



HORMIGÓN ARMADO DE ALTA DURABILIDAD FRENTE AL AMBIENTE MARINO

Volumen II.
Armaduras alternativas
a las convencionales de acero

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX

Puertos del Estado



HORMIGÓN ARMADO DE ALTA DURABILIDAD FRENTE AL AMBIENTE MARINO

VOLUMEN II. ARMADURAS ALTERNATIVAS A LAS CONVENCIONALES DE ACERO

LAURA JUÁREZ GONZÁLEZ

LAURA RODRÍGUEZ DURO

ASUNCIÓN MORALES HORTELANO

ANA LOPE CARVAJAL

MARÍA RODRÍGUEZ DE SEGOVIA SÁEZ

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

Centro virtual de publicaciones del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible:

<https://publicaciones.transportes.gob.es/>

Tienda de Publicaciones del CEDEX: <https://ceh.cedex.es/tienda/>

Título de la obra: Hormigón armado de alta durabilidad frente al ambiente marino.

Volumen II: Armaduras alternativas a las convencionales de acero.

Autoría: Laura Juárez Gonzalez, Laura Rodríguez Duro, Asunción Morales Hortelano, Ana Lope Carvajal y María Rodríguez de Segovia Sáez.

Año de la edición: 2026

EDICIÓN DIGITAL:

1ª edición electrónica: abril 2026

Formato: PDF

Tamaño: 11 MB

NIPO: 197-26-002-4

EDITA

Centro de Publicaciones

Secretaría General Técnica

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

© CEDEX: Servicio de Publicaciones

Todos los derechos reservados.

Esta publicación no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, ni registrada, ni transmitida por un sistema de recuperación de información en ninguna forma ni en ningún medio, salvo en aquellos casos específicamente permitidos por la Ley.

Puertos del Estado tiene entre sus competencias establecidas en el Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante la promoción de la investigación y el desarrollo tecnológico en materias vinculadas con la economía, gestión, logística e ingeniería portuarias.

Esta publicación que tengo el honor de prologar es parte de ese esfuerzo para que la ingeniería presente en los puertos españoles siga siendo un referente a nivel internacional. Y más en concreto, es fruto de los trabajos que, en el marco del Encargo por Parte de Puertos del Estado al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, este organismo lleva a cabo para la Realización de trabajos de Asistencia Técnica, Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico en materias de interés para el Sistema Portuario de Titularidad Estatal.

La construcción con hormigón armado en ambiente marino está expuesta a un riesgo elevado de corrosión debido al ambiente agresivo en el que se desarrolla, lo que supone un reto desde el punto de vista de la elección de materiales, diseño y ejecución de las obras. El presente documento ofrece al sistema portuario un compendio de soluciones contrastadas y de líneas de innovación emergentes para ampliar la vida útil de nuestras infraestructuras.

El primer volumen está dedicado al hormigón de altas prestaciones para prevenir la corrosión, y en él se analizan las diferentes herramientas que actúan sobre la calidad del hormigón para que sus prestaciones sean óptimas.

El segundo volumen está dedicado a las armaduras alternativas a las convencionales de acero. El texto ofrece un examen sistemático de varias familias de soluciones, tales como armaduras de aceros galvanizados, aceros inoxidables y armaduras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP).

Esta aproximación, rigurosa y eminentemente práctica a las soluciones alternativas al armado de acero convencional, facilita al proyectista, al director de obra y al gestor de activos una base objetiva para la toma de decisiones, alineada con la normativa vigente y con las mejores prácticas internacionales.

La principal conclusión de estos trabajos, recogida en este libro, se considera de gran importancia para exportar la tecnología española en el ámbito internacional, y reafirma el compromiso de Puertos del Estado con la investigación y los avances en materia de infraestructuras portuarias para seguir mejorando su funcionalidad, en este caso particularmente aumentando su vida útil de servicio, lo que redundará en definitiva en una mejora de la competitividad de nuestros puertos.

GUSTAVO SANTANA HERNÁNDEZ
PRESIDENTE DE PUERTOS DEL ESTADO

El CEDEX es un organismo público de vanguardia cuya misión principal es la resolución de los problemas tradicionales y emergentes en el ámbito de las obras públicas, la movilidad, las aguas marinas y las continentales, así como su relación con el medio ambiente y el cambio climático, contribuyendo al avance del conocimiento aplicado y a la innovación, fomentando su difusión para impulsar la mayor transferencia del conocimiento.

Esta misión se materializa a través de sus diferentes centros y laboratorios que, especializados en diferentes campos de actuación, dan servicio, tanto a la empresa privada como a la Administración General del Estado, de la que el CEDEX es medio propio.

El CEDEX presta a Puertos del Estado servicios de Asistencia Técnica, Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico a través de encargos en los que participan varios de sus centros, entre los que se encuentran el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), el Laboratorio de Geotecnia (LG) y el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM).

En el marco de la colaboración LCEYM_CEDEx-Puertos del Estado, en los últimos años se han realizado numerosos trabajos sobre la durabilidad de estructuras portuarias: cajones flotantes, pantalanos o espaldones de diques. La experiencia adquirida pone de manifiesto la elevada agresividad ambiental a la que están expuestas estas obras por efecto del ambiente marino, tanto si están en contacto directo con el agua del mar como si se encuentran en tierra, siendo la corrosión de las armaduras la principal causa de su deterioro. La presente publicación pretende ayudar a encontrar soluciones a estas cuestiones, que son de gran interés para el Sistema Portuario de Titularidad Estatal.

Para evitar o retrasar estos procesos de corrosión se puede actuar mejorando la calidad del hormigón que protege las armaduras del ambiente exterior, o bien sustituir las armaduras tradicionales de acero por otros elementos de armado no susceptibles al daño. Por ello, la publicación se divide en dos volúmenes: uno dedicado al hormigón y el otro a las armaduras.

En este texto se pueden encontrar herramientas a disposición de los ingenieros para conseguir mejores hormigones armados para construir estructuras portuarias de mayor vida útil. Las alternativas expuestas abarcan desde soluciones consolidadas, hasta aquellas que están actualmente en proceso de investigación.

Así, el empleo de adiciones activas en el cemento para reducir la permeabilidad del hormigón es conocido desde hace mucho tiempo y está recogido en la normativa nacional e internacional. El valor añadido en este documento es exponer su uso de forma resumida y muy práctica, con la aplicación al caso particular de las estructuras portuarias. Asimismo, se desarrollan también otras posibilidades más innovadoras, como el uso de aditivos para hormigones autocurables o el uso de nanoadiciones.

En cuanto al armado, el uso de armaduras galvanizadas o de acero inoxidable son igualmente alternativas ya conocidas frente a la corrosión, que quedan recogidas en la publicación con un enfoque específico de aplicación en el campo de las estructuras portuarias. Más reciente es el uso de armaduras de polímeros reforzados con fibra de vidrio, aún poco conocidas y sobre las que apenas existe normativa. Lo recogido en el capítulo correspondiente puede servir para ayudar al conocimiento de estas entre los Proyectistas y Directores de Obra, y así incentivar su uso.

El Estado del Arte recogido en ambos tomos consideramos que tiene un gran interés, por el enfoque práctico del texto, exponiendo posibles soluciones a un problema surgido en los Puertos españoles. En todos los capítulos se recogen aplicaciones en Puertos reales, para cada alternativa. El objetivo final es contribuir a que en el futuro se lleven a cabo obras portuarias más durables.

En el CEDEX agradecemos a Puertos del Estado su interés por ampliar el estado actual del conocimiento en todo lo concerniente a las patologías de corrosión del hormigón expuesto al ambiente marino, así como la confianza depositada en nosotros para llevar a cabo esta tarea, que hemos afrontado con ilusión y con el máximo rigor técnico y compromiso institucional, esperando que sea de gran utilidad.

ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ

DIRECTORA DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEx)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
2. ARMADURAS GALVANIZADAS DE ACERO AL CARBONO	12
2.1. LA GALVANIZACIÓN	12
2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS DE ACERO GALVANIZADO	16
2.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS DE ACERO GALVANIZADO	18
2.4. ESTRUCTURAS MÁS RELEVANTES EN EL ÁMBITO COSTERO CON ARMADURAS GALVANIZADAS	22
3. ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE	27
3.1. EL ACERO INOXIDABLE	27
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE	29
3.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE	32
3.4. ESTRUCTURAS MÁS RELEVANTES EN EL ÁMBITO COSTERO ESPAÑOL CON ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE	35
4. ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (FRP)	38
4.1. POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP).....	38
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS FRP	40
4.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS FRP.....	45
4.4. ESTRUCTURAS MÁS RELEVANTES EN EL ÁMBITO COSTERO ESPAÑOL CON ARMADURAS GFRP	48
5. REPERCUSIONES ECONÓMICAS Y MEDIOAMBIENTALES DEL EMPLEO DE ARMADURAS ALTERNATIVAS RESISTENTES A LA CORROSIÓN	51
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: CATEGORÍA DEL REVESTIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL ACERO BASE [4].....	14
TABLA 2: VALORES MÍNIMOS DEL ESPESOR Y MASA DEL REVESTIMIENTO GALVANIZADO [3].....	15
TABLA 3: DIÁMETRO MÍNIMO DE DOBLADO PREVIO A LA GALVANIZACIÓN [8]	17
TABLA 4: VALORES MÍNIMOS DE MASA DE CINCO POR UNIDAD DE ÁREA Y ESPESOR DE RECUBRIMIENTO GALVANIZADO EN ARMADURAS [8].....	19
TABLA 5: RECUBRIMIENTO MÍNIMO [MM] PARA LAS CLASES DE EXPOSICIÓN RELACIONADAS CON LA CORROSIÓN POR CLORUROS EN HORMIGÓN ARMADO CUANDO SE EMPLEAN ARMADURAS GALVANIZADAS. OBTENIDO DE LA TABLA 44.2.1.1.B DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL [9]	22
TABLA 6: ACEROS INOXIDABLES. PORCENTAJE APROXIMADO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA [19]	27
TABLA 7: TIPOS DE ACERO INOXIDABLE Y COMPOSICIÓN QUÍMICA SOBRE PRODUCTO (PORCENTAJES MÁXIMOS EN MASA Y RANGOS MÍNIMO/MÁXIMO) SEGÚN TABLA 34.4 DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL [9]	30
TABLA 8: VALORES TÍPICOS DE LOS PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN LA RESISTENCIA A TRACCIÓN [29], [31]	41
TABLA 9: VALORES TÍPICOS DEL COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) [29]	43
TABLA 10: 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	54
TABLA 11: RESUMEN DE PROPIEDADES, VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS ARMADURAS GALVANIZADAS... ..	59
TABLA 12: RESUMEN DE PROPIEDADES, VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE	61
TABLA 13: RESUMEN DE PROPIEDADES, VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS ARMADURAS DE GFRP	62

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CORTE TRANSVERSAL DE UN ACERO GALVANIZADO [2].....	12
FIGURA 2: RANGO DE ESTABILIDAD DEL PH DE LA ARMADURA EN EL HORMIGÓN © [13]	20
FIGURA 3: PUENTE DE SAINT NAZAIRE (FRANCIA) © [15]	23
FIGURA 4: BALNEARIO DE LA PERLA (SAN SEBASTIÁN) © [16].....	23
FIGURA 5: ESTACIÓN MARÍTIMA DE DENIA. ARRIBA, OBRA FINALIZADA; ABAJO, DETALLES DE LA ARMADURA GALVANIZADA ANTES DEL HORMIGONADO Y DEL ESTUDIO DE DURABILIDAD REALIZADO POR EL IETCC-CSIC © [17].....	24
FIGURA 6: ARRIBA, OBRA FINALIZADA; ABAJO, DETALLES DE LA ARMADURA GALVANIZADA ANTES Y DESPUÉS DEL HORMIGONADO © [17].....	25
FIGURA 7: ARRIBA, OBRA FINALIZADA; ABAJO, DETALLES DE LA ARMADURA GALVANIZADA ANTES Y DESPUÉS DEL HORMIGONADO © [17].....	25
FIGURA 8: ARRIBA, VISTA EXTERIOR DEL ESPALDÓN RECONSTRUIDO; ABAJO, CONECTORES GALVANIZADOS ANCLADOS EN EL HORMIGÓN ORIGINAL	26
FIGURA 9: TIPOS DE ACERO INOXIDABLE © [20]	28
FIGURA 10: PROCESO DE FABRICACIÓN DE ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE (CORTESÍA DE LA FÁBRICA ROLDÁN EN PONFERRADA).....	29
FIGURA 11: DIAGRAMA TENSIÓN DEFORMACIÓN DE ARMADURAS CORRUGADAS EN CALIENTE Y EN FRÍO. IZQUIERDA, ACERO AL CARBONO; DERECHA, ACERO INOXIDABLE DÚPLEX.....	31
FIGURA 12: CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE ACERO INOXIDABLE CORRUGADO	31

FIGURA 13: RODILLOS Y TREN DE CORRUGADO DE ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE (CORTESÍA DE LA FÁBRICA ROLDÁN EN PONFERRADA)	33
FIGURA 14: PUENTE PROGRESO EN YUCATÁN (MÉRIDA, MÉJICO): A LA IZQUIERDA VISTA DE PILAS Y VIGAS TRANSVERSALES DURANTE EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Y A LA DERECHA FOTOGRAFÍA AÉREA DEL ANTIGUO MUELLE Y LA AMPLIACIÓN CONSTRUIDA EN LOS AÑOS 80 © [26].....	35
FIGURA 15: BOTAOLAS SALINETAS EN FASE DE CONSTRUCCIÓN (GRAN CANARIA) © [27]	37
FIGURA 16: ARRIBA, DESPLAZAMIENTO DE LOS CAJONES; ABAJO, FABRICACIÓN DE LOS CAJONES Y DETALLE DE ARMADURA © [28].....	37
FIGURA 17: IZDA, RESISTENCIA A TRACCIÓN: COMPARATIVA ENTRE ACERO Y GFRP; DCHA, ROTURA POR TRACCIÓN EN LABORATORIO CEDEX	41
FIGURA 18: BARRA DE GFRP Ø20 PREPARADA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	42
FIGURA 19: RESISTENCIA A CORTANTE. IZDA.: CORTANTE TRANSVERSAL; DCHA.: CORTANTE INTERLAMINAR ...	42
FIGURA 20: DISTINTAS SUPERFICIES DE ACABADO EN ARMADURAS GFRP.....	44
FIGURA 21: ENSAYO DE CREEP DE ARMADURA GFRP PARA DISTINTOS NIVELES DE CARGA	46
FIGURA 22: DEPÓSITO PARA ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO EN SOLUCIÓN ALCALINA.....	47
FIGURA 23: RED RIVER FLOODWAY BRIDGE ON TCH #1E, WINNIPEG, MANITOBA, CANADA	48
FIGURA 24: PUNTA LANGOSTEIRA. ARMADURA GFRP EN DISTINTAS FASES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS BLOQUES	49
FIGURA 25: ESPALDÓN DE ESCOMBRERAS. ARRIBA, ARMADURA GFRP DURANTE UNA DE LAS FASES DE HORMIGONADO; ABAJO, CROQUIS DE LA INTERVENCIÓN Y ARMADURA INTERIOR © [43]	50
FIGURA 26: ESPALDÓN EN EL PUERTO DE BARCELONA, EN DISTINTAS FASES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN	50
FIGURA 27: 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	55
FIGURA 28: 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	57

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La durabilidad de una estructura de hormigón armado depende fundamentalmente de la calidad y espesor del revestimiento de hormigón y de la resistencia a la corrosión de la armadura. La resistencia a la corrosión del refuerzo depende de las propiedades del hormigón para evitar o retrasar la entrada de dióxido de carbono (corrosión inducida por carbonatación), o la entrada de cloruros (corrosión inducida por cloruros), pero también de la propia capacidad del refuerzo para resistir la corrosión o disminuir la velocidad a la que se produce dicho fenómeno. Este texto trata únicamente de este segundo aspecto y está enfocado a las posibles alternativas para sustituir las armaduras de acero al carbono tradicional para obtener **hormigones de muy alta durabilidad**.

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 sub-productos 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 en la dosificación de los hormigones, buscando conseguir una mayor compacidad en la masa, para impedir tanto la entrada de humedad y CO₂ 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 texto está enfocado fundamentalmente 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, 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 contenido de esta monografía 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

A pesar de que el acero galvanizado se lleva utilizando con gran éxito desde hace décadas, tanto en estructuras nuevas como en obras de reparación y rehabilitación, y de que presenta un gran número de beneficios, tanto económicos como técnicos y medioambientales, su uso no está muy extendido debido, probablemente, a que en la toma de decisiones han pesado más otros criterios distintos a los de la durabilidad de las estructuras.

2.1. LA GALVANIZACIÓN

El fundamento del empleo del **cinc** como material protector del acero al carbono está en el hecho de que tiene un potencial eléctrico más negativo que el del acero en la serie galvánica, lo que lo hace idóneo desde el punto de vista de la protección frente a la corrosión.

Existen diferentes métodos de galvanización: galvanización en caliente, cincado electrolítico, proyección térmica del cinc y pinturas ricas en cinc. A su vez, la galvanización en caliente se puede realizar mediante un proceso continuo o discontinuo. Es este último procedimiento el que se usa para galvanizar las armaduras del hormigón.

El galvanizado consiste en el revestimiento de la barra de armadura, normalmente de acero al carbono convencional, con varias **capas de aleación hierro-cinc**, en las que el contenido de cinc aumenta con la proximidad a la superficie exterior. La última capa puede ser incluso de cinc casi puro. El proceso de galvanización se produce en un baño de cinc fundido entre 440 y 465 °C, durante el cual se materializa la reacción superficial entre el hierro y el cinc, resultando que las citadas capas de aleación estarán metalúrgicamente unidas al acero base.

En el proceso discontinuo, los productos se sumergen por piezas o lotes aisladamente en un baño de cinc. Si las piezas son de mayor tamaño que los crisoles de galvanización se pueden sumergir parcialmente y repetir el proceso hasta completar la cubrición de toda la pieza. Lo ideal es que el tamaño de las piezas sea tal que la galvanización se pueda realizar en una única inmersión. El **espesor del recubrimiento** puede resultar muy variable, consiguiéndose valores en un intervalo de 20 a 250 µm. La secuencia de capas que resulta desde el sustrato de acero a la superficie exterior del revestimiento es la siguiente [1], [2]:

- **Capa gamma:** muy delgada, normalmente inapreciable y con un espesor aproximado de 1 µm. Con un porcentaje de hierro entre 21 y 28 %.
- **Capa delta:** con contenido de hierro entre 7 y 12 % y dureza 299 HV.
- **Capa zeta:** con contenido de hierro entre 5,8 y 6,8 % y dureza 177 HV.
- **Capa eta:** piel externa de cinc casi puro y dureza 49 HV.

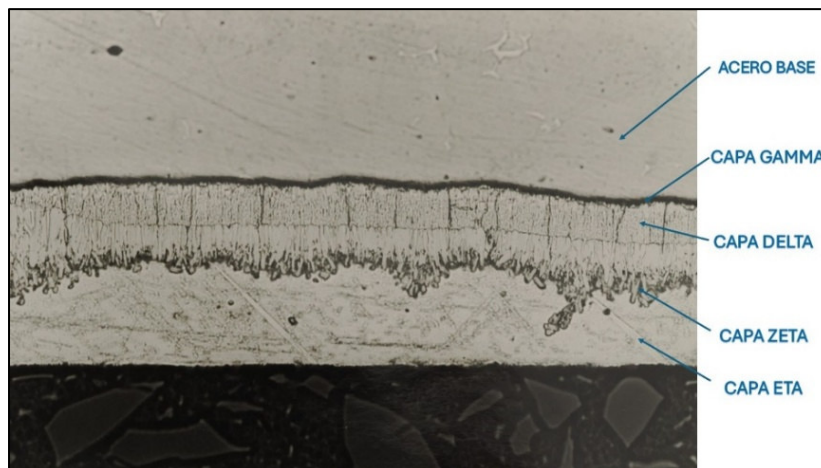


Figura 1: Corte transversal de un acero galvanizado [2]

La **dureza** típica de los aceros al carbono es aproximadamente de 135 HV [2], pero las capas de aleación cinc-hierro son, como se ha descrito, bastante más duras, mientras que la capa externa de cinc es más blanda y dúctil que el acero y que las capas de aleación. En consecuencia, cualquier impacto es absorbido, por lo general, por la capa de cinc que se deforma, mientras que la resistencia a la abrasión o a los arañazos es proporcionada por las capas de aleación que son mucho más duras. En el caso de que se desprenda algo del recubrimiento debido a un golpe muy fuerte, al menos la primera capa de aleación, la capa gamma, quedaría adherida y al estar unida al acero base a nivel atómico seguiría manteniendo la protección electroquímica al acero.

La galvanización en caliente permite cubrir completamente las piezas, incluyendo los huecos. Su gran ventaja está en la elevada durabilidad sin ningún tipo de mantenimiento. Sus características fundamentales, además de las derivadas de la elevada resistencia a la corrosión, son la excelente adherencia con el sustrato acero, debido a la unión metalúrgica entre las capas de aleación cinc-hierro, y la elevada resistencia a los impactos y a la abrasión. Esto último está relacionado también con la adherencia y con la elevada dureza de las capas de aleación que, como se ha comentado, es superior a la del acero base.

La galvanización en caliente cuenta con normativa específica en la que se establecen sus requisitos mínimos:

- UNE-EN ISO 1461 Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo. Esta norma define las propiedades generales y los métodos de ensayo de los recubrimientos aplicados por inmersión de productos de hierro y acero en un baño de cinc fundido y también los requisitos relativos a la composición de dicho baño [3].
- UNE-EN ISO 14713-2 Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Parte 2: Galvanización en caliente. La norma indica los principios generales de diseño de los artículos que vayan a ser galvanizados en caliente para su protección contra la corrosión [4].

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 de cinc.

La **calidad del acero galvanizado** depende de muchos factores que, a priori, se pueden clasificar en dos grandes grupos, los debidos a las características del acero base y los relacionados con el propio proceso de galvanización. Estos factores afectarán al espesor, a la textura y a las propiedades físicas y mecánicas del recubrimiento de cinc.

Respecto al **acero base**, el aspecto más influyente es su **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 obtenidas en el proceso de galvanización. Contenidos de silicio entre 0,03 y 0,14 %, o superiores a 0,25 %, producen revestimientos más gruesos (efecto Sandelin) 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 %; en este caso, la normativa específica de galvanización de productos de acero recomienda que, la suma de los contenidos de silicio y fósforo cumpla la siguiente relación: $Si+2,5P \leq 0,09\%$ en productos laminados en caliente. Para aceros laminados en frío, la recomendación sería: $Si+2,5P \leq 0,04\%$. La composición química afecta, además de al espesor de las capas de revestimiento, al aspecto superficial, que, en los límites no recomendados, se vuelve oscuro y mate.

La norma UNE-EN ISO 14713-2 [4] categoriza los revestimientos de cinc en cuatro clases, en función de los contenidos de los elementos de aleación en el material base, según se indica en la Tabla 1. Las composiciones indicadas para las dos primeras categorías permiten un mayor control del espesor del revestimiento, así como lograr un mejor aspecto externo y que sea más probable que se llegue a formar capa eta con un contenido de cinc casi puro.

Tabla 1: Categoría del revestimiento en función de la composición del acero base [4]

Categoría	Contenido de Si y P (%)
A ¹⁾	$Si \leq 0,03$ y $P < 0,02$
B	$0,14 \leq Si \leq 0,25$
C	$0,03 < Si < 0,14$
D	$Si > 0,25$

¹⁾ También se consideran dentro de la categoría A:

- Los aceros que, cumpliendo la condición indicada para el silicio, cumplan, además: $Si + 2,5P \leq 0,09$ %
- Los aceros laminados en frío que cumplan: $Si + 2,5P \leq 0,04$ %

Otros factores de influencia relativos al acero base son:

- La **rugosidad superficial**, que afecta a la reactividad y a la adherencia con el sustrato. Cuando las superficies son rugosas normalmente se obtienen revestimientos más gruesos. Puede ser necesario realizar tratamientos previos para aumentar la reactividad de las piezas a galvanizar.
- Las **tensiones internas previas al galvanizado**, que se pueden liberar durante el proceso y producir deformaciones en el producto una vez recubierto; por ejemplo, en zonas fragilizadas por deformación plástica en frío.
- Los **procesos térmicos**, por ejemplo, los ocasionados durante el corte o el soldeo, que hayan podido influir sobre la composición y estructura del acero calentado y, por tanto, en su galvanizado posterior.

Respecto a los factores relativos al **proceso de galvanización**, que también influyen en la calidad y el espesor del revestimiento, se pueden destacar los siguientes:

- **Calidad del cinc y composición del baño.** No debe contener más de un 2 % de otros metales y, más en detalle, la cantidad de otros elementos, excluidos el hierro y el estaño, no debe superar el 1,5 % en masa [3].
- **Temperatura de galvanización.** Debe estar entre 440 y 465°C.
- **Tiempo de inmersión.** Dependerá del tamaño y la forma de las piezas a galvanizar. En una primera etapa del proceso el espesor de las capas aumenta muy rápidamente, después el crecimiento aminora y finalmente se hace muy lento. El tiempo de inmersión debe ser lo más corto posible para evitar el exceso de cinc.
- **Velocidad de extracción.** La velocidad de retirada se establece en función del diámetro de la barra, normalmente entre 1 y 10 m/min. Además, se debe permitir el goteo y la eliminación de correduras.

La evaluación para determinar la **calidad del revestimiento** galvanizado incluye la inspección del aspecto superficial del acabado y el espesor, y solo en algunos casos la comprobación de la adherencia entre el revestimiento y el sustrato de acero.

- Respecto al **aspecto superficial**, el acabado debe estar exento de nódulos, ampollas, grumos, rugosidades y puntos punzantes. No deben existir en la superficie zonas no cubiertas. Una vez aplicado tiene que quedar libremente expuesto a la atmósfera evitando la humedad durante algún tiempo para prevenir la aparición de manchas blancas que contienen compuestos de cinc.
- Respecto al **espesor**, hay que tener en cuenta que el galvanizado protege a las piezas de hierro y acero frente a la corrosión y que esta protección se considera que tiene una duración proporcional al espesor del revestimiento. Para determinar el espesor del revestimiento galvanizado se puede utilizar el método magnético, determinando el espesor medio [5], el gravimétrico, determinando la masa media [6] o el de corte micrográfico según el anexo D de UNE-EN ISO 1461 [3].
- Respecto a la adherencia, dada la naturaleza y estructura de los revestimientos galvanizados, normalmente no es necesaria su comprobación y además no existe una norma específica para ello. Este tipo de revestimientos tiene una buena adherencia ante una manipulación normal. No se considera como tal el doblado de las piezas. En términos generales, un recubrimiento más grueso requerirá una manipulación más cuidadosa que uno más fino.

Como **espesor y masa mínimos** del revestimiento galvanizado, para piezas de acero no centrifugadas, como sería el caso de las armaduras, se recomiendan los valores recogidos en la Tabla 2. Se han incluido exclusivamente los valores de referencia para piezas de espesor comparable al diámetro de las armaduras normalizadas. La equivalencia entre espesor y masa debe realizarse considerando una densidad nominal del recubrimiento de cinc de $7,2 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 2: Valores mínimos del espesor y masa del revestimiento galvanizado [3]

Espesor pieza	Espesor local del recubrimiento galvanizado (mínimo) [μm]	Masa local del recubrimiento galvanizado (mínimo) [g/m^2]	Espesor medio del recubrimiento galvanizado (mínimo) [μm]	Masa media del recubrimiento galvanizado (mínimo) [g/m^2]
$> 3 \text{ mm y } \leq 6 \text{ mm}$	55	395	70	505
$> 6 \text{ mm}$	70	505	85	610

Las **superficies no recubiertas** de las piezas pueden ser reacondicionadas siempre que no se superen los límites que se indican a continuación; en caso contrario, las piezas tendrían que volver a ser galvanizadas [3]:

- Que la extensión sea, como mucho, el 0,5 % de la superficie total de la pieza.
- Que cada parte no recubierta tenga una extensión máxima de 10 cm^2 .

El **reacondicionamiento** se puede realizar mediante pinturas o pastas que contengan cinc o mediante proyección térmica de cinc. Previamente se debe eliminar el óxido, limpiar las superficies y pretratarlas para garantizar la adherencia. En el caso concreto de reacondicionar armaduras para el hormigón, se podría acordar un método y material de reparación específicamente adecuado para estos productos. Salvo casos concretos, el espesor mínimo de las zonas reacondicionadas debe ser de $100 \mu\text{m}$.

Para conseguir un revestimiento galvanizado de calidad es muy importante la **preparación de la superficie**. Es fundamental que las piezas estén limpias de todos los contaminantes superficiales, desengrasadas y decapadas previamente a la galvanización, sin restos de grasas, pinturas, escorias, etc.; en caso contrario, podría dar lugar a zonas superficiales no recubiertas.

En caso de ser necesaria la ejecución de soldaduras es preferible hacerlas antes de la galvanización, para asegurar un revestimiento continuo en la zona soldada.

El espesor del recubrimiento viene determinado por la naturaleza y el espesor del acero. La mayoría de los aceros pueden galvanizarse en caliente y son apropiados para ello, y en concreto los aceros para armaduras, ejecutados bajo las normas:

- UNE-EN 10080 Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades [7].
- EN 10348-2 Steel for the reinforcement of concrete – Galvanized reinforcing steel products [8].

2.2. 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, normalmente fabricadas bajo la norma UNE-EN 10080 [7]. 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 [9] 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.

El único caso en el que se ha observado que la galvanización puede influir en las resistencias mecánicas es en el de los alambres estirados en frío, debido a que la temperatura puede dar lugar a un alivio de las tensiones introducidas en el proceso de conformación. En algunos casos, esto se traduce en un aumento de la resistencia a tracción y en otros supone una disminución de dicha resistencia. En general, la variación no sería superior al 10 % del valor previo, por lo que este cambio no suele ser significativo [10].

Los aceros de alta resistencia y con tendencia al endurecimiento pueden sufrir variación en las propiedades mecánicas, pero no son aceros comunes para armaduras pasivas. No se recomienda galvanizar acero para armaduras con tensiones de tracción superiores a 800 MPa, como sí sería el caso de las armaduras activas.

Las medidas geométricas, las masas y las tolerancias deben ser las mismas que para armaduras sin galvanizar, a excepción de la masa por metro, cuyo límite superior de desviación no aplica a los productos de acero galvanizado para armaduras. La masa por metro obtenida no debe emplearse para determinar el diámetro nominal del producto galvanizado, que tampoco debe sustituir al del acero base declarado según UNE-EN 10080 [7].

La **adherencia con el hormigón** es similar a la del acero sin recubrimiento, siempre y cuando se evite durante el galvanizado la formación de un importante sobre-espesor de cinc en la zona de contacto de la corruga con la superficie circular de la barra. Respecto a esto, la norma EN 10348 [8] de acero galvanizado para armaduras, indica que los resaltos superficiales, tanto corrugas como grafilas, no deben ver disminuida su altura o profundidad respectivamente en más de un 95 % tras el proceso de galvanizado. Si la disminución fuera mayor, se podría garantizar la adherencia con el hormigón cumpliendo los requisitos del área proyectada de corruga o grafila indicados en la norma UNE-EN ISO 15630-1 [11]. El engrosamiento de los resaltos superficiales podría perjudicar tanto a la adherencia, al disminuir la altura de corruga, como a la resistencia a cortante de la superficie cilíndrica de hormigón situado entre las corrugas, al variar la forma de las corrugas por la acumulación de cinc.

Si se usan barras galvanizadas, además de lo anterior, es especialmente importante el tiempo necesario para desarrollar la adherencia completa y la capacidad adherente última. Esto es debido a la posible pérdida de adherencia a edades tempranas del hormigón, cuando está aún fresco, ya 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. Si esta fase es larga, lo cual es más fácil cuando se emplean cementos muy alcalinos, además de influir negativamente en la durabilidad (ver apartado 2.3), puede provocar la disminución de la adherencia con el hormigón y la resistencia a cortante.

En una segunda fase, se formaría hidroxizincato cálcico, que se incluiría en los productos de hidratación del cemento, por lo que, finalmente, tanto la resistencia del hormigón cerca de la superficie del revestimiento como la adherencia entre las barras y el hormigón, podrían ser incluso mayores que en el caso de las armaduras no galvanizadas.

Respecto al **doblado** de las armaduras galvanizadas, no se recomienda realizarlo tras la galvanización, ya que se puede producir fisuración con especial incidencia en la zona de transición entre la parte central de la barra y las corrugas y, mayormente, si los revestimientos son de gran espesor. De forma similar, no se recomiendan otras operaciones como el corte o la soldadura tras la galvanización, aunque no están prohibidas y sí pueden realizarse si se toman las debidas precauciones y se reparan las superficies expuestas en los extremos cortados, así como los agrietamientos y descamaciones que hayan aparecido en la parte doblada.

En todo caso, el galvanizado se realiza generalmente después del doblado; aunque en este caso se podría producir la fragilización del acero en la zona que ha sido estirada en frío, debido al gradiente térmico durante la galvanización. La norma EN 10348 [8] indica los diámetros mínimos de doblado para disminuir la susceptibilidad a este fenómeno; por este motivo habrá que tener especial cuidado cuando se galvanizan ganchos, patillas y ganchos en U. El beneficio de reducción de recubrimientos mínimos de hormigón que otorga el Código Estructural [9] cuando se emplean armaduras galvanizadas, no aplica cuando el doblado se realiza después del proceso de galvanización.

Tabla 3: Diámetro mínimo de doblado previo a la galvanización [8]

Diámetro nominal [mm]	Diámetro mínimo de doblado
≤ 16	6d
$> 16 \text{ y } < 36$	8d
≥ 36	10d

El comportamiento a **fatiga** de las armaduras galvanizadas dependerá del tipo de acero y de su composición metalúrgica, lo que a su vez influirá en la composición de las capas cinc-hierro. Estas capas pueden llegar a fisurarse cuando se someten las barras a tensiones cíclicas y las grietas formadas podrían actuar como iniciadores de fisuración en la superficie del acero. Pero también, dependiendo de los factores indicados, la temperatura del baño de cinc puede actuar reviniendo el acero, lo cual podría incluso mejorar el comportamiento de las armaduras en fatiga.

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 debidos 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.

2.3. 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 cubrimiento y revestimiento del acero, la protección catódica y el efecto de autosellado.

- Efecto de **revestimiento**: los productos de corrosión del cinc forman capas muy insolubles, compactas y adherentes, por tanto, constituyen, junto con las propias capas de cinc, una barrera protectora muy eficaz. Mientras el recubrimiento esté intacto, debido a su adhesión al material base y la resistencia a la abrasión, el acero estará protegido y la corrosión no se producirá.
- **Protección catódica**: dado que el cinc es un metal anódico con respecto al acero, el cinc se verá preferentemente atacado en contacto con él, evitando la corrosión, al constituir el cinc el ánodo de la posible pila de corrosión que se forme en presencia de humedad y oxígeno. Este tipo de protección podría estar activa incluso si el revestimiento está dañado.
- Efecto **autosellante**: los productos de corrosión del cinc permiten la restauración de pequeñas discontinuidades del revestimiento, lo que, unido a la protección catódica, supone que, si el revestimiento tiene pequeños defectos por golpes o arañazos, siga pudiendo ofrecer una protección eficaz.

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 ocurran estos tipos de daños es la que limita las operaciones de elaboración de la ferralla después del galvanizado. La superficie no cubierta de las barras no debe resultar en ningún caso inferior al 0,5 % de la superficie total de la barra en cada metro lineal [8]. La reparación de superficies puede realizarse como se ha indicado en el apartado 2.1. No se recomienda realizar el hormigonado si se detectan, en alguna ferralla elaborada o en alguna ferralla armada, defectos en el galvanizado, hasta que éstos sean reparados.

La protección que aporta el galvanizado es directamente proporcional a su espesor, siendo la velocidad de corrosión del cinc inferior a la del acero, entre 15 y 50 veces. Mientras el cinc no se haya consumido, el acero no se corroerá. 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 de la capacidad de protección del galvanizado es el valor medio del espesor de revestimiento, que suele estar en el rango de 85 a 87 μm , lo cual equivale a un intervalo entre 600 y 610 g/m^2 de masa de recubrimiento. En algunos países se limita además el espesor máximo en el orden de unas 200 μm . En el Código Estructural [9], se indica exclusivamente que el espesor de galvanizado de las armaduras no podrá ser menor de 70 μm , equivalente a 505 g/m^2 .

En la Tabla 4 se recogen los valores mínimos que deben cumplir tanto la masa media como el espesor medio de las armaduras galvanizadas según la norma EN 10348 [8], para garantizar la uniformidad del revestimiento. En la relación entre el espesor y la masa debe considerarse una densidad del cinc de 7,2 gr/cm^3 . Localmente se pueden obtener valores menores, pero no inferiores al 80 % de los especificados. Estos límites son sensiblemente similares a los recogidos en el apartado 2.1 para la galvanización general y en este caso particular tampoco es necesario evaluar la adhesión del recubrimiento.

Tabla 4: Valores mínimos de masa de cinc por unidad de área y espesor de recubrimiento galvanizado en armaduras [8]

Diámetro [mm]	Masa media mínima de recubrimiento [g/m²]	Espesor medio mínimo de recubrimiento [μm]
> 6	610	85
≤ 6	505	70

Como se ha comentado anteriormente con relación a la adherencia de las barras galvanizadas con el hormigón (ver apartado 2.2), la durabilidad de estas armaduras podría ser cuestionable cuando se usan cementos de alta alcalinidad, ya que durante el proceso de fraguado existe una primera fase activa de corrosión del cinc, en la que combinado con el agua se forma hidróxido de cinc y se desprende 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 μm. 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, con el consiguiente incremento de la pérdida de espesor de revestimiento.

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. Cuando se produce la pasivación, la superficie se cubre totalmente de productos de corrosión cristalizados.

Según algunas publicaciones [12], a medida que aumenta el valor del pH también aumenta el tamaño de los cristales, llegando a no poder sellar la superficie en su totalidad y quedar pequeñas zonas sin protección. En consecuencia, el metal no llegaría a estar suficientemente pasivado y la disolución del cinc continuaría hasta mayores grados, pudiendo llevar a la total desaparición del revestimiento galvanizado en algunos años. Otras investigaciones no confirman que la alta alcalinidad incremente a largo plazo la corrosión del cinc, sino que la pasivación del cinc se retrasa cuanto más alto es el pH de la solución acuosa de los poros, pero finalmente siempre se acaba produciendo.

Una característica particular de las soluciones alcalinas, que es importante para el comportamiento del cinc, es que la concentración de iones de calcio decrece a medida que se incrementa el valor del pH. La importancia está en que los iones de calcio son necesarios para la pasivación del cinc en soluciones alcalinas.

El cinc puro proporciona una pasivación más efectiva en contacto con soluciones alcalinas, mientras que las capas adyacentes de aleación son menos estables, particularmente en presencia de cloruros, los cuales las atacan selectivamente.

Los agentes pasivantes, tales como los cromatos solubles, pueden inhibir la reacción del cinc con los álcalis del hormigón y, por tanto, la corrosión del cinc y el desprendimiento de hidrogeno en el hormigón fresco. Cuanto mayor es el contenido de álcalis y menor el contenido de cromatos solubles, en mayor medida y durante más tiempo se produce la reacción del hidrogeno y más tarde termina la pasivación. La cromatización puede aplicarse directamente en la superficie de la barra o en el agua de amasado del hormigón.

Es muy significativo que, en Norteamérica, donde se usan mayoritariamente cementos menos alcalinos comparados con los europeos, el empleo de armaduras galvanizadas haya resultado, en la mayor parte de los casos, muy satisfactorio desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión y la durabilidad. Además, para evitar la reacción entre la pasta de cemento alcalina y la superficie de cinc durante el curado del hormigón, en algunos países se recomienda el uso de un tratamiento con cromo después de galvanizar.

En resumen, en función del valor del pH de la solución acuosa de los poros, al cabo de unas pocas horas, o varios días, la velocidad de corrosión del cinc decrece. Después, en el hormigón endurecido, las velocidades de corrosión de las barras galvanizadas embebidas en hormigones fabricados con diferentes tipos de cemento tienden a igualarse, y los valores de corrosión dependerán de los parámetros propios del hormigón y de las condiciones ambientales.

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 en hormigón carbonatado.

Para valores de pH entre 6 y 12,5, el recubrimiento de cinc de una barra galvanizada en caliente mantiene una velocidad de corrosión muy baja, por lo que, en un hormigón carbonatado, las armaduras galvanizadas en caliente permanecerían estables. Para valores de pH entre 11,5 y 13,2, la barra galvanizada en caliente se mantiene protegida debido a la formación de la capa pasiva de hidroxincato de calcio. Con el tiempo, el valor del pH se reduciría a un valor casi neutro de 7, pero la armadura galvanizada en caliente no se vería afectada por la carbonatación del hormigón. En general, es muy importante tener en cuenta que los aceros galvanizados en caliente no deben usarse sin protección adicional en soluciones ácidas o en soluciones alcalinas fuertes. (ver Figura 2).

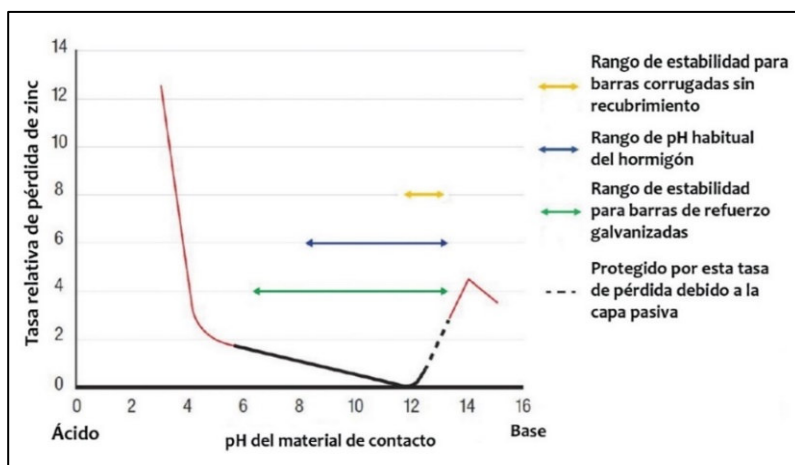


Figura 2: Rango de estabilidad del pH de la armadura en el hormigón © [13]

La **corrosión por cloruros** en un acero galvanizado es en forma de picaduras, su aparición es más lenta y menos dispersa que en un acero al carbono durante mucho más tiempo; por tanto, la formación de fisuras en el hormigón y su desconchado son también menores, por lo que se reduce considerablemente el deterioro de éste. 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 [9], 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 [13] 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 indica en el Código Estructural [9], para conocer el límite máximo de cloruros en cada caso particular, se deben llevar a cabo trabajos experimentales según UNE 83992-2 [14], 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.

Algunos estudios indican que en hormigón altamente contaminado con cloruros los aceros galvanizados llegarían a ser ineficaces como armaduras resistentes a la corrosión. Si el contenido de cloruros excede de aproximadamente el 1,5 % en peso de cemento, la velocidad de corrosión se incrementaría rápidamente. Aun así, la galvanización siempre retrasaría el inicio de la fase activa de la corrosión, en comparación con las barras no galvanizadas, pero la protección adquirida con la galvanización sería mucho más limitada en el tiempo en estos casos extremos [12].

En un **hormigón fisurado**, las armaduras galvanizadas pueden sufrir corrosión localizada, tanto por presencia de cloruros, que alcanzarán de forma más rápida la superficie de la armadura, como por carbonatación, ya que en las fisuras el efecto se nota más rápidamente a la profundidad de las armaduras. Si las fisuras alcanzan al revestimiento de cinc, ni la protección catódica ni el efecto cicatrizante pueden detener la corrosión en las zonas dañadas si se combina con la presencia de cloruros; ya que, una vez que se ha iniciado la corrosión local del cinc, se producirá antes corrosión por picaduras en el acero.

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.

Respecto al **uso combinado** de armadura convencional de acero al carbono y armadura galvanizada, el Código Estructural [9] considera que, en todo caso, se debe evitar el contacto entre ellas y así garantizar que no se formen pilas galvánicas. Estas precauciones son especialmente importantes en hormigones sumergidos o en ambiente marino, ya que, en general, el acero galvanizado se comporta bien en contacto con otros materiales metálicos como el acero, aluminio o cobre. El uso combinado exigiría, por tanto, el empleo de procedimientos especiales para evitar el contacto, como sería el caso de la utilización de elementos de plástico expresamente fabricados para esta finalidad.

En el caso de poner en contacto eléctricamente barras de acero galvanizado y armaduras de acero no galvanizado en el momento del fraguado, el cinc estaría en fase activa y su potencial de corrosión sería bajo. El acero no galvanizado estaría en estado pasivo y su potencial de corrosión sería mayor, por lo que se aceleraría la velocidad de corrosión del cinc. Pero una vez formada la capa de cinc, su potencial de corrosión aumenta y por tanto la diferencia de potencial entre el acero galvanizado y el acero sin galvanizar disminuye lo que provoca que la velocidad de corrosión se ralentice, siempre y cuando el contenido de cloruros sea bajo.

Para las clases de exposición de corrosión inducida por cloruros de origen no marino (XD) y corrosión inducida por cloruros de origen marino (XS), si se van a utilizar armaduras galvanizadas en caliente, el Código Estructural [9] permite proyectar secciones de hormigón con **recubrimientos mínimos** inferiores a los prescritos para el uso general de armaduras de acero al carbono, pero reducidos en no más de 10 mm (ver Tabla 5). En este caso, se tiene que justificar obligatoriamente esta disminución y además se tienen que tomar medidas suplementarias que garanticen durante toda la vida útil de la estructura la eficacia del procedimiento y productos utilizados. Además, para garantizar la durabilidad, dichas reducciones se podrán considerar sólo cuando la galvanización se haya producido posteriormente a la elaboración de la ferralla, y, por tanto, a las operaciones de corte, doblado o soldadura.

Tabla 5: Recubrimiento mínimo [mm] para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros en hormigón armado cuando se emplean armaduras galvanizadas. Obtenido de la tabla 44.2.1.1.b del Código Estructural [9]

Cemento	Vida útil de proyecto en años	Clase de exposición			
		XS1	XS2	XS3	XD ¹⁾
CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsilíce superior al 6 % o de cenizas volantes superior al 20 %	50	15	20	35	25
	100	20	25	40	30
CEM II/B-S, B-P	50	20	25	55	30
	100	25	30	60	35
Resto de cementos utilizables, según el art. 28 de [9]	50	30	35	2)	2)
	100	55	2)	2)	2)
CEM II/A-D o bien CEM I con adicción de humo de sílice superior al 6 %	50	20	25	40	30
	100	25	30	55	35
Resto de cementos utilizables, según el art. 28 de [5]	50	35	45	2)	2)
	100	2)	2)	2)	2)

¹⁾ Para cualquiera de las tres clases de exposición XD

²⁾ Estas situaciones obligan, en el caso de armaduras convencionales, a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda realizar un estudio específico para establecer el espesor de recubrimiento necesario en función de las condiciones de agresividad y la vida útil requerida.

Para la evaluación de las características diferenciales de las armaduras galvanizadas se debe considerar como **unidad de inspección** cada uno de los pedidos de un tipo de forma de producto, con un máximo de 20 t [8]. Se debe verificar:

- Espesor de recubrimiento en 3 muestras de cada unidad de ensayo. La determinación puede realizarse por el método magnético, obteniendo el espesor de recubrimiento, o por el método gravimétrico, obteniendo la masa del recubrimiento. Este segundo método siempre tiene prioridad en caso de discrepancia.
- Altura de corruga o profundidad de grafila en 3 muestras de cada diámetro de cada unidad de ensayo. Comparando los valores obtenidos en las mismas corrugas o grafilas antes y después del galvanizado.

2.4. ESTRUCTURAS MÁS RELEVANTES EN EL ÁMBITO COSTERO CON ARMADURAS GALVANIZADAS

El acero galvanizado se ha utilizado de modo eficaz desde hace más de 70 años. Entre sus usos más comunes se encuentran las estructuras costeras y marinas, como muelles, rompeolas, dársenas y puertos, y otras como infraestructuras de transporte, tableros de puentes, instalaciones para el tratamiento de agua, postes de iluminación, centrales eléctricas, etc.

Una de las primeras construcciones europeas en las se usaron armaduras galvanizadas fue el puente Saint Nazaire en Francia. Se proyectó con barras de 16 y 12 mm de diámetro, que se colocaron en las alas de los extremos de las vigas en T y en las losas de conexión fabricadas in situ a la altura de las alas (aproximadamente 63 toneladas). La mayor parte del hormigón armado del puente no estaba protegido contra la corrosión, lo que dio lugar a un amplio programa de mantenimiento y reparación.

En cambio, en los lugares específicos donde se utilizaron las armaduras galvanizadas no se necesitaron reparaciones.



Figura 3: Puente de Saint Nazaire (Francia) © [15]

En Estados Unidos, son numerosas las estructuras de hormigón armado con acero galvanizado en las que se han obtenido muy buenos resultados, la mayoría de ellas son puentes: Athens Bridge (Pensilvania), Boca Chica Bridge (Florida), Tioga Bridge (Pensilvania), Curtis Road Bridge (Michigan), Spring Street Bridge (Vermont), Intersección Evanston (Wyoming), etc. También destacan cierto número de estructuras en las Islas Bermudas.

En **España** su uso es posterior y a pesar de sus ventajas frente a la corrosión, su empleo no está muy extendido ni siquiera en ambientes singularmente expuestos. Una de las primeras experiencias fue el **Balneario de la Perla** en San Sebastián, situado en la playa de la Concha y en el que se emplea agua de mar en sus instalaciones. La primera construcción de este balneario databa de finales del siglo XIX y debido a su pésimo estado de conservación fue sustituido, entre 1908 y 1910, por una segunda estructura de hormigón armado. Finalmente, en la década de los 90, el ayuntamiento se planteó una reforma muy importante. En febrero de 1991, el edificio de La Perla cerró sus puertas y en 1993 se procedió al derribo y reconstrucción del edificio con armaduras de acero galvanizado.



Figura 4: Balneario de La Perla (San Sebastián) © [16]

Entre las más recientes construcciones portuarias con armaduras galvanizadas destacan además varias estructuras de la Generalitat Valenciana en las que se habían producido deterioros muy acusados por corrosión después de una vida útil bastante más corta de lo esperado. Se utilizó esta tipología de

armaduras tanto para proteger las zonas más críticas, como para estudiar el efecto del galvanizado en la evolución de la corrosión en ambiente marino. Como ejemplo, se citan las siguientes:

- **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 m² de los cuales 2.300 m² 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 CI dosificado: 6,4 l/m³) [17] y [18].
- **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 Pórtland 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 [17] y [18].
- **Zona pesquera e industrial del puerto de Vinarós.** 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 m³). Se ejecutaron con hormigón HA-30/B/20/IIIc+Qb [17] y [18].



Figura 5: Estación marítima de Denia. Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes del hormigonado y del estudio de durabilidad realizado por el IETcc-CSIC © [17]



Figura 6: Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes y después del hormigonado © [17]



Figura 7: Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes y después del hormigonado © [17]

Finalmente, por su reciente ejecución y por el uso de armaduras alternativas de dos tipologías distintas, destaca también el espaldón del dique de la bocana norte del puerto de Barcelona. Al igual que en los casos anteriores, existía una primera estructura, cuyo estado de conservación era sensiblemente peor de lo esperado, habiendo desarrollado importantes problemas por corrosión, prácticamente desde su finalización en 2003.

En 2009, se ejecutaron las primeras obras de refuerzo y reparación de cierta envergadura, y, finalmente, a finales de 2023 se afrontó su reconstrucción integral, demoliendo prácticamente todo el espaldón hasta la retirada de todas las armaduras de acero convencional. Las armaduras principales se sustituyeron por barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP) y los puentes de unión entre hormigones y las conexiones mecánicas, se ejecutaron con acero convencional galvanizado en caliente.

Para la conexión entre hormigones se utilizaron anclajes de acero galvanizado en caliente de diámetro $\Phi 16$ mm. Se dispusieron piezas rectas de longitud 560 mm en la zona superior del espaldón demolido y piezas curvas de longitud 270 mm con patilla de 190 mm en los dos paramentos del espaldón. Las armaduras eran barras corrugadas de tipo B500 SD, galvanizadas después de conformadas y con un espesor medio de recubrimiento entre 120 y 200 μm .

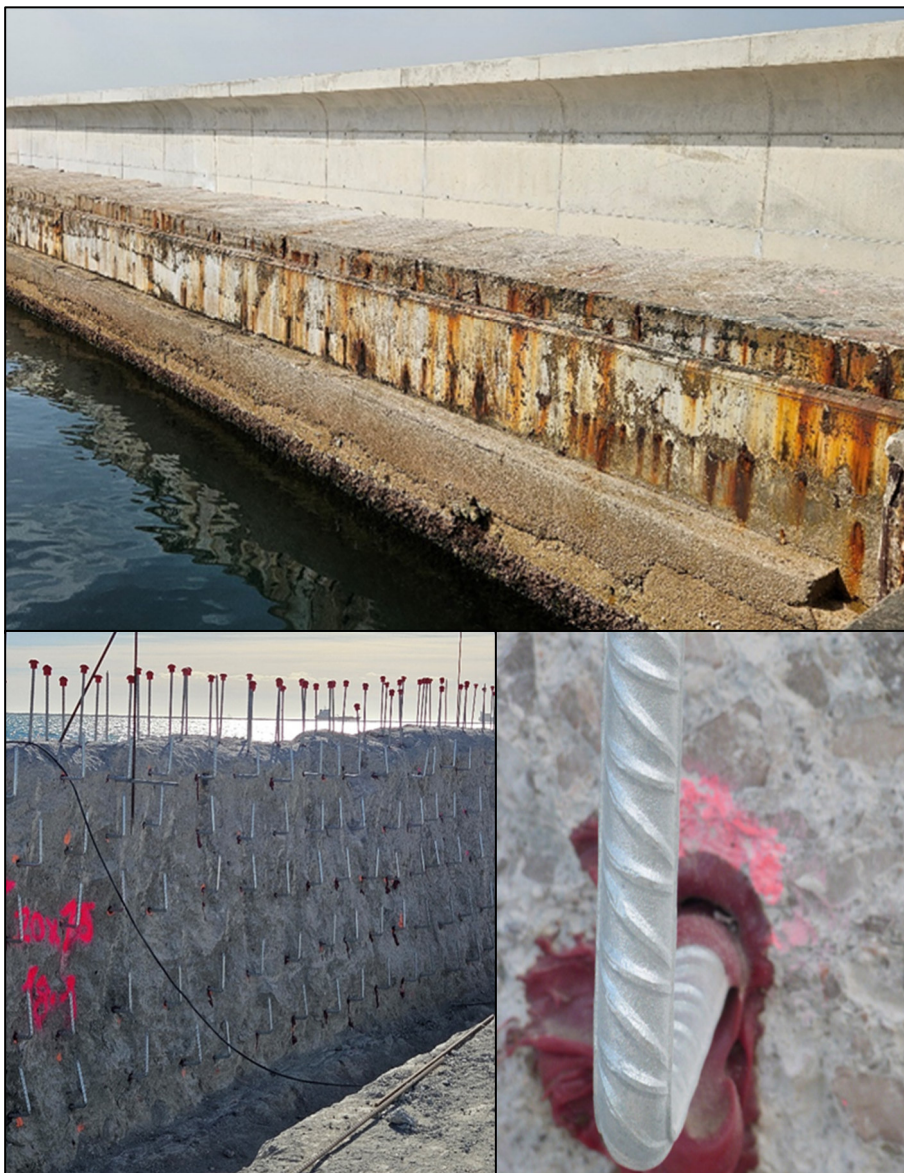


Figura 8: Arriba, vista exterior del espaldón reconstruido; abajo, conectores galvanizados anclados en el hormigón original

3. ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable y su uso como armaduras, tanto laminadas en caliente como en frío, para reforzar estructuras de hormigón armado es una de las opciones que más durabilidad pueden aportar a los proyectos en los que la exposición ambiental sea singularmente severa y las construcciones vayan a estar sometidas a agentes muy agresivos, ya que su comportamiento frente a la corrosión es excelente.

Sus características mecánicas son iguales o incluso mejores que las de las barras corrugadas de acero al carbono tradicionales. Las armaduras de acero inoxidable se han utilizado tanto en estructuras nuevas como para reparación o rehabilitación de otras más antiguas, pero su uso no está muy extendido debido fundamentalmente a su elevado coste.

3.1. EL ACERO INOXIDABLE

Según la norma UNE-EN 10088-1 [19], los aceros inoxidables son aquellos que contienen al menos un 10,5 % de cromo y un máximo de 1,2 % de carbono. El contenido de cromo permite la formación de una capa muy fina de óxido que los autoprotege.

Se pueden **clasificar** según tres principios diferentes:

- Propiedades de utilización, que a su vez pueden ser: aceros resistentes a la corrosión, aceros refractarios y aceros resistentes a la fluencia.
- Microestructura, que a su vez pueden ser: ferríticos, martensíticos, endurecidos por precipitación, austeníticos y austenoferríticos (dúplex).
- Elementos principales de aleación: cromo y níquel, molibdeno, manganeso, bajo contenido en carbono, nitrógeno, elementos que conducen a la estabilización y azufre. El cromo y el níquel mejoran la resistencia a la corrosión, pero también las propiedades mecánicas. De hecho, el níquel, modifica las propiedades de la capa pasiva haciéndola más fina y protectora. El molibdeno mejora la resistencia a la corrosión localizada aumentando el espesor de la capa pasiva. El nitrógeno también mejora la resistencia a la corrosión localizada, pero reteniendo el cromo en la capa pasiva y facilitando la repasivación, además de mejorar la resistencia mecánica cuando se añade como sustituto del níquel. El manganeso aumenta la solubilidad del nitrógeno cuando sustituye también al níquel.

En la Tabla 6, 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 6: Aceros inoxidables. Porcentaje aproximado de composición química [19]

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

Los aceros **inoxidables ferríticos** tienen un contenido de cromo bastante elevado, entre el 10,5 y el 30 % pero deben limitar su proporción en carbono por debajo del 0,08 %. Presentan una estructura ferrítica debido al carácter fuertemente alfégeno que tiene el cromo. Para facilitar su mecanizado, se añade un contenido de azufre superior al 0,15 %, lo que reduce significativamente su resistencia a la corrosión. Para obtener una mayor resistencia se añade nitrógeno en cantidades pequeñas, entre un 0,10 y un 0,30 %. Son magnéticos, de dureza poco elevada y poseen poca ductilidad. Resisten bastante bien la corrosión atmosférica mientras el ambiente no sea muy agresivo.

Los aceros **inoxidables austeníticos** son los de mayor interés en ingeniería. Tiene un contenido de cromo entre el 14 y el 28 %, una proporción de carbono inferior al 0,40 % (como valor máximo y excepcionalmente para alguno de los tipos austeníticos, pero normalmente bastante inferior), e incluyen níquel entre el 0,5 y el 35 %. Presentan una microestructura austenítica debido al carácter fuertemente gammágeno del níquel. La presencia de otros elementos gammágenos como el carbono, manganeso, nitrógeno o cobre, incrementan la estabilidad de la austenita. Son tenaces y dúctiles, con una deformación antes de rotura muy alta. Son amagnéticos y su resistencia a la corrosión atmosférica, al agua y al vapor de agua es superior a la de los aceros inoxidables ferríticos. La adición de molibdeno mejora su resistencia a la corrosión por picaduras en medios ácidos con cloruros y a la corrosión bajo tensión. Esta adición de molibdeno hasta un 8 % es posible por la presencia de nitrógeno que estabiliza la estructura austenítica.

Estos aceros inoxidables austeníticos se pueden subdividir según su contenido de carbono y demás elementos de aleación en: de muy bajo contenido en carbono, con molibdeno, estabilizados y superausteníticos.

- Los aceros austeníticos de muy bajo contenido en carbono ($\leq 0,03$ %) evitan la corrosión intergranular, al no formarse carburos de cromo, ya que el carbono existente se mantiene en forma de solución sólida.
- Los aceros austeníticos con adición de molibdeno mejoran su resistencia a la corrosión por cloruros (ambiente marino). En cambio, tienen un efecto desfavorable frente al ácido nítrico y los vapores nitrosos.
- Los aceros austeníticos estabilizados son los que evitan la precipitación de carburos de cromo, por tratamiento térmico o soldadura, mediante adición de titanio o niobio.
- Los aceros superausteníticos incluyen altos contenidos de cromo y molibdeno. El contenido en nitrógeno suele ser elevado. Ofrecen una buena resistencia a la corrosión en ambientes agresivos.

Los aceros **inoxidables austenoferríticos (dúplex)** tienen un bajo contenido en carbono, no mayor de 0,05 %, una proporción de cromo muy elevada, del 18 al 30 % y un contenido en níquel inferior a los austeníticos, entre el 1,0 y el 9,5 %. Su microestructura es bifásica de austenita y ferrita lo que le proporciona unas buenas características mecánicas y una excelente resistencia a la corrosión bajo tensión. Si se añade nitrógeno o se someten a un proceso de deformación en frío se puede aumentar más su resistencia mecánica. También poseen una notable resiliencia, incluso a bajas temperaturas.

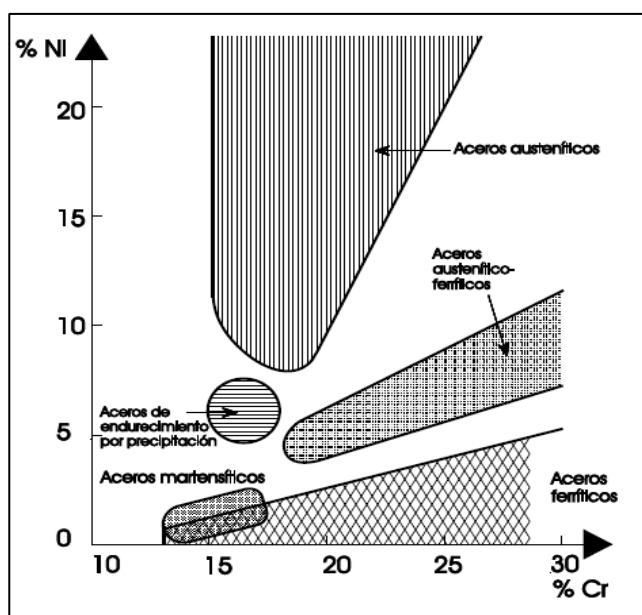


Figura 9: Tipos de acero inoxidable © [20]

La **normativa de referencia** de los aceros inoxidables en general está constituida por las distintas partes de la norma UNE-EN 10088. Y en concreto son de interés específico en lo relativo a las armaduras de hormigón las partes 1 (general) y 5 (aceros para construcción):

- UNE-EN 10088-1 Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables. [19].
- UNE-EN 10088-5 Condiciones técnicas de suministro para barras, alambrón, alambre, perfiles y productos brillantes de aceros resistentes a la corrosión para usos en construcción [21].

Según la mencionada parte 1 [19], la **designación numérica** de los aceros inoxidables comienza con el número 1 seguido por 4 números más, los dos primeros se refieren al tipo y los siguientes al material específico:

- 1.40xx para los tipos con $< 2,5$ % de Ni, sin Mo y sin adiciones especiales
- 1.41xx para los tipos con $< 2,5$ % de Ni, con Mo y sin adiciones especiales
- 1.43xx para los tipos con $\geq 2,5$ % de Ni, sin Mo y sin adiciones especiales
- 1.44xx para los tipos con $\geq 2,5$ % de Ni, con Mo y sin adiciones especiales
- 1.45xx y 1.46xx para los tipos con adiciones especiales, tales como Ti, Nb o Cu.

En cuanto a la **normativa específica** para armaduras de acero inoxidable, se citan como significativas las siguientes:

- UNE 36067 [22] Alambres de acero inoxidable para armaduras de hormigón armado. Recoge los requisitos de los alambres, tanto corrugados como grafilados, con los mismos parámetros normativos que los alambres convencionales de acero al carbono.
- prEN 10370 [23] Steel for the reinforcement of concrete – Stainless Steel. Se encuentra en fase de borrador y pendiente de aprobación (Comité de normalización CTN 036/SC 04). La norma regulará los productos de acero inoxidable para el armado del hormigón, incluyendo barras, alambres y mallas, con los mismos parámetros normativos que las armaduras de acero al carbono.

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

Los aceros inoxidables para armaduras 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.



Figura 10: Proceso de fabricación de armaduras de acero inoxidable (cortesía de la fábrica Roldán en Ponferrada)

El Código Estructural [9] 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 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.

La **composición química** de los aceros inoxidables citados en el Código Estructural [9] se reproduce en la Tabla 7. El tipo EN 1.4003 es un acero inoxidable ferrítico muy común, 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 simple que posee buenas propiedades de resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad. El tipo EN 1.4482 es un acero inoxidable de baja aleación austeno-ferrítico (lean dúplex) con límite elástico dos veces superior al anterior y buena conformabilidad y resistencia a la corrosión. El acero inoxidable EN 1.4362 es también dúplex de baja aleación y se comporta como el anterior. El tipo EN 1.4462 es un acero inoxidable dúplex con una alta resistencia mecánica y excelente resistencia a la corrosión; es una solución muy apropiada donde la durabilidad sea crucial y el ambiente muy agresivo, ya que el molibdeno aumenta considerablemente la resistencia a la corrosión por picaduras.

Tabla 7: Tipos de acero inoxidable y composición química sobre producto (porcentajes máximos en masa y rangos mínimo/máximo) según tabla 34.4 del Código Estructural [9]

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	---

Las **características mecánicas en tracción** 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 específico de que se trate.

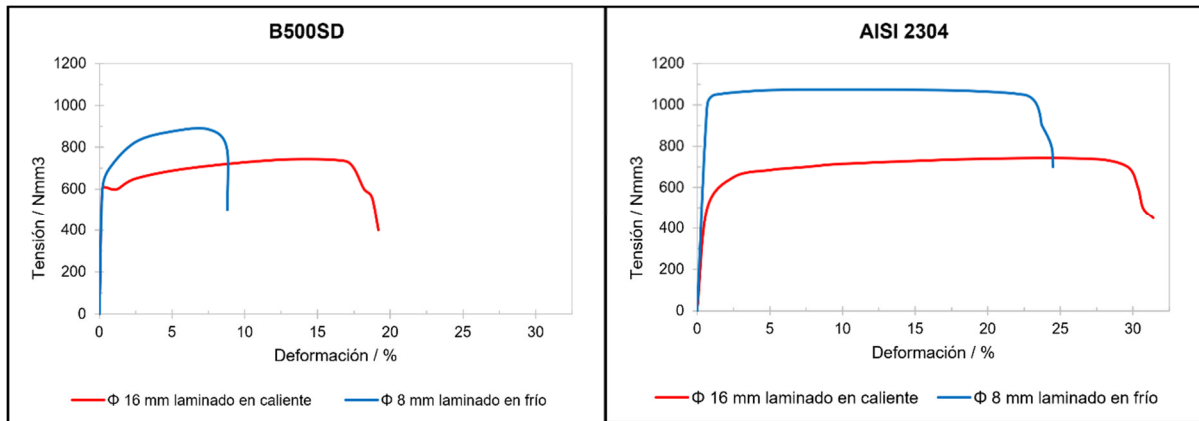


Figura 11: Diagrama tensión deformación de armaduras corrugadas en caliente y en frío. Izquierda, acero al carbono; derecha, acero inoxidable dúplex

El módulo elástico depende del grado del acero inoxidable, pero, por lo general, suele ser igual o ligeramente inferior al del acero al carbono. Dentro de los aceros inoxidables hay que señalar que los dúplex tienen unas características mecánicas superiores a los austeníticos, tanto laminados en caliente como en frío.

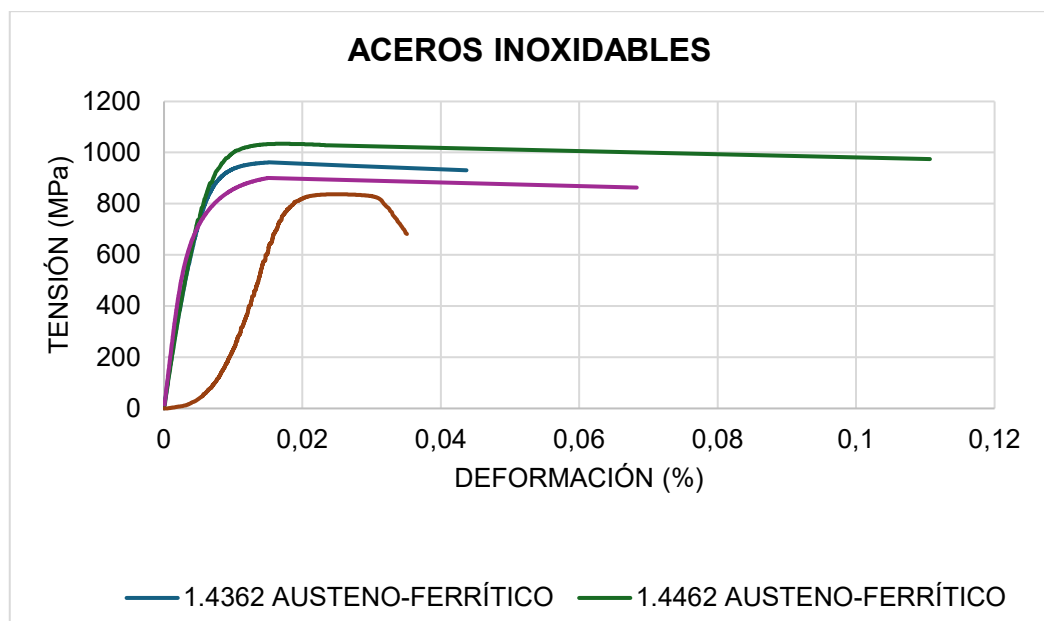


Figura 12: Curvas tensión-deformación para diferentes tipos de acero inoxidable corrugado

En cuanto a sus **características frente a fatiga**, éstas son, en general, superiores a las de los aceros al carbono por su mayor resistencia a la tracción. En algunos casos [1] se recomienda la verificación de los requisitos mínimos con amplitudes de carga que disminuyen al aumentar el diámetro, desde 200 MPa para los diámetros inferiores o iguales a 16 mm hasta 150 MPa para los diámetros superiores a 32mm. En todo caso, el Código Estructural [9] prescribe los mismos requisitos de fatiga, tanto para las armaduras de acero al carbono como para las inoxidables, verificándolos para una amplitud de carga de 150 MPa para cualquier diámetro en el caso de las barras y para una amplitud de 100 MPa en el caso de las mallas.

Respecto a la **manipulación y conformado**, 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. Al manipular barras de acero inoxidable es recomendable evitar el contacto directo con las de acero al carbono, no apilándolas juntas. El acero limpio debe enderezarse, cortarse, doblarse y procesarse en equipos utilizados exclusivamente para el conformado de las armaduras de acero inoxidable, a fin de evitar la contaminación incrustada que podría romper la capa protectora de óxido de cromo.

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. Respecto a la soldabilidad de los aceros mencionados en la Tabla 7 [23]:

- El acero ferrítico EN 1.4003, como la mayoría de los aceros inoxidables ferríticos, es sensible al crecimiento de grano durante la soldadura, lo que podría reducir la ductilidad de la unión soldada; por lo tanto, es recomendable soldar con el menor aporte de calor posible. Se puede soldar con la mayoría de los métodos de soldadura utilizados para los aceros inoxidables. Los materiales de aportación austeníticos dan como resultado una soldadura más dúctil en comparación con la que se obtiene con materiales de aportación la misma composición.
- El acero austenítico EN 1.4301, tiene muy buena soldabilidad y no es sensible al agrietamiento o al crecimiento de grano durante la soldadura. Se puede soldar con todos los métodos normalmente utilizados para los aceros inoxidables. Si la soldadura se realiza con material de aportación, se debe utilizar también acero austenítico.
- Los aceros dúplex EN 1.4482, EN 1.4362 y EN 1.4462 tienen buena soldabilidad. La soldadura con materiales de aportación, con una composición específicamente diseñada para ellos, confiere una mayor ductilidad en comparación con la soldadura autógena (sin metal de aportación). La razón de esta reducción de la ductilidad es debida al alto contenido de ferrita que se forma en la soldadura. Se pueden soldar con todos los métodos normalmente utilizados para los aceros inoxidables.

El Código Estructural [9] 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-alaeado, para que se pueda garantizar una buena resistencia a la corrosión de la unión y unas propiedades mecánicas apropiadas. Un ejemplo de material de aportación apropiado sería el tipo 23Cr12Ni [23].

Para restaurar la resistencia a la corrosión después de la soldadura o por la contaminación después del contacto con el acero al carbono, **el acero inoxidable debe limpiarse antes de su uso**. El objetivo es eliminar escoria de soldadura, salpicaduras, óxidos y contaminación debida al acero al carbono. Los métodos recomendados son el cepillado con cepillo de acero inoxidable, granallado, limpieza a presión con agua caliente y/o decapado químico.

3.3. 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. El cromo es el elemento que le da a este tipo de acero la propiedad de inoxidable, que en muchos tipos se ve reforzada además por el níquel. 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. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable es intrínseca del material, y no depende de los acabados u otras condiciones superficiales

En el acero inoxidable se pueden dar diferentes **tipos de corrosión**: generalizada, intergranular, bajo tensión o fatiga, por picaduras y galvánica.

- La **corrosión generalizada** solo aparece en medios suficientemente ácidos. No sería el caso del hormigón, incluso aunque esté carbonatado, ya que la capa pasiva del acero le protege del medio.
- La **corrosión intergranular** se puede dar si ocurre algún cambio estructural en el acero. Podría producirse en barras soldadas o sometidas a algún tratamiento térmico que provoque la precipitación de carburos. Para evitarlo se puede proceder, después de la soldadura o tratamiento térmico, al recocido del material, o también a usar directamente aceros que contengan menos del 0,03 % de carbono o que hayan sido estabilizados mediante otros elementos de aleación que eviten la precipitación de carburos.
- La **corrosión bajo tensión**, al igual que para el acero al carbono, se produce por la combinación de tres factores, el material, el medio y la presencia de tensiones; se puede identificar también como corrosión por fatiga. En este caso, ocurre en aceros inoxidable austeníticos cuando se sueldan y están colocados en un hormigón carbonatado o con alto contenido de cloruros y en aceros inoxidable de alta resistencia. Los aceros inoxidable dúplex muestran una mayor resistencia a la corrosión bajo tensión que los austeníticos más habituales. El fenómeno afecta más a los aceros inoxidable estirados y trabajados en frío.
- La **corrosión por picaduras** es la más frecuente en el acero inoxidable y tiene lugar cuando la concentración de cloruros es muy alta. Se inicia por la rotura de la capa protectora de óxido de cromo. En todo caso, la concentración crítica necesaria para el inicio de este tipo de corrosión es mayor que en el caso del acero al carbono. El riesgo de corrosión por picaduras disminuye si se aumenta el contenido de ciertos aleantes como son el cromo, el molibdeno y el nitrógeno. Por el contrario, este riesgo aumenta si se producen daños mecánicos en la superficie de la armadura y también en las zonas afectadas por la soldadura.
- La **corrosión galvánica** se puede dar si se ponen en contacto dos metales y existe entre ellos una solución que actúa como electrolito. El acero inoxidable es más noble que el acero al carbono en la serie galvánica, incluso en estado activo, por lo que siempre resultará menos probable que constituya el ánodo de la celda electroquímica y por lo tanto será menos susceptible de sufrir corrosión de este tipo.

En cuanto a la **influencia del corrugado en la durabilidad** de las armaduras de acero inoxidable, en principio, la resistencia a la corrosión en las corrugas es menor que en otras partes de la armadura, debido a la mayor deformación superficial en la zona donde se practican los resaltos. Si la barra es laminada en frío, el ataque se produce por picaduras aisladas en las corrugas, pero si es laminada en caliente, el ataque tiene lugar también en las corrugas, pero de forma menos penetrante y menos localizada.



Figura 13: Rodillos y tren de corrugado de armaduras de acero inoxidable (cortesía de la fábrica Roldán en Ponferrada)

La corrosión localizada suele ser mucho más peligrosa que la corrosión generalizada. La primera daña más significativamente las propiedades mecánicas del material y produce una distribución de tensiones más comprometida para el hormigón, lo que puede llevar a su agrietamiento. Si una armadura laminada en frío sufre corrosión, ésta puede ser un poco más peligrosa que si la corrosión tuviera lugar en una armadura laminada en caliente; por el contrario, en este segundo caso la corrosión tiene más probabilidad de llegar a desarrollarse [24].

Respecto al riesgo frente a la **corrosión por carbonatación**, el empleo de cualquier acero inoxidable garantizará una larga vida útil, ya que la cubierta de óxido rica en cromo que se forma en cualquiera de ellos es suficiente para evitar la corrosión en ausencia de otros agentes agresivos, sea cual sea la alcalinidad del hormigón.

Respecto a la **resistencia a los cloruros**, el contenido crítico necesario para vencer la capa pasiva e iniciar la corrosión es, en el caso de las armaduras de acero inoxidable, mucho mayor que en el caso de las barras de acero al carbono. El valor final dependerá tanto de aspectos propios del refuerzo (tipo de acero inoxidable y acabado superficial) como de características propias del hormigón (temperatura de la estructura y pH del hormigón durante toda la vida útil del proyecto) [23].

Respecto al uso **combinado con las armaduras de acero al carbono** el riesgo de formación de **par galvánico** es muy bajo si tanto la armadura de acero al carbono como la de acero inoxidable están pasivadas, y más considerando que ambas estarían rodeadas de hormigón. El Código Estructural [9] permite su contacto y para soldar ambos aceros se recomienda usar un material de aportación sobrealeado para que se pueda garantizar una buena resistencia a la corrosión de la unión y unas propiedades mecánicas apropiadas. La diferencia de potencial entre las dos tipologías de armaduras es notablemente menor que la que existe entre un acero al carbono corroído y otro sin corroer.

En reparación de estructuras dañadas, si la concentración de cloruros es muy alta, el efecto del par galvánico entre el acero inoxidable pasivado y el acero al carbono corroído existente será el aumento de la velocidad de corrosión de este último, pero dicho aumento será en todo caso menor que el que se produciría introduciendo armadura de acero al carbono pasivada, ya que la de inoxidable es, como se ha dicho, un cátodo menos activo [1]. Aun así, en las reparaciones en las que no se haya eliminado previamente el hormigón contaminado por cloruros, no se recomienda conectar eléctricamente el acero inoxidable y el acero al carbono, ante el riesgo de activar la corrosión de este último.

Las **normas y códigos de diseño** al tratar el problema de la durabilidad tabulan las condiciones de exposición que causan los problemas de durabilidad y las medidas que se deben tomar para evitarlos, normalmente en cuanto a tipo y cantidad de cemento, relación agua/cemento y recubrimiento de hormigón. Cuando se utilizan armaduras de acero inoxidable, normalmente se permite la reducción del recubrimiento de hormigón, pero no se indica nada con relación a los otros factores.

El Código Estructural [9] incluye las armaduras inoxidables soldables como **medida especial de durabilidad** en las estructuras de hormigón armado. En función de los ambientes las recomendaciones serían las siguientes [1],

- El acero EN 1.4003 se recomienda en estructuras expuestas a la corrosión debida a la carbonatación, con humedad alta o media, y en los casos de ataque químico de débil agresividad.
- Los aceros EN 1.4301 y EN 1.4482 se recomiendan en estructuras expuestas a la corrosión debida a la carbonatación, con humedad media, y en los casos de ataque químico de débil o fuerte agresividad.
- El acero EN 1.4362 se recomienda en estructuras expuestas a los cloruros de origen marino, en los casos de ataque químico de media agresividad, de exposición al ataque hielo/deshielo y a la erosión.
- El acero EN 1.4462 se recomienda en estructuras expuestas a los cloruros de cualquier origen, tanto marino como otro, y en los casos de ataque por erosión.

En los casos críticos en los que sea necesario garantizar la resistencia a la corrosión frente a una determinada concentración de cloruros de cualquier origen habrá que recurrir a un tipo de acero inoxidable con el que se pueda certificar dicha resistencia. Puede ser necesario si se dan una o varias de las siguientes circunstancias: que se requiera una vida útil mayor de lo normal, que la exposición sea singularmente severa, que las consecuencias de la corrosión de las armaduras resulten singularmente graves, o que las condiciones de construcción y/o mantenimiento sean especialmente difíciles. La norma prEN 10370 incluye en su anexo D un método para determinar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable en hormigón contaminado con cloruros [23].

Cuando se **proyecta con armadura de acero inoxidable** se pueden tener en cuenta ciertas consideraciones sobre los requisitos de durabilidad del hormigón [9]:

- 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, siempre y cuando tanto la armadura transversal como la capa más exterior de la armadura longitudinal sean de acero inoxidable.
- 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.

3.4. 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.

Una de las primeras estructuras realizadas con armaduras de acero inoxidable en ambientes de especial agresividad fue el **Puente-embarcadero Progreso en Yucatán** (Mérida, Méjico) construido entre 1937 y 1941 y que después de más de 75 años en servicio no presenta importantes signos de corrosión a pesar de hallarse en un ambiente con una concentración de cloruros superior al 2 %.

Tiene 2.100 metros de longitud y sustituyó al embarcadero original de madera. Se utilizaron 220 toneladas de acero inoxidable con una composición química parecida a la del tipo EN 1.4301, con un contenido en níquel del 8 %. Las barras corrugadas eran de 30 mm de diámetro. Posteriormente se construyó un segundo embarcadero en 1972 con armadura de acero al carbono del cual no queda prácticamente nada [25].

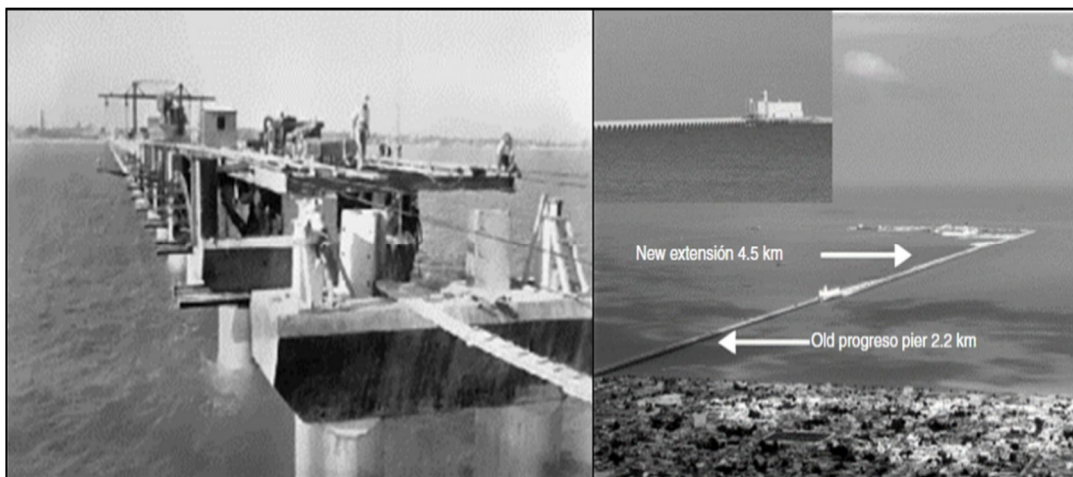


Figura 14: Puente Progreso en Yucatán (Mérida, Méjico): a la izquierda vista de pilas y vigas transversales durante el proceso de construcción y a la derecha fotografía aérea del antiguo muelle y la ampliación construida en los años 80 © [26]

En muchos países y regiones geográficas se ha utilizado de forma eficaz el acero corrugado inoxidable, que ha funcionado correctamente frente a la corrosión, incluso en ambientes muy agresivos:

- En **Estados Unidos**, se pueden destacar las siguientes estructuras: Puente de New Jersey en la entrada a la autopista Garden State y la autovía interestatal I-80 (165 toneladas de acero inoxidable dúplex EN 1.4462 en diámetros Φ 13, 16 y 19 mm). Puente de la carretera Interestatal I-696, Detroit, Michigan (33 toneladas de armadura de tipo 304 en el tablero del puente). Puente sobre el río Colorado, en Montana (100 toneladas de acero inoxidable EN 1.4462 en el tablero del puente y en la zona exterior de las pilas). Puente TH 61 Hastings sobre el río Mississippi, Minesota (acero inoxidable EN 1.4362 para el tablero de 166 m de largo y 30 m de ancho).
- En **Asia**, algunos ejemplos son: Puente Hong Kong-Macao (China). Puente de Sitra, se utilizó acero inoxidable tipo EN 1.4462 (Barein). Puente Shezhen Western Corridor (Hong Kong, China). Palacio Qasr al Alam Guest (Muscat, Omán). Ampliación de la zona Jebel Ali Free (Emiratos Árabes Unidos). Puerto Sohar (Oman). Puente Sheikh Zayed (Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos). Museo de Arte Islámico (Doha, Qatar). Ras Laffan Gas Loading Piers (Qatar). Pearl Island (Doha, Qatar).
- En **Europa**, su aplicación es escasa para nuevas estructuras, pero sí es más frecuente para operaciones de reparación: Queensferry Crossing (Escocia, Reino Unido). Blackpool (Irlanda). Metro de Copenhage (Dinamarca). Puente Eiffel, rehabilitado con EN 1.4462 (Portugal). Catedral San Paul, Londres (Inglaterra, Reino Unido). Puente Highman, se usó acero inoxidable EN 1.4436 junto con el tradicional acero al carbono (Reino Unido). Extensión de Mónaco.
- En **España**, su uso está muy limitado, aunque se pueden mencionar algunos ejemplos, tanto de primera construcción como de rehabilitación: algunas obras de la Autovía del Mediterráneo. Museo de Arte Moderno donde se usaron 100 toneladas de acero inoxidable corrugado de los tipos EN 1.4301 y EN 1.4462 y diámetros entre Φ 6 y 25 mm, este último en las zonas de mayor riesgo por presencia de cloruros (Vitoria). Palacio de Justicia (Guernica). Algunas obras del AVE León-Palencia. Iglesia de Santa Catalina (Sevilla). Iglesia de Santiago en Jerez de la Frontera (Cádiz). Muralla de Jerez de los Caballeros (Badajoz). Catedral de Segovia. Cúpulas de la Sagrada Familia (Barcelona).

Respecto a obras portuarias españolas se conocen muy pocas ejecutadas con armadura de acero inoxidable. La más relevante de las últimas construidas es el **Botaolas Salinetas**, ubicado en el paseo marítimo del mismo nombre, en Gran Canaria. Se construyó una estructura para hacer frente a los efectos de la erosión del oleaje y las mareas, consistente en un pequeño espaldón con forma adecuada en la parte superior del lado exterior para hacer efecto de botaolas y facilitar el retorno del agua al mar. El muro se construyó con hormigón armado de acero inoxidable austeno-ferrítico (dúplex) de tipo EN 1.4362, con una composición adecuada que garantiza tanto unas excelentes propiedades mecánicas (necesarias para resistir los empujes del mar) como una adecuada resistencia a la corrosión (necesarias para evitar los efectos del ataque de los cloruros de origen marino).



Figura 15: Botaolas Salinetas en fase de construcción (Gran Canaria) © [27]

También es importante citar como obra de referencia marítima la **extensión de Mónaco hacia el mar**, ejecutada mediante cajones portuarios construidos con acero inoxidable de fabricación española [28]. Se trata de una extensión artificial de 60.000 m² construida sobre un manto de rocas y con arena traída de Sicilia. La barrera de protección frente al mar de esta nueva extensión está 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 $\Phi 40$ mm, que garantizan una durabilidad para el proyecto de 100 años [28].

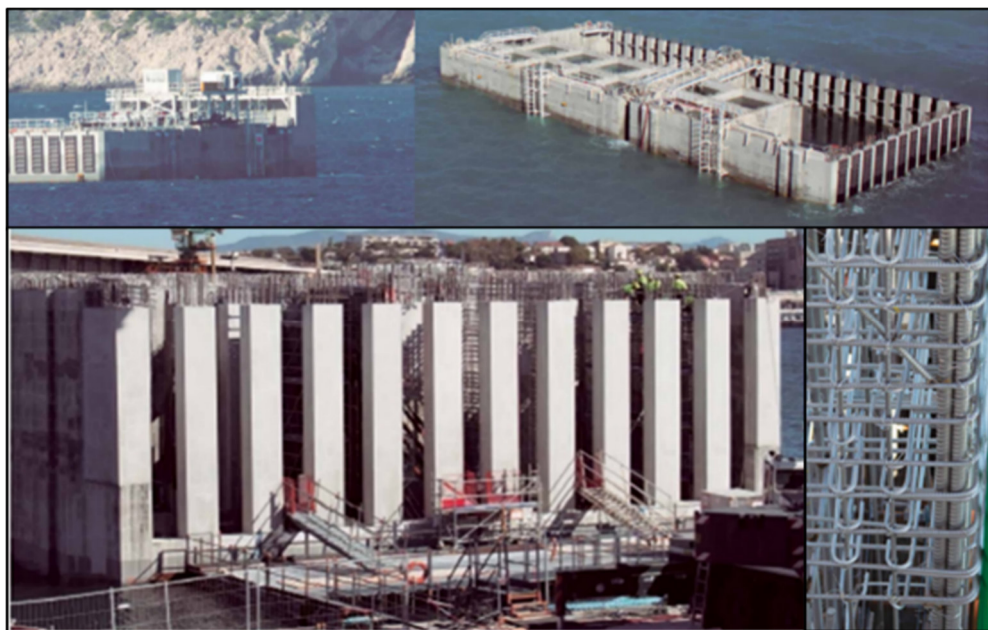


Figura 16: Arriba, desplazamiento de los cajones; abajo, fabricación de los cajones y detalle de armadura © [28]

4. ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (FRP)

Dentro de las alternativas para evitar los problemas de la corrosión y sus consecuencias se encuentran las barras de polímeros reforzados con fibras debido a su **excelente resistencia al deterioro** en hormigones carbonatados y en ambientes singularmente agresivos por la presencia de cloruros. Para analizar la durabilidad de este tipo de materiales hay que considerar distintos agentes y mecanismos de deterioro, pero en ningún caso se puede hablar de corrosión. En ambientes agresivos su utilización permite el empleo de hormigones convencionales en lugar de hormigones de baja permeabilidad, elimina la necesidad de protección o utilización de inhibidores de corrosión e incluso permite el empleo de agua de mar como agua de amasado (lo cual puede ser singularmente interesante en zonas geográficas en las que el agua potable es un recurso escaso).

Aunque la **primera experiencia de utilización de barras de polímeros reforzados con fibras como armaduras de hormigón** data de los años 70, las barras de FRP no estuvieron comercialmente disponibles hasta los años 90. Los primeros en desarrollar guías de diseño para este producto fueron los ingenieros rusos y japoneses, a los que siguieron los norteamericanos, tanto canadienses como estadounidenses. China, a comienzos del siglo XXI, se convirtió en el mayor consumidor del material, principalmente para su empleo en tableros de puentes y obras subterráneas.

4.1. POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)

El **desarrollo del material FRP** tiene su origen en los años 40 en la industria aeroespacial que aprovechó la ventajosa combinación de ligereza junto con alta resistencia. Al ámbito de la construcción llegó con el abaratamiento de los procesos de fabricación y con la búsqueda de soluciones al elevado coste de mantenimiento de las infraestructuras ya construidas, en las que, con el paso de los años, se iba poniendo de manifiesto la problemática de la durabilidad del hormigón reforzado con acero convencional en ambientes agresivos.

En el ámbito de la rehabilitación de estructuras ya afectadas por la corrosión, se están empleando también los materiales de FRP como elementos de refuerzo exterior de elementos de hormigón armado, campo que no es objeto de este trabajo.

Los polímeros reforzados con fibras están formados por **fibras continuas** impregnadas de **resina polimérica**. Las fibras tienen alta resistencia y rigidez y son la columna vertebral del material, mientras que 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.

Las fibras más comunes son de vidrio (GFRP), carbono (CFRP) y aramida (AFRP), y más recientemente se están utilizando también las de basalto (BFRP). Dentro de cada tipo de fibra existe también variedad. Por ejemplo, en el caso de la fibra de vidrio está el tipo E, que es el tipo de fibra más empleado, que se caracteriza por sus propiedades dieléctricas, o el tipo S, con formulación de alta resistencia a tracción. En el caso de fibra de carbono se puede distinguir entre las de alto módulo de deformación y las de alta resistencia.

En cuanto a las resinas, existen fundamentalmente dos tipos, las termoestables, que al calentarse tras el curado mantienen su forma hasta que se descomponen a alta temperatura, y las termoplásticas, que reblandecen de forma reversible solidificándose al enfriar. Las más habituales para la fabricación de armaduras son la resina epoxi y la resina de viniléster que se encuentran dentro del primer grupo de resinas mencionado.

Para el hormigón armado en ambiente agresivo, las barras de polímero reforzado más usadas como armadura son las de fibra 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 la impresión de deformaciones en la superficie, la aplicación de un revestimiento de arena, la sobreposición de una nueva superficie o la combinación de varias. En caso de emplear arena con este objetivo es importante evitar el riesgo de reacción expansiva en el hormigón (reacción de sílice alcalina o carbonato alcalino).

Este tipo de armaduras pueden ser diseñadas para prestaciones específicas y existen bastantes variables de diseño disponibles como son la elección de componentes, la proporción de fibra y matriz, la orientación de la fibra o el proceso de fabricación. Otros factores, como los efectos dimensionales y el control de fabricación, juegan un papel determinante en las características de las barras de FRP. Como se verá más adelante, las propiedades de los materiales de FRP también están influenciadas por el historial de cargas, la duración de las mismas, la temperatura o la humedad. Un elemento fundamental para la evaluación de las propiedades del FRP es el volumen relativo y/o contenido en masa de los constituyentes.

Debido a las notables ventajas de durabilidad, principalmente en ambientes muy agresivos, que tienen las barras FRP para el armado del hormigón se está multiplicando su investigación y desarrollo tecnológico, 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, como también es el caso de España. Aquí, este material tiene poca trayectoria de uso, no existe normativa a nivel nacional y el diseño con esta tipología de armaduras no está contemplado implícitamente en la reglamentación.

Una de las primeras **publicaciones de referencia** [29], se debe a la FIB (Fédération internationale du béton); se trata de un informe técnico que repasa las principales 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 en francés, y posteriormente actualizado en 2023 en inglés por la AFGC (Association Française de Génie Civil), que supone una guía completa o estado del arte acorde al conocimiento actual [30].

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 GFRP, la guía de diseño ACI 440.1R-15 [31] y el código ACI CODE-440.11-22 [32]; 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 [33], que incluye las propiedades mínimas que deben cumplir las armaduras GFRP.

Del mismo tipo y también muy completas, aunque con diferentes requisitos y algunas diferencias conceptuales de diseño, son las normas canadienses. La CSA S806:12 (revisada en 2021), que establece los métodos de cálculo y de diseño de estructuras de edificación armadas con FRP [34] y la CSA S807:19, que recoge los requisitos, en cuanto a propiedades y fabricación, de las barras de FRP que vayan a ser usadas como refuerzo interior en elementos estructurales de hormigón armado [35]

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 [34], 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 y publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea, al amparo del Reglamento de Productos de Construcción, el Documento de Evaluación Europea EAD 260023-00-0301 [36], que ya permite su libre comercialización en el mercado único con marcado CE y, por tanto, mejora la información concreta y específica de las características, propiedades y prestaciones de los productos de cada fabricante.

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS FRP

Además de la ausencia de corrosión, hay otras **características de las armaduras FRP** que se pueden considerar para decidir su empleo como refuerzo del hormigón:

- Mayor resistencia a la tracción longitudinal que el acero.
- Peso considerablemente más ligero, lo que beneficia su transporte y colocación en obra. Su densidad oscila entre 1,25 y 2,1 g/cm³.
- Transparencia magnética (fibra de vidrio).
- Aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico (fibra de vidrio).
- Facilidad de demolición para estructuras temporales.

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. Aunque las reglas de diseño del hormigón reforzado con barras de FRP son análogas a las del hormigón reforzado con barras de acero, no es posible sustituir directamente una tipología de armaduras por otra, debido a las numerosas **divergencias** que tienen sus características y propiedades y, por tanto, a causa del diferente comportamiento de los dos materiales:

- Los productos de FRP son elásticos hasta el fallo, son frágiles y no avisan antes de la rotura. Por el contrario, el acero es un material dúctil (ver Figura 17).
- Los productos de FRP son anisótropos caracterizados por una alta resistencia a tracción en dirección de las fibras. Esta anisotropía afecta negativamente a la resistencia a cortante en dirección transversal. El acero en cambio es un material isótropo.
- Los productos de FRP tienen un módulo de elasticidad bajo, del orden de 4 veces inferior al del acero. Esta propiedad puede determinar que en el diseño de elementos de hormigón sea más crítica la deformación que la resistencia, contrariamente a lo que suele suceder cuando se emplea el acero (ver Figura 17).
- Los productos de FRP presentan el fenómeno denominado fatiga estática o rotura por fluencia; barras sometidas a carga constante pueden fallar después de un cierto periodo de tiempo llamado de endurancia. Esta circunstancia no se da en el acero.
- La resistencia a tracción de las barras de FRP, a diferencia de las barras de acero, puede disminuir al aumentar el diámetro.

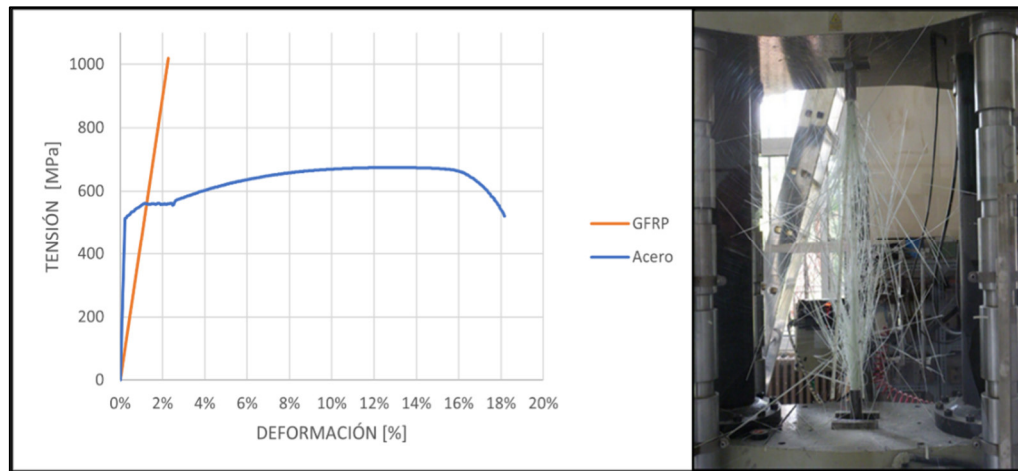


Figura 17: Izda, resistencia a tracción: comparativa entre acero y GFRP; dcha, rotura por tracción en laboratorio CEDEX

Los parámetros que caracterizan el comportamiento a tracción de las barras de FRP son el módulo elástico, la resistencia a tracción y la deformación en carga máxima. Para la determinación de los dos primeros se suele emplear el área efectiva de las armaduras, obtenida a partir del volumen y la densidad de las barras; normalmente, para obtener este valor los códigos y guías indican que se empleen probetas en las que no se haya retirado el acabado superficial de las armaduras, incluso cuando esté acabado sea a base de árido silíceo.

Las barras de FRP no presentan comportamiento plástico, por lo que no se puede hablar de límite elástico, se caracterizan por una relación lineal entre la tensión y la deformación hasta rotura. Los valores de referencia indicados en la Tabla 8 serían característicos de armaduras en las que la proporción en volumen de fibras estuviera entre 0,5 y 0,7.

Tabla 8: Valores típicos de los parámetros que caracterizan la resistencia a tracción [29], [31]

	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Límite elástico [MPa]	276 - 517	---	---	---
Resistencia [MPa]	450 - 700	450 - 1600	600 - 3690	1000 - 2540
Módulo elástico [GPa]	200	35 - 60	100 - 580	40 - 125
Deformación del límite elástico [%]	0,14 a 0,25	---	---	---
Deformación en rotura [%]	5,0 - 20,0	1,2 - 3,7	0,5 - 1,7	1,9 - 4,4

La norma ISO 10406-1 [37] establece un método estandarizado para la determinación de las características resistentes a tracción. A diferencia de las armaduras de acero y debido a la mencionada anisotropía de los materiales de FRP, es muy importante en la realización correcta de estos ensayos el emboquillado y anclaje de la probeta durante el ensayo, generalmente a base de tubos metálicos rellenos de resina de unión o cemento expansivo, que evite el daño transversal sobre la armadura.



Figura 18: Barra de GFRP Ø20 preparada para la realización del ensayo de tracción

Existen además otras dos particularidades de la resistencia a tracción de esta tipología de barras dignas de mención por su diferencia también con las tradicionales armaduras de acero:

- La capacidad resistente a tracción de los elementos curvos es considerablemente menor que la de las barras rectas.
- La resistencia a tracción disminuye conforme aumenta el diámetro, debido a que la transmisión de cargas desde la superficie al centro de la barra no es completa, por lo que las fibras situadas cerca del centro no llegan a tener la misma tensión que las fibras de borde. Se pueden dar formas de rotura caracterizadas por el deslizamiento de las fibras exteriores con relación a las interiores, cuando se supera la capacidad de la resina para transmitir tensiones entre fibras.

Las armaduras de FRP tienen en general una baja **resistencia a cortante**, porque su capacidad para soportar este tipo de esfuerzo está gobernada por la matriz. El trenzando o enrollando de fibras transversales a las principales, mejora el comportamiento a cortante de este tipo de productos. Dos son los mecanismos que lo determinan y cada uno de ellos tiene su propio método de ensayo para evaluar los valores característicos:

- La resistencia al **corte transversal** τ_s , que depende de las propiedades de las fibras, y que es singularmente importante cuando se emplea este tipo de barras como pasadores. Las distintas guías de referencia recomiendan resistencias mínimas variables entre 130 y 180 MPa [33] y [35]. Se determina mediante ensayo de cortante puro (ver Figura 19).
- La resistencia al **corte interlaminar** τ_i , que viene determinada por las propiedades de la matriz y de la interfase fibra/matriz. Las guías recomiendan resistencias mínimas de entre 35 y 50 MPa, según los casos [35]. Se determina mediante un ensayo de flexión en una probeta corta (ver Figura 19).

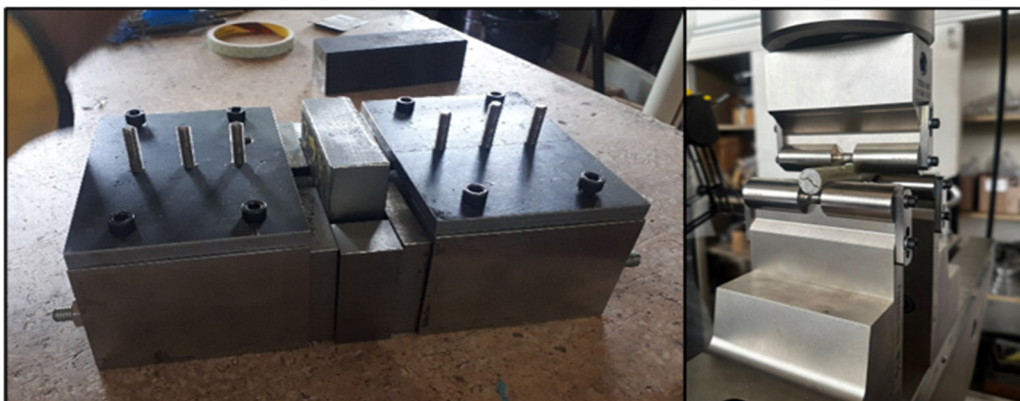


Figura 19: Resistencia a cortante. Izda.: cortante transversal; Dcha.: cortante interlaminar

En cuanto a la **resistencia a flexión** de las armaduras FRP, viene gobernada por las propiedades de la fibra y de la interfaz. No existen valores de referencia para esta propiedad ni métodos estandarizados, pero no deja de tener importancia dado que es un tipo de resistencia a la que se ha recurrido tradicionalmente en el control de calidad de las obras, como sustituto al ensayo de tracción para determinar el módulo elástico y las resistencias a tracción y deformación última, dada la dificultad de realizar ensayos puros de tracción, que se ha indicado en los párrafos anteriores.

En cuanto a la resistencia a la **fatiga** frente a la acción de las cargas cíclicas, los códigos de diseño son muy conservadores [31] o incluso recomiendan el empleo de este material para elementos sometidos fundamentalmente a cargas estáticas [38]. El motivo está en la gran cantidad de factores que afectan al comportamiento a fatiga y en la escasez de investigación de su efecto, fundamentalmente en la adherencia con el hormigón. El comportamiento a fatiga empeora a temperaturas elevadas o en presencia de humedad, o cuando existe algún tipo de degradación en la resina. Al igual que en el caso del acero, otros factores propios de la secuencia de cargas, como la frecuencia del ciclo, la tensión media y la ratio de tensiones (relación entre el valor mínimo y el máximo) también influyen en este tipo de resistencia.

La resistencia a la fatiga se caracteriza generalmente a través de las curvas de Wöhler (o curvas S-N) que definen el número de ciclos antes de la fractura para una amplitud de tensiones y una ratio dadas. Generalmente se determina el límite de fatiga como la amplitud de tensiones para la que se superan los dos millones de ciclos sin que se produzca la rotura. Las guías recomiendan alcanzar valores, en el caso de GFRP, entre el 20 y el 35 % de la tensión de rotura [31] y [35]. Distintas normas recogen métodos de ensayo estandarizados, entre ellas se puede citar como referencia la ISO 10406-1 [37].

Otra característica relacionada con la anisotropía de las armaduras de FRP es que el **coeficiente de dilatación o de expansión térmica** es diferente en dirección longitudinal y transversal; en la primera de las direcciones está dominado por las propiedades de las fibras. Los valores de referencia indicados en la Tabla 9 serían característicos de armaduras en las que la proporción en volumen de fibras estuviera entre 0,5 y 0,75.

Tabla 9: Valores típicos del coeficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) [29]

Dirección	Acero	GFRP	CFRP	AFRP	Hormigón
Longitudinal	11	6 a 10	-9 a 0	-2 a -6	7 a 11
Transversal	11	21 a 23	74 a 104	60 a 80	7 a 11

Se puede apreciar que los polímeros reforzados con fibras tienen valores mucho más altos de expansión térmica en la dirección transversal que en la longitudinal y que también los valores son mucho más elevados que los característicos del hormigón. Esta diferencia puede llegar a tener implicaciones en la determinación del espesor de recubrimiento en ciertas aplicaciones.

Otra propiedad física a considerar es la **temperatura de transición vítrea de la matriz**. En el caso de las resinas termo-endurecibles, con las que normalmente se conforman las armaduras de FRP, existe una temperatura característica en la que el material cambia de un estado vítreo, es decir duro y relativamente quebradizo, a un estado blando o gomoso, que se conoce como temperatura de transición vítrea. A temperaturas cercanas, las propiedades de las resinas se deterioran y pierden la capacidad de transmitir tensiones a las fibras. Esta temperatura puede oscilar entre los 70 °C y los 175 °C dependiendo del tipo de resina [29]. El diseño de los elementos de hormigón debe garantizar que la temperatura de servicio no se aproxime a la de transición vítrea. Se suele recomendar un valor mínimo para la temperatura de transición vítrea de 100°C [30]. Ante un fuego, la disminución de las propiedades mecánicas y de la adherencia sería más rápida que en el caso del acero y variaría con las propiedades de fibra y matriz; es, por tanto, un fenómeno que tiene que ser estudiado, teniendo en cuenta las propiedades de transferencia de calor entre los materiales en las estructuras de hormigón.

La **adherencia con el hormigón** de las armaduras FRP depende 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 FRP 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 FRP, con un módulo elástico más bajo y con 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 FRP se debe principalmente al fallo parcial en el hormigón y a posibles daños en el acabado superficial de la armadura [29].

La adherencia con el hormigón es fundamental en las zonas de anclaje. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que frecuentemente el diseño de hormigón armado con barras de FRP está definido por estados límites de servicio, debido a la mayor deformabilidad, por lo que se cuenta con una reserva de resistencia antes de la pérdida de adherencia superior a la de las barras de acero. Existen varios métodos de ensayo para determinar la adherencia, el más utilizado para armaduras FRP es el conocido como pull-out [37]. Los valores recomendados de resistencia mínima están entre 7,6 y 10 MPa [33] y [35]



Figura 20: Distintas superficies de acabado en armaduras GFRP

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 [31]:

- Por la ausencia de **ductilidad**, no se recomienda su empleo para resistir cargas sísmicas o su uso en elementos estructurales donde se requiera redistribución de momento.
- No se recomienda el **diseño** con barras de FRP de elementos de hormigón para resistir esfuerzos de compresión. Su resistencia es mucho menor que a tracción y lo mismo sucede con el módulo de elasticidad. La caracterización de dicho comportamiento no tiene además un modelo estandarizado; normalmente en el diseño de los elementos que trabajan a compresión no se tiene en cuenta la presencia de este tipo de armaduras y, si existen, se considera como si todo el elemento fuera de hormigón.
- Es un material susceptible al **fuego** y que se degrada con las altas temperaturas, perdiendo propiedades mecánicas y adherencia.
- Los elementos fabricados con resinas termoestables no pueden **doblarse**, por lo que los elementos curvos deben fabricarse previamente según el diseño y el despiece que resulte de las necesidades de armado de cada elemento de hormigón. La fabricación de dichos elementos debe estar sobredimensionada teniendo en cuenta que en su colocación en obra puede haber pérdidas por rotura.
- Los elementos **curvos** de las barras de FRP presentan una resistencia a la tracción inferior con respecto a la de los elementos rectos (alrededor del 40 % en primera aproximación).

- Es un material que se degrada con la **radiación ultravioleta**, por lo que debe evitarse el almacenaje a la intemperie.
- La conservación de las capacidades resistentes de estos materiales puede verse afectada por **condiciones ambientales**, tales como altas temperaturas, alcalinidad, ciclos humedad-sequedad y ciclos hielo-deshielo.

4.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS FRP

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. La diferencia más significativa es que no se ven afectadas ni por la carbonatación del hormigón ni por la presencia de cloruros, y, en general, no se deterioran en presencia de un gran número de sustancias agresivas.

No obstante, las características de las barras de FRP 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. La exposición simultánea a rayos ultravioleta y humedad, antes de la colocación en obra, puede ser especialmente perjudicial. En algunas guías de diseño la durabilidad de este tipo de armaduras se expresa en términos de absorción de agua. La ASTM prescribe absorción menor del 1% según ensayo normalizado [33].

Cada elemento de los materiales de FRP, ya sea matriz, fibras o interfaz matriz-fibras, es susceptible de ser atacado en algunos ambientes agresivos. La matriz es por naturaleza resistente al medio agresivo y protege a las fibras. La calidad del composite puede expresarse por factores como la capacidad de mojado de la resina, ausencia de fisuras, ausencia de huecos, grado de curado de la resina y/o fortaleza de la interfaz fibra/matriz. Para que la matriz de resina funcione adecuadamente debe ser resistente a álcalis y cloruros, tener suficiente dureza para resistir microfisuras, ser suficientemente impermeable para impedir penetración, ser de fácil procesado para minimizar las variaciones de calidad y tener compatibilidad con las fibras para asegurar una fuerte adherencia fibra/matriz.

Los principales fenómenos que se estudian para tener en cuenta la evolución de características de las barras a largo plazo son el comportamiento bajo carga estática (creep), la resistencia al medio alcalino del hormigón y, finalmente, el efecto combinado de la carga y el medio alcalino.

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 endurancia o tiempo que transcurre hasta el fallo. El límite de endurancia 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 concreto de material.

Debido a este comportamiento, los materiales de FRP sometidos a carga constante en el tiempo puede romper de manera repentina. Este fallo depende del tipo de fibra, de su orientación y de la proporción. Debido a este fenómeno, si no se dispone de una caracterización completa del material, las guías de diseño limitan la tensión a largo plazo incluso hasta un 20 % de la resistencia inicial, en el caso de los materiales conformados con fibra de vidrio [31]. Existen métodos estandarizados para caracterizar el comportamiento bajo carga sostenida, de tal manera que, si la caracterización es completa a base de ensayos experimentales, se puede extrapolar y obtener la resistencia residual esperada a 100 años. Como ejemplo, la norma ISO 10406-1 [37] propone un método de ensayo que determina el tiempo hasta rotura de probetas traccionadas para cierto porcentaje de la carga de rotura, que se mantiene de modo estático hasta el fallo.



Figura 21: Ensayo de creep de armadura GFRP para distintos niveles de carga

Las fibras de vidrio son especialmente 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.

También para esta propiedad la norma ISO 10406-1 [37] propone un método de ensayo para determinar la degradación en ambiente alcalino, mediante inmersión de las probetas en la correspondiente solución. Por su parte, las guías de diseño recomiendan que tras el envejecimiento la resistencia a tracción sea como mínimo del 70 al 85 % de la resistencia inicial [33] y [35]. También se recomienda que tras la inmersión y transcurrido el tiempo necesario se estudien los cambios de las barras en apariencia y masa, aplicando técnicas como el análisis termogravimétrico, microscopía, calorimetría, etc. así como que se analice también la disminución de otros tipos de resistencia, no sólo a tracción, como sería el caso de la resistencia al corte interlaminar.

También existen pruebas estandarizadas y recomendaciones que indican que el estudio de la afección alcalina no solo se haga mediante el envejecimiento de las probetas, sino que además se aplique **carga simultáneamente**, por ejemplo, imponiendo una deformación de un 3‰; en este caso se admitirían pérdidas de resistencia superiores, del orden del 60 al 75 % [35]. Otras recomendaciones y normas consideran incluso que el ensayo con carga simultánea se haga en probeta de hormigón saturado, en lugar de en la solución alcalina [39].



Figura 22: Depósito para ensayos de envejecimiento acelerado en solución alcalina

Aunque las experiencias en el empleo de este material no son muy dilatadas en el tiempo, ya van permitiendo empezar a cotejar los resultados reales con los ensayos de envejecimiento acelerado; aun así, el muestreo es complicado, lo que suele implicar que el número y tamaño de las probetas extraídas sea pequeño y no se puedan utilizar para esas tareas las técnicas habituales que se emplean en el caso del acero. Es importante también tener datos previos de las características y resistencia del material antes de su puesta en obra, lo que no siempre es posible por no haberse realizado en su momento ensayos de control de calidad apropiados.

Se debe tener en cuenta también que la tecnología de FRP está en constante desarrollo, por lo que todas las directrices deberían ser actualizadas para ser acordes con los nuevos productos.

En el **proyecto de estructuras de hormigón armado con FRP** 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 [40] y [41].
- Prescindir de dosificaciones de hormigón especialmente diseñadas para prevenir la corrosión del acero; principalmente en lo relativo al tipo y cantidad de cemento y a la relación agua/cemento.
- 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.

4.4. 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. Las aplicaciones que más han destacado hasta ahora son las siguientes:

- 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, instalaciones de industrias químicas, 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 o perforados, por ejemplo, mediante tuneladora.
- Rehabilitación de patrimonio histórico, elementos prefabricados y elementos arquitectónicos con poco espesor de recubrimiento y/o combinados con hormigones de cal.

Norteamérica tiene ya una amplia experiencia en estructuras de hormigón armado con FRP. Algunos puentes tienen más de una veintena de años en servicio, como es el caso de “O’Fallon Park Bridge” construido en 2002 en Colorado y “53rd Avenue Bridge” construido en 2001 en Iowa; o están muy próximos, como es el caso del “Red River Floodway Bridge” construido en 2006 en Manitoba. Existen ya estudios de durabilidad en puentes de 15 y 20 años de servicio que constatan el buen comportamiento del material en tableros sometidos a sales de deshielo [42]. Actualmente se siguen proyectando puentes con barras de FRP como refuerzo interno del hormigón, principalmente en los tableros, barreras, elementos prefabricados, elementos en contacto con sales de deshielo o en zonas de salpicadura de agua de mar.



Figura 23: Red River Floodway Bridge on TCH #1E, Winnipeg, Manitoba, Canada © 2021 OWENS CORNING. ALL RIGHTS RESERVED. USED WITH PERMISSION

Respecto a obras portuarias españolas, ya existen algunas construcciones ejecutadas con armaduras de polímeros reforzados con fibra de vidrio:

- **Bloques del dique de punta Langosteira (A Coruña).** La obra se ejecutó en 2017. 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 bloques de densidad 2,66 t/m³ y los 4 restantes de densidad 2,82 t/m³, armados en ambos casos con 60 barras de GFRP de diámetro Ø32 mm. Se colocaron

en total 7560 m de barras. (Información y fotografías facilitadas por la Autoridad Portuaria de A Coruña y la empresa Galaicontrol. Ver Figura 24).

- **Espaldón del dique suroeste de Escombreras, 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. El recrecido se debió a 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 $\Phi 32$ mm por metro lineal. Aplicando la normativa italiana, la armadura transversal debía ser del 20 % de la vertical; así se emplearon 5 barras $\Phi 20$ mm por metro lineal [43]. Se colocaron en total 67.000 kg de armaduras GFRP (Información facilitada por la Autoridad Portuaria de Cartagena y la empresa RTHp. Ver Figura 25).
- **Espaldón del dique de la bocana norte del puerto de Barcelona.** A los 5 años de su construcción ya tenía problemas de corrosión de las armaduras de acero. Se hicieron algunas obras de reparación, y finalmente en el año 2022 se hizo necesaria una actuación para su rehabilitación completa. La solución propuesta y ejecutada, entre finales de 2023 y principios de 2024, consistió en el saneo de superficies de hormigón tanto del lado mar como del lado puerto en una profundidad estimada de 20 cm y la sustitución del armado del espaldón, empleando barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP). Finalmente se procedió a la demolición y reconstrucción de los 130 cm superiores del espaldón. La normativa y recomendaciones utilizadas para el desarrollo del proyecto de rehabilitación fueron el FIB bulletin 40 [29], el Código Estructural [9] y el anexo R del nuevo Eurocódigo 2 en redacción [38].

Como resultado de los cálculos se colocaron 5 barras de diámetro $\Phi 25$ mm por metro lineal en el lado mar y 5 barras de diámetro $\Phi 16$ mm por metro lineal en el lado tierra. Como armadura longitudinal se dispusieron 5 barras de diámetro $\Phi 16$ mm por metro lineal. El recubrimiento de todas las armaduras de GFRP fue de 50 mm. No fue necesaria armadura de cortante. Las superficies se trataron con puentes de unión entre hormigones y conexiones ejecutadas con pernos de acero galvanizado de diámetro $\Phi 16$ mm cada 40×40 cm² de superficie de espaldón. (Ver Figura 8 y Figura 26).



Figura 24: Punta Langosteira. Armadura GFRP en distintas fases del proceso de fabricación de los bloques

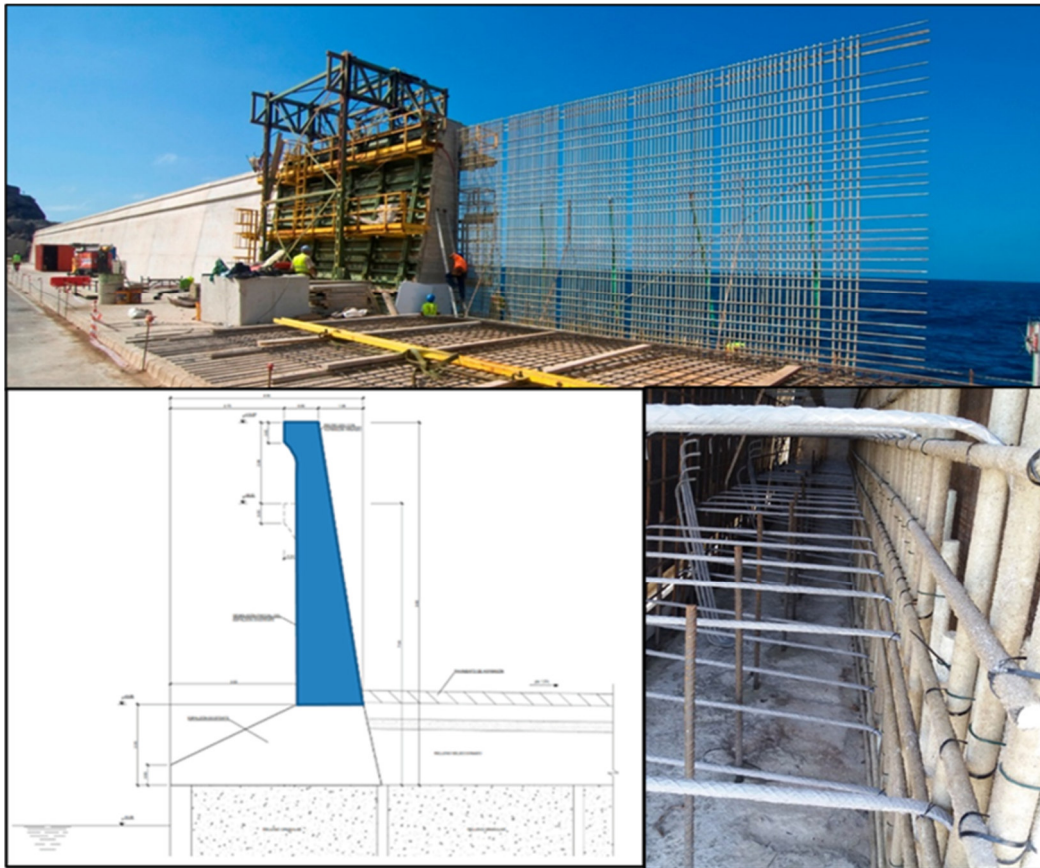


Figura 25: Espaldón de Escombreras. Arriba, armadura GFRP durante una de las fases de hormigonado; abajo, croquis de la intervención y armadura interior © [43]



Figura 26: Espaldón en el puerto de Barcelona, en distintas fases del proceso de ejecución

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**¹ completo de las estructuras, y, por tanto, repercute directamente en la **sostenibilidad** de las mismas. 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 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 [44], [45].

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 [46] y UNE-EN 17472 [47]. 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 [40] [48] o estar en una relación de 1,5 veces superior a la del acero [41]. Así, el precio por kilo podría ser incluso más de 14 veces superior [48], 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

¹ Según la versión corregida de 2021 de la norma UNE-EN ISO 14040 [56], 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*.

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 [49] [48]; 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 [48].

Como ejemplos, respecto a las armaduras galvanizadas en la construcción de edificios, su empleo puede suponer un aumento del 20 al 30 % en el precio de las armaduras [1], del 6 al 10 % en el coste del hormigón, y del 1,5 al 3 % del coste total de la obra [1], [13].

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. [50]. También se han hecho valoraciones del incremento del coste total en función del porcentaje de sustitución de la armadura al carbono convencional por la de acero inoxidable (en este caso, en estructuras de puentes), llegándose a valores del 30 % del coste total, cuando el porcentaje de sustitución es del 100 % [1]. En otras referencias, en las que se han evaluado diferentes alternativas para el refuerzo del hormigón (en este caso para un tanque de cloración de agua), está valoración podría llegar a más del 80 %, teniendo en cuenta diferencias geográficas y coyunturales [40]. Aunque esta última valoración es muy alta, realmente el coste del acero inoxidable es muy fluctuante según las zonas geográficas y la situación económica; influye además el tipo de acero inoxidable que se requiera, siendo, en principio, el coste más variable y probablemente más elevado en los aceros inoxidables con mayor contenido de níquel y molibdeno [1].

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 [43].

- 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 [48]; pero su empleo también puede implicar algunos sobrecostes de construcción, por ejemplo, debidos a que necesiten más atado ante la posibilidad de que, por su menor peso, puedan flotar en el hormigón [40].

- 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 [40] [48] [50] [51] [52].

- 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 económica 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 también como un beneficio [48] [51].

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 en 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 [40], [41], [48], [49], [51].

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 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 10 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.

Tabla 10: 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 (%)
[40]	---	11 [6,0]	25 (50) [1,95]	43 (35) [5,15]	0,6
[41]	---	0,75 [2]	10,37 (75) [2]	20 (40) [4]	1
[51]*	---	---	28,8 (50) [3-5]	---	0,01
[49]	---	---	---	30 (50) [10]	0,7
[48]	---	---	15 (50) [1,35]	≈50 (20) [5,9]	0,7

*Periodo de referencia 79 años.

En la Figura 27 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.

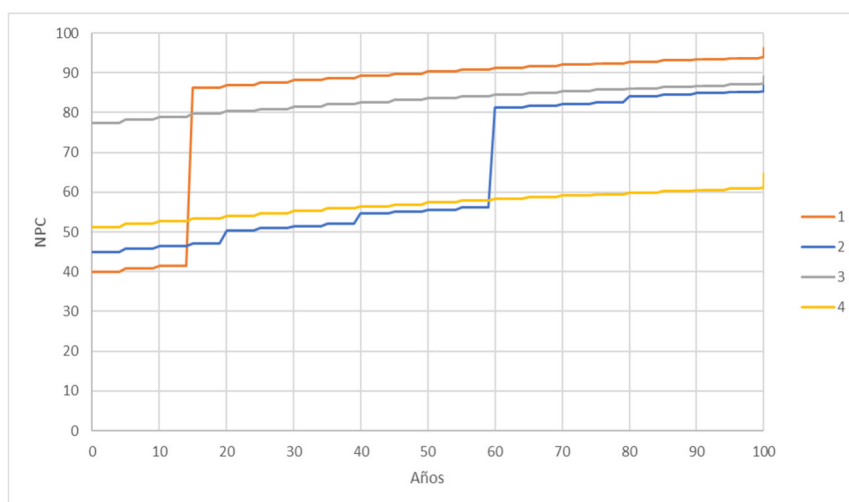


Figura 27: Ejemplo de curva comparativa de los costes actualizados del ciclo de vida de una estructura de hormigón armado con 4 alternativas de armaduras, para un periodo de referencia de 100 años

La curva 1 de la Figura 27 trata de representar la situación real de algunos diques en el ámbito costero español, contruidos 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 o protección 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. 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* [45]. Dicha integración se podría realizar si se cuantificaran los aspectos medioambientales en términos monetarios [53], por ejemplo, si existe un pago o tasa real por la emisión de CO₂ 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 [54].

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 [55], [56], UNE-EN ISO 14044 [57], [58], [59] y UNE-EN 15804 [60], [61]. 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 unos 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 resultados 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 [41], [51].
- 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 [51]. 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 [48].

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 % [41] o más de un 70 % dependiendo de la categoría de impacto [51]. 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.

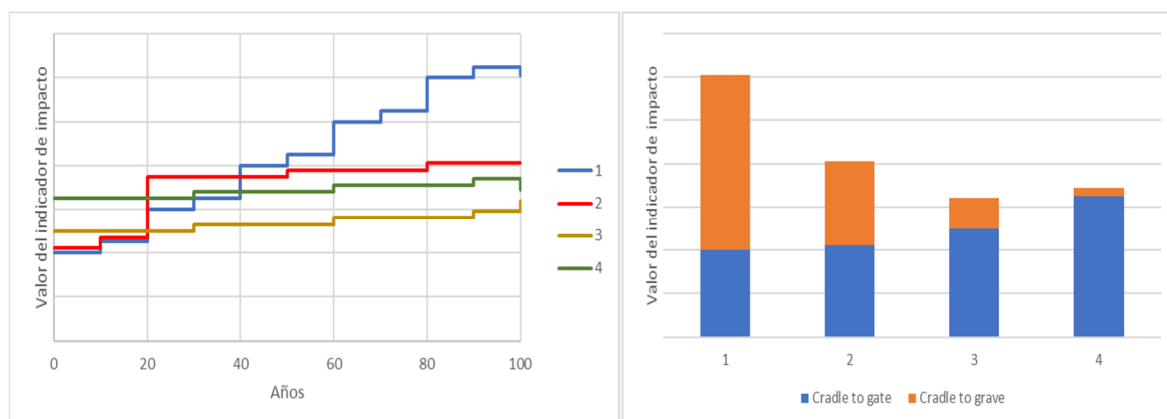


Figura 28: Ejemplo de gráficos comparativos de análisis LCA para una determinada categoría de impacto, de una estructura de hormigón con diferentes tipologías de armaduras y estrategias de mantenimiento y reparación

En la Figura 28, la curva 1 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 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 [55].

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Cualquiera de las tipologías analizadas de armaduras alternativas para evitar la corrosión del acero al carbono convencional tiene como mayor ventaja el aumento de la durabilidad del hormigón armado estructural, retrasando o incluso eliminando su deterioro por la corrosión de las armaduras. En concreto, se han analizado las siguientes tipologías:

- Acero galvanizado.
- Acero inoxidable.
- Polímeros reforzados con fibra de vidrio.

La elección de la solución más apropiada desde el punto de vista global dependerá de numerosos factores, tanto de la propia estructura como de su entorno.

A continuación, se resume, por cada tipo de armadura, las características más importantes y las conclusiones que se han alcanzado.

ARMADURAS DE ACERO GALVANIZADO

El galvanizado consiste en el recubrimiento de la barra de acero base por varias capas de aleación hierro-cinc de espesor mínimo entre 70 y 87 μm , aumentando el contenido de cinc de las capas a medida que se aproximan a la superficie exterior. Puede ser parte del proceso integral de fabricación de la barra o que se realice en barras terminadas según su respectiva norma de producto en función del acero base. En ambos casos, es fundamental garantizar la adherencia del acero con su revestimiento galvánico. Normalmente se galvanizan en caliente y por procedimiento discontinuo.

Tabla 11: Resumen de propiedades, ventajas e inconvenientes de las armaduras galvanizadas

Propiedades	• El acero base es el mismo que el acero convencional, por lo que su comportamiento y requisitos exigibles son también los mismos. Los contenidos de silicio y fósforo del acero a recubrir son los responsables principales del espesor y distribución de las capas de aleación del revestimiento de cinc. La unión metalúrgica entre ambos metales garantiza la adherencia al sustrato de acero. Cualquier proceso térmico, por ejemplo, corte o soldeo, puede influir localmente en la composición del acero y, por tanto, en el resultado de su posterior galvanizado. • Las características mecánicas de las barras de acero galvanizado son muy conocidas, ya que prácticamente coinciden con las de las barras convencionales, por lo que su uso deja poco margen a la incertidumbre y únicamente deben controlarse la continuidad, el espesor y la composición de las capas de aleación, como características adicionales. • La adherencia con el hormigón es similar a la del acero sin recubrimiento, siempre que se evite durante el galvanizado la acumulación de cinc en la zona de contacto de la corruga con la superficie circular de la barra y se tomen ciertas precauciones cuando el hormigón está aún fresco, especialmente si se emplean cementos muy alcalinos. • El comportamiento frente a fatiga debe ser estudiado en cada caso, ya que el recubrimiento se puede fisurar debido a tensiones cíclicas y las irregularidades generadas pueden actuar como iniciadoras del fenómeno en el acero base. Por el contrario, el galvanizado también puede resultar beneficioso cuando actúa reviniendo el acero.
Ventajas	• La durabilidad de las barras con recubrimiento galvanizado es mayor que la correspondiente a las de acero convencional, tanto en hormigón carbonatado como en hormigón contaminado por cloruros. Los revestimientos en base cinc protegen de la corrosión mediante la cubrición, la protección catódica y el efecto de autosellado. 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. 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 contenido de cloruros que marca el inicio de la corrosión es mayor, pero el límite máximo admisible debe ser estudiado en cada caso particular. La mejora es especialmente significativa en hormigones carbonatados y no muy densos. • Se puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón en hasta 10 mm, en relación a lo prescrito para la armadura convencional.

Inconvenientes	• La mejora de durabilidad es muy sensible a los defectos en el recubrimiento de cinc. Cualquier causa que produzca su fisuración puede mermar, o incluso anular, su efecto beneficioso: • El doblado de las barras, sobre todo si se lleva a cabo después del galvanizado, puede producir fisuración, especialmente con recubrimientos de gran espesor. La zona entre el cuerpo central y las corrugas puede actuar como concentrador de tensiones cuando se doblan los productos y exfoliar el recubrimiento. Se plantea cierta disyuntiva entre galvanizar antes o después del doblado: antes, puede producir la posterior fisuración del recubrimiento; después, puede producir fragilización del acero en la zona que ha sido estirada en frío, debido al gradiente térmico durante la galvanización. En todo caso, no se recomienda doblar después de galvanizar. • La galvanización de los alambres estirados en frío puede provocar la variación de las resistencias, debido al proceso de fragilización mencionado en el párrafo anterior. • Los procesos de soldadura son más lentos y es necesario tomar precauciones especiales. Si son posteriores al galvanizado, puede ser necesario reparar el revestimiento de cinc. • Se debe evitar el contacto con armadura convencional de acero al carbono.
----------------	---

ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable se define como aquel que contiene al menos un 10,5 % de cromo y un máximo de 1,2 % de carbono. El otro elemento fundamental de su composición química es el níquel. Los tipos más utilizados para armaduras pasivas y, en general, para usos de construcción, son los ferríticos, los austeníticos y los austeno-ferríticos, estos últimos son también conocidos como dúplex. El empleo de uno u otro tipo normalmente depende del grado de exposición a la que vaya a estar sometida la estructura y de su corrosividad. Su propiedad fundamental es que son aceros resistentes a la corrosión debido a la formación de una capa muy fina de óxido pasivante. Se pueden fabricar tanto por laminación en caliente como en frío.

Tabla 12: Resumen de propiedades, ventajas e inconvenientes de las armaduras de acero inoxidable

Propiedades	- 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. Su uso no supone una diferencia importante con el acero convencional y tienen un módulo elástico muy similar, por lo que pueden ser usadas en el hormigón armado sin variar apenas su comportamiento resistente conjunto. Las armaduras de acero inoxidable deben cumplir los mismos requisitos que las de acero al carbono, salvo en lo relativo a su composición química. - La resistencia a fatiga del acero inoxidable es superior a la del acero convencional.
Ventajas	- La durabilidad de las barras y alambres de acero inoxidable es sustancialmente mayor que la correspondiente a las de acero al carbono, tanto en hormigones carbonatados como en aquellos contaminados por cloruros. La fina capa de óxido de que se cubren es una barrera muy eficaz que, si por algún motivo se pierde o rompe, se vuelve a formar sin merma de sección. Su deterioro es prácticamente inexistente. La resistencia a la corrosión es ligeramente inferior en las corrugas que en el resto de la barra. - En el diseño, el valor límite admisible de la anchura de fisura en el hormigón puede ser superior al valor correspondiente con acero convencional; así como también mayor el contenido límite de cloruros para que se inicie la corrosión. El empleo de barras de acero inoxidable puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón hasta un valor de 30 mm. - Se permite colocar en contacto las armaduras inoxidables con las de acero convencional, e incluso soldar ambos tipos si se toman ciertas precauciones.
Inconvenientes	- La elección del tipo de acero inoxidable debe ser acorde a las circunstancias de la estructura de hormigón y al tipo de exposición a la que vaya a estar sometida. Hay que tener en cuenta que existen muchos tipos de acero inoxidable y su resistencia a la corrosión es variable de unos a otros. - En la manipulación, conformado y almacenamiento se debe evitar el contacto con armaduras de acero al carbono y los equipos que se utilicen para estos procesos deben ser exclusivos del inoxidable. - Los procesos de soldadura son más delicados y es necesario tomar precauciones para que las soldaduras sean también inoxidables y resistentes a la corrosión.

ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

Los polímeros reforzados con fibras están formados por fibras continuas impregnadas de resina polimérica. Para las armaduras, las fibras más comunes son las de vidrio y el tipo de resina más frecuente la de viniléster. Normalmente se fabrican por pultrusión, aunque también pueden ser moldeadas. Para aumentar la adherencia con el hormigón se recurre a tratamientos superficiales, como impregnación de arena, o a deformaciones o bandas de forma helicoidal alrededor de la barra.

Tabla 13: Resumen de propiedades, ventajas e inconvenientes de las armaduras de GFRP

Propiedades	- Respecto a las características mecánicas, estas armaduras tienen un comportamiento en tracción elástico hasta el fallo, frágil y no avisan antes de la rotura. Se caracterizan por un diagrama lineal entre tensión y deformación. Tienen mayor resistencia a la tracción longitudinal que el acero. Su módulo de elasticidad es bajo, lo que supone un cambio importante en las consideraciones de diseño. La resistencia a tracción disminuye conforme aumenta el diámetro. - Se trata de un material anisótropo caracterizado por una alta resistencia a tracción en dirección de las fibras. Esta anisotropía afecta también a la resistencia a cortante, que generalmente es baja. Tiene un coeficiente de expansión térmica diferente en dirección longitudinal y transversal. - En principio, se supone una buena resistencia a fatiga, pero si se eleva la temperatura o la humedad, o existe degradación medioambiental de la resina, la resistencia frente a cargas cíclicas puede verse afectada. Los códigos son muy conservadores en los criterios de diseño frente a este tipo de esfuerzos, por la gran cantidad de factores que afectan a su comportamiento y la escasez de investigación de su efecto en la adherencia con el hormigón. - La adherencia de este tipo de armaduras depende de la composición resina-fibra, del proceso de fabricación, de las condiciones medioambientales y, sobre todo, del tipo de superficie de acabado.
Ventajas	- Desde el punto de vista de la durabilidad, estas armaduras no se deterioran cuando se encuentran en presencia de un gran número de sustancias agresivas y son inertes a los cloruros. No se ven afectadas por la carbonatación del hormigón. El valor límite admisible de la anchura de fisura en el hormigón puede ser superior al valor correspondiente con acero convencional; así como también mayor el contenido límite de cloruros. - Otras características que diferencian notablemente estas armaduras de las de acero y que son muy ventajosas para determinadas aplicaciones son su peso ligero, lo que beneficia su transporte y colocación en obra, la transparencia magnética y que son aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico. - Finalmente, hay que resaltar su facilidad de demolición en estructuras temporales. - En el diseño, el empleo de esta tipología de barras puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón de modo significativo. Se pueden proyectar con espesores de hormigón de recubrimiento menores y se puede prescindir de dosificaciones y mezclas especialmente diseñadas para prevenir la corrosión del acero. - Se pueden poner en contacto y usar de modo combinado con cualquier tipo de armadura de acero.

Inconvenientes	• El hormigón reforzado con barras FRP tiene un comportamiento estructural distinto al del hormigón armado tradicional, por lo que se requieren métodos específicos de diseño. • Las barras de polímeros reforzados con fibras presentan el fenómeno denominado fatiga estática o rotura por fluencia; en consecuencia, las barras sometidas a carga constante pueden fallar de modo frágil después de un cierto periodo de tiempo. • Las fibras de vidrio son sensibles a la degradación en medio alcalino, en el que se puede deteriorar alguna de sus propiedades físico-mecánicas. • Es un material susceptible al fuego. A altas temperaturas presenta considerables pérdidas en su resistencia mecánica y adherencia. • Las barras no pueden doblarse y deben fabricarse con la geometría definitiva. Los elementos curvos de esta tipología de barras presentan una resistencia a la tracción inferior con respecto a la de los elementos rectos. • Se deben tomar precauciones en su almacenamiento, ya que es un material que se degrada con la radiación ultravioleta. Antes de su puesta en obra, su durabilidad se puede ver muy afectada por condiciones ambientales, tales como las altas temperaturas, alcalinidad, ciclos humedad-sequedad, y ciclos hielo-deshielo. Todos estos factores pueden afectar a su resistencia y rigidez a largo plazo. • No se recomienda su empleo en elementos comprimidos, ni en aquellos que vayan a resistir cargas sísmicas o que requieran distribución de momento. • En la actualidad, existe dificultad en los laboratorios de ensayo para realizar pruebas de control de calidad y control de producción, principalmente de tracción; igualmente sucede con otro tipo de ensayos específicos para esta tipología de armaduras.
----------------	---

Finalmente, hay que decir que todas las alternativas presentadas en esta monografía son económicamente más costosas y, dependiendo de las categorías de impacto que se consideren, podrían ser también más gravosas desde el punto de vista medioambiental en el momento de la construcción. Por el contrario, 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 marinas 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 en 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 medioambientales a etapas posteriores a la de ejecución de la obra. En este tipo de análisis es donde se puede mostrar claramente la ventaja del empleo de armaduras alternativas.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean agradecer a **Puertos del Estado** por el encargo de este trabajo y a las personas, organismos e instituciones que han contribuido aportando información o material para la documentación y redacción de esta monografía. Y en concreto:

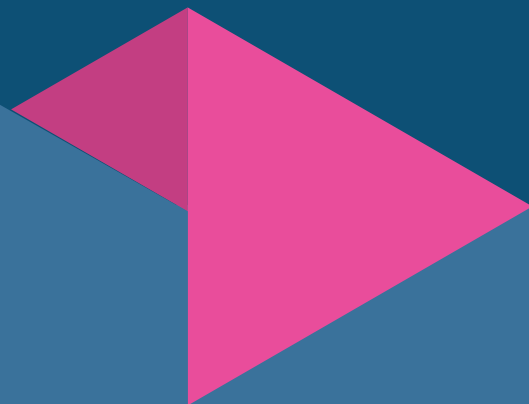
- A las autoridades portuarias de A Coruña, Barcelona y Cartagena y a las autoridades de los puertos de la Generalitat Valenciana.
- A la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG) y a la Asociación para la Investigación y Desarrollo del Acero Inoxidable (CEDINOX).
- Al fabricante de armaduras de acero inoxidable, Roldán, y a los fabricantes de armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio, RTHp, Owens Corning y Sireg. A la empresa Galaicontrol.

REFERENCIAS

- [1] ACHE. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Sistemas de reparación y protección de estructuras de hormigón con corrosión, vol. Monografía 26, Grupo de trabajo 4/1 Sistemas de reparación y protección para garantizar la durabilidad de las estructuras existentes, 2015.
- [2] S. López Ramos y Á. Martínez del Olmo, «El zinc, ese gran desconocido,» Ingeniería Civil, nº 148, pp. 71-82, 2007.
- [3] AENOR, «UNE-EN ISO 1461 Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo,» 2023.
- [4] AENOR, «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,» 2020.
- [5] AENOR, «UNE-EN ISO 2178 Recubrimientos metálicos no magnéticos sobre metal base magnético. Medida del espesor del recubrimiento. Método magnético,» 2017.
- [6] AENOR, «UNE-EN ISO 1460 Recubrimientos metálicos. Recubrimientos de galvanización en caliente sobre materiales férricos. Determinación gravimétrica de la masa por unidad de área,» 2021.
- [7] AENOR, «UNE-EN 10080: Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades,» 2006.
- [8] CEN-CENELEC, “EN 10348 Steel for the reinforcement of concrete - Galvanized reinforcing steel products,” 2024.
- [9] MITMA, Código Estructural, 2021.
- [10] ATEG, «www.ateg.es,» [En línea]. Available: <https://www.ateg.es/media/1791/ateg-notas-informativas.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [11] AENOR, «UNE-EN ISO 15630-1 Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 1: Barras, alambres y alambón para hormigón armado,» 2019.
- [12] Fib: CEP-FIP, «Corrosion protection of reinforcing steels, Bulletin nº . 49,» 2009.
- [13] EGGA, «EGGA European General Galvanizers Association,» [En línea]. Available: <https://www.galvanizingeurope.org/wp-content/uploads/2021/07/Version-2.1-Feb-2022.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [14] AENOR, «UNE 83992-2 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado,» 2012.
- [15] J.-J. Bianchi, «El puente de Saint-Nazaire-Saint-Brévin-Francia,» Informes de la Construcción, vol. 29, nº 280, pp. 73-89, 1976.
- [16] El Diario Vasco, «Así se construyó La Perla,» El Diario Vasco, 4 octubre 2020.
- [17] I. Martínez y M. C. Alonso, «Estudio de la durabilidad de armaduras galvanizadas en estructuras portuarias de la Generalitat Valenciana,» IETcc, CSIC.
- [18] M. C. Alonso, I. Martínez, V. Ibarra y O. Molines, «Empleo de armadura galvanizada para proteger frente a la corrosión en estructuras marítimas,» de XI Jornada de Costas y Puertos, Gran Canaria, 5 y 6 de mayo, 2011.
- [19] AENOR, «UNE-EN 10088-1 Aceros inoxidables. Parte 1: Lista de aceros inoxidables,» 2024.
- [20] Instituto Técnico de la Estructura en Acero, [En línea]. Available: https://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/TOMO22.pdf. [Último acceso: octubre 2023].
- [21] AENOR, «UNE-EN 10088-5: Condiciones técnicas de suministro para barras, alambón, alambre, perfiles y productos brillantes de aceros resistentes a la corrosión para usos en construcción,» 2010.

- [22] AENOR, «UNE 36067 Alambres de acero inoxidable para armaduras de hormigón armado,» 2017.
- [23] AENOR, «prEN 10370 Steel for the reinforcement of concrete - Stainless steel,» 2019.
- [24] CEDINOX, «www.cedinox.es,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.cedinox.es/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/59armadurasaceroinoxidable.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [25] ARMINOX, «www.arminox.com,» [En línea]. Available: https://www.arminox.com/Files/Filer/Arminox%20doks/Arminox_Progreso_Inspec_Report_web.pdf. [Último acceso: octubre 2023].
- [26] A. A. Torres-Acosta, M. Martínez-Madrid y P. Castro-Borges, «El viaducto de Progreso en Yucatán, México: primera estructura de concreto durable en el mundo construida con acero inoxidable,» *Hormigón y Acero*, vol. 29 (S1), pp. 35-41, 2019.
- [27] CEDINOX - Asociación para el desarrollo del acero inoxidable en España, «Botaolas Salinetas,» *Acero Inoxidable*, nº 94, pp. 4-5, junio 2024.
- [28] CEDINOX, «Extensión de Mónaco hacia el mar,» *Acero Inoxidable*, nº 83, pp. 40-45, 2018.
- [29] Fib: CEP-FIP, «FRP reinforcement in RC structures, Bulletin nº. 40,» 2007.
- [30] AFGC - Association Française de Génie Civil, «Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures,» 2023.
- [31] ACI, «ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars,» 2015.
- [32] ACI, «ACI CODE-440.11-22 Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars – Code and Commentary,» 2022.
- [33] ASTM, «D7957/D7957M-22 Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymers Bars for Concrete Reinforcement,» 2022.
- [34] CSA, «S806 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers,» 2012 (revisada en 2021).
- [35] CSA, «S807 Specification for fibre-reinforced polymers,» 2019.
- [36] EOTA, «EAD 260023-00-0301 Carbon, glass, basalt and aramid Fibre Reinforced Polymer bars as reinforcement of structural elements,» 2023.
- [37] ISO, «ISO 10406-1:2015 Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids,» 2015.
- [38] AENOR, «UNE-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures,» 2023.
- [39] ASTM, «D7705 Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction,» 2019.
- [40] A. Younis, U. Ebead, P. Suraneni y A. Nanni, «Cost effectiveness of reinforcement alternatives for a concrete water chlorination tank,» *Journal of Building Engineering*, vol. 27, pp. 1-11, January 2020.
- [41] T. Cadenazzi, G. Dotelli, M. Rossini, S. Nolan y A. Nanni, «Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge,» *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 16, pp. 787-802, 2020.
- [42] V. Benzcry, A. Al-Khafaji, R. Haluza, C. Bakiis, J. Myers y A. Nanni, «Durability Assessment of 15 to 20 years old GFRP bars extracted from bridges in the US,» *Journal of Composites for Construction ASCE*, 2021.
- [43] M. Jáuregui Pajares, «Puerto de Cartagena. Recreido del espaldón del dique suroeste,» *Revista del MITMA*, nº 718, pp. 56-65, octubre 2021.

- [44] Comisión Europea, «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,» UE, 2014.
- [45] M. Perelli y L. Parra Ruiz, «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, 2017.
- [46] ISO, «ISO 15686-5 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing,» 2017.
- [47] AENOR, «UNE-EN 17472 Sostenibilidad de las obras de construcción. Evaluación de la sostenibilidad de las obras de ingeniería civil. Métodos de cálculo,» 2022.
- [48] A. Younis, U. Ebead y S. Judd, «Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement,» Construction and Building Materials, vol. 175, pp. 152-160, 2018.
- [49] S. Hamid, K. Naji, A. Younis y U. Ebead, «Material performance and cost effectiveness of seawater-mixed rubberized concrete,» Case Studies in Construction Materials, vol. 15, pp. 1-11, 2021.
- [50] D. V. Val y M. G. Stewart, «Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments,» Structural safety, vol. 25, pp. 343-362, 2003.
- [51] M. Mistry, C. Koffler y S. Wong, «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. 1678-1644, 2016.
- [52] L. Abreu Araujo, I. Helices Arcila, N. Rebolledo Ramos, J. E. Torres Martín, S. Chinchón-Payá, J. Sánchez Montero, B. B. Raggiotti y V. Matres, «Corrosion Initiation Period for Stainless Steel Reinforcement in Concrete Structures,» de XVI International Conference on Durability of Building Materials and Components for Sustainability, China, 2023.
- [53] C. A. Dattilo, P. Negro y R. Landolfo, «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.
- [54] C. C. Steputat, J. O'Connor, M. Arrants, J. Beech y A. Nanni, «GFRP-RC seawalls as a means of coastal fortification and extended service life,» Concrete International, vol. 44, nº 11, pp. 36-42, November 2022.
- [55] AENOR, «UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia,» 2006.
- [56] AENOR, «UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1,» 2021.
- [57] AENOR, «UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices,» 2006.
- [58] AENOR, «UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1,» 2028.
- [59] AENOR, «UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 2,» 2021.
- [60] AENOR, «UNE-EN 15804:2012+A2 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción,» 2020.
- [61] AENOR, «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,» 2021.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX

