13] AENOR (2019). prEN 10370 Steel for the reinforcement of concrete - Stainless steel.
- [14] CEDINOX (2018). Extensión de Mónaco hacia el mar. *Acero Inoxidable*, nº 83, pp. 40-45.
- [15] Fib: CEB-FIP (2007). FRP reinforcement in RC structures, Bulletin nº 40.
- [16] AFGC (2021). Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé.
- [17] ACI (2015). ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.
- [18] ACI (2022). ACI CODE-440.11-22 Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars – Code and Commentary.
- [19] ASTM (2022). D7957/D7957M-22 Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymers Bars for Concrete Reinforcement.
- [20] EOTA (2023). EAD 260023-00-0301 Carbon, glass, basalt and aramid Fibre Reinforced Polymer bars as reinforcement of structural elements.
- [21] Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P., y Nanni, A. (2020). Cost effectiveness of reinforcement alternatives for a concrete water chlorination tank. *Journal of Building Engineering*, Vol. 27, pp. 1-11.
- [22] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., y Nanni, A. (2020). Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4): pp. 787-802.
- [23] Jáuregui Pajares, M. (2021). Puerto de Cartagena. Recreido del espaldón del dique suroeste. *Revista del MITMA*, nº 718, pp. 56-65.
- [24] Comisión Europea (2014). Directiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014 sobre contratación pública y por la que se deroga la Directiva 2004/18/CE.
- [25] Perelli, M., y Parra Ruiz, L. (2017). Aproximación del análisis del ciclo de vida (ACV) y del coste del ciclo de vida (CCV) al caso particular de los firmes de carretera. *Ingeniería Civil*, nº 186, pp. 23-38.
- [26] ISO (2017). ISO 15686-5 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.
- [27] AENOR (2022). UNE-EN 17472 Sostenibilidad de las obras de construcción. Evaluación de la sostenibilidad de las obras de ingeniería civil. Métodos de cálculo.
- [28] Younis, A., Ebead, U., y Judd, S. (2018). Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement. *Construction and Building Materials*, Vol. 175, pp. 152-160.
- [29] Hamid, S., Naji, K., Younis, A., y Ebead, U. (2021). Material performance and cost effectiveness of seawater-mixed rubberized concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, pp. 1-11.
- [30] Val, D.V., y Stewart, M.G. (2003). Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments. *Structural Safety*, 25(4): pp. 343-362.
- [31] Mistry, M., Koffler, C., y Wong, S. (2016). LCA and LCC of the world's longest pier: a case study on nickel-containing stainless steel rebar. *International Journal Life Cycle Assess*, nº 21, pp. 1637-1644.
- [32] Dattilo, C.A., Negro, P., y Landolfo, R. (2010). An integrated approach for sustainability (IAS): life cycle assessment (LCA) as a supporting tool for life cycle costing (LCC) and social issues, de *Sustainable Building Affordable to All, Lisboa, 2010*.
- [33] Steputat, C.C., O'Connor, J., Arrants, M., Beech, J., y Nanni, A. (2022). GFRP-RC seawalls as a means of coastal fortification and extended service life. *Concrete International*, 44(11): pp. 36-42.
- [34] AENOR (2006). UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [35] AENOR (2021). UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1.
- [36] AENOR (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [37] AENOR (2018). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1.
- [38] AENOR (2021). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 2.
- [39] AENOR (2020). UNE-EN 15804:2012+A2 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.
- [40] AENOR (2021). UNE-EN 15804:2012+A2:2020/AC Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.