



**Universidad
Europea**

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS**

CURSO ACADÉMICO 2023-2024

**ALTERNATIVAS AL ACERO EN ARMADO DE
ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN EN
AMBIENTE MARINO**

Autor: Alberto Aguilar Vivancos

Dirigido por: D. Raúl Rodríguez Escribano

D. Miguel Vázquez Romero

Dña. M.^a Dolores Esteban Pérez

TÍTULO: Alternativas al acero en armado de estructuras de hormigón en ambiente marino

AUTOR: Alberto Aguilar Vivancos.

DIRECTOR DEL PROYECTO: Raúl Rodríguez Escribano, Miguel Vázquez Romero, María Dolores Esteban Pérez.

FECHA: 14 de septiembre de 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que han contribuido en el camino de alguna forma que me ha llevado hasta aquí. No puedo evitar acordarme de profesores del grado y del máster, así como de mis tutores que también han sido mis profesores, aunque merecen una especial mención.

Se me vienen a la cabeza los profesores que han despertado mi interés por la ingeniería de una forma u otra, grandes profesionales que dedican su tiempo a transmitir el enorme conocimiento que han adquirido a lo largo de los años y deciden utilizar su tiempo en compartirlo conmigo de una forma u otra.

El mismo sentimiento se me despierta pensando en el tiempo que llevo trabajando en el ámbito de la ingeniería portuaria.

Solo puedo daros las gracias por darme las herramientas para crecer como persona y como ingeniero. También debo acordarme de mi familia y amigos que han soportado mis quejas y disfrutado de mis alegrías a lo largo de este camino.

En cualquier caso, el camino es largo y solo acaba de empezar...

RESUMEN

Los elementos estructurales propuestos en los proyectos portuarios, así como en sus fases previas contemplan diferentes soluciones realizadas en hormigón armado con barras de acero. Sin embargo, el ambiente marino donde se ejecutan estos proyectos es muy favorable al deterioro de estos elementos debido a los procesos de corrosión que sufren las armaduras.

Los avances tecnológicos en los materiales han dado nuevas alternativas a los proyectistas para la sustitución del acero. No obstante, la realidad es que, en los proyectos públicos de construcción, salvo contadas experiencias motivadas por los centros de investigación, el hormigón armado con acero es la solución a la que recurren los técnicos en sus soluciones propuestas.

Por este motivo, y en vísperas de la aprobación del Anexo R del Eurocódigo 2 en 2024, que dará el apoyo normativo necesario en los diseños, se estudiara y analizara la competitividad y los condicionantes que supone la sustitución del acero por materiales FRP.

Para poder realizar este estudio competitivo previamente se ha realizado un análisis comparativo de las normativas internacionales existentes. Estas normativas se han desarrollado y evolucionado desde hace más de 20 años. En este análisis se caracterizan las diferencias entre los diferentes tipos de armaduras en función del material utilizado y las diferentes formas de aplicación que presenta cada una de las normativas.

Tras este análisis, se desarrolla un modelo de armado en dos elementos de hormigón con armaduras de acero y PRFV. En la realización del modelo se analizarán las diferencias que supone el diseño la sustitución del acero en los armados para su posterior valoración económica y medioambiental. Basándose en el Código Estructural y la ACI 440.11.22 se aplicarán las características de durabilidad para cada tipo de refuerzo a lo largo de una vida útil de 100 años para su posterior valoración.

ABSTRACT

The structural elements proposed in port projects, as well as in their previous project phases, contemplate different solutions made of concrete reinforced with steel bars. However, the marine environment where these projects are carried out is very favorable to the deterioration of these elements due to the corrosion processes suffered by the reinforcement.

Technological advances in materials have provided designers new alternatives for replacing steel as reinforcement. However, the reality is that, in public construction projects, except for a few experiences motivated by experimental centers, steel-reinforced concrete is the solution that project engineers inquire to in their proposed solutions.

For this reason and closed to the Annex R of Eurocode 2 approval in 2024, which will provide the necessary regulatory support in the designs, the competitiveness and conditions involved in replacing steel with FRP materials will be studied and analyzed.

In order to carry out this competitive study, a comparative analysis of existing international regulations has been previously realized. These regulations have been developed and evolved at least since the last 20 years. This analysis characterizes the differences between the different types of reinforcement in function of the material used and the different forms of application that each of the regulations provide.

After this analysis, a reinforcement model is developed in two concrete elements with steel and GRP reinforcements. In the creation of the model, the differences that the replacement of steel in the reinforcements entails in the design will be analyzed for its subsequent economic and environmental assessment. Based on the Structural Code and ACI 440.11.22, the durability characteristics will be applied for each type of reinforcement over a useful life of 100 years for subsequent assessment.

Índice

1	INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO	17
2	OBJETIVOS	20
3	ESTADO DEL ARTE: EL HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO	24
3.1	Introducción: ambiente marino y las estructuras	24
3.2	El hormigón armado en ambiente marino: zonas de exposición.....	26
3.3	Durabilidad-tipos de ataque.....	31
3.3.1	Ataques al hormigón: tipos de corrosión de armaduras	31
3.3.2	Ataque por cloruros	34
3.3.3	Carbonatación	35
3.3.4	Ataque de los sulfatos	36
3.3.5	Reacción árido-álcali	37
3.4	Dosificación del hormigón	37
3.4.1	Introducción	37
3.4.2	Relación agua-cemento.....	39
3.4.3	Contenido de cemento.....	43
3.4.4	Tipo de cemento	44
3.5	Selección de los áridos.....	46
3.5.1	Árido fino.....	47
3.5.2	Árido grueso	48
3.5.3	Resistencia del árido	49
3.6	Adiciones	50
3.7	Aditivos	51

3.8	Recubrimientos.....	53
3.9	Protecciones superficiales o revestimientos y pinturas.....	59
3.10	Protección catódica	59
3.11	Particularidades de puesta en obra y control de calidad	59
3.12	Otras recomendaciones generales.....	63
4	ARMADURAS FRP	64
4.1	Introducción	64
4.2	Barras FRP: Características generales de las armaduras.....	65
4.3	Barras de polímeros reforzadas con fibras de vidrio	66
4.4	Factores principales en proyectos con refuerzos FRP.....	68
4.4.1	Fase de diseño.....	68
4.4.2	Fase de ejecución	74
4.5	Aplicación en ambiente marino en España	74
4.6	Otras experiencias fuera de España	84
4.7	Resumen	86
5	JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE ESTUDIO	88
6	METODOLOGÍA.....	90
7	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MARCOS NORMATIVOS ACTUALES PARA EMPLEO DE BARRAS FRP.....	92
7.1	Introducción	92

7.2	Marco normativo	93
7.2.1	Normativa Europea-Española	94
7.2.2	Normativa Estadounidense	96
7.2.3	Normativa Canadiense	97
7.3	Diseñando con ACI 440.11-22	97
8	MODELO DE ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD: ENSAYOS Y CRITERIOS DE VALORACIÓN	105
9	MODELO PARA ANALISIS COMPETITIVO EN ARMADOS CON MATERIAL PRFV FRENTE AL ACERO TRADICIONAL	113
9.1	Introducción	113
9.2	Bases de diseño	116
9.2.1	Tipología de elementos	116
9.2.2	Clasificación ambiental.....	116
9.2.3	Tipo de cemento	117
9.2.4	Áridos	118
9.2.5	Armaduras	118
9.2.6	Fase de construcción: programación de las obras.....	121
9.2.7	Fase de operación y mantenimiento	122
9.3	Espaldón	123
9.4	Viga cantil + faldón	127
9.5	Valoración económica	129
9.6	Valoración medioambiental	131
10	CONCLUSIONES	135
11	PROPUESTA DE LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	138

ANEXOS:

ANEXO I: Modelo armado espaldón acero

ANEXO II: Modelo armado espaldón PRFV

ANEXO III: Modelo armado viga cantil acero

ANEXO IV: Modelo armado viga cantil PRFV

Índice de figuras

Figura 1. Sección del dique. Tipología de bloques con banquetta de hormigón sumergido. (Archivo Puerto Getaria).....	18
Figura 2. Sección tipo para diques en tipología talud y vertical. (Máster interuniversitario en ingeniería de Puertos y Costas. Ana Lope Carvajal)	25
Figura 3. Deterioro de estructuras de hormigón en agua de mar. (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. IECA, 2013)	30
Figura 4. Tipos de corrosión de armaduras en el hormigón (ANDRADE, C., ALONSO, C., SARRIÁ, J Y CASTELLOTE, M., 1998)	31
Figura 5. Funcionamiento de pila de corrosión electroquímica en las armaduras. (Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB, boletín GEHO nº 12., 1996)	32
Figura 6. Niveles de salinidad en las diferentes masas de agua salada. (Nasa.com).....	33
Figura 7. Penetración de agua bajo presión hidrostática. (SIKA)	39
Figura 8. Periodo de iniciación para el espaldón del Código Estructural, con diferentes tipos de cemento. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	50
Figura 9. Resultados de ensayos realizado en aditivo tipo inhibidor de la corrosión. (Sika)	52
Figura 10. Estructuras en ambiente marino con destrucción del recubrimiento hasta la zona de armadura. (Holcim S.A.).....	57
Figura 11. Duración del periodo de iniciación en función del recubrimiento para un hormigón que cumple lo marcado en el CE. (Víctor D. Lanza Fernández & Pilar Alaejos Gutiérrez, CEDEX)	58
Figura 12. Deformaciones en diferentes tipos de refuerzos en ensayo a tracción. (Brown et al., 2023)	67
Figura 13. Tipos de anclaje y curvatura en armaduras de PRFV. (Brown et al., 2023).....	70
Figura 14. Gráfica de variación de límites ambientales impuestos por ACI 440.11 y EC2 Anexo R en la resistencia a tracción de las barras FRP (rectas) al aire libre. (Gold, 2023)	72
Figura 15. Zona de actuación del proyecto de rehabilitación del espaldón en el Puerto de Escombreras. (GoogleEarth).....	76
Figura 16. Sección de la solución adoptada mixta Acero/PRFV. (Autoridad Portuaria de Cartagena. APC)	77

Figura 17. Detalle de armados con solución mixta acero-PRFV en puerto de Escombreras. (Autoridad Portuaria de Cartagena. APC)	79
Figura 18. Zona de actuación del proyecto de rehabilitación del espaldón de la bocana Norte de Port de Barcelona. (Cedex).....	79
Figura 19. Detalle de armado del espaldón. (Cedex)	80
Figura 20. Imágenes de la puesta en obra del espaldón. (Cedex).....	81
Figura 21. Modelo de elementos finitos de la estructura. (Estructuras de hormigón armado sostenibles e innovadoras, 2024)	82
Figura 22. Sección longitudinal de armado inicial y final. (Estructuras de hormigón armado sostenibles e innovadoras, 2024)	83
Figura 23. Terminal del puerto de contenedores de Rotterdam. (Mateenbar)	86
Figura 24. Tipos de fibra cubierto por cada código (A.ILKI et al, 2023).....	93
Figura 25. Factor reductor dependiente de la duración para cargas sostenidas. (Brown et al., 2023)	103
Figura 26. Ejemplos de armado ante axil y axil y flexión respectivamente. (Brown et al., 2023) ...	104
Figura 27. Ejemplos de forma de los cercos. (Brown et al., 2023).....	104
Figura 28. Curva de “las cuatro políticas” de conservación de una infraestructura.(Gestión de la conservación en el entorno portuario, 2012).....	106
Figura 29. Representación 3D del proyecto AS-built del puente sobre el río Halls. (Engineering Management Institute).....	107
Figura 30. Sección viga HCB. (Engineering Management Institute).....	108
Figura 31. Estudio comparativo de costes del ciclo de vida empleando diferentes tipos de refuerzo. (Journal of Construction Engineering and Management, 148.).....	109
Figura 32. Estudio comparativo de huella medioambiental en un estudio LCA empleando diferentes tipos de refuerzo. (Journal of Construction Engineering and Management, 148).....	110
Figura 33. Muelle de cruceros de Palma de Mallorca. Fases de la actuación de ampliación del muelle. (GoogleEarth)	111
Figura 34. Ley de deformaciones del acero-PRFV en barras de armadura. (Brown et al., 2023)....	115
Figura 35. Sección de armado del espaldón del dique de Levante. (Autoridad Portuaria de Alicante,2014).....	119

Figura 36. Esquema de geometría tipo de la disposición de las armaduras PRFV de los elementos estudiados. (Elaboración propia)	120
Figura 37. Geometría de armados según fabricante y ACI 440.11. (Pultron) y.(Brown et al., 2023)	121
Figura 38. Sección de armados de la solución de FRP. (Elaboración propia)	125
Figura 39. Sección de armados de la solución de acero. (Puerto de Alicante)	126
Figura 40. Detalle de armado viga longitudinal. (Elaboración propia)	128
Figura 41. Evaluación del ciclo de vida (LCA) en kg CO2-eq. (Sika Mix Design Tool)	132
Figura 42. Gráfica de resultados de estudio comparativo en vigas reforzadas con barras de diferentes materiales. (Nikhil Garg & Sandeep Shrivastava, 2019)	133

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de obras de atraque y amarre según su tipología estructural. (Soriano Peña, 2005)	24
Tabla 2. Tabla 27.1.a Clases de exposición en ambiente marino. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021).....	27
Tabla 3. Tabla 27.1.a Clases de exposición relativas al hormigón estructural. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021).....	28
Tabla 4. Tabla 27.1.b Clasificación de la agresividad química. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	28
Tabla 5. Extracto de la Tabla 43.2.1.a Contenido mínimo de cemento y máxima relación agua/cemento. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	39
Tabla 6. Tabla de referencia sobre condiciones en la dosificación del hormigón por elementos estructurales. (Working Group in the Committee for Propagating Japanese Technical Standards Abroad, 2020).....	41
Tabla 7. Relación máxima a/c en diferentes normativas. (Elaboración propia)	42
Tabla 8. Variación en velocidad de difusión de cloruros en función del contenido de cemento y la relación a/c. (Hwan OH, B y Seok Jang, B, 2003)	43
Tabla 9. Extractos de las tablas 43.2.1 a y b sobre contenido mínimo de cemento y resistencia característica mínima esperada para las clases XS. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	44
Tabla 10. Tabla A6.4 Tipos de cementos en función de las circunstancias de hormigonado. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021).....	45
Tabla 11. Tamaño máximo del árido recomendado. (Enrique Dapena García, 2009)	48
Tabla 12. Valores del coeficiente de los Ángeles de diferentes tipos de rocas sanas, comunes como áridos de hormigón. (Enrique Dapena García, 2009).....	49
Tabla 13. Recubrimientos mínimos (mm), <i>c_{min}</i> , para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por carbonatación. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	54
Tabla 14. Margen de recubrimiento en función del nivel del control de ejecución. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	55
Tabla 15. Recubrimiento mínimo exigible en estructuras de puentes. (ASSHTO)	56

Tabla 16. Recubrimientos mínimos en normativa japonesa. (Working Group in the Commite for Propagating Japanese Technical Standards Abroad, 2020)	56
Tabla 17. Recubrimientos mínimos exigidos en la EHE-91, en mm. (Ministerio de Fomento, 1991) 57	
Tabla 18. Efecto del curado sobre la difusión de cloruros. (Miguel Ángel Bermúdez Odriozola, 2007)	62
Tabla 19. Limitación de resistencia a ELS respecto a resistencia a la tracción máxima en ELU. (Elaboración propia)	71
Tabla 20. Cantidades de armado consideradas en la solución tipo 3. (Autoridad Portuaria de Cartagena.APC).....	78
Tabla 21. Definición de armados del proyecto iDock realizado en Miami. (Universidad de Miami). 85	
Tabla 22. Características de los principales tipos de fibras. (Mapei)	92
Tabla 23. Tabla 19.3.1.1Exposure categories and classes. (Brown et al., 2023)	98
Tabla 24. Adaptación de tabla 19.3.2.1 sobre “Limitaciones del hormigón según clase de exposición”. Parte 1.(Brown et al., 2023).....	99
Tabla 25. Adaptación de tabla 19.3.2.1 sobre Limitaciones del hormigón según clase de exposición. Parte 2.(Brown et al., 2023).....	100
Tabla 26.Tabla 20.5.1.3.1 Espesor de recubrimiento de hormigón en elementos de hormigón prefabricado y armado in situ.(Brown et al., 2023)	101
Tabla 27. Variación del coeficiente de reducción en función de la fuerza. (Brown et al., 2023)	102
Tabla 28. Especificaciones de barra de acero B 500 S. (Elaboración propia)	115
Tabla 29. Especificaciones de barra de PRFV. (Elaboración propia)	116
Tabla 30. Tabla 44.2.1.1.b Recubrimiento mínimo (mm), cmin, para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021).....	117
Tabla 31. Contenido máximo de finos en los áridos, extracto de tabla 30.4.1 a del CE. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)	118
Tabla 32. Comparativa de puesta en obra entre elementos reforzados con acero y PRFV. (Elaboración propia)	121
Tabla 33. Condicionantes al hormigón en espaldones según CE. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021).....	123

Tabla 34. Contenido máximo de cemento en clases de exposición XM. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021).....	123
Tabla 35. Cemento utilizable según CE para un recubrimiento máximo de 65 cm en ambiente XS3+XM. (Elaboración propia)	124
Tabla 36. Cemento requerido según ACI 440.11.22 para un recubrimiento máximo de 65 cm en ambiente XS3+XM. (Elaboración propia)	125
Tabla 37. Comparativa de utilización de armaduras durante 100 años en el espaldón tipo. (Elaboración propia).	127
Tabla 38. Cantidades de material requeridas para cada elemento según el material de refuerzo. (Elaboración propia)	129
Tabla 39. Resumen de costes según material de refuerzo en el espaldón L=200 m. (Elaboración propia)	129
Tabla 40. Resumen de costes según material de refuerzo en la viga con faldón L=200 m. (Elaboración propia)	130
Tabla 41. Resumen de costes para 100 años de vida útil manteniendo la estructura en servicio. (Elaboración propia)	130
Tabla 42. Huella de carbono de diferentes cementos para ambiente marino. (Elaboración propia)	131
Tabla 43. Coste de recursos para puesta en obra del hormigón según tipo de armado. (Elaboración propia)	134

1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

El hormigón y sus componentes han sido objeto de estudio y utilización en las obras marítimas desde la época de Julio Cesar según nos ha llegado en los escritos de Marco Vitruvio Polión. En ellos Vitruvio indicaba la importancia de numerosos factores que influían en durabilidad de las estructuras. Resaltó entre otros la importancia de cuidar la elaboración de la mezcla, de una buena dosificación de los componentes, de la granulometría del árido y de la calidad del material.

También identifiqué la porosidad como un factor especialmente importante. Los siguientes extractos de sus escritos muestran estas ideas, estos pueden encontrarse en el libro en latín original en (Vitruvio Polión et al., 2006):

“Una vez que la cal esté apagada, se mezclará con arena, poniendo tres partes de arena por una de cal. Si fuera arena marina o fluvial, con dos partes será suficiente y se mezclará con ladrillos molidos, obteniendo un material aún mejor por su uso”

En cuanto a la arena:

“En las construcciones hechas con hormigón, lo primero que hay que hacer es encontrar una arena que sea apta para la mezcla, y que no tenga restos de tierra [...] Será óptima aquella que, frotada con las manos, se escurre, aquella que a pesar de tener tierra no es áspera. La arena marina, además, después de hecho el muro y colocado el enlucido, exuda sacando el salitre y se disuelve”.

De la cal dice lo siguiente:

“Habiendo explicado los diversos tipos de arena, tendremos que poner toda la atención en el tipo de cal proveniente de la cocción de piedra blanca, aquella que provenga de una roca más compacta y dura será útil para la fabricación del hormigón, aquella que sea más porosa se utilizará para los enlucidos”.(Pérez, 2014)

En cuanto a la tipología Vitruvio proponía tres secciones de diques y muelles expuestos: el dique/muelle vertical de hormigón en masa, el dique/muelle vertical de bloques de hormigón y el dique vertical de paredes de sillería.(Carlos Domingo Force, 2012).

Vitruvio puso de manifiesto la importancia que tiene una buena dosificación de los componentes del hormigón. Desde entonces no fue hasta el año 1875 que en Francia se construye el puente de Chazalet siendo esta la primera estructura realizada con hormigón armado.

En España su uso creció de forma considerable en la última década del siglo XIX realizándose la ampliación del dique Este del puerto de Barcelona con cajones de hormigón armado en 1905. Para su ejecución se aplicaron las experiencias previas obtenidas durante la ejecución de los cajones metálicos en el puerto de Bilbao en 1897.

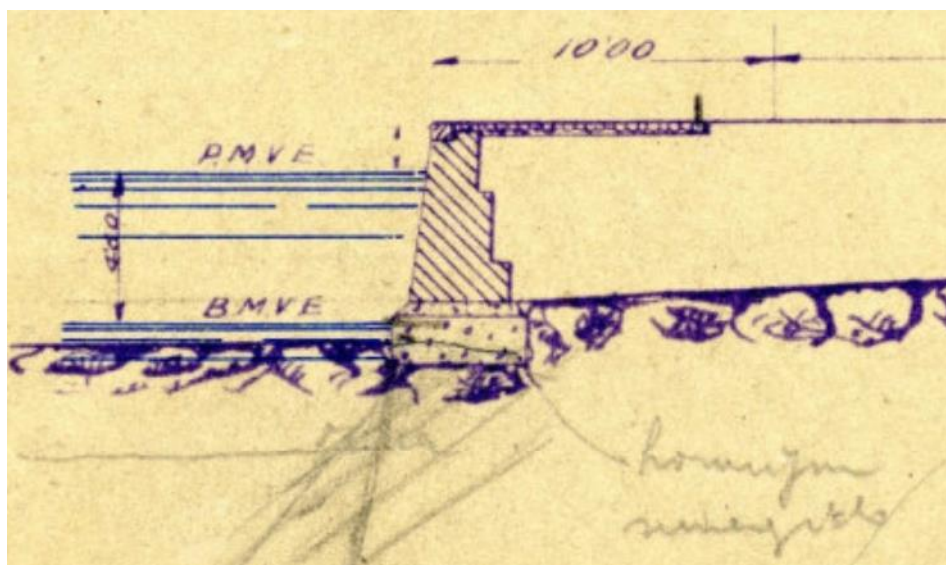


Figura 1. Sección del dique. Tipología de bloques con banquetta de hormigón sumergido. (Archivo Puerto Getaria).

Desde entonces hasta la actualidad las costas españolas se han llenado de estructuras ejecutadas la inmensa mayoría con sus elementos de hormigón armado.

La experiencia obtenida durante estos años ha demostrado que en ambiente marino si las condiciones son agresivas los procesos de corrosión pueden surgir durante la vida útil de la estructura.

Es cierto que los avances en las tecnologías del hormigón permiten nuevos hormigones con propiedades mejoradas. No obstante, existen dos factores que en la actualidad tienen mayor importancia que en el pasado. Estos son el factor medioambiental y las condiciones de durabilidad.

El factor medioambiental junto con la necesidad de conseguir ejecutar estructuras más duraderas y sostenibles ha motivado el avance en la utilización de otro tipo de armados al acero. Siendo así hace ya un tiempo dejó un camino abierto, en el cual podemos encontrar en el mundo diversa tipología de estructuras ejecutadas con este tipo de materiales. (Pérez, 2014)

Los puertos son las estructuras con mayor afección medioambiental en la ingeniería civil (Saravia de Los Reyes et al., 2020). En la búsqueda de mejores soluciones y extender el uso de los hormigones compuestos con el fin de ofrecer unas estructuras más sostenibles y duraderas, se realiza este trabajo de investigación. Se tratará de descubrir que factores influyen para que estas alternativas sean la mejor solución de fabricación en determinadas situaciones.

La mayoría de las estructuras que podemos observar en nuestras costas contienen grandes cantidades de hormigón y en la actualidad, más del 90% se sigue construyendo con los mismos materiales. Esto se debe a la poca experiencia en el empleo de estos materiales compuestos que poco a poco están demostrando que su uso es ventajoso en determinadas situaciones.

En España son pocas las experiencias ya realizadas con armaduras FRP. No obstante, la mayoría de estas se ha centrado en el ambiente marino. A partir de un análisis de las experiencias adquiridas en España y algunas internacionales se buscará exponer lo que supone el cambio en el material de refuerzo en todas las fases del proyecto.

2 OBJETIVOS

La aparición de nuevas tipologías de refuerzo estructural distinto al acero que no sufren procesos de corrosión ha motivado este trabajo de investigación inicialmente. Al no corroerse, los refuerzos FRP son potencialmente útiles en obra marítima.

Gran cantidad de las estructuras ya construidas en España expuestas al mar contienen grandes cantidades de acero. Con la experiencia obtenida en relación a la durabilidad de las estructuras, se puede afirmar que, a pesar de condicionar la mezcla en base a su protección de los procesos corrosivos en los refuerzos, estos acaban apareciendo si el ambiente es muy agresivo a lo largo de su vida útil.

A modo de objetivo se estudiará la competitividad de los nuevos materiales para su empleo en barras de armado embebidas en el hormigón con respecto a las armaduras tradicionales de acero. Para ello se tomará como base de referencia las estructuras ya construidas en España y algunas experiencias internacionales junto con las normativas con las que se han diseñado. Se identificará si las hubiera, las ventajas de los refuerzos FRP en obra marítima frente a los tradicionales en acero.

Otro de los objetivos principales y que determina la realización de la mayoría de los proyectos será obtener un análisis del coste económico en la fase de construcción y a lo largo de la vida útil de los elementos estudiados en un ambiente marino agresivo XS3.

El trabajo se centrará en las estructuras expuestas a ambiente marino. El ambiente marino es uno de los más agresivos que se pueden encontrar. Siendo así, para que una estructura sea ejecutada con estas nuevas tipologías, los proyectistas necesitan de una normativa de diseño y materiales que los ampare. En esta línea el Código Estructural permite mediante las comprobaciones que se consideren necesarias y bajo responsabilidad del proyectista la utilización de refuerzos distintos al acero. La realidad es que, en España, a excepción de alguna ejecución en ambiente marino, pero no a la exposición del agua salada, solo se encuentran proyectos piloto apoyados por los centros de investigación como el Cedex.

Para ello se estudiarán las diferentes zonas de exposición existentes en ambiente marino. Los ataques que sufre el hormigón armado en ambiente marino pueden tener diferente origen, aunque el más perjudicial en relación a la durabilidad de los elementos estructurales de forma general es

el ataque de los cloruros. En caso de que las condiciones de exposición sean favorables a otro tipo de ataques, una buena protección del hormigón permitirá que no afecten a la durabilidad de los elementos expuestos.

En cambio, todas las estructuras en contacto con el agua de mar están expuestas al ataque de los cloruros, siendo protegidas frente al ataque de estos siguiendo las diferentes normativas e igualmente antes de alcanzar la vida útil de diseño aparecen patologías relacionadas con la corrosión de las armaduras.

Cuando diseñamos un elemento de hormigón armado, los diferentes códigos establecen una serie de limitaciones en función de la clase de exposición. Cuando buscamos la mejor dosificación de la mezcla en ambiente marino, nos encontramos grandes restricciones en el contenido de cemento y su relación a/c. Estas restricciones buscan la impermeabilidad de la mezcla y por tanto reducir el avance de los cloruros. Se tratará de exponer y estudiar los diferentes rangos que presenten diferentes normativas importantes para entender el diseño y comportamiento de estructuras en servicio durante su vida útil.

En las normativas de hormigón reforzado con materiales FRP existentes, estas reducciones son mucho menores al no necesitar esa protección frente a los cloruros. Además, los aditivos y adiciones utilizados habitualmente para frenar la corrosión se podrán eliminar.

Tanto el cemento, como los aditivos y algunas adiciones aumentan la huella medioambiental y el coste del hormigón final. La gran importancia que está adquiriendo en los proyectos la huella de carbono y la concienciación con el medio ambiente son otra motivación más para la elaboración de este trabajo. A modo de objetivo secundario se analizará la influencia medioambiental entre los diferentes tipos de refuerzo.

En cuanto al dimensionamiento de las piezas, la disposición de los recubrimientos es mucho menor que en los refuerzos tradicionales y veremos cómo lo tratan las diferentes normativas. Este factor es especialmente ventajoso en estructuras tipo espaldón de diques. Gracias a su utilización se permite reducir el tamaño de los recubrimientos de forma considerable y aumentar su vida útil en uno de los ambientes más agresivos. Se estudiará como han ido evolucionando los espesores de recubrimiento en los elementos reforzados en acero y como deben considerar para los armados con FRP.

La realidad es que los refuerzos FRP no son un material novedoso, ya que, por ejemplo, en Japón encontramos estructuras realizadas con diferente tipología de fibra en puentes con más de 40 años mientras que en los EE. UU. y Canadá en la década de los 90 ya se construían puentes con tableros FRP.

Siendo así, otro de los objetivos será analizar algunas de las normativas de aplicación como son la canadiense, americana y europea desde el punto de vista del dimensionamiento de los elementos y refuerzos. Estas normativas, en cuanto al dimensionamiento con barras FRP, se apoyan en sus normativas vigentes en hormigón armado. No obstante, la limitada experiencia en este tipo de refuerzos y el auge de la tecnología por medio de los fabricantes todavía presenta una serie de limitaciones o consideraciones importantes en las diferentes fases que han de tenerse en cuenta en el diseño con FRP.

Se expondrán las diferencias más importantes entre las dos tipologías de refuerzo, sin perder de vista la durabilidad de las estructuras. En este capítulo, nos centraremos en las características de los refuerzos realizados con fibras de vidrio. La elección de este tipo de fibra se ha basado en las tipologías de refuerzos realizadas en España en ambiente marino.

En España podemos encontrar diferentes realizaciones con barras de fibra de vidrio como refuerzo: espaldones, pasarelas, cubos y cajones. E internacionales, con realizaciones portuarias pilotos en muelles o pantalanés y una gran experiencia en puentes con estas tipologías de refuerzo recogida en la AASHTO.

Se revisarán y analizarán los dimensionamientos realizados para con ello reproducir una sección tipo de armado con la que estudiar las ventajas competitivas de los refuerzos FRP. Para este análisis se validará el diseño acorde a los criterios de durabilidad de la normativa ACI 440.11.22.

Otro de los objetivos buscados será el análisis y caracterización, a partir de la realización de los modelos de los elementos tipo viga cantil y espaldón, de la diferencia de medios requeridos durante la fase constructiva. Con esto se podrá valorar de forma más específica como afectará a la movilización de recursos durante la fase constructiva permitiendo una valoración económica y ambiental más específica.

El objetivo final de este trabajo será ayudar a los proyectistas en la toma de decisión desde la fase inicial de los proyectos con respecto a la consideración de armados sustitutos del acero. Facilitando el análisis de los condicionantes de proyecto en las distintas situaciones y en que medida afecta al resto de parámetros de valoración tomados en consideración para la selección de los materiales de armado.

3 ESTADO DEL ARTE: EL HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO

3.1 Introducción: ambiente marino y las estructuras

Las estructuras más utilizadas en la ingeniería marítima son realizadas en su mayoría con hormigón armado. En ambiente marino la construcción de estas estructuras suele requerir una gran cantidad de recursos para su ejecución, principalmente gran cantidad de acero y hormigón. En este ambiente, el acero es el principal causante de la degradación del hormigón, esto se debe al fenómeno de corrosión que suele acarrear de grandes reparaciones en los casos en que los daños sean reparables.

El grado de degradación dependerá de la cantidad de contaminantes o de agentes corrosivos en el exterior del hormigón, el cual una vez dañado puede requerir de su eliminación antes de cualquier reparación. Las técnicas de eliminación de hormigón incluyen el uso de herramientas de mano, martillos hidráulicos, técnicas de división mecánica hidro-demolición, químicos o explosivos, amoladoras o escarificadores.

Para poder comparar de forma realista ambas tipologías en los diferentes tipos de elementos estructurales desde el punto de vista del material del refuerzo se debe realizar un análisis en cuanto a la durabilidad de las estructuras existentes en obra marítima y de los procesos de degradación de sus elementos reforzados con acero.

Según la R.O.M 0.5-05 las obras de atraque y amarre se clasifican según su tipología estructural de sus elementos:

Tabla 1. Clasificación de obras de atraque y amarre según su tipología estructural. (Soriano Peña, 2005)

FIJAS CERRADAS			FIJAS ABIERTAS	FLOTANTES
Gravedad	Pantallas	Recintos de tablestacas	Pilotes, pilas y otras	Boyas, pontonas o pantalanés, cajones y estaciones de transferencia
Bloques, hormigón sumergido, cajones y otros tipos	Con/Sin plataforma superior			

En cuanto a la tipología estructural de los diques podemos diferenciar entre diques en talud y diques verticales con una sección típica de estas tipologías representadas en las imágenes inferiores.

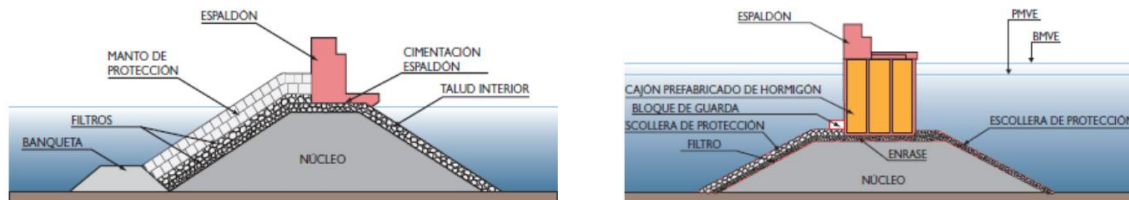


Figura 2. Sección tipo para diques en tipología talud y vertical. (Máster interuniversitario en ingeniería de Puertos y Costas. Ana Lope Carvajal)

Las diferentes tipologías de estructuras citadas se componen en gran medida de elementos de hormigón armado. Las estructuras existentes con estas tipologías llevan en servicio más de 50 años siendo esta la vida útil total para la que se concibieron en su diseño y ejecución.

Es por ello que hoy en día sabemos mucho más sobre su comportamiento en contacto con el agua salada y de la influencia que tienen los componentes que componen la mezcla.

Freyermuth (2009) en su artículo “Service Life and Sustainability of Concrete Bridges” enumero los siguientes condicionantes en estructuras destinadas a proporcionar vidas útiles prolongadas en puentes, y que se puede aplicar a la obra marítima:

- Concebido, ubicado y diseñado para proporcionar un nivel aceptable de seguridad con respecto al entorno natural y las cargas artificiales.
- Con un control adecuado del drenaje de la plataforma, especialmente en áreas expuestas a las sales de forma directa.
- Tratados con un mantenimiento preventivo oportuno de revestimientos protectores, juntas de sistemas de drenaje y rodamientos.

Las recomendaciones de Freyermuth no entran en el ámbito de este trabajo, pero han de tenerse presentes en todas las construcciones portuarias ya que, de no hacerlo así, la probabilidad de favorecer los procesos corrosivos aumentara en ciertos elementos y como consecuencia la estructura podría perder su seguridad y por tanto reducir o paralizar su funcionalidad.

3.2 El hormigón armado en ambiente marino: zonas de exposición

Los ataques al hormigón en contacto con el agua del mar pueden llevarse a cabo por diferentes agentes, pudiendo clasificarse según su naturaleza en:

- Mecánicos: acción del oleaje, impactos de buques.
- Biológicos: colonización de organismos.
- Químicos y electroquímicos.

Para conseguir que los elementos de armado alcancen la vida útil esperada, se debe diseñar según el tipo de ambiente o clase de exposición al que serán sometidos los elementos estructurales. Cada normativa de aplicación adapta estos condicionantes según su criterio y experiencias.

La principal causa de degradación del hormigón se debe a los procesos químicos y electroquímicos. Estos procesos son la principal causa de degradación incluso cuando se cumple con todos los requerimientos y especificaciones normativos en su ejecución y diseño.

En España, la normativa de referencia en los proyectos después de su publicación el 10 de noviembre de 2021 es el Código Estructural, de ahora en adelante CE. Con su aprobación quedaron derogados tanto la instrucción de hormigón estructural (EHE-08) como la Instrucción de Acero Estructural (EAE).

Para la caracterización del ambiente en la EHE-08 se diferenciaba entre clase general y específica, debiéndose así diferenciar entre la situación frente al riesgo de corrosión de las armaduras y la situación frente al riesgo de degradación frente a procesos distintos a la corrosión. Siendo obligatorio caracterizar todo elemento estructural con una clase general y pudiendo o no hacerlo con una clase específica.

El CE en ambiente marino presenta la siguiente diferenciación para clases de exposición en hormigón armado:

Tabla 2. Tabla 27.1.a Clases de exposición en ambiente marino. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Corrosión inducida por cloruros de origen marino		
XS1	Expuestos a aerosoles marinos, pero no en contacto directo con el agua del mar.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado sometidos a los aerosoles marinos, ubicados en la costa o cerca de la costa.
XS2	Permanentemente sumergida en agua de mar.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado permanentemente sumergidos en agua marina.
XS3	Zonas de carrera de mareas afectadas por el oleaje o salpicaduras.	Elementos estructurales de hormigón armado o pretensado situados en zona de carrera de mareas, afectados por el oleaje o salpicaduras.

Estas clases de exposición no sufren un cambio sustancial en cuanto a la diferenciación de ambientes marinos existentes con respecto a la clasificación recogida en la EHE-08. Los Hormigones clasificados como de clase III (a, b, c) ahora se denominan clase XS (1,2,3°).

Otras clases de exposición presentes en las obras marítimas son las que caracterizan la erosión y los ataques químicos. Ciertos hormigones deberán incorporar una segunda clase de exposición, entre ellos podemos encontrar la clase XM referida a la exposición a agentes erosivos como el sufrido por ciertas partes de los diques frente a la acción del oleaje y el impacto de sedimentos o la clase XA(n°) referida a los ataques químicos y en los que se establece un límite para cada clase de diferentes compuestos en agua y suelo. En cuanto clases cabe destacar la diferenciación que hace el CE con respecto a la EHE-08, en la que no había subdivisiones y ahora diferencia entre moderada, intensa y extrema. (aplicable en diques o elementos con gran exposición al oleaje). Se incorpora a continuación la tabla que marca las clases de exposición química.

Tabla 3. Tabla 27.1.a Clases de exposición relativas al hormigón estructural. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Ataque químico		
XA1	Ambiente de una débil agresividad química conforme a la tabla 27.1.b.	Terrenos naturales y aguas (subterráneas, industriales, residuales, etc.).
XA2	Ambiente de una moderada agresividad química conforme a la tabla 27.1.b.	Terrenos naturales y aguas (subterráneas, industriales, residuales, etc.).
XA3	Ambiente de una alta agresividad química conforme a la tabla 27.1.b.	Terrenos naturales y aguas (subterráneas, industriales, residuales, etc.).

La tabla 21.1.b determinara los niveles de agresividad química. Esta clase será especialmente influyente en elementos enterrados con suelos y/o aguas con presencia de estos elementos dentro de los rangos establecidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Tabla 27.1.b Clasificación de la agresividad química. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

TIPO DE MEDIO AGRESIVO	PARÁMETROS	TIPO DE EXPOSICIÓN		
		XA1	XA2	XA3
		ATAQUE DÉBIL	ATAQUE MEDIO	ATAQUE FUERTE
AGUA	VALOR DEL pH, según UNE 83952	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	< 4,5
	CO2 AGRESIVO (mg CO2/ l), según UNE-EN 13577	15 - 40	40 - 100	> 100
	ION AMONIO (mg NH4 + / l), según UNE 83954	15 - 30	30 - 60	> 60
	ION AMONIO (mg NH4 + / l), según UNE 83954	300 - 1000	1000 - 3000	> 3000
	ION SULFATO (mg SO4 2- / l), según UNE 83956	200 - 600	600 - 3000	> 3000
	RESIDUO SECO (mg / l), según UNE 83957	75 - 150	50 - 75	< 50
SUELO	GRADO DE ACIDEZ BAUMANN-GULLY (ml/kg), según UNE-EN 16502	> 200	(*)	(*)

	IÓN SULFATO (mg SO ₄ 2- / kg de suelo seco), según UNE 83963	2000 - 3000	3000 - 12000	> 12000
--	---	-------------	--------------	---------

El CE, siguiendo los criterios de la UNE-EN 206, establece unos límites en la dosificación de la mezcla de obligado cumplimiento en función de la clase de exposición, salvo en casos específicos que se validarán mediante ensayos que demuestren el objetivo buscado en estos hormigones.

Por su parte la ACI (American Concrete Institute), y su reglamentación ACI-318 que establece los requisitos para la construcción con hormigón armado, caracteriza la exposición por agua de mar dentro de la categoría C (nº), distinguiendo entre la clase C1 para elementos expuestos a la humedad que no estén en contacto con el mar siendo similar a los condicionantes de la clase XS1 del CE. En cambio, todos los elementos en contacto con el agua de mar total o parcialmente se clasifican dentro de la categoría C2.

Otra normativa de referencia en la construcción de estructuras es la de especificaciones para el diseño de puentes elaborada por la “American Association of State Highway and Transportation Officials” de ahora en adelante AASHTO como se la conoce por sus siglas en inglés. En ella, al igual que en la ACI no se distingue entre clases de exposición dentro de los elementos expuestos a las aguas salinas del mar.

En Japón, la normativa japonesa vigente para el diseño de estructuras de hormigón elaborada por la “Japan Society of Civil Engineers” (JSCE), establece tres tipos de ambiente a considerar en el diseño de estructuras. Estas clases son las que establecen los condicionantes de diseño en relación al ancho de fisura y al recubrimiento mínimo según la clasificación del ambiente y el tipo de refuerzo del hormigón. En ella, encontramos que se diferencia únicamente entre ambiente corrosivo y severamente corrosivo. Las estructuras que no están en contacto directo con el agua de mar y las completamente sumergidas se agrupan en la misma clase siendo la zona de carrera de marea, zona de salpicadura (incluso aunque su frecuencia sea muy ocasional) y la zona de oleaje las más favorables para desarrollar procesos de corrosión y por tanto las que deben clasificarse en ambiente severamente corrosivo. Todas las estructuras situadas a menos de 1 km de la costa y que no se clasifiquen como severas deberán hacerlo en el ambiente corrosivo. En esta línea el CE

establece como recomendación general aplicar la clase XS1 a elementos ubicados a menos de 5 km de la línea de costa salvo decisión del proyectista y bajo su responsabilidad.

También en Japón, el “The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan” desarrolla la norma de referencia para obras portuarias y marítimas mediante “Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan”, siendo la traducción al inglés de la norma japonesa presentada unos años antes. Esta normativa se apoya en la citada anteriormente para el diseño de estructuras de hormigón elaborada por la JSCE.

La zona de la estructura que sufre mayor exposición a la degradación es la de oleaje. La cantidad reducida de oxígeno limita la velocidad de difusión de los cloruros en la superficie del hormigón.

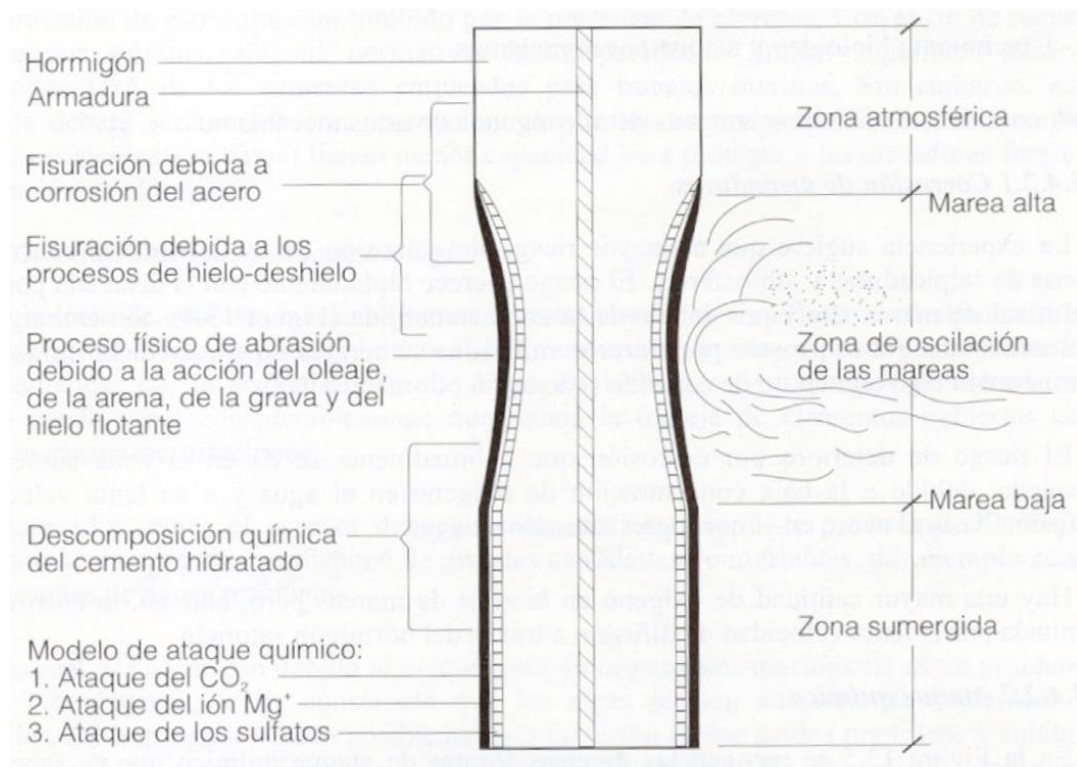


Figura 3. Deterioro de estructuras de hormigón en agua de mar. (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. IECA, 2013)

3.3 Durabilidad-tipos de ataque

3.3.1 Ataques al hormigón: tipos de corrosión de armaduras

Generalmente en obra marítima, las barras de acero embebidas en el hormigón están expuestas a ambientes corrosivos. Tanto el agua como el oxígeno juegan un papel importante en este proceso siendo muy importante diseñar los elementos estructurales para cada clase de exposición.

El ambiente más agresivo para el hormigón es la zona de salpicadura y por tanto donde mayor es el riesgo de sufrir procesos de corrosión en el hormigón. Estas generalmente podrán ser una corrosión localizada por picadura o bien generalizada por procesos como la carbonatación.

En las zonas que permanecen sumergidas la corrosión es menor debido a las bajas concentraciones de oxígeno donde la velocidad de difusión de los cloruros se ve muy reducida.

La corrosión es el ataque destructivo de un metal como el acero por reacción química o electroquímica con su medio ambiente.

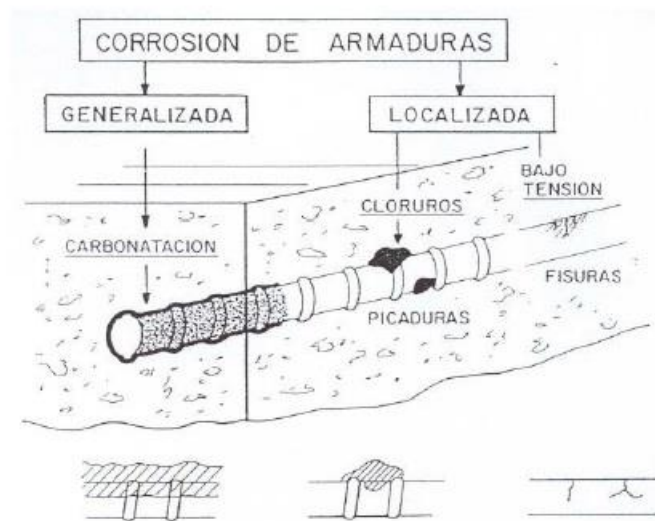


Figura 4. Tipos de corrosión de armaduras en el hormigón (ANDRADE, C., ALONSO, C., SARRIÁ, J Y CASTELLOTE, M., 1998)

El proceso de corrosión de las armaduras en el hormigón se debe a un proceso electroquímico que se produce debido a las diferencias de concentración de iones disueltos en los poros del hormigón.

Estos iones como los álcalis, cloruros u oxígeno presentes en el agua del mar tienden a distribuirse de manera no uniforme alrededor de los refuerzos transformando unas partes del acero en ánodo y otras en cátodo en función de su potencial de corrosión. Produciendo así que la zona anódica sufra un proceso de disolución del metal mientras que la zona catódica permanece inalterada.

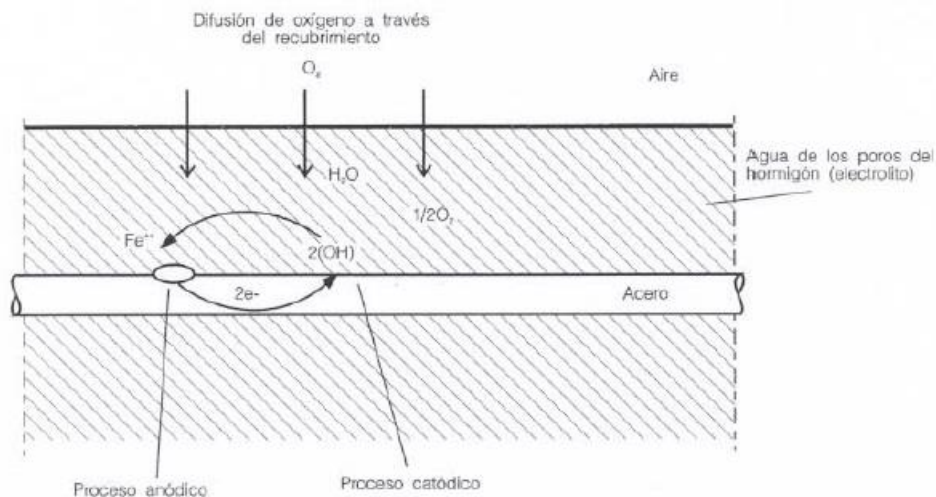


Figura 5. Funcionamiento de pila de corrosión electroquímica en las armaduras. (Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB, boletín GEHO nº 12., 1996)

Para que el proceso de corrosión continúe en el tiempo es necesario un circuito eléctrico cerrado con su ánodo, cátodo, la conexión metálica entre ambos y el propio electrolito como muestra la imagen superior.

Aplicando la ley de Faraday se puede determinar la cantidad de metal corroído, siendo proporcional a la intensidad de corriente (Amperios) y al tiempo (segundos).

$$\text{Nº de equivalentes} - \text{gramos} = \frac{I \times t}{96493}$$

El proceso de corrosión se inicia una vez se destruye la capa pasiva que protege las armaduras que proporcionan el carácter básico a la mezcla.

Cuando el proceso de corrosión avanza las armaduras pierden parte de su sección con la consecuente pérdida de capacidad mecánica. Además, el proceso de oxidación aumenta el volumen del acero hasta 6 veces causando fisuras e incluso desprendimientos. Todos estos efectos disminuyen considerablemente la durabilidad de las estructuras.

El grado de corrosión externo dependerá de las condiciones corrosivas del ambiente. Este variará en función del oleaje y las condiciones meteorológicas, la salinidad y la composición química del agua (pH, concentración de oxígeno y la presencia elevada de otros elementos agresivos como los sulfatos). Siendo los factores que más influyen en la velocidad del proceso a misma calidad de hormigón, las variaciones de humedad, la temperatura y el contenido de iones de cloro.

Dentro de los elementos químicos presentes en el agua de mar se encuentran el magnesio, los sulfatos, el sodio entre otros y el más abundante de ellos el cloro. La salinidad presente en el agua de mar influirá en la concentración de estos elementos y en la corrosión de las estructuras, siendo diferente su concentración según la ubicación del proyecto en cuestión.

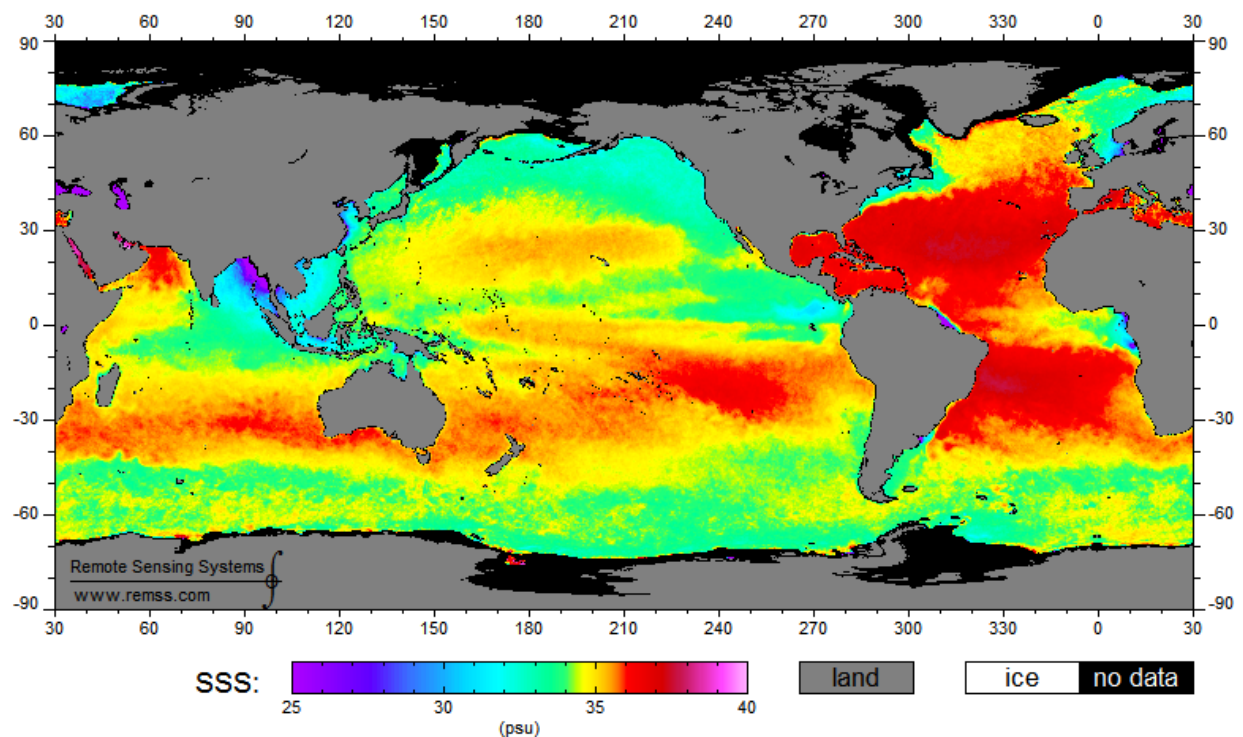


Figura 6. Niveles de salinidad en las diferentes masas de agua salada. (Nasa.com)

En las zonas frías como el Ártico la concentración de sal disuelta en el agua es menor que en las zonas cálidas como son los mares tropicales o el mediterráneo.

3.3.2 Ataque por cloruros

El ion cloruro es el principal agente causante de la degradación del hormigón en ambiente marino y por tanto el mayor condicionante en el diseño de las estructuras.

Debido a su potencial de corrosión, la presencia del ion cloruro está limitado en los componentes de la mezcla por la mayoría de las normativas. Estos cloruros presentes en la fabricación del hormigón si se realiza una buena puesta en obra, tienden a repartirse de forma uniforme fijando los cloruros. De esta forma, inicialmente, no da lugar a la formación de pilas corrosivas.

Las normativas limitan el contenido de cloruros en los componentes de la mezcla, aunque inicialmente solo los iones cloruro disueltos en los poros formaran las pilas de corrosión. Se establecen limitaciones en la dosificación con el fin de fijar los cloruros del hormigón. Sin embargo, otros procesos como la carbonatación pueden descomponer las sales hidratadas de cloruro, liberando iones cloruro sin alterar el contenido total de estos en la mezcla. Esto se debe a que los cloruros combinados tienden a liberarse para compensar la eliminación de los cloruros libres.

El ion cloruro que permanece libre y disuelto en el agua contenida en los poros penetra en el hormigón a través del recubrimiento alcanzando y despasivando las armaduras. La relación agua-cemento y la permeabilidad de la mezcla son los factores principales para que alcance las armaduras.

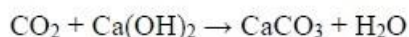
Para evitar el proceso de avance de los cloruros provenientes del exterior hacia el interior del hormigón, el acero cuenta con un recubrimiento superficial y una capa pasiva que le otorga el pH alcalino del hormigón.

A partir de un límite de concentración de iones cloruro en la solución acuosa se produce la destrucción de la capa pasiva. Una vez es destruida esta capa pasiva se inicia el proceso de corrosión activa por picadura cuyo grado de avance dependerá a su vez de la cantidad de oxígeno presente en el hormigón en la zona de armaduras, limitando su zona y grado de aparición.

La experiencia muestra como en la zona por encima de la carrera de marea donde hay acumulación de iones cloros como consecuencia de la evaporación del agua de mar, los daños por corrosión aparecen antes y en mayor grado. Este proceso favorece la formación de las llamadas “pilas de corrosión” entre las áreas pasivas (cátodo) y las de concentración de iones cloruros (ánodo).

3.3.3 Carbonatación

La carbonatación se produce cuando el CO₂ presente en el aire atmosférico provoca una bajada en la alcalinidad del hormigón debido a una disminución de hidróxido de calcio. Esta bajada en el pH rompe la capa pasiva del hormigón favoreciendo a su vez otros procesos de corrosión más agresivos como el producido por los cloruros. El proceso químico es el siguiente:



Esta reacción se ve favorecida cuando los valores de humedad relativa en los poros del hormigón oscilan entre el 60-75 %, viéndose muy reducido su avance para valores fuera de ese rango.

La velocidad del frente de carbonatación depende de diversos factores como son: relación agua/cemento, permeabilidad de la mezcla, su humedad relativa y el contenido total de álcalis de los productos de hidratación.

A modo de resumen y basándonos en otros autores que realizaron estudios experimentales de predicción sobre la penetración por cloruros y carbonatación a largo plazo, se indica que en hormigones de calidad media-alta, independientemente de la clase de exposición marina a la que se someta la estructura, la velocidad de carbonatación es mucho menor que la de penetración de cloruros. Por tanto, se concluye que si la dosificación de la mezcla y los recubrimientos se seleccionan para proteger a las estructuras del efecto de los cloruros, el proceso de carbonatación no afectará a su durabilidad.

En caso de considerarse necesario, existen revestimientos en el mercado que actúan como barrera protectora frente a la carbonatación de acuerdo con la UNE-EN 1504-2 sobre “Productos y sistemas de protección y reparación de estructuras de hormigón”.

3.3.4 Ataque de los sulfatos

El ataque químico de los componentes del agua de mar será la principal causa de degradación en las zonas sumergidas debido a la baja concentración de oxígeno en esta zona necesaria para que se produzca el proceso de corrosión. Este proceso de inicia en desde el exterior del hormigón avanzando hacia el interior (Miguel Ángel Bermúdez Odriozola, 2007)

El proceso es el siguiente: los iones sulfato del agua de mar reaccionan con los hidratos de cemento como son el hidróxido de calcio y la alúmina (Al_2O_3) para formar etringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

La presión generada por la expansión del volumen junto con la reacción anterior provoca grietas en el hormigón. Sin embargo, sobre la base de que la tasa de penetración de sulfato en el hormigón es inferior a la de los iones cloro y que el agua de mar en general tiene una concentración moderadamente baja de iones sulfato de aproximadamente 2,6 g/l, se puede concluir que el efecto de las sales en el agua de mar sobre el deterioro del hormigón no es alto y el progreso del deterioro del hormigón se limita a áreas superficiales a menos que la calidad del hormigón sea significativamente baja.

La presencia de sulfatos en el ambiente puede iniciar el proceso de corrosión al reaccionar con algunos de los componentes del hormigón, no obstante, en caso de ser un ambiente muy agresivo por este motivo, se puede prevenir mediante el uso de cementos sulforesistentes.

La necesidad de usar cementos sulforesistentes con respecto a los normales reduce la capacidad de fijación de cloruros del hormigón. Por ello diversas normativas limitan el contenido de C3A mínimo para la protección de cloruros y máximo para la protección de sulfatos.

3.3.5 Reacción árido-álcali

También conocida como reacción alcalina, se produce cuando los componentes alcalinos del cemento como el óxido de potasio y el óxido de sodio reaccionan con determinados áridos que contienen formas reactivas de sílice.

Esta reacción da como resultado la formación de silicatos alcalinos en forma de gel. Este gel, al absorber agua a través de los poros padece un efecto de hinchamiento que aumenta la presión en el hormigón que acaba manifestándose en forma de fisuras superficiales acompañadas de manchas blanquecinas. Mientras la reacción se produzca tenderá a expandirse hacia el interior de la mezcla.

En el CE al igual que anteriormente en la EHE-08 se establece el deber de comprobar mediante el un estudio petrográfico que los áridos no son potencialmente reactivos con los álcalis.

En caso de que el estudio petrográfico no descarte la reactividad, se establecen dos ensayos mas según normativa europea UNE para asegurar que no se produce la expansión del gel en el interior de la mezcla mediante la reacción alcalina. Estos ensayos son:

- En caso de reactividad álcali-sílice o álcali-silicato (UNE 146508 EX): método acelerado en probetas de mortero.
- En caso de reactividad álcali-carbonato (UNE 146507-2EX): método químico para determinación de la reactividad álcali-carbonato. En el caso de mezcla de áridos calizos y silíceos, el ensayo se realizará sobre la fracción calizo-dolomítica del árido.

3.4 Dosificación del hormigón

3.4.1 Introducción

Los ataques por corrosión son el principal causante de la degradación de estructuras en ambiente marino. Siendo así la dosificación de la mezcla se diseña para reducir o eliminar estos efectos a lo largo de la vida útil de las estructuras.

La característica más importante en los hormigones para alcanzar un comportamiento adecuado en cuanto a durabilidad y sostenibilidad es la permeabilidad, además de la cantidad de cloruros en la mezcla y la abertura de fisura en servicio. Los hormigones poco permeables tienden a tener un buen comportamiento a lo largo de toda su vida útil. Son varios los factores de los que depende

alcanzar la permeabilidad adecuada, siendo los principales una buena dosificación y fabricación. También debe realizarse una buena puesta en obra poniendo especial atención a los procesos de vibrado y de curado. Siendo así, el origen de una mala permeabilidad vendrá originada por un mal diseño o por una deficiente puesta en obra.

Para proporcionar al hormigón las características buscadas, las normativas establecen una serie de limitaciones que deben cumplirse para cada clase de exposición: relación agua/cemento, cantidad y tipo de cemento, granulometría y resistencia de los áridos, resistencia a la abrasión (en caso de elementos estructurales sometidos al oleaje).

También y según las necesidades concretas de cada proyecto puede ser de gran utilidad para mejorar las propiedades del hormigón la utilización de adiciones y aditivos que proporcionen al hormigón ciertas características beneficiosas para conseguir el objetivo final de alcanzar su vida útil.

La composición elegida para la preparación de las mezclas destinadas a la construcción de estructuras o elementos estructurales deberá estudiarse previamente, con el fin de asegurarse de que es capaz de proporcionar hormigones cuyas características mecánicas, reológicas y de durabilidad satisfagan las exigencias del proyecto.

Los hormigones se tipificarán de acuerdo con el siguiente formato (lo que deberá reflejarse en los planos de proyecto y en el pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto): T - R / C / TM / A donde: T Indicativo que será HM en el caso de hormigón en masa, HA en el caso de hormigón armado, HP en el de pretensado. R Resistencia característica especificada, en N/mm². C Letra inicial del tipo de consistencia, tal y como se define en el apartado 33.5. TM Tamaño máximo del árido en milímetros, definido en el apartado 30.3 del CE. A Designación del ambiente, de acuerdo con 27.1.a del CE.

En líneas generales, una buena dosificación de un hormigón debe conseguir la resistencia deseada con el mínimo contenido de cemento y además no debe ser segregable, es decir debe evitar que se separen los elementos gruesos.(Enrique Dapena García, 2009).

3.4.2 Relación agua-cemento

La relación agua-cemento está directamente relacionada con la permeabilidad de la mezcla y por tanto con la durabilidad de la estructura. Todas las normativas de hormigón armado establecen unos límites a esta relación especialmente importante en ambiente marino.

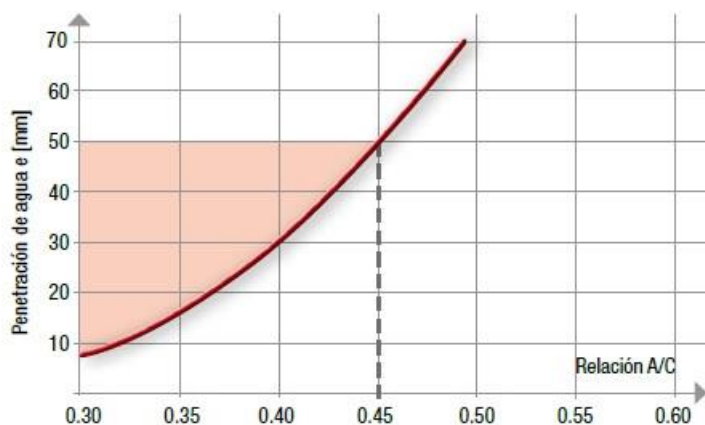


Figura 7. Penetración de agua bajo presión hidrostática. (SIKA)

En el capítulo 9 del CE sobre durabilidad de las estructuras de hormigón se establecen los criterios a seguir en los proyectos y las medidas necesarias para alcanzar la vida útil establecida. En él se establecen los siguientes requisitos en relación con la dosificación del hormigón:

Tabla 5. Extracto de la Tabla 43.2.1.a Contenido mínimo de cemento y máxima relación agua/cemento. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

MÁXIMA RELACIÓN a/c				
TIPO DE HORMIGÓN		XS1	XS2	XS3
MÁXIMA RELACIÓN a/c	MASA	-	-	-
	ARMADO	0,50	0,50	0,45
	PRETENSADO	0,45	0,45	0,45

Estos requisitos se mantienen con respecto a la normativa vigente anterior en España (EHE-08) en ambiente marino salvo por una restricción mayor de la relación/ agua cemento para el ambiente más agresivo XS3, seguramente motivado porque la mayoría de las patologías por corrosión

sucedidas en el pasado aparecen en esta zona. Estas limitaciones son sensiblemente mayores a las que se utilizaron en las estructuras diseñadas con la EHE-91 donde la relación se limitaba a 0,50.

Para los casos en los que se utilicen aditivos en la fabricación del hormigón se establecen dos coeficientes en función del grado de eficacia y el contenido de adición que se aplican en el denominador de la relación agua/cemento permitiendo reducirla.

Las diferentes normativas han desarrollado esta limitación en función de su experiencia y necesidades. En general, podemos encontrar pequeñas variaciones en esta limitación según la normativa en la que se base el proyectista.

Por ejemplo, la normativa japonesa, y más concretamente “The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan” antes de 2007 limitaba la relación agua cemento en 0.55 con un mínimo recubrimiento de 70 mm en la superestructura de un muelle de pilotes abierto.

La experiencia ha demostrado que, aunque las estructuras se construyeron cumpliendo la normativa, los procesos de deterioro por corrosión aparecían dentro de la vida útil esperada en las estructuras. Para controlar este aspecto la normativa japonesa establece un coeficiente C_{lim} en función de la relación a/c, difusión y concentración de cloruros en el elemento, abertura de fisura, espesor de recubrimiento y la calidad del refuerzo fundamentalmente. Este verifica el potencial de corrosión debido a la penetración por cloruros esperable en el elemento calculado en función de la “vulnerabilidad” de la mezcla en ese ambiente.

Tabla 6. Tabla de referencia sobre condiciones en la dosificación del hormigón por elementos estructurales. (Working Group in the Commitee for Propagating Japanese Technical Standards Abroad, 2020)

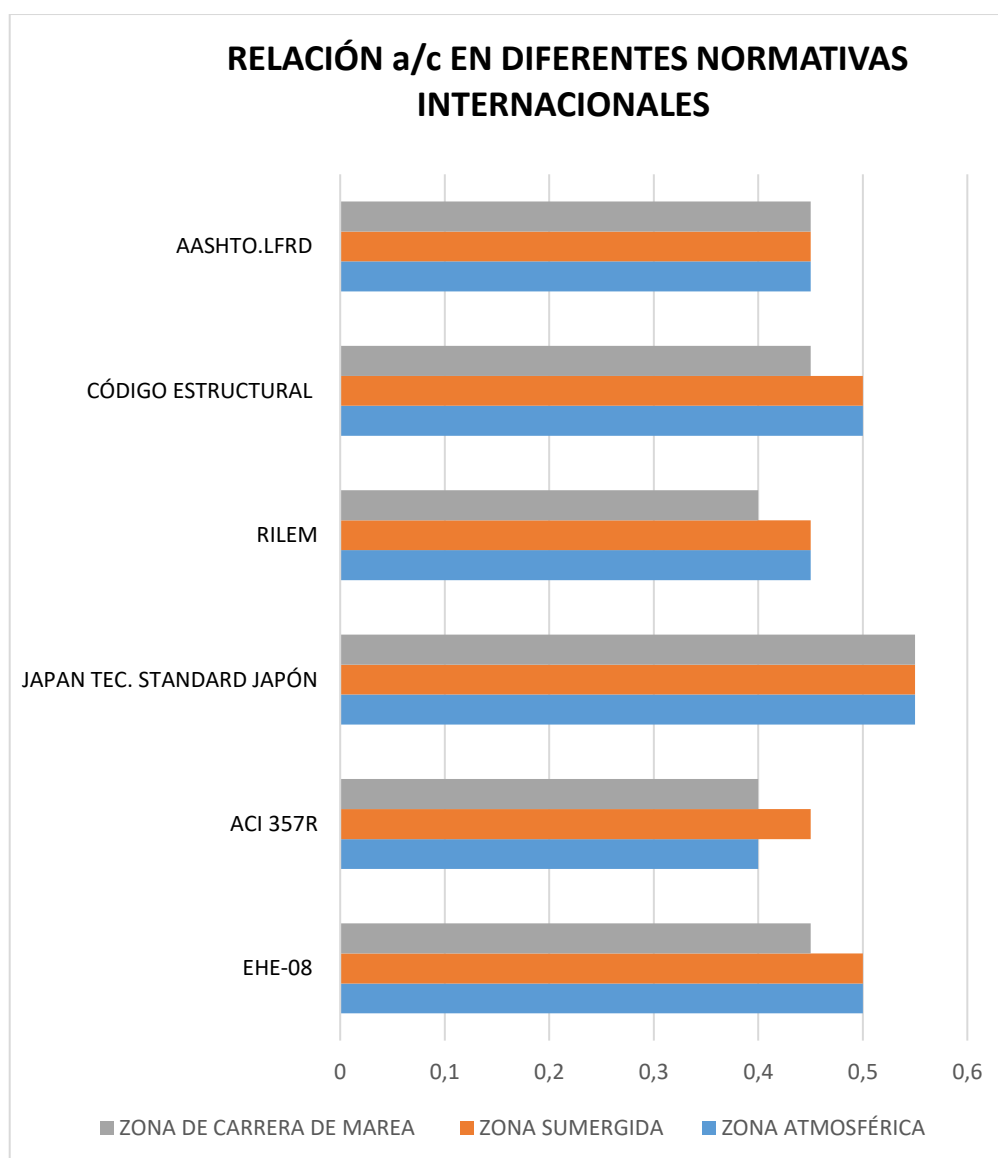
TIPO	EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS	CONDICIONES DE LA MEZCLA	
		MÁXIMA RELACIÓN a/c (%)	
		REGIONES CON CICLOS DE HIELO-DESHIELO	REGIONES DONDE T BAJA DE 0º C POCAS VECES
HORMIGÓN EN MASA	Superestructura en diques, tapadera de cajones de hormigón, bloques del manto, bloques para disipación de olas o recubrimiento, bloques de protección de cimentación y hormigón preparado	65	65
	Superestructura de muelle, dique vertical, cimentación de puesto de amarre (tipo gravedad)	60	
HORMIGÓN ARMADO	Pilotes de cimentación en muelles, diques verticales y superestructura de muelle.	60	65
	Cajón, bloque celular, bloque en forma de L	50	55
	Bloques disipadores de olas	55	55
	Superestructura de pilotes de anclaje	60	60
	Superestructura de muelles abiertos con escollera ⁽¹⁾	-	-

⁽¹⁾ Miembro estructural con riesgo de deterioro del rendimiento durante la vida útil de diseño con corrosión de barra de acero debido a corrosión inducida por cloruro.

La normativa japonesa es la que permite ratios más altas en la relación a/c, limitando la relación al rango entre 0,55-0,65 en climas donde no suele bajar de 0º la temperatura como en España. El CE lo limita entre 0,45-0,50 no siendo la normativa más restrictiva con respecto a esta relación siendo usual encontrar rangos de valores con hasta 0,40 en las normativas anglosajonas.

La siguiente tabla muestra un resumen de las diferentes limitaciones establecidas para la relación agua-cemento por diferentes entes de distintos países en la que se puede apreciar como esta limitación varía en los diferentes países y normativas.

Tabla 7. Relación máxima a/c en diferentes normativas. (Elaboración propia)



Algunas de estas normativas relacionan estas limitaciones con otros factores como las características del árido o el espesor de recubrimiento. En la mayoría de las normas se deja abierta la puerta a establecer unas relaciones diferentes por medio de adiciones o aditivos, siempre y cuando se compruebe mediante los ensayos necesarios.

3.4.3 Contenido de cemento

Para que la permeabilidad del hormigón sea lo suficientemente baja en ambiente salino es necesario que el hormigón contenga un mínimo contenido de cemento dentro de la mezcla. Esto se debe a que cuando el contenido de cemento aumenta también lo hace la capacidad del hormigón para fijar los iones cloruros y el CO₂.

Está demostrado que hormigones con bajos contenidos de cemento son mucho más permeables y sufren mucho más deterioro que los hormigones con una buena dosificación ante los procesos de erosión.

A modo explicativo se incorpora la siguiente tabla que muestra como el aumento del contenido de cemento dentro de un rango reduce la velocidad de difusión de los cloruros.

Tabla 8. Variación en velocidad de difusión de cloruros en función del contenido de cemento y la relación a/c. (Hwan OH, B y Seok Jang, B, 2003)

CONTENIDO DE CEMENTO (kg/m ³)	a/c	D _e (* 10 ⁻⁸ cm ² /s)
300	0,4	10,32
	0,55	33,9
350	0,4	8,28
	0,55	28,1
400	0,4	7,63
	0,55	16,46

En la tabla superior se muestra como las variaciones en la relación a/c para ratios asimilables a la normativa española y japonesa producen variaciones en la difusión de cloruros dentro de la mezcla del orden de más de dos o tres veces según el contenido de cemento.

Las variaciones mostradas como consecuencia de la variación del contenido mínimo de cemento son significativas, con una relación lineal entre el aumento del contenido de cemento y la difusión de cloruros dentro de los rangos expuestos.

Por su parte, el CE mantiene las limitaciones en relación al contenido mínimo de cemento marcadas en la EHE-08. En cambio, la exigencia de resistencia mínima para la zona sumergida se ve reducida,

esto se debe probablemente a que con el tiempo se ha comprobado que los daños en esta zona son mucho menores que en la zona de carrera de mareas.

Tabla 9. Extractos de las tablas 43.2.1 a y b sobre contenido mínimo de cemento y resistencia característica mínima esperada para las clases XS. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Contenido mínimo de cemento (kg/m³) y Resistencia característica mínima esperada para el hormigón (N/mm²) (*)				
PÁRAMETRO DE DOSIFICACIÓN	TIPO DE HORMIGÓN	XS1	XS2	XS3
CONTENIDO MÍNIMO DE CEMENTO (kg/m ³)	MASA	-	-	-
	ARMADO	300	325	350
	PRETENSADO	300	325	350
(*) Resistencia característica mínima alcanzable para un hormigón fabricado con cemento de categoría resistente 32,5 R y conforme al %Min. Cemento y Máx. a/c de la tabla.				
RESISTENCIA CARACTERÍSTICA MÍNIMA (N/mm ²)	MASA	-	-	-
	ARMADO	30	30	35
	PRETENSADO	30	35	35

El CE limita el contenido total de ion cloruro de los componentes del hormigón, para clases de exposición XS, a valores del 0,20% del peso del cemento para el hormigón armado.

3.4.4 Tipo de cemento

Para seleccionar el tipo de cemento, tanto el CE como la Instrucción para la recepción de cementos “RC-16” marcan la necesidad de emplear cementos que cumplan la prescripción relativa al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR, SR o SRC).

En la normativa española, todo cemento resistente a los sulfatos SR es resistente al agua de mar, pero no todo cemento resistente al agua de mar MR es resistente a los sulfatos

Dentro de la clase XS recomienda los siguientes indicando un orden de preferencia dentro de cada tipo recomendable, siendo estos:

- CEM II/S: cemento con entre un 6-80 % de escorias.
- CEM II/V: cemento con entre un 6-35 % de cenizas volantes, preferiblemente los B con un contenido de ceniza superior al 20 %.
- CEM II/P: cemento con entre 6-35% de puzolana natural, preferiblemente los B con un contenido de puzolana superior al 20%.
- CEM II/A-D: cementos con entre 6-10 de humo de sílice.
- CEM III: cementos de alto horno.
- CEM IV: cementos puzolánicos, preferentemente los CEM IV/A, con entre 11 y 35 % de adición puzolánica.
- CEM V/A: cemento compuesto (escoria más puzolánica), pero con un mínimo del 40 % de Clinker.

Para ciertas condiciones ambientales que se encuentran frecuentemente en ambiente marino y que en numerosos casos son causantes de malas puestas en obra que favorecen la degradación temprana del hormigón establece las siguientes recomendaciones en cuanto al tipo de hormigón:

Tabla 10. Tabla A6.4 Tipos de cementos en función de las circunstancias de hormigonado. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Circunstancias de hormigonado	Cementos recomendados
Hormigonado en tiempo frío (1) (2)	Cementos comunes tipo CEM I, CEM II/A y CEM IV/A.
	Se recomienda la utilización de cementos de clase resistente alta o media (52,5 y 42,5).
Hormigonado en ambientes secos y sometidos al viento y, en general, en condiciones que favorecen la desecación del hormigón (2)	Cementos comunes tipo CEM I y CEM II/A.
Insolación fuerte u hormigonado en tiempo caluroso (2)	Cementos comunes tipo CEM II, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A.

(1) En estas circunstancias, no conviene emplear la característica adicional de bajo calor de hidratación (LH).

(2) En estas circunstancias, resulta determinante tomar, durante el proceso de ejecución o puesta en obra, las medidas adecuadas especificadas en la reglamentación correspondiente y, en su caso, en el Código Estructural vigente.

En Japón los componentes del hormigón se rigen por la JIS A 5308 para asegurar que los materiales cumplen la calidad exigida.

Para alcanzar mayor durabilidad recomienda la utilización de cemento Portland de calor moderado de hidratación, de alto horno y de cenizas volantes. Estos cementos aportan al hormigón grandes resistencias a largo plazo y reducen el calor de hidratación, pero tienen la desventaja de tener bajas resistencias iniciales.

En caso de requerirse resistencias a edades tempranas se recomienda la utilización de cementos de alto horno tipo B (CEM III/B) como el más resistente a la corrosión.

Partiendo del punto de vista de que el hormigón creado con cemento Portland de alto horno tipo B es más resistente a la corrosión de las barras de acero que el cemento Portland ordinario, es preferible utilizar cemento Portland de alto horno tipo B desde el punto de vista de la durabilidad.

Será necesario prestar especial atención al curado inicial al utilizar estos cementos. El contenido de ion cloruro en el hormigón fresco se limita a $0,30 \text{ kg/m}^3$.

La ACI limita específicamente los cloruros aportados por los materiales en elementos expuestos a ambiente marino. En la última versión de la ACI-319 se realizaron cambios para reflejar la nueva experiencia que demuestra los efectos beneficiosos de los materiales cementantes suplementarios de reducir la permeabilidad y ligar los cloruros, consecuentemente ayudando a inhibir la corrosión (Kosmatka & Wilson, 2016).

Debido a que hay efectos decrecientes con el aumento de cementantes suplementarios, el Reglamento limita la masa de estos al 50% de los cementos totales que pueden utilizarse para calcular la cantidad permitida de iones cloruro en el hormigón.

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas resalta la gran importancia que tiene la selección del conglomerante con adiciones frente a los ataques por cloruros en numerosos estudios.

3.5 Selección de los áridos

En general la roca que constituye los áridos debe ser sana, resistente, no evolutiva y no debe reaccionar con los componentes del cemento. El conjunto de áridos es el que debe cumplir las condiciones que nos permitan asegurar un buen comportamiento del hormigón fabricado con ellos.

Se denomina tamaño máximo del árido la mínima abertura del tamiz que deje pasar más del 90 %, siempre que por el tamiz de abertura doble pase el 100 % y por el de abertura 1,4D pase el 98 %.

Una fracción en general indeseable, pero que resulta cara su eliminación total, son los finos, que pasan por el tamiz UNE 0,063 mm, y cuya cantidad y composición se limita para evitar los efectos perjudiciales que pueden tener a la hora de fabricar el hormigón.

En cuanto a su geometría, la forma ideal es la esférica, y la dosificación ideal sería aquella que permitiera ir rellenando paulatinamente los huecos dejados entre las esferas más grandes por otras esferas de tamaño menor hasta conseguir una masa compacta de esferas de distintos tamaños que se rellenaría con las pastas de cemento que, al fraguar, daría cohesión al conjunto.

El empleo de áridos gruesos con formas inadecuadas dificulta extraordinariamente la obtención de una masa compacta que de buenas resistencias y, en todo caso, exige una dosis excesiva de cemento. (Enrique Dapena García, 2009)

Entre los minerales que forman las rocas habituales en áridos, y que pueden reaccionar con el cemento, están los compuestos de azufre, la sílice reactiva, los carbonatos reactivos y los cloruros.

El contenido total de compuestos de azufre en los áridos, expresado en SO_3 , se debe limitar al 1 %, aunque en la EHE-08 se limita al 0,8 % expresado en SO_3 .

3.5.1 Árido fino

La arena o árido fino es el árido de mayor influencia en la calidad del hormigón. No se puede hacer un buen hormigón sin arena de calidad.

Las arenas, en general, se prefieren rodadas, pues los hormigones con ellas fabricadas tienen menor consistencia para una misma cantidad de agua, es decir son más dóciles.

En caso de proceder del fondo marino o de la playa se deben lavar para eliminar el cloruro sódico de su superficie. Las mejores arenas de machaqueo son las procedentes de rocas calizas, con las que se es más tolerante en el contenido de finos (filler calizo).

En la normativa española la cantidad total de finos en el hormigón, resultante de sumar el contenido de partículas del árido grueso y del árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la componente

caliza, en su caso, del cemento, deberá ser inferior a 200 kg/m³. Este valor podrá variar a 210 y 250 kg/m³ para hormigones con agua reciclada y autocompactantes respectivamente.

3.5.2 Árido grueso

Las gravas rodadas en un porcentaje elevado permiten obtener hormigones con una consistencia determinada utilizando una cantidad menor de agua y por tanto obteniendo una mayor resistencia.

Los hormigones ligeros y los hormigones pesados se consiguen utilizando arena rodada y gravas ligeras o pesadas.

Tabla 11. Tamaño máximo del árido recomendado. (Enrique Dapena García, 2009)

TIPO	EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS	
		TAM. MAX. ÁRIDO (mm)
HORMIGÓN EN MASA	Superestructura en diques, tapadera de cajones de hormigón, bloques del manto, bloques para disipación de olas o recubrimiento, bloques de protección de cimentación y hormigón preparado	40
	Superestructura de muelle, dique vertical, cimentación de puesto de amarre (tipo gravedad)	
HORMIGÓN ARMADO	Pilotes de cimentación en muelles, diques verticales y superestructura de muelle.	20,25,40
	Cajón, bloque celular, bloque en forma de L	20,25,40
	Bloques disipadores de olas	20,25,40
	Superestructura de pilotes de anclaje	20,25,40
	Superestructura de muelles abiertos con escollera	-

3.5.3 Resistencia del árido

Para asegurar la resistencia del árido se somete una muestra del árido al ensayo de Los Ángeles. Consiste en introducir un peso de muestra del árido dentro de un cilindro giratorio junto con un peso determinado de bolas de acero.

El ensayo de Los ángeles recomendado para los áridos del hormigón consiste en: introducir 11 bolas de acero (4,6 kg) junto con 5 kg de muestra, y se dan 500 vueltas. El coeficiente de Los ángeles muestra en tanto por ciento la cantidad de finos o lo que es lo mismo la cantidad de material que pasa por el tamiz UNE 1,6 mm.

En la EHE-08 se exigía un coeficiente inferior a 40. En la siguiente tabla se muestran los valores típicos del coeficiente de Los Ángeles para diferentes tipos de roca sana:

*Tabla 12. Valores del coeficiente de los Ángeles de diferentes tipos de rocas sanas, comunes como áridos de hormigón.
(Enrique Dapena García, 2009)*

TIPO DE ÁRIDO %	COEFICIENTE "LOS ANGELES"
SILÍCEO	20-25
GRANÍTICO	23-27
BASÁLTICO	18-22
CALIZO	25-30
DOLOMÍTICO	25-30

En general el árido debe cumplir una serie de características:

- No contener áridos que reaccionen con los álcalis del hormigón.
- Control del contenido de cloruros
- No contener sulfuros oxidables ni compuestos de azufre.
- Tamaño máximo del árido entre 16-40 mm.
- Controlar características del árido: superficie, limpieza, porosidad.

3.6 Adiciones

En general, las normativas recomiendan su uso para mejorar las características del hormigón, incluida la impermeabilidad y por tanto para controlar la velocidad de difusión de los cloruros.

Concretamente en la ACI se afirma que para una relación de agua/cemento establecida, las adiciones de ceniza volante, cementos de escoria de alto horno, humo de sílice o una combinación de estos materiales normalmente aumenta la resistencia del hormigón a la penetración de fluidos y aumenta su durabilidad.

El CE favorece su uso permitiendo construir con espesores de hormigones considerablemente menores que sin ellos. En la siguiente gráfica realizada por el Cedex podemos ver la influencia del uso de adiciones. Se compara la vida útil de un espaldón (XS3+XM3) que cumple todas las exigencias normativas en el caso de utilizar cementos portland y un cemento con adiciones.

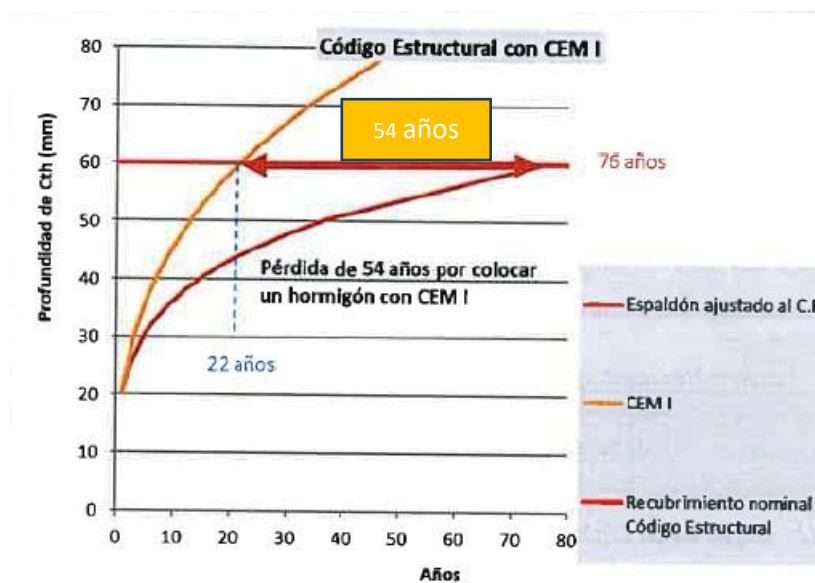


Figura 8. Periodo de iniciación para el espaldón del Código Estructural, con diferentes tipos de cemento. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

El CE recomienda el uso de los siguientes contenidos de adición en los cementos por medio de las recomendaciones sobre el tipo de cemento del Anejo 6 y mediante las limitaciones marcadas en la Tabla 13 para ambiente XS ya que para contenidos menores el espesor de recubrimiento de los elementos aumenta:

- Contenido de adición puzolánica: más del 20 % de ceniza volante y más del 6 % de humo de sílice.
- Contenidos de escoria: más de un 36 % y no menor de un 20 %.
- Cementos CEM IV de adición puzolánica: tipo A (11-35 %) y tipo B (36-55%).

En cuanto a la influencia del empleo de adiciones sobre la capacidad de fijar cloruros del hormigón y basándonos en los resultados experimentales de (Mangat, P.S. y Molloy, B.T, 1995) se ha comprobado que:

- El contenido de cloruros fijados en la zona superficial del hormigón no se afectado por la incorporación de cenizas o escorias. A mayores profundidades, el empleo de cenizas o escorias sustituyendo al cemento supone una reducción del contenido de cloruros fijados.
- La sustitución de cemento por humo de sílice supone una fuerte reducción de la capacidad de fijación de cloruros.
- Para bajas concentraciones de cloruros.

3.7 Aditivos

Con el fin de impermeabilizar el hormigón frente al agua salina y el resto de los agentes, la elección de la mejor tipología de aditivos dependerá fundamentalmente de los condicionantes del proyecto, del lugar de ejecución y de las resistencias iniciales requeridas. Para mejorar las características del hormigón existen diferentes tipos de aditivos:

- **Plastificantes y Superplastificantes:** aumentan la trabajabilidad del hormigón permitiendo reducir la relación agua/cemento manteniendo la fluidez del material y su resistencia. Otras de las ventajas que tiene son disminución de la segregación y la exudación de agua y mayor facilidad de colocación.
Los superplastificantes se emplean una vez la capacidad de los plastificantes ha llegado a su máximo. Son especialmente eficientes en hormigones con consistencia alta o de altas resistencias que implican en ambos casos, contenidos elevados de pasta. Su utilización puede ser necesaria en zonas de difícil acceso para las herramientas de vibrado y en elementos muy armados siendo habitual en cajones portuarios. Se consigue una consistencia más fluida en elementos que no cumplan los valores exigidos en el ensayo del cono de Abrams.

- **Productos inhibidores de la corrosión:** cumplen su función cuando el contenido de cloruros es bajo y el proceso de corrosión no ha comenzado. Siendo así, una forma de retrasar el proceso de corrosión y por tanto de aumentar la durabilidad de la estructura es la utilización de estos productos.

Estos productos son añadidos en el proceso de dosificación de la mezcla, y no impiden el paso de los cloruros o CO₂ en la mezcla, sino que actúan directamente sobre el proceso de corrosión tanto retardando su inicio como reduciendo la velocidad de avance del proceso.

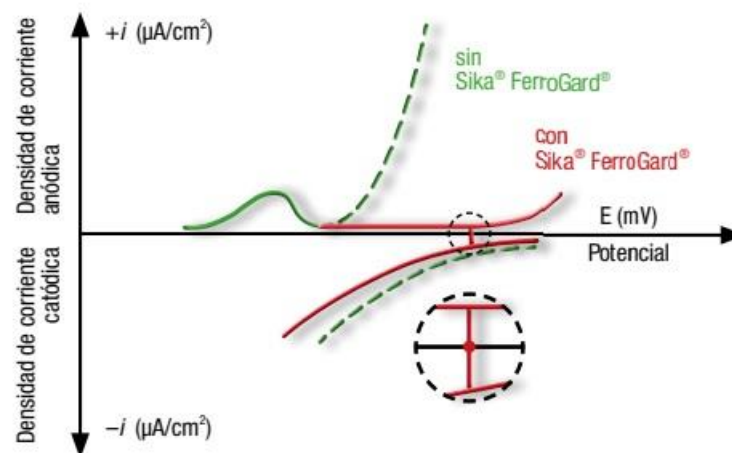


Figura 9. Resultados de ensayos realizado en aditivo tipo inhibidor de la corrosión. (Sika)

Los inhibidores anticorrosivos forman una capa de protección alrededor de las armaduras que las protege consiguiendo reducir de forma considerable la densidad de corriente de y por tanto la velocidad de corrosión del perfil de acero.

Hoy en día los inhibidores principales se basan en soluciones de nitrito de calcio o en aminoésteres.

- **Hidrófobos:** al reaccionar con los iones de calcio del cemento se crea un revestimiento hidrofóbico dentro de los propios poros capilares del hormigón. Se consigue un efecto de bloqueo de los poros proporcionando una protección efectiva hasta los 100 m.c.a.
- **Autocompactantes:** facilitan la instalación y compactación del hormigón. Con un buen curado aseguran un alto grado de compactación en las superficies.
- **Aditivos en polvo:** ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice o puzolanas naturales. Mejoran la cohesión interna y reducen la exudación mejorando la durabilidad del hormigón.

- **Retardantes**: mantienen la trabajabilidad del hormigón retardando su fraguado. Se utiliza especialmente cuando el hormigón está muy expuesto al sol a altas temperaturas. Aumenta la fluidez de la mezcla siendo útil en hormigones bombeados.
- **Acelerantes**: acelera el fraguado del hormigón consiguiendo un endurecimiento rápido de la mezcla. Es de gran utilidad en la construcción de elementos en zonas de exposición a agua subterráneas o del mar. Reduce los tiempos de encofrado.

Existen otros aditivos destinados a elementos que sufren ciclos de hielo-deshielo de forma frecuente (aireantes), para protección contra ambientes susceptibles de ataques químicos como la carbonatación, sulfatos o reacción árido-álcali. También es frecuente el uso de aditivos para conseguir mejores características frente al fuego o la erosión o para alcanzar altas resistencias iniciales o a largo plazo.

3.8 Recubrimientos

En España el espesor de recubrimiento o lo que es lo mismo, la distancia entre las superficies exteriores más próximas del acero y del hormigón se establece en función de la suma del recubrimiento mínimo y del margen de recubrimiento que marca el CE. El recubrimiento mínimo se establece en función de la clase de exposición a la que se exponen los elementos de la estructura, la vida útil del proyecto y la dosificación y composición empleada. El margen de recubrimiento dependerá de la calidad de ejecución que se establece según el proceso de fabricación del elemento. Se deberá calcular sumando los valores correspondientes a las siguientes tablas:

Tabla 13. Recubrimientos mínimos (mm), *cmín*, para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por carbonatación. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Tipo de elemento	Cemento	Vida útil de proyecto (tg) (años)	Clase de exposición		
			XS1	XS2	XS3
Hormigón armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	25	30	45
		100	30	35	50
	CEM II/B-S, B-P	50	30	35	65
		100	35	40	70
	Resto de cementos utilizables	50	40	45	*
		100	65	*	*
Hormigón pretensado	CEM II/A-D o bien CEM I con adición de humo de sílice superior al 6%	50	30	35	50
		100	35	40	65
	Resto de cementos utilizables	50	45	55	*
		100	*	*	*

*Estas situaciones obligan 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.

Los cementos no incorporados en la tabla se ven condicionados para uso ya que se obliga a recubrimientos excesivos que son desaconsejables desde el punto de vista de ejecución dependiendo de la geometría del elemento. Por tanto, para evitar recubrimientos excesivos que dificulten la ejecución es necesario recurrir a la tabla superior.

Tabla 14. Margen de recubrimiento en función del nivel del control de ejecución. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Tipo de elemento	Δc_{dev} (mm)
Elementos prefabricados con nivel intenso de control en la instalación de prefabricación (en obra o ajena a la obra)	0
Elementos ejecutados in situ con nivel intenso de control de ejecución	5
Otros casos	10

Para los elementos de hormigón pretensado se obliga a recubrimientos mayores debido a que la afección de las armaduras causa mayores daños en la estructura.

En las zonas clasificadas con un ambiente XS3+XM3 (erosión/abrasión extrema). El Código Estructural incorpora un cambio importante con respecto a versiones anteriores. Se deberá sumar 15 mm de espesor al recubrimiento obtenido de la suma mostrada anteriormente para XS3 en este caso.

En estructuras donde sea necesario reducir al máximo este recubrimiento y siempre en función de la exposición es habitual el empleo de hormigones especiales que ayuden a reducir el espesor. El Código estructural admite una reducción máxima de 10 mm mediante la utilización de aditivos inhibidores de la corrosión, utilizando refuerzos de acero galvanizado.

En la normativa de puentes AASHTO el recubrimiento total de las estructuras se compone de un recubrimiento mínimo según el tipo de exposición al agua salada y un factor de aplicación directa fundamentado en la relación a/c.

Tabla 15. Recubrimiento mínimo exigible en estructuras de puentes. (ASSHTO)

ZONA DE EXPOSICIÓN	RECUBRIMIENTO MÍNIMO PARA REFUERZOS DE ACERO
Exposición directa al agua salada	10,16 cm
Zona de salpicadura	7,62 cm
Zona atmosférica	5,08 cm
FACTOR DE RECUBRIMIENTO	
Para $a/c \leq 0,40$	0,80
Para $0,40 < a/c \leq 0,50$	1,00
Para $a/c \geq 0,50$	1,20

A diferencia del resto de normativas expuestas la normativa japonesa mantiene el espesor de los recubrimientos en las diferentes zonas mientras se cumpla el resto de las limitaciones.

Tabla 16. Recubrimientos mínimos en normativa japonesa. (Working Group in the Committee for Propagating Japanese Technical Standards Abroad, 2020)

ZONA DE EXPOSICIÓN	RECUBRIMIENTO (mm)
Zona sumergida	70
Zona de carrera de marea	
Zona de salpicadura y atmosférica	
Otras zonas	50

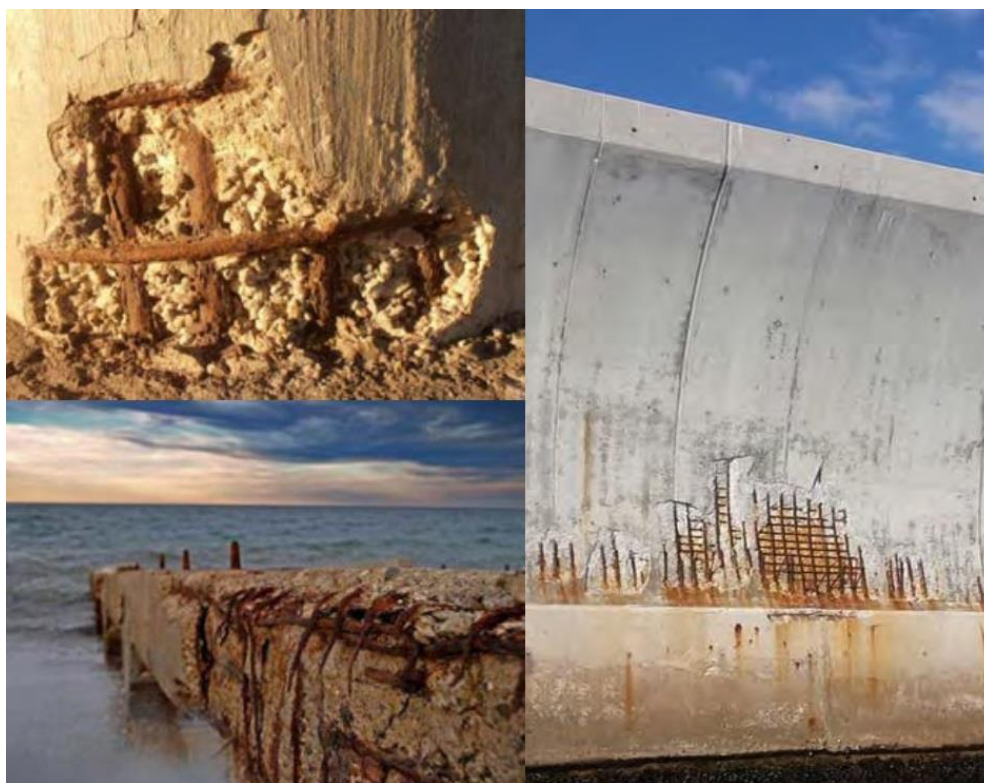


Figura 10. Estructuras en ambiente marino con destrucción del recubrimiento hasta la zona de armadura. (Holcim S.A.)

Con el tiempo se ha podido comprobar que, aumentando el recubrimiento de algunas estructuras construidas en el pasado, se consigue aumentar la protección del hormigón considerablemente frente al deterioro sufrido por el ataque de los cloruros a un coste bajo.

En el pasado, cuando el conocimiento sobre el comportamiento de los procesos corrosivos era menor, normativas como la EHE-91 con las que se diseñaba en la última década del siglo XX. En ella los recubrimientos mínimos exigibles eran menores y con el tiempo se ha comprobado que este pequeño ahorro ha causado grandes costes en actuaciones de mantenimiento o renovación.

Tabla 17. Recubrimientos mínimos exigidos en la EHE-91, en mm. (Ministerio de Fomento, 1991)

Recubrimiento mínimo Atmósfera marina						
Condiciones ambientales de la estructura	Elementos en general			Láminas; piezas con paramentos protegidos; piezas prefabricadas		
fck (kp/cm ²)	fck < 250	250 ≤ fck < 400	fck ≥ 400	fck < 250	250 ≤ fck < 400	fck ≥ 400
	40	35	30	35	30	25

Si comparamos la tabla anterior con los recubrimientos mínimos exigibles en el CE, podemos ver que con la normativa vigente hace 30 años en un ambiente XS3 se podría llegar a recubrimientos de 30 y 25 cm según el tipo de ejecución. En el CE no bajaríamos de 45 cm en este ambiente tan agresivo. Esto se puede traducir en que, ante los ambientes más agresivos, el deterioro de algunos elementos de hormigón armado los procesos de penetración de cloruros son inevitables, siendo la forma más eficaz de retrasar su afección a las armaduras la disposición de un espesor de recubrimiento mayor.

En la actualidad los estudios del CEDEX han demostrado como afecta en la vida útil de los elementos estructurales el no cumplimiento de los espesores mínimos marcados en el CE.

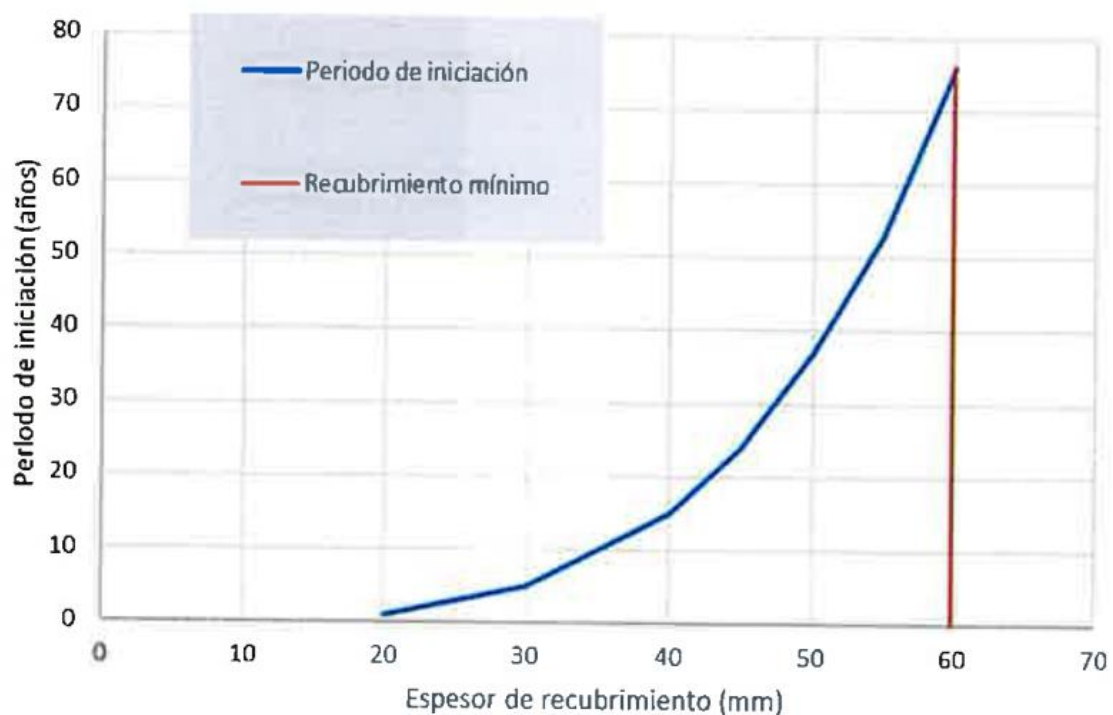


Figura 11. Duración del periodo de iniciación en función del recubrimiento para un hormigón que cumple lo marcado en el CE. (Víctor D. Lanza Fernández & Pilar Alaejos Gutiérrez, CEDEX)

3.9 Protecciones superficiales o revestimientos y pinturas

Otra forma de proteger el hormigón es la utilización de sistemas de protección superficial como pueden ser camisas perdidas que recubren la parte expuesta del pilote, pinturas anticarbonatación, impregnaciones hidrofóbicas u otros recubrimientos de diferentes materiales como pueden ser cerámicos, de PRFV, poliméricos u otros. Estos métodos reducen la entrada de cloruros y CO₂ a la matriz del hormigón.

También existen pinturas y/o capas de pasivación. Se utilizan para reducir la entrada de cloruros y de dióxido de carbono. Pueden aplicarse según dos procedimientos: en la superficie del hormigón o en las barras de la armadura de acero antes de ser embebidas.

Se establece también la necesidad de establecer en el proyecto un plan de mantenimiento, el cual a veces no queda definido en gran parte de los proyectos llevando a procesos de deterioro de los revestimientos, que en su mayoría tienen una vida útil menor que la estructura y al reducir su efecto favorecen los procesos de degradación del hormigón reduciendo la vida útil de estas y obligando en muchos casos a la realización de proyectos de rehabilitación que requieren grandes costes para mantener la vida útil de la estructura.

3.10 Protección catódica

En el artículo 43 del CE se prescriben los sistemas de protección catódica. Esta protección puede ser por ánodos de sacrificio o por corriente impresa. Para la utilización de estos métodos deberá cumplirse lo prescrito en UNE-EN ISO 12696. Estos deben ser monitorizados en el tiempo y contemplados en el mantenimiento de la estructura de forma que su reposición se efectúe en caso de ser necesaria para que su efectividad se prolongue en el tiempo. Cuando se incorporen al diseño sistemas de protección catódica, se podrán reducir los recubrimientos de forma considerable marcados para la clase XS por los de la clase XC4.

3.11 Particularidades de puesta en obra y control de calidad

Para obtener las características requeridas en la mezcla del hormigón, además de un buen diseño es necesaria una buena puesta en obra con el fin último de conseguir un hormigón impermeable. Durante la fase de construcción hay que poner especial cuidado en la buena ejecución de todas las fases que componen la puesta en obra del hormigón. De no hacerlo, pueden transformar un buen

diseño en una estructura defectuosa desde su puesta en servicio. Algunos de estos aspectos pueden ser:

- Prevenir la segregación del hormigón, se deberá poner atención a este factor desde la salida de los camiones en la fábrica hasta su puesta en obra. En relación con este factor, se debe controlar la altura de vertido del hormigón, evitar alturas superiores a 2 m salvo justificación previa.
- Evitar las juntas frías que creen discontinuidades en la estructura no contempladas en la fase de diseño.
- Realizar un buen vibrado del hormigón
- Realizar un buen curado que evite la aparición de fisuras y la retracción del hormigón
- Hormigonado en tongadas de 30-40 cm aproximadamente, asegurando la buena compactación del hormigón.

Compactación

El CE establece las siguientes indicaciones con respecto a la compactación durante la puesta en obra del hormigón.

- No se colocarán en obras capas o tongadas de hormigón cuyo espesor sea superior al que permite una compactación completa de la masa.
- La compactación en obra se realizará mediante procedimientos adecuados a la consistencia de las mezclas y de manera tal que se eliminen los huecos y se obtenga un perfecto cerrado de la masa, sin que llegue a producirse segregación. El proceso de compactación deberá prolongarse hasta que refluya la pasta a la superficie y deje de salir aire.
- Cuando se utilicen vibradores de superficie el espesor de la capa después de compactada no será mayor de 20 centímetros.
- La utilización de vibradores de molde o encofrado deberá ser objeto de estudio, de forma que la vibración que se transmita a través del encofrado sea la adecuada para producir una correcta compactación, evitando la formación de huecos y capas de menor resistencia.
- El revibrado del hormigón deberá ser objeto de aprobación por parte de la dirección de obra.

Proceso de curado y vibrado

Es habitual encontrar daños en estructuras por un mal vibrado y/o curado de la mezcla. En el caso del vibrado, todos los hormigones independientemente de su consistencia necesitan de este proceso, a excepción de los hormigones autocompactantes.

Con un buen proceso de vibrado se obtienen hormigones más densos, resistentes e impermeables, con menor retracción, mayor protección de las armaduras y mayor adherencia a ellas. De lo contrario la mezcla no alcanza la impermeabilidad deseada de forma homogénea y eficaz favoreciendo los ataques de degradación externos.

En el CE se realizan las siguientes indicaciones con respecto al curado del hormigón:

- Durante el fraguado y primer período de endurecimiento del hormigón, deberá asegurarse el mantenimiento de la humedad del mismo mediante un adecuado curado. Éste se prolongará durante el plazo necesario en función del tipo y clase del cemento, de la temperatura y grado de humedad del ambiente.
- El curado podrá realizarse manteniendo húmedas las superficies de los elementos de hormigón, mediante riego directo que no produzca deslavado. El agua empleada en estas operaciones deberá poseer las cualidades exigidas.
- El curado por aportación de humedad podrá sustituirse por la protección de las superficies mediante recubrimientos plásticos, agentes filmógenos u otros tratamientos adecuados, siempre que tales métodos, especialmente en el caso de masas secas, ofrezcan las garantías que se estimen necesarias para lograr, durante el primer período de endurecimiento, la retención de la humedad inicial de la masa, y no contengan sustancias nocivas para el hormigón.
- Si el curado se realiza empleando técnicas especiales (curado al vapor, por ejemplo) se procederá con arreglo a las normas de buena práctica propias de dichas técnicas, previa autorización de la dirección facultativa.

Los valores de difusión de cloruros aumentan si no se realiza un buen curado durante al menos 28 días. Esto se estudió en un hormigón enterrado en zona costera y se obtuvieron los siguientes valores

Tabla 18. Efecto del curado sobre la difusión de cloruros. (Miguel Ángel Bermúdez Odriozola, 2007)

Tiempo de curado (días)	D ($\times 10^{10}$ cm ² /s)
1	2,39
3	2,25
14	2,15
28	0,07

Mediante varios estudios experimentales se ha demostrado que la influencia que tiene el curado con agua de mar en la profundidad de penetración de los cloruros solo tiene influencia en los primeros 28 días no afectando a la impermeabilidad a largo plazo.

Hormigonado bajo el agua

El hormigonado bajo el agua no presenta más problema que el de lavado de la pasta de cemento o de mortero que puede ocasionar el agua en movimiento

El transporte debe realizarse en tubos que se elevan a medida que sube el nivel del hormigón y permaneciendo siempre introducidos en la masa de este, con el fin de que no se produzca una caída libre que favorezca la segregación.

Control de espesor de los recubrimientos

El artículo 66 del CE indica una serie de comprobaciones mínimas que la asistencia técnica de la obra deberá comprobar en la fase de construcción para asegurar la buena ejecución del montaje del armado, siendo estas:

- Separadores (material, tamaño, cantidad y distribución).
- Recubrimientos (mínimos y máximos).
- Tolerancias.
- Estado de oxidación de la armadura pasiva, asegurando el cumplimiento de las limitaciones establecidas en el apartado 49.8.1 para que no se produzca pérdida de propiedades de las armaduras.
- Estado de limpieza y eliminación de suciedades.
- Aseguramiento de los recubrimientos.

La importancia de cumplir las exigencias de recubrimiento marcadas en la normativa en relación a la penetración de cloruros en los refuerzos y por tanto en la durabilidad de las estructuras se pone de manifiesto en Figura 11

Para dar validación a las limitaciones establecidas en cada normativa, en la fase de construcción deben realizarse una serie de comprobaciones. Por ejemplo, en la normativa americana para validar la relación agua/cemento se utiliza un método normalizado a partir de ensayos de resistencia basados en un rango de valores congruentes, esto se debe a la dificultad de verificar mediante ensayos en obra la relación a/c.

3.12 Otras recomendaciones generales

Como recomendaciones generales para la elección de las características de la mezcla de hormigón armado se pueden adoptar las siguientes:

- En zonas donde se pueda esperar una degradación superficial del hormigón, se recomienda una resistencia mínima a compresión ($f_{ck} \geq 42 \text{ N/mm}^2$).
- Se recomienda que para ambientes marinos muy agresivos se debe estudiar la dosificación del hormigón de forma muy detallada en la fase de proyecto, ya que, de forma orientativa, puede exigir relaciones agua/cemento $\leq 0,35$ y cantidades de cemento $\geq 400 \text{ kg/m}^3$.
- En un ambiente muy agresivo se debe estudiar de forma paralela al resto de parámetros anteriores la necesidad de utilizar reductores de agua de alta actividad.
- Se necesita una fabricación y puesta en obra muy cuidada.

4 ARMADURAS FRP

4.1 Introducción

En los últimos años se ha producido un aumento en el uso de materiales que pueden sustituir al acero como refuerzo en el hormigón permitiendo nuevas formas de dosificar y dimensionar los elementos estructurales. Los diseños realizados con acero inoxidable no son objeto de este trabajo.

El más destacado por su buen comportamiento en relación con la durabilidad de los elementos reforzados en obra marítima son las fibras reforzadas con polímeros conocidas como FRP. Su principal cualidad es que son inoxidables.

En general los FRP pueden encontrarse en diferentes tipologías según su geométrica destacándose las barras y las fibras para su uso como refuerzo estructural. El trabajo se centrará en el estudio de refuerzos tipo barra, dejando las fibras para estudios con geometrías más favorables como son los cajones portuarios.

Las barras y/o fibras realizadas con materiales FRP aplicadas en refuerzo de estructuras de hormigón se llevan comercializando de forma amplia desde la última década del siglo XX y desarrollando varias décadas antes.

La primera normativa que introdujo las guías de diseño para la construcción de estructuras reforzadas con FRP fue la japonesa en 1996.

Desde su aparición los refuerzos FRP han destacado debido a que el refuerzo no sufre procesos de corrosión. En consecuencia, una de las aplicaciones que más potencial tiene y según las diferentes normativas y fabricantes es la estructura situada en ambiente marino donde los procesos corrosivos son el mayor agente de degradación como hemos visto con anterioridad.

La utilización de fibras como refuerzo estructural está teniendo un gran auge en el ámbito de los cajones portuarios. Permitiendo aligerar las estructuras y facilitando la puesta en obra y reduciendo la duración de las obras de forma considerable.

El empleo de materiales compuestos alternativos al acero son una forma de evitar la corrosión del acero. Siendo la forma más habitual hasta ahora la protección del hormigón armado con barras de

acero, pero aun así se acaban produciendo procesos de corrosión en las estructuras expuestas al ambiente marino.

4.2 Barras FRP: Características generales de las armaduras

Las barras se componen de fibras continuas como el vidrio y de resinas poliméricas como el vinilester siendo estos dos ejemplos los más utilizados hoy en día. Para conseguir la adherencia necesaria se le suele dar un acabado superficial mediante deformaciones, revestimientos de arena o sobreposición de elementos.

Se caracterizan por soportar grandes tracciones en la dirección de la fibra que se reducen de forma notable en la dirección transversal. Siendo un factor importante las direcciones que se consideren. Ofrecen una respuesta elástica hasta el fallo y un bajo módulo de elasticidad en comparación con el acero.

En cuanto a su puesta en obra, tienen la limitación de no poder doblarse, necesitando una fabricación exprofeso para estos elementos que presentan menor resistencia que los elementos curvos. También deben tomarse medidas para evitar su exposición a altas temperaturas y los rayos ultravioletas para evitar su degradación.

No obstante, tienen una serie de ventajas que lo convierten en una alternativa interesante según el tipo de estructura en ambiente marino. Las estructuras realizadas con barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra no sufren el proceso de corrosión de los aceros, tienen mayor facilidad de demolición y reciclaje y se caracterizan una densidad muy baja que facilita su transporte y manipulación con respecto al acero. Otra ventaja destacable que tienen es que permite reducir el espesor de los recubrimientos.

Su gran deformabilidad y por tanto la anchura de las fisuras puede ser el principal condicionante de diseño. Figura 12.

4.3 Barras de polímeros reforzadas con fibras de vidrio

Las barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio o barras PRFV se llevan utilizando en EE. UU. como sustituto de las barras de acero desde hace más de 30 años. En este tiempo se han podido comprobar sus características como refuerzo en el hormigón en diferentes proyectos en ambiente de exposición alta a los cloruros.

Existen distintos tipos de refuerzos con barras de PRFV, pudiendo componerse de diferentes resinas como vinilester, epoxi y otros. La durabilidad de la estructura variará según el tipo de aplicación. Esto muestra la necesidad para el proyectista de disponer de las especificaciones y requerimientos sobre que barras y resinas deben incorporarse a los elementos de hormigón en las diferentes situaciones. Este conjunto barra-resina será el que de la resistencia real del refuerzo.

Para asegurar el buen comportamiento del hormigón final se debe acudir a los estándares existentes y realizar las pruebas y ensayos correspondientes a este tipo de material a diferencia del acero. En el caso de las fibras de vidrio y basalto, según los estándares americanos debe seguirse la ASTM D7957 y la ASTM 8505 que establecen los requisitos mínimos de cualificación y control de calidad para las barras de fibras reforzadas con polímeros de vidrio y basalto.

El código ACI 440 establece los mecanismos de cálculo para este tipo de refuerzos en el hormigón. Por ejemplo, se diferencia entre el fallo a flexión con tracción controlada donde el refuerzo se rompe antes que el hormigón y con compresión controlada donde ocurre de forma inversa.

Las barras de fibra de vidrio resisten altas tracciones solo en la dirección de las fibras, afectando a la resistencia al corte y a su adherencia con respecto al acero. La ACI tiene sus propias ecuaciones de cálculo al corte y de longitud de las barras.

Un condicionante fundamental en el diseño de elementos con barras con fibra de vidrio es su menor rigidez y módulo elástico será la deformación y el control de grietas.

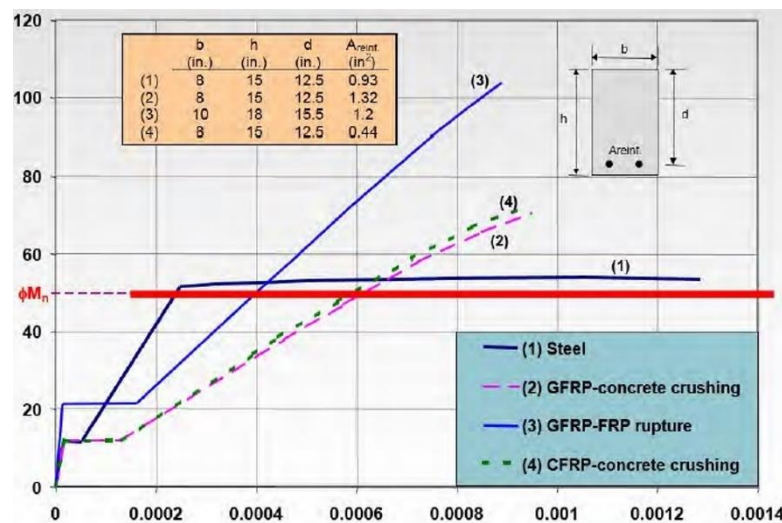


Figura 12. Deformaciones en diferentes tipos de refuerzos en ensayo a tracción. (Brown et al., 2023)

Como muestra la figura superior en un ensayo sobre vigas armadas con acero y fibras de vidrio y la que facilita un fabricante homologado para un tipo de barra, se comprueba como las estructuras construidas con fibra de vidrio tienen mayores deformaciones en consecuencia con su módulo elástico para alcanzar las mismas resistencias que el acero. En cambio, para llegar a romper y debido a su comportamiento lineo-elástico para alcanzar la rotura tiene el doble de capacidad nominal exigida dando mayor factor de seguridad a la estructura. En consecuencia, las deflexiones y los anchos de grieta registrarán muchos diseños en este tipo de barras.

En cuanto a su resistencia, a compresión la sección de fibra de vidrio se considera como parte del hormigón a efectos de cálculo y por tanto solo resiste como armadura de tracción.

En cuanto a la comercialización de las barras estas tienen el mismo estándar de fabricación que las barras de acero en la mayoría de los fabricantes facilitando su comparación con el acero e implementación posterior en los proyectos. La longitud típica de las barras es de 6-12 m siendo similar a las del acero.

Si atendemos al tipo de acabado superficial que se da a las barras pueden ser:

- Envuelto helicoidalmente.
- Acanalado.
- Recubierto de arena.
- Ranurado helicoidalmente.

El tipo de acabado dependerá del fabricante principalmente.

4.4 Factores principales en proyectos con refuerzos FRP

4.4.1 Fase de diseño

1. Falta de normativa de aplicación

El acero al carbono como refuerzo en el hormigón lleva utilizándose en diferentes tipologías hasta llegar a las barras corrugadas. En la actualidad, es la elección más recurrente en la mayoría de los proyectos en obra marítima desde los años 70 hasta nuestros días.

Anteriormente se comprobado como los refuerzos FRP y más concretamente los realizados con fibra de vidrio llevan varias décadas incorporándose a los proyectos al mismo tiempo que se publican códigos y guías de diseño.

El desarrollo del Código ACI, en sinergia con los fabricantes, publicó su primer Código de diseño en el año 2008. Mientras en Europa, se aprobará durante el 2024 el Anexo R que dará las herramientas de cálculo necesarias para el cálculo de elementos estructurales con refuerzos FRP. Siendo así, cada código recoge sus limitaciones del material. En esta línea cada normativa recoge sus valores de cálculo en cuanto al módulo elástico del material. Por su parte existen fabricantes que aseguran resistencias que alcanzan valores de más del doble del valor recogido en las normativas.

Las diferentes normativas se asemejan en la manera de considerar los principios básicos que ofrecen las propiedades de los refuerzos con FRP, sin embargo, en cada uno de ellos se aplican de forma diferente según el tipo de estructura o las acciones en cada caso.

(Gold, 2023) analizó las normativas americana, canadiense y europea exponiendo sus variaciones en la forma de aplicación.

En su análisis pone de manifiesto como las diferentes formas de aplicación de las propiedades en cada normativa del material lleva a diferencias significativas en el dimensionamiento final de los elementos según el código utilizado.

2. Falta de experiencia: durabilidad y medioambiente

Un factor de diseño de gran importancia es la aplicación a efectos de cálculos de diseño de las reducciones de resistencia que sufre el material. En la ACI se aplica un coeficiente medioambiental de reducción de valor 0,85. La experiencia adquirida en los diferentes proyectos del pasado ha demostrado que este coeficiente no es necesario ya que no son realistas sino muy conservadores. Los estudios llevados a cabo por entidades como la AASHTO sobre durabilidad en puentes demuestran como este coeficiente es eliminable mejorando su competitividad como solución constructiva. Con el tiempo y las nuevas experiencias que se adquieren se podrán eliminar ciertas “barreras de desconfianza” existentes.

En el Anexo R, se consideran dos factores. Se aplicará un factor 0,80 para elementos estructurales expuestos al calor de la luz solar. El segundo factor de seguridad medioambiental se aplicará con valor 0,70. Permite ajustarse mediante ensayos según la ISO 104060-1.

La normativa canadiense no utiliza estos factores. Sin embargo, establece unas reducciones de resistencia bajo ciertas condiciones de envejecimiento acelerado.

Tanto en la ACI como en el Eurocódigo estos factores se aplican en la resistencia inicial a tracción. Esto es un limitante importante en competitividad y por tanto utilización.

3. Curvatura de las barras

Una de las principales limitaciones de las barras es su curvatura. En este ámbito los fabricantes se remiten a las normativas existentes para el cálculo de la reducción de resistencia, asegurando fabricar las piezas con las mismas curvaturas que en el acero a excepción de las Z en la actualidad con este tipo de fibras.

El proceso de doblado no puede realizarse en obra por lo que los armados deberán diseñarse con estos criterios con diferencias con respecto al acero.

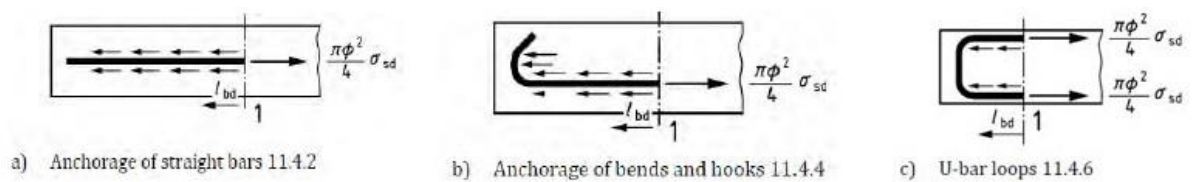


Figura 13. Tipos de anclaje y curvatura en armaduras de PRFV. (Brown et al., 2023)

Por ejemplo, la CSA limita la resistencia de estos elementos curvos a un 45%, siendo un 40 % lo más habitual.

Existen fabricantes de barras de PRFV que aseguran al menos un 75 % de resistencia en las zonas curvas del elemento. En estos casos el radio de la barra se limita a $2,50 \phi$. En general y a día de hoy, el dimensionamiento óptimo de la geometría de los armados deberá hacerse bajo las especificaciones de los fabricantes.

4. Ancho de fisura

En la siguiente tabla se resumen las limitaciones establecidas al ancho de fisura en elementos estructurales con refuerzos de fibra de vidrio:

ACI 440.11	CSA S 806		EC2 AN.R
0,71 mm	INTERIOR	EXTERIOR	0,40 mm
	0,60 mm	0,50 mm	

En general, si se quieren evitar armados excesivos al diseñar con PRFV se debe diseñar con anchos de fisuras mayores que en el acero. Esto se puede hacer ya que los procesos corrosivos que afectan a la durabilidad de las armaduras de acero no lo hacen así con los FRP. No obstante, deberá estudiarse cada caso de forma específica.

5. Diseño bajo acción de sismo

La ACI limita su uso a elementos estructurales con bajo riesgo de daño sísmico o a elementos con riesgo medio, pero no forman parte de la resistencia bajo esta acción. En el caso de riesgo mayor se limita su uso.

Por ejemplo, en condiciones sísmicas las fibras de vidrio y basalto tienen un mal comportamiento ya que está comprobado que no se forman rótulas plásticas en los elementos estructurales. Siendo así, la ACI no establece restricciones para su empleo, aunque si restringe su uso en zonas de riesgo sísmico adoptando tipologías que independizan de las fuerzas sísmicas en caso de no poder soportar por la estructura de otro modo.

La normativa canadiense tiene sus propias especificaciones de cálculo bajo este tipo de acción. También incorpora las especificaciones para estructuras realizadas con refuerzos mixtos FRP-acero.

El Eurocódigo no cubre el cálculo de diseño bajo este tipo de acción siendo un factor que pueda limitar su uso.

6. Resistencia a compresión del refuerzo

La CSA 806 y el EC2 Anexo R aplican la contribución de las barras en la resistencia a compresión de la misma forma ignorando su aportación resistente. A efectos de cálculo en la ACI 440.11 el área de la barra resistente se considera como parte del hormigón que lo embebe.

7. Ruptura por fluencia

Los materiales plásticos bajo carga sostenida en el tiempo tienden a deformarse, siendo mucho mayores a altas temperaturas. Las tres normas expuestas en la Tabla 19 consideran la importancia de limitar las cargas sostenidas, especialmente en PRFV.

La ACI y la norma canadiense difieren con el EC2 en la forma de tratar este fenómeno. En la siguiente tabla se muestran estas diferencias:

Tabla 19. Limitación de resistencia a ELS respecto a resistencia a la tracción máxima en ELU. (Elaboración propia)

	ACI 440,11	CSA S 806	EC2 AN. R
Vidrio	20%	25%	35%
Carbón	-	65%	80%
Aramida	-	35%	-
Ajuste	No	No	ISO 1406-1

Tanto en la ACI como en la CSA establecen este límite en condiciones de ELS. En cambio, el EC2 es mucho más conservador y aplica este coeficiente antes de ningún otro cálculo limitando así el diseño competitivo de estas soluciones.

Respecto al comportamiento de los distintos tipos de refuerzos, el vidrio es el que peor comportamiento tiene bajo carga sostenida y así lo reflejan las normativas.

Tal y como muestra el gráfico inferior esta forma de cálculo limita mucho uso mediante aplicación del Anexo R del EC2.

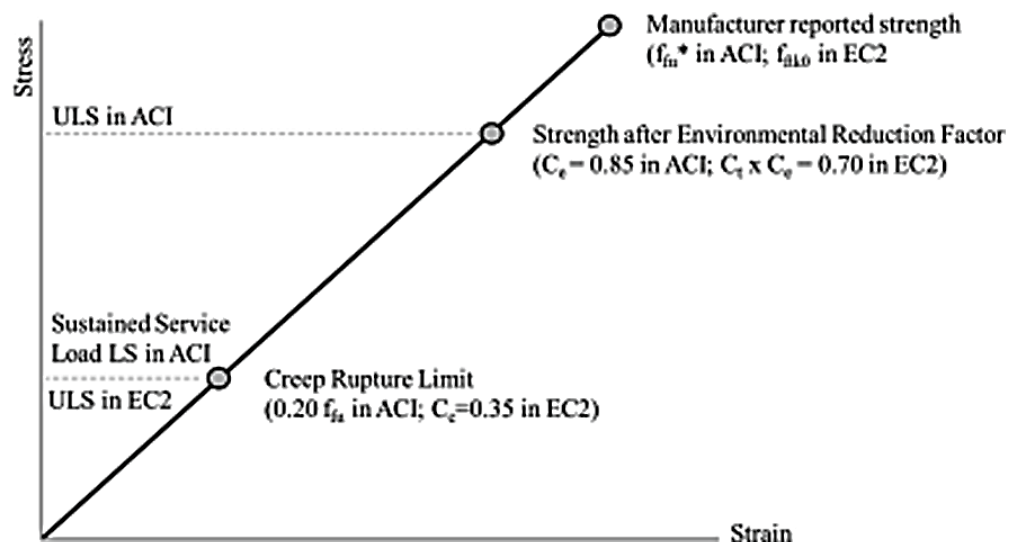


Figura 14. Gráfica de variación de límites ambientales impuestos por ACI 440.11 y EC2 Anexo R en la resistencia a tracción de las barras FRP (rectas) al aire libre. (Gold, 2023)

En la normativa canadiense a diferencia de las otras revisadas se valida mediante ensayo este fenómeno.

8. Nuevas dosificaciones

Permite diseñar con nuevos productos y reducir la huella de carbono de las mezclas reduciendo algunos de sus componentes como el Clinker. Siendo así los refuerzos con fibras permiten una amplia variedad de cementos y hormigones con menor huella de carbono que los utilizados habitualmente en obra marítima.

Existe un ahorro en adiciones y aditivos incorporados al hormigón para protegerlo del ataque de los cloruros que encarecen la mezcla final y aumentan su huella.

La modificación de criterio en factores como: la selección del árido, el tipo de cemento, aditivos y la unión entre la mezcla y el árido y la edad del hormigón son factores muy sensibles a la definición de las propiedades de la mezcla final y la calidad del control ejercido en obra.

Se está estudiando las posibles diferencias que podrían tener importancia estructural entre los valores esperados en fase de diseño y la deformación final. El origen de este fallo provendría de un cálculo erróneo del módulo elástico de la mezcla final. Esto podría llevar a fallos del tipo mala toma de mediciones y más cálculos de importancia como sería bajo carga sostenida o vibración.

9. Durabilidad

Los refuerzos FRP en obra marítima tienen la cualidad de que son inoxidables. Ya hemos visto como el principal problema de degradación y causa de actuaciones de mantenimiento en las estructuras marítimas en refuerzos de acero es la oxidación de las barras. Por tanto, con los medios necesarios por medio de las normativas los proyectistas podrán diseñar estructuras a 100-150 años con este tipo de refuerzos con actuaciones de mantenimiento mínimas.

En los estudios realizados por la ACI se afirma que la vida útil de las estructuras de acero se puede reproducir en el doble de durabilidad en las estructuras realizadas en fibras. Permitiendo en estructuras de EE. UU. alcanzar los 100 años de durabilidad según las bases de proyecto buscando ya el horizonte de los 150.

Este factor puede compensar la falta de experiencia que encarece el producto en la actualidad y lo eliminaría en gran parte de los proyectos donde es competitivo.

No obstante, cuando se analiza el coste económico, medioambiental y social de una estructura a lo largo de toda su vida útil, la mayor vida útil con menor mantenimiento lo convierte en la mejor solución tal y como se está empezando a asentar para espaldones de diques gracias al buen hacer del Cedex y otras instituciones. En cambio, el coste inicial de la construcción inicial suele ser mayor. Por tanto, un análisis realista debe comprender todas las fases del proyecto durante toda su vida útil.

4.4.2 Fase de ejecución

Durante esta fase se deben asegurar que no se daña la calidad del producto antes de su puesta en obra. Los refuerzos están diseñados para resistir embebidos en el hormigón, por tanto, en caso de que vayan a sufrir una exposición elevada a los rayos UV deberán ser protegidos con inhibidores.

De lo contrario, sus cualidades resistentes podrán verse reducidas considerablemente. En caso de ser almacenado en obra, deberá hacerse en una zona limpia y cubierta de la luz directa del sol acondicionado para ello.

Al igual que cuando se colocan las armaduras de acero, el armado debe colocarse en la posición precisa y sujetarse firmemente antes de verter el hormigón.

En caso de muescas, ralladuras y cortes los que superen el 5 % de la profundidad de la sección. se deberá reemplazar la barra o utilizar empalmes de solape en cada lado de la zona dañada.

Debido a las características inherentes de las barras de refuerzo de PRFV, no es posible doblarlas en obra. Todas las barras curvas se fabrican en taller y se entregan según especificaciones exactas. Se pueden producir diversas formas de curvatura a medida.

En la valoración económica de las estructuras construidas con fibras frente al acero debe considerarse la facilidad de manipulación en la elaboración de las armaduras y transporte con la consecuente reducción de los tiempos de construcción que repercuten positivamente en coste final de la estructura. Otros factores a tener en cuenta son el ahorro de agua y materiales, pero principalmente el aumento en la vida útil de la estructura.

Los recubrimientos se reducen enormemente con respecto al empleo de acero pueden ser un problema para su correcta ejecución en obra que, en el caso de los elementos prefabricados, con un intenso control de ejecución y con buenos áridos se puede llegar a recubrimientos de 10 mm que reducen enormemente los medios de transporte y colocación en obra.

4.5 Aplicación en ambiente marino en España

El empleo de estos materiales en los proyectos en ambiente marino implicará distintas consideraciones típicas de las estructuras como resistencia a tracción, flexión y cortante. Presentan distintas cuantías de armaduras y requieren diferentes consideraciones derivadas de la no

necesidad de proteger el acero frente a la corrosión. Esta última consideración permite nuevas adiciones, nuevos aditivos en los cementos, recubrimientos menores o mayor anchura de fisura.

El empleo de este tipo de refuerzos empezó en los años 90 en Japón y su uso fue extendiendo por el mundo destacando a EE. UU. y Canadá como los países que más han recurrido a este tipo de solución. Inicialmente su uso en estos países era el refuerzo de tableros de puentes expuestos a ciclos de hielo-deshielo o afectados por sales fundentes, condiciones agresivas para el acero como el ambiente marino.

En España existen pocos casos en el que se han utilizado, podemos encontrar algunos casos de rehabilitación como los espaldones de Escombreras y Barcelona La mayoría de estos proyectos tienen un carácter de rehabilitación de la estructura causado por procesos de corrosión.

En España, si solo atendemos al material que sustituye al acero, se han encontrado los siguientes casos de interés para nuestro trabajo:

Recrecio del espaldón de Escombreras (APC)

En fase de proyecto, se estudiaron soluciones de hormigón con acero, PRFV y mixta (acero y PRFV). Para el dimensionamiento de los refuerzos de fibras se aplicó la normativa italiana publicada en 2006 "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymers Bars".

El proyecto inicial de ampliación del dique suroeste (2000-2005) se componía de cajones de hormigón armado en un área de 28 m de profundidad con un espaldón entre las cotas +4-8 m. Antes de la ejecución del proyecto de rehabilitación y durante el tiempo que estuvo en servicio su acceso estaba restringido por problemas de rebase causados por el bajo frente al dique que amplificaba el oleaje.



Figura 15. Zona de actuación del proyecto de rehabilitación del espaldón en el Puerto de Escombreras. (GoogleEarth)

En consecuencia, surgió este proyecto ejecutado en 2018. Se decide crecer el espaldón en una altura de 2 metros a lo largo de 400 m. También se analizaron los problemas de corrosión sufrida durante su vida en servicio.

El Cedex por medio de la APC llevo a cabo el estudio del proyecto y para su diseño se plantearon cinco alternativas diferentes en las que se proponían diferentes geometrías con hormigón armado con tratamiento de inhibición a la corrosión, tipología de hormigón en masa e incluso soluciones con voladura sin recrecido.

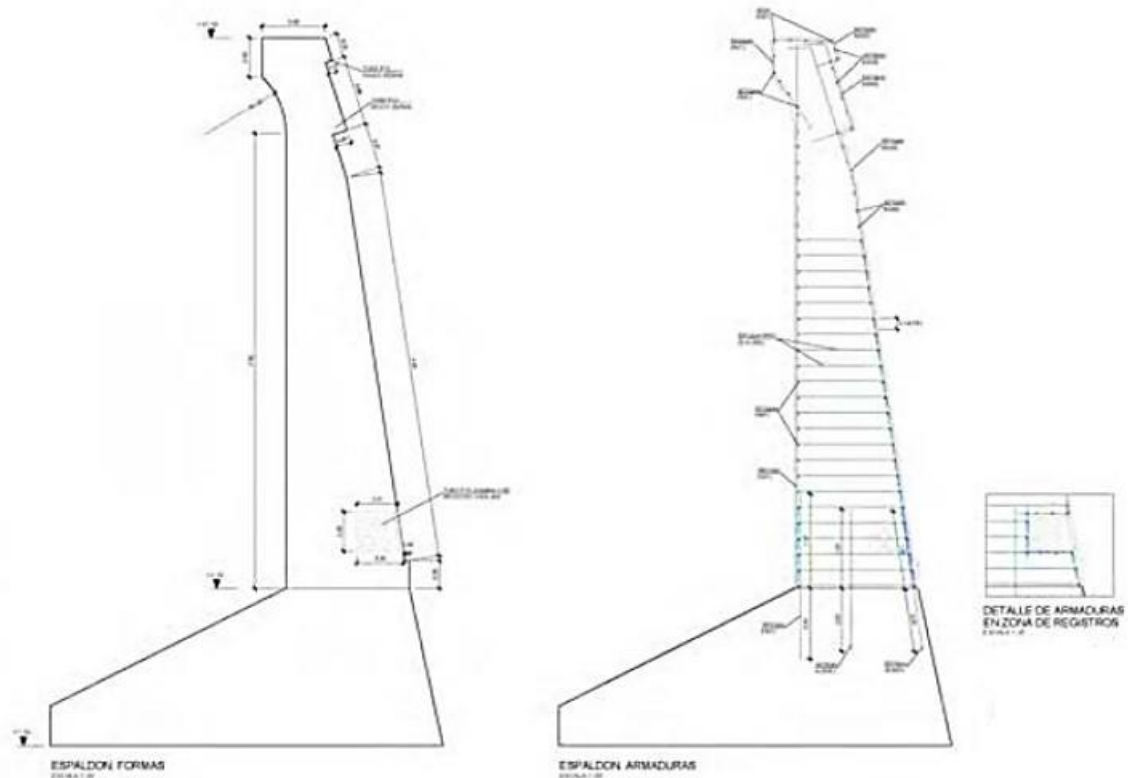


Figura 16. Sección de la solución adoptada mixta Acero/PRFV. (Autoridad Portuaria de Cartagena. APC)

La geometría seleccionada era la correspondiente a la única alternativa que planteaba dos opciones con la misma geometría, una de ella con refuerzos de acero (opción A) y otra con refuerzos de PRFV (opción B). Se optó finalmente por una solución mixta compuesta por barras de fibra de vidrio en sustitución del acero en el lado mar manteniendo una solución tradicional en con refuerzos de acero en el lado tierra.

Tabla 20. Cantidades de armado consideradas en la solución tipo 3. (Autoridad Portuaria de Cartagena.APC)

ELEMENTO	MATERIAL	UNIDAD	ALTERNATIVA 3A (Acero)	ALTERNATIVA 3B (PRFV)	ALTERNATIVA MIXTA
Superestructura	*Hormigón HA 35/20/B/IIIc+Qb+E	m ³	2.988	3.108	2.960
Armadura superestructura	Acero B-500-S	Kg	194.220	0	57.613
Conexión del espaldón nuevo con el existente	Acero B-500-S	Ud.	6000		2.800
Elaborado y colocado armados	PRFV	Kg		93.240	65.121
Conexión del espaldón nuevo con el existente	PRFV Ø20	Ud.		2.400	3.600
Conexión del espaldón nuevo con el existente	PRFV Ø25	Ud.		6.000	
Cuantía de acero		kg/m ³	65		19,5
Cuantía de PRFV		kg/m ³		30	22

* HA 35/20/B/IIIc+Qb+E denominado en el CE como HA 35/20/ XS3+XA2+XM3

Se ejecuto con hormigón H35 con un armado de 9Ø32 pml con cercos de 5Ø20 pml con un espesor de los recubrimientos de 5 cm. Esta solución incremento el coste de construcción en 4 % con respecto a la misma solución con refuerzos de acero en su totalidad.

Se llevo a cabo el análisis de su comportamiento en un ciclo de vida útil de 100 años, sin considerar actuaciones de mantenimiento. También se estudió la necesidad de mantenimiento de forma independiente. Los refuerzos FRP dieron mejores resultados en estos estudios.



Figura 17. Detalle de armados con solución mixta acero-PRFV en puerto de Escombreras. (Autoridad Portuaria de Cartagena. APC)

Se concluyo que para este tipo de estructuras los armados con material PRFV son la solución óptima en términos de ciclo de Vida útil. Además, desde el Cedex se identifica un camino de mejora a través de modificaciones en el cemento, áridos y el resto de los componentes.

Rehabilitación del espaldón de la bocana Norte del Port de Barcelona (APB)

Actualmente se están desarrollando las obras en este 2024, en las que se rehabilitara la totalidad del muro que compone el espaldón de la bocana norte empleando como armaduras barras de PRFV como consecuencia de los daños causados por el clima en la estructura.

En 2009 ya se realizó un proyecto de refuerzo y reparación de superficies en el espaldón de hormigón armado por problemas de corrosión de las armaduras.

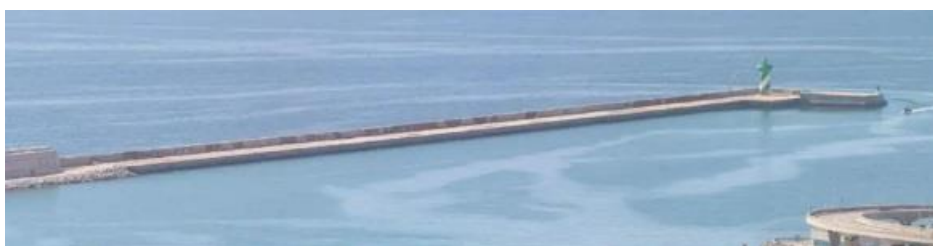


Figura 18. Zona de actuación del proyecto de rehabilitación del espaldón de la bocana Norte de Port de Barcelona.

(Cedex)

Debido a la escasa experiencia en España, el CEDEX considera este proyecto como una experiencia real piloto en la que aprender del comportamiento tanto a corto como a largo plazo de este tipo de armaduras. Para con ello aprender sobre las características y propiedades que confiere al hormigón con respecto al armado tradicional.

En la imagen inferior se muestra la sección tipo de la solución final. Las zonas en amarillo muestran las zonas donde se recrece o repara (eliminación) el hormigón armado. Se pueden apreciar a simple vista la similitud entre las geometrías de armado entre diferentes tipos de refuerzo.

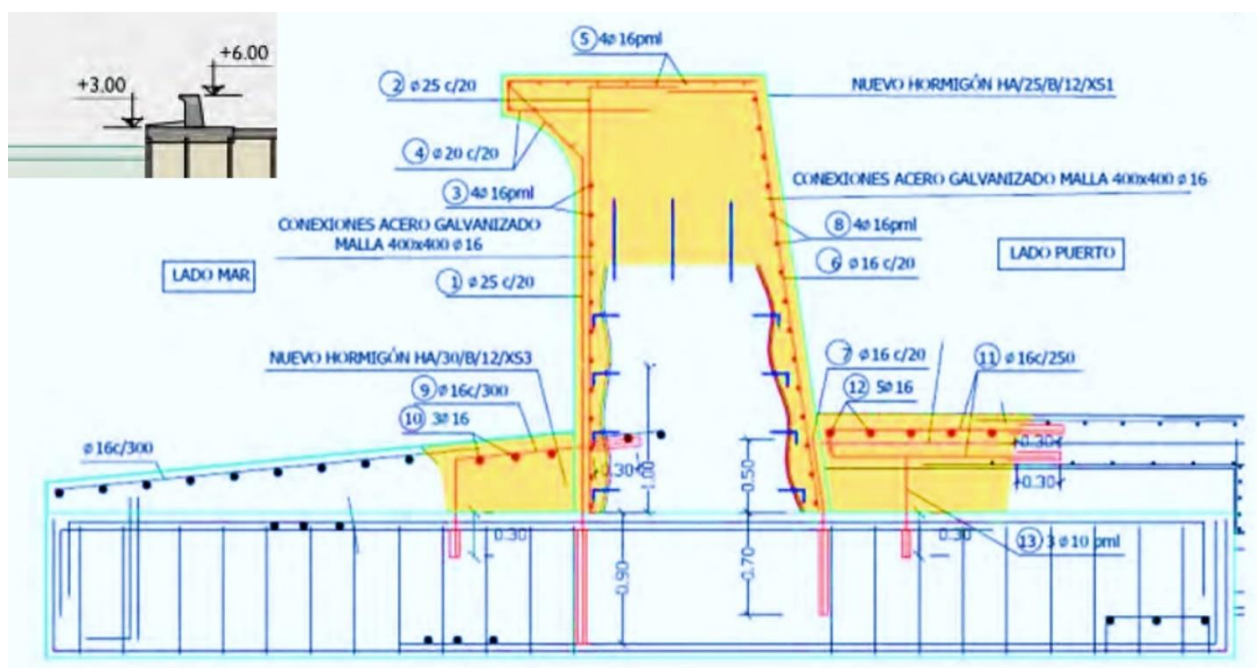


Figura 19. Detalle de armado del espaldón. (Cedex)

La actuación afectará a los 500 m de espaldón ubicados sobre 15 cajones de hormigón armado en la que se realizarán las siguientes actuaciones:

- Demolición y reconstrucción de los 130 cm superiores del espaldón. (zonas del espaldón coloreadas en amarillo en el detalle de armaduras de la siguiente imagen).
- Saneamiento de superficies en profundidad de 20 cm.
- Retirada de armaduras de acero y sustitución por barras de PRFV con ϕ 16, 20 y 25 mm. En total se colocarán 38.864,68 kg de PRFV con $E=60$ Mpa.
- Reconstitución de superficies con H-30 en el cuerpo del espaldón y H-35 en la losa al pie del espaldón.

- Recubrimientos de 5 cm

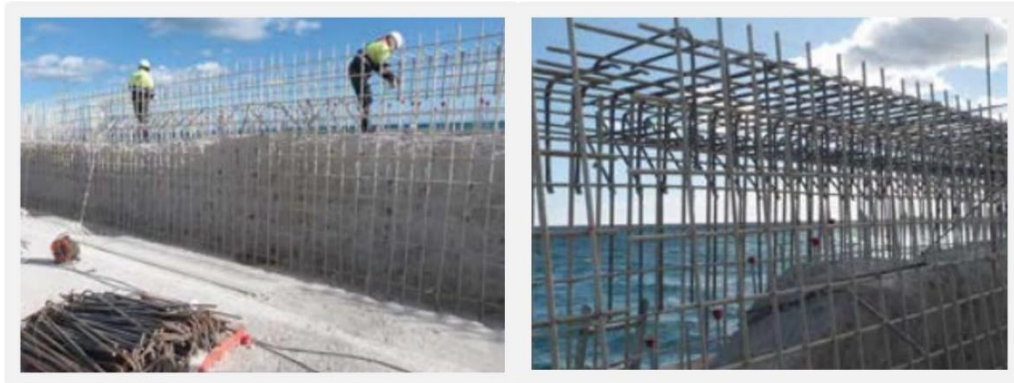


Figura 20. Imágenes de la puesta en obra del espaldón. (Cedex).

Durante la elaboración del proyecto constructivo y el inicio de las obras, la dirección de obra destacó las ventajas de puesta en obra de los FRP que permiten reducir costes y medios en zonas de operación portuaria. En cuanto a problemas para la puesta en obra se destacó la falta de laboratorios homologados y la falta de conocimiento, especialmente en el doblado de las armaduras FRP.

En este proyecto el Cedex tiene dos objetivos en su hoja de ruta del proyecto. El primero de ellos es la identificación de singularidades durante la fase de ejecución (control de calidad y ejecución) y diseño de la obra (normativa de aplicación y características exigibles a los materiales) que permita la elaboración de un documento de recomendaciones para obras futuras.

El segundo objetivo que se marca es el análisis y evaluación mediante ensayos experimentales de las capacidades resistentes a esfuerzos de tracción, cortante y flexión de las armaduras. El objetivo final de este estudio experimental será fijar un control de calidad claro que sirva de guía durante la ejecución de los proyectos. Como en el hormigón armado, deberá fijarse el tipo y número de ensayos necesarios en cada caso que aseguren las características resistentes proyectadas. Se evaluará también la posible pérdida de capacidad resistente del material a largo plazo, debida a su exposición al ambiente alcalino del hormigón.

Pasarela de acceso al faro de Cudillero

El proyecto comprendía la ejecución de una pasarela de 60 m de luz localizada en un acantilado con un ambiente clasificado como XS1. Inicialmente durante la fase de proyecto no se consideraba la utilización de este tipo de refuerzos, pero los condicionantes del proyecto en cuanto a coste y accesibilidad y la necesidad de mantenimiento nulo durante 50 años favorecieron la incorporación de refuerzos de PRFV en el tablero. ´

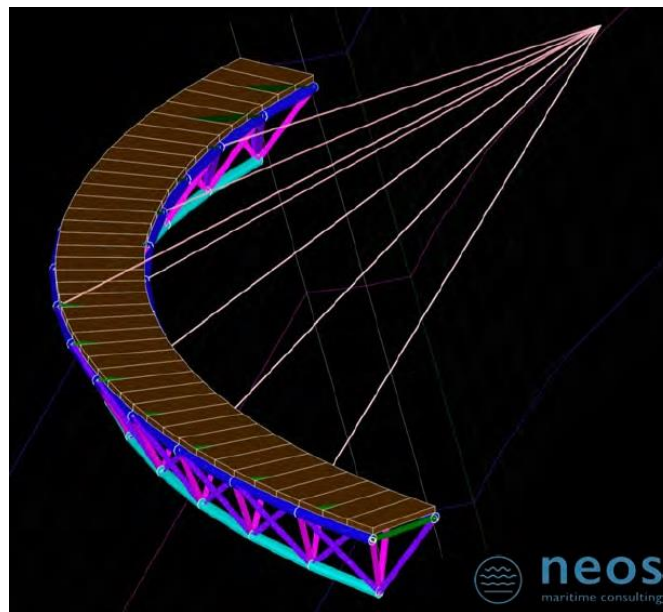


Figura 21. Modelo de elementos finitos de la estructura. (Estructuras de hormigón armado sostenibles e innovadoras, 2024)

Inicialmente se planteaba una celosía de acero inoxidable con tablero curvo de hormigón armado suspendido por anclajes al macizo rocoso. Esta pasarela peatonal, en fase de diseño con la solución inicial no cumplía el rango de vibraciones esperado para este tipo de estructuras y la única solución sin elevar considerablemente los costes fue cambiar el tipo de refuerzos con el consiguiente ahorro de recubrimiento.

Inicialmente se consideró la utilización de hormigones especiales que permitieran fijar estos en 40 mm que con una solución en PRFV permitió bajarlo a 15-20 mm con lo que se consiguió un ahorro del 30 % en el peso de la estructura que le permitía entrar en el rango de vibraciones esperado. Además, los medios de elevación necesarios en esta zona de difícil acceso dejaron de ser un problema y a su vez no elevaban el coste durante la ejecución.

En este proyecto se pudo comprobar el considerable ahorro en coste durante el transporte de los elementos prefabricados en PRFV, la reducción de medios requeridos para su puesta en obra y los grandes beneficios obtenidos en cuanto a la durabilidad de la estructura sin mantenimiento durante toda la vida útil de la estructura.

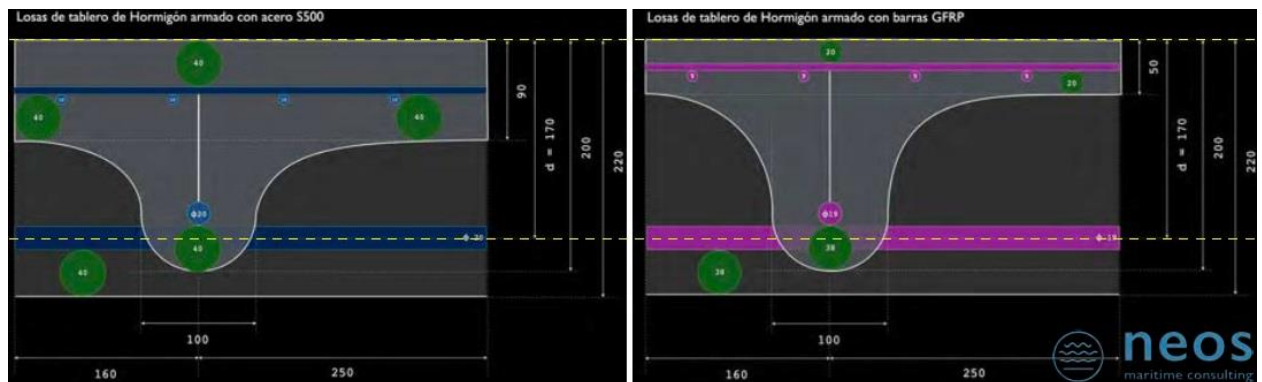


Figura 22. Sección longitudinal de armado inicial y final. (Estructuras de hormigón armado sostenibles e innovadoras, 2024)

En la imagen superior podemos ver la sección longitudinal de armado propuesta inicialmente a la izquierda con barras longitudinales de acero S500 de $\varnothing 20$ mm y cerros de $\varnothing 10$ con un recubrimiento total de 40 mm. A la derecha podemos comprobar que para este caso los $\varnothing$ empleados son similares a la solución inicial, con refuerzos de PRFV de $\varnothing 19$ mm para la armadura longitudinal y cerros de $\varnothing 9$ mm con un recubrimiento de 20 mm.

Otras aplicaciones piloto en España

También en España en el proyecto “Refuerzo del dique de abrigo de Punta LLagosteira (APAC)”, en la ejecución final se emplearon bloques de hormigón de alta densidad armados con PRFV. Su utilización estuvo motivada por aparición de aberturas en los cubos a causa del alto gradiente térmico. Se resolvió sin mayores dificultades y con las facilidades que aporta en el manejo del material durante la puesta en obra.

4.6 Otras experiencias fuera de España

En los EE. UU. la AASHTO realizó un estudio sobre la durabilidad de las armaduras en puentes realizados con barras con fibra de vidrio y una vida en servicio de entre 15-20 años, en zonas expuestas a ciclos de humedad-secado y congelación-descongelación donde se utilizaban sales para descongelación en los tableros de los puentes. Los resultados obtenidos en las barras extraídas para su ensayo mostraban que la durabilidad de estas estructuras era de 100 años.

En algunos casos se encontraba un bajo deterioro que produciría una bajada de sus propiedades físico-mecánicas de un 2-3% debido a la alcalinidad y la humedad del hormigón alrededor de las barras. Estos resultados en líneas generales son superiores a los esperables en refuerzos de acero.

Otro caso interesante es el prototipo realizado para la construcción de un muelle como sustitución de otro dañado por el huracán Irma. Los elementos de la estructura se fabricaron con

- Elementos de hormigón prefabricado con barras de fibra de vidrio.
- Hormigón in situ reforzado con barras de basalto.
- Pilotes de hormigón con acero pretensado.

En este muelle de construcción mixta de acero y fibras se emplearon elementos modulares prefabricados en los elementos compuestos con fibra de vidrio. En la mitad de la estructura se empleó agua salada de curado y áridos reciclados mientras que en la otra se empleó una mezcla tradicional.

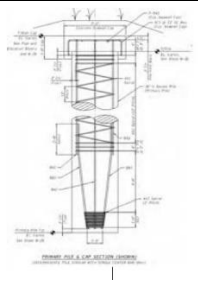
En la construcción de este proyecto se ha demostrado cómo es posible diseñar estructuras sometida a condiciones agresivas como un huracán de nivel V fabricada refuerzos de polímeros reforzados, además de la utilización de agua salada y áridos reciclados.

Durante la puesta en obra se encontraron ventajas en la puesta en obra con respecto al acero manteniendo los mismos procesos requeridos por el acero. En general será más rápida la puesta en obra y requiere medios de menores dimensiones para su manipulación debido a su ligereza en comparación al acero. En zonas con poco espacio facilita mucho la manipulación de las jaulas de armado.

Otro caso que demuestra el buen comportamiento de las fibras fue el realizado en Florida para restaurar un deslizamiento del terreno provocado por huracanes que había afectado a lo largo de 1500 metros a la línea de costa destruyendo carreteras y accesos.

La solución se componía de un muro pantalla de pilotes secantes en arenas con alto nivel de cloruros y en una zona muy expuesta al ambiente marino. En él se emplearon armaduras de fibra de vidrio con las siguientes características:

Tabla 21. Definición de armados del proyecto iDock realizado en Miami. (Universidad de Miami)

Tamaño de barra imperial	Masa por unidad de longitud (kg / m)	Diámetro nominal (mm)	
#5	1.556	15.875	
#8	3.982	25.400	

Este diseño dio ventajas y no dio problemas inesperados durante la puesta de los pilotes en obra finalizando la construcción en 4 meses reduciendo en dos meses la programación prevista. Por tanto, se cumplieron las ventajas esperadas del uso de este tipo de materiales.

Además, en este proyecto se pudo comprobar de forma casual la seguridad que confiere a las estructuras las soluciones con fibras y la gran capacidad resistente de estas estructuras. Tres años después de finalizarse las obras, en 2022 se produjo un huracán que desplazo las tierras exponiendo 4 metros del muro cuando su diseño se relaciona a la estabilidad de este apenas superaba los 3,50 metros. Tras este suceso no se produjo ningún daño en la estructura demostrando que estas soluciones funcionan y su uso es ventajoso conduciendo al aumento de proyectos de este tipo.

Existen otros ejemplos relevantes, en 2019 se instalaron losas reforzadas con barras sin corrugas de PRFV. En ella se colocaron 184.000 barras de 38 mm como refuerzos en losas que soportan cargas de almacenamiento de contenedores. Además de su mayor durabilidad con menor mantenimiento, su instalación es más rápida y sencilla. Esto favorece su uso en zonas de alta actividad comercial ininterrumpida.

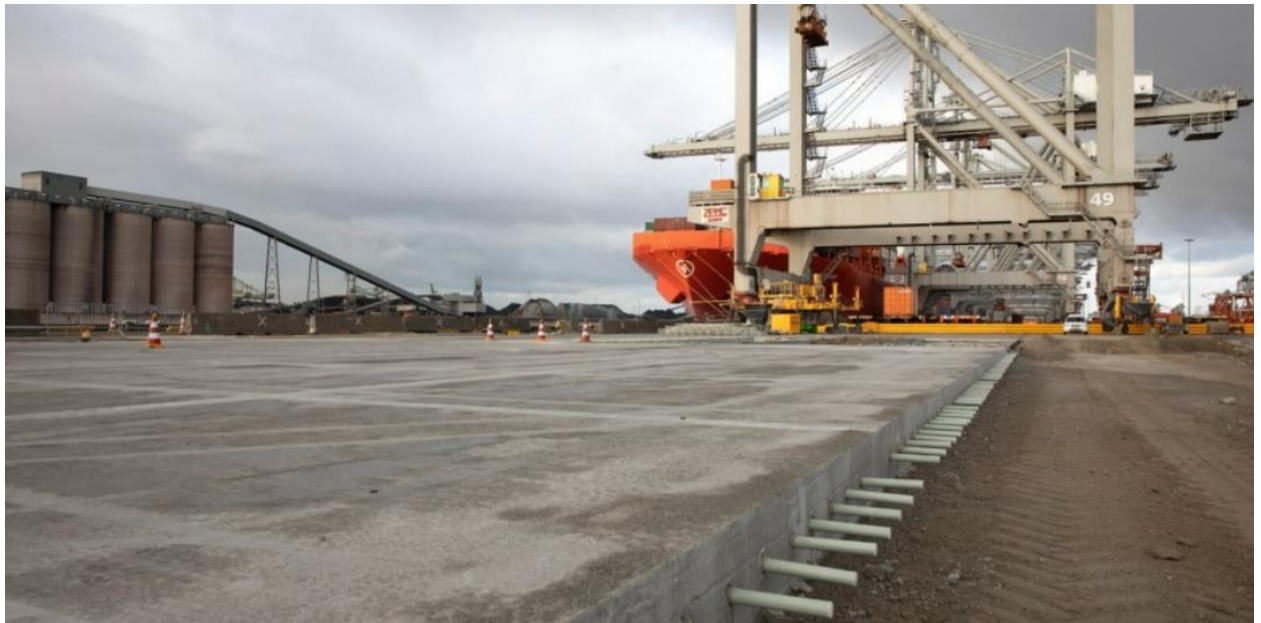


Figura 23. Terminal del puerto de contenedores de Rotterdam. (Mateenbar)

4.7 Resumen

A pesar de las formulaciones muy conservadoras debido a la poca experiencia se permite demostrar mediante experimentos que lo corroboren la posibilidad de reducir considerablemente el volumen de armado de los elementos estructurales. Estos ensayos existen y son fiables ya que en esta tecnología lleva desarrollando durante más de 60 años.

- Reducción de los recubrimientos: reduce la cantidad de hormigón empleada con los consecuentes ahorros. Estos recubrimientos ya no deben calcularse en función de la penetración de los cloruros. El menor tamaño de los elementos y su mayor ligereza reduce su impacto medioambiental tanto en materiales como en maquinaria.
- Áridos: no requieren lavado previo que reduzcan la presencia de sales corrosivas facilitando el reciclado de los áridos. Existen numerosos estudios que validan su utilización. Los ensayos realizados muestran que la resistencia y la vida útil de las estructuras no se modifica sustancialmente con el uso de estos con el correspondiente ahorro. No obstante, el Eurocódigo por falta de experiencia que asegure su uso no permite su uso.
- Cementos: permite dosificar la mezcla con cementos diferentes a los normalmente utilizados con el fin de reducir la capacidad de penetración de los cloruros principalmente.

- Ahorro en costes de transporte, maquinaria y mano de obra debido a su menor peso. Los medios requeridos son de menores dimensiones facilitando la puesta en obra. Siendo así, se ha comprobado en algunos proyectos ejecutados como el de la Pasarela de acceso al faro de Cudillero donde los accesos son difíciles y el espacio es limitado que su uso puede ser muy ventajoso. Esta ventaja se puede reproducir en elementos donde las tareas de mantenimiento vayan a ser nulas o escasas por diversos factores.
- Mayor vida útil de las estructuras en ambiente salino.
- Este tipo de refuerzo facilita la demolición al final de su vida útil o en caso de requerirse por otros factores.

Sus propiedades mecánicas en comparación con el acero se pueden resumir en las siguientes:

- Mayor resistencia a tracción, según datos de fabricante del orden de 2,5 veces superior para los mismos diámetros.
- Gran ligereza, según datos de fabricante del orden de $\frac{1}{4}$ para los mismos diámetros.
- Menor rigidez, aproximadamente $\frac{1}{4}$ de la rigidez del acero. Menor módulo elástico que el acero.
- Alta resistencia en la dirección de la fibra.
- Baja resistencia al corte por cizalladura.
- Elástico hasta el fallo, no se forman rótulas plásticas (mal funcionamiento para fuerzas sísmicas). Análisis lineal de la deformabilidad frente a la ductilidad del acero.
- La gran diferencia en el cálculo de diseño radica en que con refuerzos PRFV se dimensiona a rotura del hormigón mientras que en acero en función de la pérdida de resistencia.

5 JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE ESTUDIO

Las estructuras de hormigón en ambiente marino requieren de mayores espesores de recubrimientos de los requeridos en otros ambientes con el fin de retrasar la entrada de los cloruros a la zona de armaduras. Las normativas internacionales y el Código estructural, así como sus predecesores han diseñado la mezcla del hormigón. La experiencia y diversos estudios han demostrado como el ataque de los cloruros acaba produciéndose en un ambiente tan propicio para ello como es el XS3+XM3 o XS3. La corrosión de las armaduras requiere de grandes inversiones en mantenimiento correctivo en obra marítima.

Las nuevas tecnologías han permitido que surjan nuevos materiales como sustitución del acero como refuerzo en el hormigón. Concretamente en ambiente marino, lo ideal sería un refuerzo que no sufra procesos de corrosión. Entre estos y con la misma filosofía de utilización de barras como refuerzo en el hormigón aparecieron las barras de refuerzo FRP o barras reforzadas con polímeros de fibras.

A su vez la necesidad creciente en la sociedad de alcanzar diseños cada vez más duraderos y sostenibles ofrece una gran oportunidad a este tipo de refuerzo alternativo al acero. Con estas premisas, y revisando que el Código estructural no cubre este tipo de soluciones se busca caracterizar sus principales aplicaciones y las ventajas competitivas que pueda tener con respecto a las armaduras de acero en obras marítimas.

La realidad es que existe un vacío normativo importante para este tipo de soluciones, y en la actualidad hasta la aprobación del Eurocódigo 2 no existe apoyo normativo para los proyectistas en España. Mediante un análisis comparativo de las normas internacionales existentes y las principales diferencias de aplicación entre ellas se buscará de reducir este “vacío normativo”. De esta forma se podrá estudiar el diseño de elementos reforzados con armaduras FRP utilizando como apoyo las normativas más experimentadas en el ámbito internacional.

A diferencia del acero, los fabricantes de refuerzos FRP llevan años trabajando de la mano con los técnicos encargados de elaborar los diferentes códigos de diseño para optimizar el diseño de los elementos realizados. Se deberá recurrir a las recomendaciones y especificaciones de estos para asegurar la viabilidad de los diseños propuestos.

Las barras de FRP y en concreto las de PRFV utilizadas como refuerzo en el hormigón infieren mayores resistencias a las estructuras que el acero. No obstante, para desarrollar esas resistencias

tienden a sufrir mayores deformaciones. Al no ser un material dúctil, si se sobrepasaran los límites del material estas estructuras colapsarían sin previo aviso lo que tendría graves consecuencias. Es por ello, y con un componente de conservadurismo, que se decide estudiar este material en el rango de deformaciones del acero donde el margen de seguridad es muy alto.

Este estudio se realiza en el marco de los vacíos normativos existentes y del alto nivel de seguridad que tendrían estas estructuras. Además, en caso de ser competitivas en este rango, su mayor durabilidad y su característica de no corrosivo aportaría un nuevo campo de trabajo para este material en armaduras de estructuras portuarias.

La experiencia del autor se reduce hasta la realización de este trabajo al diseño de elementos de hormigón armado con acero en ambiente marino. En la realización de los proyectos se debe considerar principalmente el factor técnico y económico para su viabilidad. El otro factor que cada vez tiene mayor importancia es el factor medioambiental.

6 METODOLOGÍA

Para poder entender lo que supone el diseñar con este tipo de estructuras en ambiente marino primeramente se realizara una revisión del avance normativo que han conseguido los países más experimentados en la utilización de este tipo de refuerzos.

Algunos de estos países llevan más de 20 años desarrollando normativas que han ido evolucionando por medio de las experiencias adquiridas y el desarrollo de normativas. De esta forma se tratará de entender lo que supone cambiar el acero por los FRP en el diseño de armados en elementos estructurales de hormigón.

A causa de la reducida experiencia en España y en el mundo con respecto al acero la utilización de este material en armaduras se hace necesaria la revisión y análisis de los pocos estudios realizados. Así mismo se analizarán las recomendaciones de los fabricantes en base a los ensayos realizados para caracterizar y valorar cada uno de estos factores que son los principales a considerar en la toma de la decisión del proyectista.

Las normativas en lo que al diseño se refiere, mantienen gran parte de los criterios de cálculo impuestos en elementos reforzados con barras de acero. En cambio, existen otros nuevos condicionantes debido a las diferencias en el comportamiento del material bajo diferentes acciones. Para ello se estudiará el comportamiento del material y las consideraciones normativas más importantes en comparación con el acero.

De esta forma se podrán concluir los condicionantes principales que deben tenerse en cuenta en el diseño con refuerzos FRP. Para ello se recurrirá a normativa y fabricantes principalmente.

Se seleccionará una de las normas analizadas para realizar un análisis más específico sobre el diseño y la aplicación de las consideraciones de durabilidad.

Entendiendo los condicionantes en fase de proyecto y de construcción que supone en los diseños, se realizara un análisis comparativo en elementos típicos de obra marítima en lo que el cambio de material pueda ser más ventajoso. La selección de los elementos se realiza en base a las características del material de utilizado en el armado. Debido a la mayor experiencia y avance normativo dentro de los materiales FRP se selecciona para su estudio más específico los PRFV.

Se realizará un modelo de elementos tipo espaldón y viga cantil con armados de acero y PRFV respectivamente con el que poder cuantificar las variaciones y consideraciones más relevantes en el diseño. Este se realizará manteniendo los límites de deformación impuestos en el acero para ambos tipos de armado.

La elección de los elementos viga cantil y espaldón se ha realizado en base a su forma de trabajo. Estos elementos no tienden a sufrir grandes cargas sostenidas en el tiempo durante su vida útil y por tanto no sufren deformaciones por flexión. Esto desde el punto de vista técnico favorece su utilización.

La ausencia de estudios en el rango de deformaciones del acero sumado a los pocos realizados en el extranjero para el estudio de su competitividad es otra motivación para la realización de este estudio. Además, los avances constantes en la reducción del coste de fabricación del material junto con la mejora de sus cualidades y reducción de limitaciones hacen necesario este estudio con el fin de valorar su futura incorporación en los estudios de alternativas previos a los proyectos.

Otro de los objetivos secundarios del modelo será estudiar la sensibilidad que tiene las modificaciones geométricas en el hormigón y los condicionantes geométricos en el diseño de las armaduras entre la solución en acero y PRFV.

El diseño de elementos con armaduras de acero en ambiente marino condiciona considerablemente la selección del hormigón. La no necesidad de proteger las armaduras ante los cloruros permite seleccionar la mezcla con menores restricciones. Como objetivo secundario del modelo, se caracterizará la utilización de armaduras de PRFV en ambiente marino y los condicionantes impuestos por la normativa seleccionada para la elección de la mezcla en este ambiente.

El objetivo final del modelo será la valoración a lo largo de la vida útil del elemento a lo largo de 100 años para su análisis posterior y poder concluir si lo es en que circunstancias es más ventajoso. De esta forma se podrá valorar su competitividad en la fase constructiva y durante su vida útil.

7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MARCOS NORMATIVOS ACTUALES PARA EMPLEO DE BARRAS FRP

7.1 Introducción

Los materiales FRP se definen como materiales compuestos heterogéneos, constituidos por dos o más fases físicas diferentes, cuyas propiedades son mejores que las de las fases por separado.

Las fibras envueltas por la matriz aportan la resistencia que por sí solas no aportarían. La matriz transfiere las tensiones, manteniendo las fibras y protegiéndolas en su posición. Los materiales FRP más habituales en son:

Tabla 22. Características de los principales tipos de fibras. (Mapei)

	CARBONO	VIDRIO	BASALTO
MÓDULO ELASTICIDAD (GPA)	230-400	72-87	85-98
RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPA)	2400-5700	3300-4500	3200-4840
DEFORMACIÓN DE ROTURA (%)	0,3-1,8	4,8-5,0	1,9-3,2

La utilización de refuerzos con fibras de aramida está en auge especialmente en entramados que necesiten un aligeramiento importante. No obstante, no serán objeto de estudio en este trabajo, aunque su potencial en estructuras tipo pantalanés de uso náutico podría ser interesante.

Como sustitución del acero estructural, se presentan los materiales FRP, que al igual que el acero se puede presentar en forma de fibras o barras estructurales.

Si comparamos las fibras con el acero son un material fuerte, rígido y ligero. Las exigencias o requerimientos estructurales y funcionales esperables de las fibras como refuerzos son:

- Menor módulo elástico que el acero.
- Altas resistencias y mayores deformaciones.
- Propiedades estables durante su manipulación y fabricación.
- Uniformidad en los refuerzos.
- Alta tenacidad.

- Alta durabilidad

Según el FIB las fibras más utilizadas como refuerzo en hormigón son las provenientes de vidrio, carbono y aramida y basalto.

Las barras de materiales FRP se componen de fibras continuas impregnadas con resinas poliméricas, generalmente de vinilester, epoxi o de poliéster.

La matriz polimérica es necesaria para conseguir que el armado desarrolle todas las propiedades que debe conferir en el hormigón. Siendo estas:

- Protección superficial frente a la manipulación.
- Durabilidad.
- Transmisión de tensiones a las fibras.

El conjunto fibra-matriz será el que aporte las características de diseño frente al comportamiento del hormigón frente a acciones como el fuego y los ambientes corrosivos. Se debe asegurar el buen comportamiento químico y térmico de la matriz y las fibras.

7.2 Marco normativo

En general, todas las normativas se apoyan en las normativas de diseño de hormigón armado reforzado con acero en los casos que el diseño sea similar con refuerzos FRP. Solo la normativa canadiense de las presentadas en la tabla inferior funciona como un código por sí mismo.

En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de fibras que cubren respectivamente las normativas americana, canadiense y europea respectivamente.

	ACI 440,11	CSA S 806	EC 2 ANNEX R
Vidrio FRP	X	X	X
Basalto FRP		X	
Aramida FRP		X	
Carbón FRP		X	X
Barras circulares sólidas		X	X
Barras cuadradas sólidas		X	X
Mallas		X	X

Figura 24. Tipos de fibra cubierto por cada código (A.ILKI et al, 2023)

7.2.1 Normativa Europea-Española

En España su uso ha sido reducido hasta el momento y todavía no está recogido en la reglamentación española. A nivel internacional, hay países que están aumentando su uso en los últimos años y han dispuesto de guías, recomendaciones o códigos para su uso en ejecución de obras. No obstante, el CE deja la puerta abierta al proyectista de realizar los cálculos justificativos necesarios y bajo su responsabilidad validar el diseño.

En la primera década del siglo XXI, más concretamente en septiembre de 2007 publicó la FIB el “Technical Report: FRP reinforcement in RC structures”, para dar apoyo técnico a los proyectos.

En esta década el auge en la utilización de este tipo de refuerzos en estructuras de hormigón favoreció la aparición de normativa de forma progresiva.

En este reporte técnico se proporcionan las herramientas necesarias para validar el diseño de una estructura con refuerzos FRP. No obstante, el proyectista en colaboración con el fabricante deberá resolver ciertos aspectos que no están totalmente cubiertos por las normativas y que siguen desarrollándose por parte de los fabricantes que serán tratados un poco más adelante

En ella se expone como ya en 1988 en Japón se realizaban tableros de puentes de hormigón pretensado con FRP. Destacando diferentes obras realizadas en tableros de puentes durante el final de siglo XX con fibras de aramida y carbono. La utilización del pretensado mejora el comportamiento a fatiga de las fibras mejorando su comportamiento a largo plazo

En el marco europeo se espera próximamente la aprobación del Eurocódigo 2 en el que se incorporará el Anejo R informativo (“no es de obligado cumplimiento”) en el que se incluye el empleo de barras reforzadas con fibras de vidrio o de carbono no pretensadas en estructuras de hormigón a nivel de diseño. En su aplicación se usa el Eurocódigo salvo en lo modificado por el anejo para este tipo de material junto con las limitaciones marcadas.

En cuanto a los materiales, también esta próxima la publicación del documento de evaluación europeo que permitirá la certificación del producto y su marcado C€, dando una seguridad en cuanto al comportamiento técnico del material. Este certificado regulará:

- Tipos de fibras: carbono, vidrio, basalto y aramida

- Tipos de resinas: termoplásticas y termoestables.
- Dimensiones de las barras en el rango de 5-32 mm.
- Sin limitación de longitud de las barras en su fabricación a diferencia del ASTM.
- Durabilidad de 100 años.

Para el control del material el nuevo anejo se apoya en la normativa internacional ISO10406-1 sobre “Refuerzo de hormigón con polímero reforzado con fibra” que establece los métodos de ensayos para estos materiales. Esta norma es la que deben seguir los fabricantes para el cálculo de las resistencias a largo plazo (100 años).

En caso de no disponer de ella, el Anejo R proporciona el método para su obtención. Se deberá un cálculo a de la resistencia a corto plazo y afectarla por una serie de coeficientes basados en la temperatura, la duración de la carga y el tipo de exposición o envejecimiento esperable.

A diferencia de las estructuras de hormigón armado en el cálculo de las combinaciones de diseño se deberá aplicar un coeficiente de seguridad de valor 1,50 tanto para situaciones persistentes como transitorias. En situaciones accidental y de servicio los coeficientes serán de 1,10 y 1,00 respectivamente.

Para el cálculo de cortante se utilizan las mismas fórmulas que para el hormigón con unas modificaciones basadas en la relación entre los módulos elásticos de la fibra y el acero. Además, y a diferencia de las últimas normativas de cálculo que eliminaron este factor, se considera cierta contribución del hormigón para resistir estos esfuerzos.

Para el cálculo a estado límite de servicio se mantiene el criterio utilizado en el hormigón armado con alguna limitación y se establecen los límites de ancho de fisura y de tensiones de tracción.

La abertura de fisura se limita a 0,4 mm que mediante justificación podría aumentarse hasta valores de 0,7. En cuanto a la deformabilidad y el dimensionamiento de flechas se puede aplicar el mismo cálculo, pero no los mismos límites pudiendo condicionar el diseño.

En 2022 se publicó en Francia las recomendaciones para uso de fibras reforzadas con polímeros en barras de refuerzo como referencia para su uso.

En el contexto internacional encontramos Canadá y EE. UU. que llevan años trabajando con normativas para la construcción de este tipo de estructuras.

7.2.2 Normativa Estadounidense

En los EE. UU. donde se ha avanzado notablemente en el empleo de estos materiales y se ha trabajado en la normalización de estos materiales gracias al trabajo de los miembros de ACI Internacional (Instituto Americano del Concreto u Hormigón).

El Instituto Americano, más conocido como ACI, es una asociación técnica y educativa que elabora códigos, especificaciones, notas técnicas especificaciones, referencias y otros documentos técnicos, con el fin de difundir el conocimiento sobre los diferentes usos del hormigón. En 2002 publicó la primera edición de Recomendación de diseño para estructuras con refuerzos FRP.

En 2022, se publica el Código de Construcción ACI 440.11-22 sobre “Requisitos de Construcción para Concreto Estructural Reforzado con barras de Polímero Reforzado con fibra de vidrio (PRFV)”. Siendo una herramienta fundamental para los diseños de estructuras en los proyectos. Este Código se basa en la guía anterior existentes desde 2008 y renovada en 2015.

Como complemento al Código se publicó la Especificación ACI SPEC-440.5-22 sobre “Construcción con barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio”. Dando las herramientas para la puesta en obra y el aseguramiento del control de la calidad en la fase de construcción.

En los proyectos que se incorporan barras de refuerzo de PRFV se deben cumplir los criterios de propiedades físicas y mecánicas marcados por la norma ASTM D7957 de normalización de materiales.

El Código ACI 440 es dependiente de la ACI 318-19 ya que, para numerosos aspectos de aplicación, alude al capítulo y sección de la ACI directamente.

Por su parte, también en EE. UU., la AASHTO, ha desarrollado una guía de especificaciones para el diseño de puentes AASHTO LFRD para hormigón reforzado con PRFV. Con una larga experiencia en el empleo de estos materiales, es probablemente la guía más avanzada para el uso de este tipo de materiales, permitiendo el diseño del 100 % de las estructuras con estos materiales.

7.2.3 Normativa Canadiense

Ya en 2002 la Canadian Standard Association (CSA) publicó la denominada “CSA S 806”, siendo esta primera normativa de diseño publicada y posteriormente aprobada en 2021. A esta normativa se la complementa en 2019 con la publicación de la “CSA S 807” que establece la normativa para los materiales facilitando la seguridad de implantación en los proyectos. En ellas se trata la corrosión por medio de las sales para descongelación de carreteras.

7.3 Diseñando con ACI 440.11-22

Desde su aprobación en 2022 este código cubre el diseño de los elementos reforzados con PRFV, bien estructuras completas o elementos parciales de una estructura con armado convencional. Como se decía en el punto 7.2.2, este código es dependiente de la norma ACI vigente para hormigón armado ACI 18-19.

En el diseño del modelo se analizarán los condicionantes de durabilidad que deben considerarse en obra marítima para el diseño con este tipo de solución.

En el Código se establecen las siguientes categorías y clases de exposición mostradas en la siguiente tabla. Se señala que no se tienen especial consideración ante ambientes muy agresivos por altas temperaturas y alta acidez entre otros. Esta tabla asigna se relaciona con la tabla 19.3.2.1 de la norma para establecer las limitaciones en las características de la mezcla para los ambientes más agresivos.

Tabla 23. Tabla 19.3.1.1 Exposure categories and classes. (Brown et al., 2023)

Categoría	Clase	Condición	
Hielo-deshielo (F)	F0	Hormigón no expuesto a ciclos de hielo-deshielo	
	F1	Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo con poca exposición al agua	
	F2	Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo con bastante exposición al agua	
	F3	Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo con bastante exposición al agua y contacto con sales de deshielo	
Sulfato (S)		Sulfato soluble en agua en el suelo (SO ₄ -2), porcentaje en masa*	Sulfato disuelto en el agua, porcentaje en ppm*2
	S0	SO ₄ -2<0,10	SO ₄ -2<150
	S1	0,10 ≤ SO ₄ -2<0,20	150 ≤ SO ₄ -2<1500 o agua de mar
	S2	0,20 ≤ SO ₄ -2<2,0	1500 ≤ SO ₄ -2<10000
	S3	SO ₄ -2>2,00	SO ₄ -2>10000
En contacto con agua (W)	W0	Hormigón seco en servicio. No se requiere hormigón en contacto con el agua ni de baja permeabilidad.	
	W1	Hormigón en contacto con el agua que no requiere baja permeabilidad	
	W2	Hormigón en contacto con el agua que requiere baja permeabilidad	

⁽¹⁾ El porcentaje de sulfato en masa en el suelo se determinará mediante ASTM C1580.

⁽²⁾ La concentración de sulfatos disueltos en agua, en ppm, se determinará mediante ASTM D516 o ASTM D4130

Se toma especial consideración a los ataques por ciclos de hielo-deshielo, debido a los cambios de volumen que se experimentan en el interior de la mezcla que pueden afectar a la integridad de la barra anulando su aporte estructural. La segunda categoría establece las diferentes clases que limitan la mezcla en función de la presencia de sulfatos que puedan penetrar el hormigón hasta llegar a las armaduras, bien en el suelo o en el agua de mar distintivamente.

La tercera categoría se refiere a las estructuras en contacto con agua. La norma no toma limitaciones ante la reacción de los álcalis, ya que establece una serie de comprobaciones previas para prevenir este ataque. Tampoco toma medidas especiales por presencia de sales marinas en el agua.

En general, al igual que cuando diseñamos con refuerzos de acero, la durabilidad del hormigón está relacionada con la permeabilidad de este. Dependiendo así de la relación a/c y de la dosificación utilizada. Para una relación a/c determinada, el uso de humo de sílice, cenizas volantes o escorias mejorará su capacidad impermeable y por tanto su durabilidad.

Tabla 24. Adaptación de tabla 19.3.2.1 sobre "Limitaciones del hormigón según clase de exposición". Parte 1. (Brown et al., 2023)

Clase de exposición		Máxima relación a/c	Resistencia mínima (psi)	Resistencia mínima (kg/cm ²)
F0		N/A	3000	210,92
F1		0,55	3500	246,07
F2		0,45	4500	316,38
F3		0,45	4500	316,38
S0		N/A	3000	210,92
S1		0,5	4000	281,23
S2		0,45	4500	316,38
S3	Opción 1	0,45	4500	316,38
	Opción 2	0,4	5000	351,54
W0		N/A	3000	210,92
W1		N/A	3000	210,92
W2		0,5	4000	281,23

Para la clase exposición en contacto con agua salada, se toma como referencia la menos restrictiva de la clase S. Esto se debe a que la expansión sufrida por el cemento en presencia de sulfatos es menor en contacto con agua salada que en con dulce.

En la nota 1 de Tabla 25, se especifica que, en contacto con agua salada, se permite usar cemento Portland con un contenido de C3A mayor del 10 % si se reduce la relación a/c a 0,40. Para la clase W, y tras asegurar de acuerdo a la ASTM el contenido de álcalis y la toma de medidas necesarias según este código, que solo para la clase W2 se requiere limitar la permeabilidad.

Tabla 25. Adaptación de tabla 19.3.2.1 sobre Limitaciones del hormigón según clase de exposición. Parte 2. (Brown et al., 2023)

Clase de exposición		Tipos de cemento		
		ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157
S0		sin restricción	sin restricción	sin restricción
S1		II ^{(1) (2)}	Tipos clasificados como MS	MS
S2		V ⁽²⁾	HS	HS
S3	Opción 1	V y adición de puzolana o escoria ⁽³⁾	HS y adición de puzolana o escoria ⁽³⁾	HS y adición de puzolana o escoria ⁽³⁾
	Opción 2	V ⁽⁴⁾	HS	HS

⁽¹⁾ En caso de exposición al agua de mar, se permiten otros tipos de cementos Portland con contenidos de aluminato tricálcico (C3A) de hasta el 10 % si la relación a/cm no excede 0,40.

⁽²⁾ Otros tipos de cemento disponibles, como el Tipo I o el Tipo III, están permitidos en las Clases de exposición S1 o S2 si el contenido de C3A es inferior al 8 % para la Clase de exposición S1 o menos del 5 % para la clase de exposición S2.

⁽³⁾ La cantidad de la adición puzolánica o de escoria que se utilizará deberá ser al menos la cantidad que se haya determinado previamente para mejorar la resistencia a los sulfatos cuando se utiliza en concreto que contiene cemento tipo V. Alternativamente, la cantidad de adición puzolánica o de escoria que se utilizará deberá ser al menos la cantidad probada de acuerdo con ASTM C102 y cumpliendo con los criterios en 26.4.2.2(c).

⁽⁴⁾ Si se utiliza cemento Tipo V como único material cementoso, se deberá especificar el requisito opcional de resistencia a los sulfatos de 0,040% de expansión máxima según ASTM C150.

El comportamiento a tracción de las barras de PRFV tiene una relación tensión-deformación elástica lineal hasta rotura. El módulo de elasticidad de la barra deberá proporcionarlo el fabricante. Para el cálculo de la resistencia a tracción de las barras se deberán aplicar una serie de coeficientes en función del cálculo. El factor 0,85 de reducción ambiental deberá afectarse antes de ningún otro cálculo. Los elementos curvos, cuya resistencia es aproximadamente un 40 %-70% que, en elementos curvos de acero, se afecta de la misma forma y será el fabricante quien proporcione ese dato antes de afectarlo por este coeficiente.

La norma del material ASTM D7957 proporciona los valores mínimos del módulo de elasticidad para el dimensionamiento de la barra sin selección previa del material a un fabricante.

A diferencia de cuando diseñamos para evitar la corrosión, se pone especial énfasis en el aseguramiento del buen comportamiento de los refuerzos a dimensionar ante cargas de fatiga durante toda su vida útil. En esta línea, se establecen también las medidas para asegurar a lo largo de la vida útil la eficiente unión de las barras y el hormigón.

En cuanto a los recubrimientos mínimos impuestos, se basan en factores de construcción, unión y comportamiento ante el fuego. Las condiciones climáticas adversas en relación al recubrimiento no se deben a la humedad, sino a una alta exposición al calor del sol.

Tabla 26. Tabla 20.5.1.3.1 Espesor de recubrimiento de hormigón en elementos de hormigón prefabricado y armado in situ. (Brown et al., 2023)

Exposición del hormigón	Elemento	Refuerzo PRFV	Espesor de recubrimiento (in.)	Espesor de recubrimiento (cm)
Elementos enterrados	Todos	Todos	3	7,62
Expuesto al ambiente	Todos	N.6 - N.10	2	5,08
		≤ N.5	1-0,5	2,54 - 1,27
No expuesto al ambiente ni en contacto con el suelo	Losas, viguetas y muros	Todos	3/4	1,91
	Vigas, columnas, pedestales y tirantes tensionados	Todos	1-0,5	2,54 - 1,27

Se establece así un rango entre de 7,62-1,27 cm entre la clase de exposición más agresiva y el recubrimiento mínimo exigible por motivos de construcción.

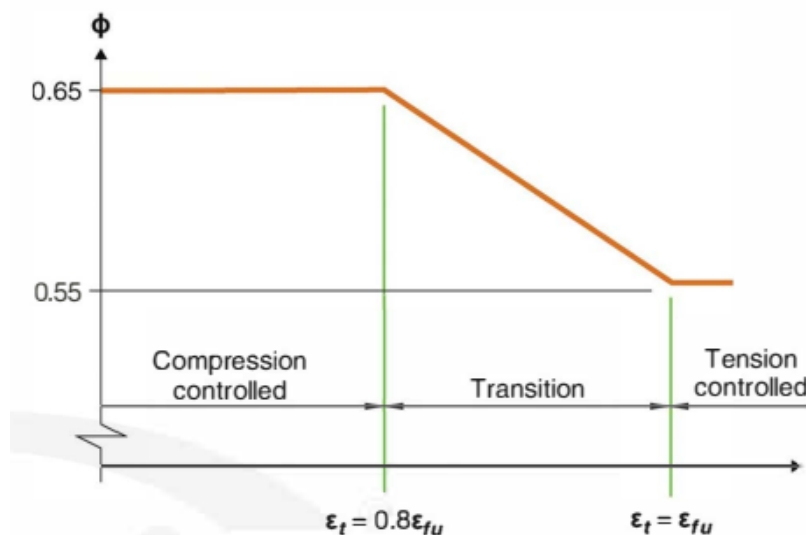
En esta tabla están considerados los recubrimientos mínimos necesarios para asegurar el buen comportamiento con relación al embebimiento de las barras y la longitud de transferencia. También consideran la diferencia de expansión térmica existente entre el PRFV y el hormigón, que de no ser así podría desembocar en fisuras que afecten a la unión hormigón-barras.

En obra marítima en España y del lado de la seguridad excepto para elementos enterrados que del lado de la seguridad se deberá tomar el máximo de 7,62 cm, se podrá considerar entre 5,08 y 1,27 según el diámetro nominal de la barra.

Para los cálculos de dimensionamiento se deberán afectar las resistencias iniciales (ya afectadas previamente por el coeficiente ambiental). La resistencia de diseño de la sección será la nominal por el factor de reducción correspondiente.

Se establecen así unas reducciones según el tipo de fuerzas que involucradas en la combinación de cálculo o el elemento a afectar. Para la obtención de los factores de reducción de cálculo de la sección según los diferentes tipos de fuerza se deberá recurrir a la tabla 21.2.2 de la norma. Se encuentran factores de reducción en un rango de 0,55 y 0,75.

Tabla 27. Variación del coeficiente de reducción en función de la fuerza. (Brown et al., 2023)



La clasificación de la tabla 21.2.2 establece que en la zona de transición el fallo ocurrirá por rotura del hormigón en la zona de compresión. Este criterio de cálculo está del lado de la seguridad, dando seguridad a las estructuras durante su vida útil en servicio.

En cuanto a las deformaciones esperables, (Bakis et al., 2002) apuntaban lo siguiente: “ Los elementos de hormigón reforzado con PRFV tienden a tener deformaciones mayores que los miembros de hormigón reforzado con acero de tamaño, forma y relación de refuerzo similares debido a la menor rigidez asociada con el refuerzo de PRFV disponible comercialmente.

En el dimensionamiento, las deflexiones estimadas deben calcularse y compararse con los valores límite no satisfaciendo los de espesor mínimo como en el acero. Sin embargo, la flecha máxima queda limitada a valores entre $l/180$ y $l/480$ según el tipo de elemento y sus condiciones de carga.

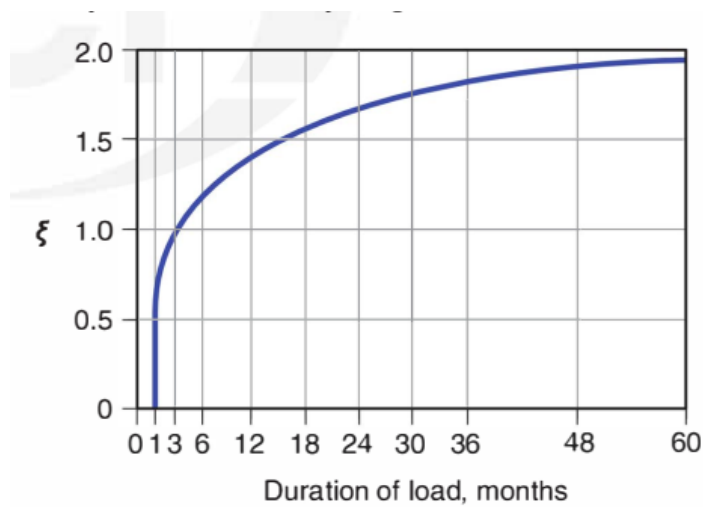


Figura 25. Factor reductor dependiente de la duración para cargas sostenidas. (Brown et al., 2023)

El ancho de fisura está relacionado con la duración de las cargas en el tiempo y por los fenómenos de contracción. Las investigaciones determinan que el ancho de fisura aumenta con el aumento de duración de la carga. (Duy Nguyen et al., 2020).

Para mejorar el control de fisura se debe realizar una uniforme distribución del refuerzo en la zona de máxima tensión. Está comprobado que mayor cantidad de armado, reduce el ancho de fisura, en comparación a una o dos barras de área equivalente.

No obstante, en la ACI 440.11 se apunta como la tecnología ha mejorado de forma significativa en cuanto a las fibras, resinas y el proceso de fabricación. Ensayos más recientes como el de Keller et al. 2017; Sayed-Ahmed et al. 2017; Benmokrane et al. 2019) demuestran estos avances comparando diferentes diámetros de barra de diferentes fabricantes. Los resultados dan mejoras ante carga sostenida de en torno al 30 % con respecto a los valores límites establecidos en el Anejo 440 .1. R basado en los refuerzos PRFV de “primera generación”.

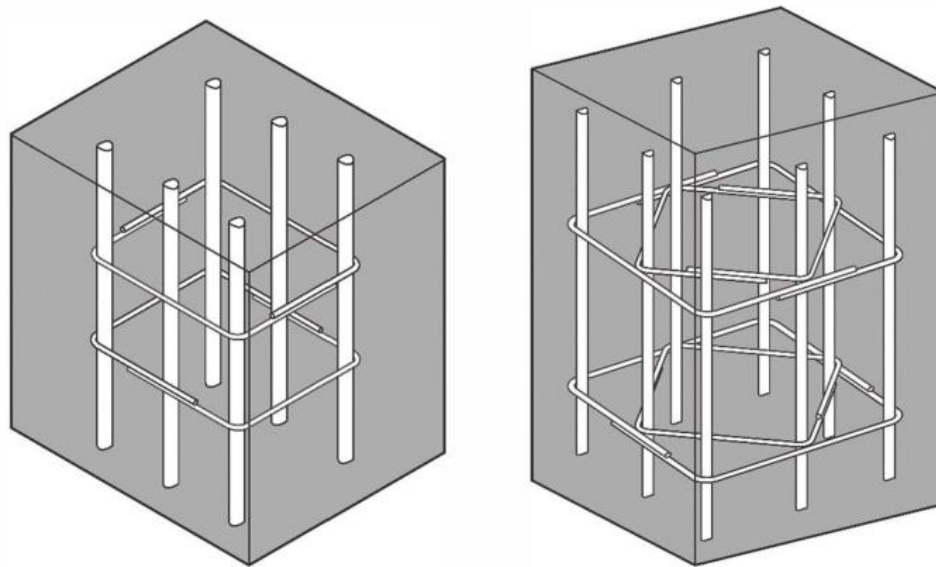


Figura 26. Ejemplos de armado ante axil y axil y flexión respectivamente. (Brown et al., 2023)

En cuanto a los cercos, existen diferentes formas que aseguran la longitud de anclaje sin grandes limitaciones en el proceso de fabricación. Algunas formas como las Z u otras podrían no fabricarse, por tanto, es importante en la fase de diseño el dimensionamiento mediante los códigos existentes, con el apoyo de los fabricantes o con ambas simultáneamente.

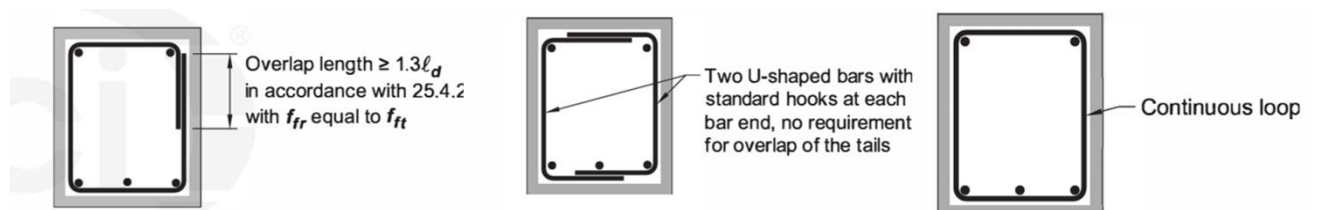


Figura 27. Ejemplos de forma de los cercos. (Brown et al., 2023)

8 MODELO DE ESTIMACIÓN DE DURABILIDAD: ENSAYOS Y CRITERIOS DE VALORACIÓN

Para determinar cómo las estructuras en contacto con el medio marino mejoran su comportamiento en términos de sostenibilidad y durabilidad, a la vez que cumplen su función estructural, se deberán comparar las estructuras convencionales construidas con hormigón armado y las realizadas con materiales FRP. Se deberá analizar el coste total inferido por la estructura a lo largo de toda su vida útil. Para su valoración se debe recurrir a estudios de durabilidad.

Estos estudios o modelos pueden ser en laboratorio o en estructuras en servicio. Los estudios de laboratorio se realizan mediante procesos de aceleración del deterioro en condiciones más agresivas a las que encontramos en la realidad que tras su análisis dan unos resultados que se extrapolan para obtener la vida útil teórica. En los estudios en estructuras en servicio como el realizado por la AASHTO en numerosos puentes realizados con materiales FRP, se realizan ensayos sobre estructuras en servicio obteniendo valores reales de esta vida útil.

En ambos casos se realizan ensayos de caracterización de determinan el deterioro sufrido por los elementos.

El ambiente marino es muy agresivo para las estructuras de hormigón-acero. De ahí surge la necesidad de establecer una estrategia de mantenimiento bien definida que optimice el coste de estas actuaciones y los derivados de su explotación consiguiendo que alcancen la totalidad de su vida útil.

Se pueden tomar diversas estrategias de mantenimiento en función de la frecuencia y la envergadura de estas “pequeñas” actuaciones “programadas” en el tiempo. En general los tipos de mantenimiento se pueden diferenciar en:

- Mantenimiento correctivo: las actividades de mantenimiento se realizan cuando los daños exigen de una reparación y las averías sean importantes.
- Mantenimiento preventivo: se tratará de analizar el estado de las infraestructuras, su comportamiento ante el medio marino y sus usos durante la vida en servicio con el fin último de anticipar el deterioro, detectando así con tiempo las posibles patologías, permitiendo tomar la decisión de reparar o sustituir el elemento.

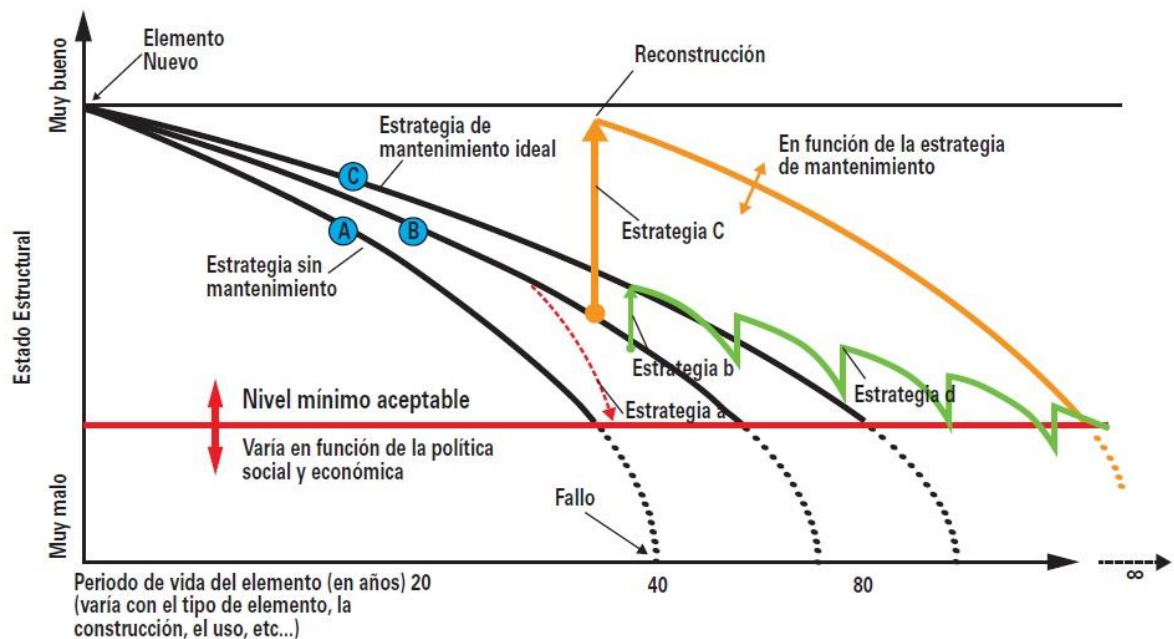


Figura 28. Curva de "las cuatro políticas" de conservación de una infraestructura. (Gestión de la conservación en el entorno portuario, 2012)

La estrategia de mantenimiento seguida durante la fase de explotación será decisiva en la vida útil de la estructura. En la imagen superior podemos ver cuatro estrategias o políticas de mantenimiento típicas de las estructuras marítimas en las que se alcanzan diferentes años de vida útil en las estructuras.

- Estrategia "a": considera que, tras un periodo de mantenimiento mínimo, se suspende toda la inversión, como consecuencia el deterioro es total y rápido del elemento en cuestión.
- Estrategia "b": considera la circunstancia bastante frecuente de que en un determinado momento se efectúe una inversión que lleve la capacidad estructural del elemento al nivel que tendría en el caso de un mantenimiento ideal. La línea consiguiente de deterioro del elemento correspondería, naturalmente, a la del plan de conservación que se le aplique a partir de ese momento.
- Estrategia "c": en este caso, se supone que, en un momento dado, se procede a la reconstrucción total del elemento. Sería como reiniciar desde este punto la vida del elemento que seguirá la curva de deterioro correspondiente al tipo de conservación que se adopte.

En el departamento de transportes de Florida se realizó un estudio sobre 54 puentes de hormigón armado en los que se concluyó que $\frac{3}{4}$ partes de los costes totales provenían del mantenimiento. En esta línea y en colaboración con la universidad de ingeniería de Florida y la universidad de Miami se realiza el proyecto de sustitución del puente Halls River.

Su ejecución se inició en 2017 y en ella se han valorado todos los aspectos del proyecto desde su fabricación, construcción y puesta en servicio para estudiar el coste de utilizar nuevos materiales frente al acero.

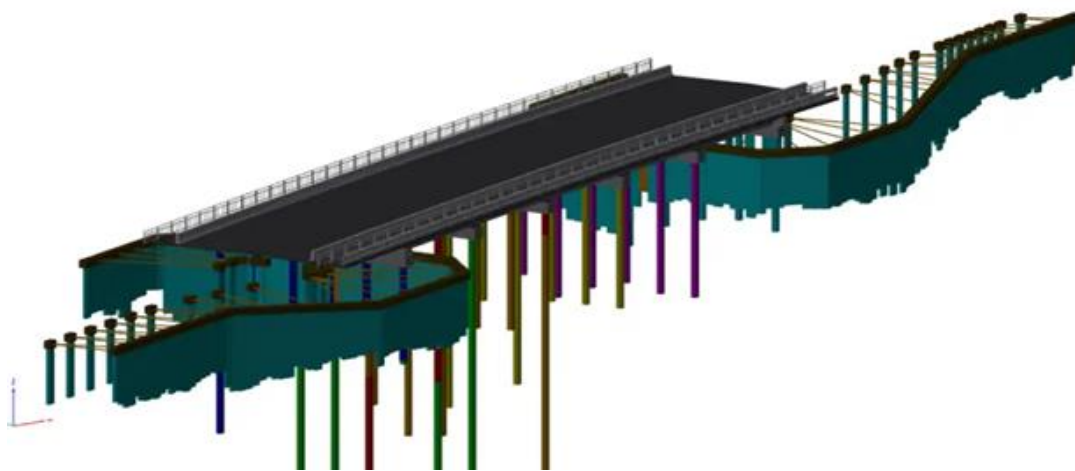


Figura 29. Representación 3D del proyecto AS-built del puente sobre el río Halls. (Engineering Management Institute)

La estructura de 5 vanos y 56,70 m de largo y 17,60 m ancho se compone de los siguientes elementos:

- Pilotes de hormigón pretensados con cables de fibra de carbono.
- Las vigas que soportan el tablero son vigas compuestas (HBC). La viga compuesta híbrida (HCB) se compone de un arco de hormigón autocompactante que sujeto en su extremo mediante cordones galvanizados. El arco ligado está encapsulado por una carcasa de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV).
- El uso de PRFV se encuentra en el puente en diversos elementos estructurales y no estructurales: barandillas, encabezados de los pilotes, en el tablero del puente y como refuerzo en las tablaestacas pretensadas con cables de carbono que funcionan como muros pantalla.

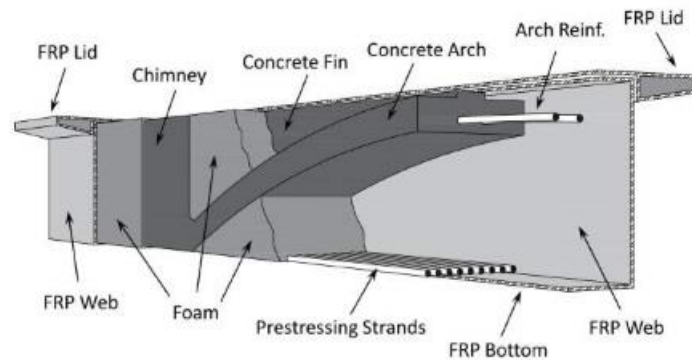


Figura 30. Sección viga HCB. (Engineering Management Institute)

Además del uso de refuerzos no corrosivos el proyecto incorpora hormigones curados con agua de mar ("SEACRETE"), junto con un aditivo retardador que compensa el alto contenido de cloruro. Con estos se consigue un hormigón más sostenible con mayor resistencia a edades tempranas.

Se realizaron elementos con pavimento asfáltico reciclado (RAP) y elementos con áridos provenientes de hormigón reciclado (Green-RCA). En esta línea se realizaron diferentes combinaciones en diferentes bloques para el estudio de su comportamiento durante su vida en servicio.

Con esta composición estructural, el coste inicial de ejecución es de un 30 % superior al de una tipología tradicional. Sin embargo, el gran potencial de estas estructuras en ambiente marino desde el punto de vista económico está en el mantenimiento y la prolongación de la vida útil. Por tanto, se espera que la vida útil de la estructura supere los 75 años y su coste total sea menor debido al ahorro en mantenimiento a lo largo de toda su vida útil.

Para realizar la valoración del coste económico-medioambiental a lo largo del ciclo de vida útil de la estructura con los distintos tipos de refuerzo se consideró una vida útil de las estructuras de 100 años. Para los refuerzos de acero y acero recubierto con epoxi se considera que para alcanzar una vida útil 100 años es necesaria una reconstrucción a los 75 años. En cuanto a la estrategia de mantenimientos, las estructuras FRP y de acero inoxidable solo necesitarán un mantenimiento preventivo durante su vida en servicio mientras que los aceros necesitarán reparaciones importantes como consecuencia de los procesos corrosivos.

ALTERNATIVAS AL ACERO EN ARMADO DE ESTRUCTURAS
DE HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO

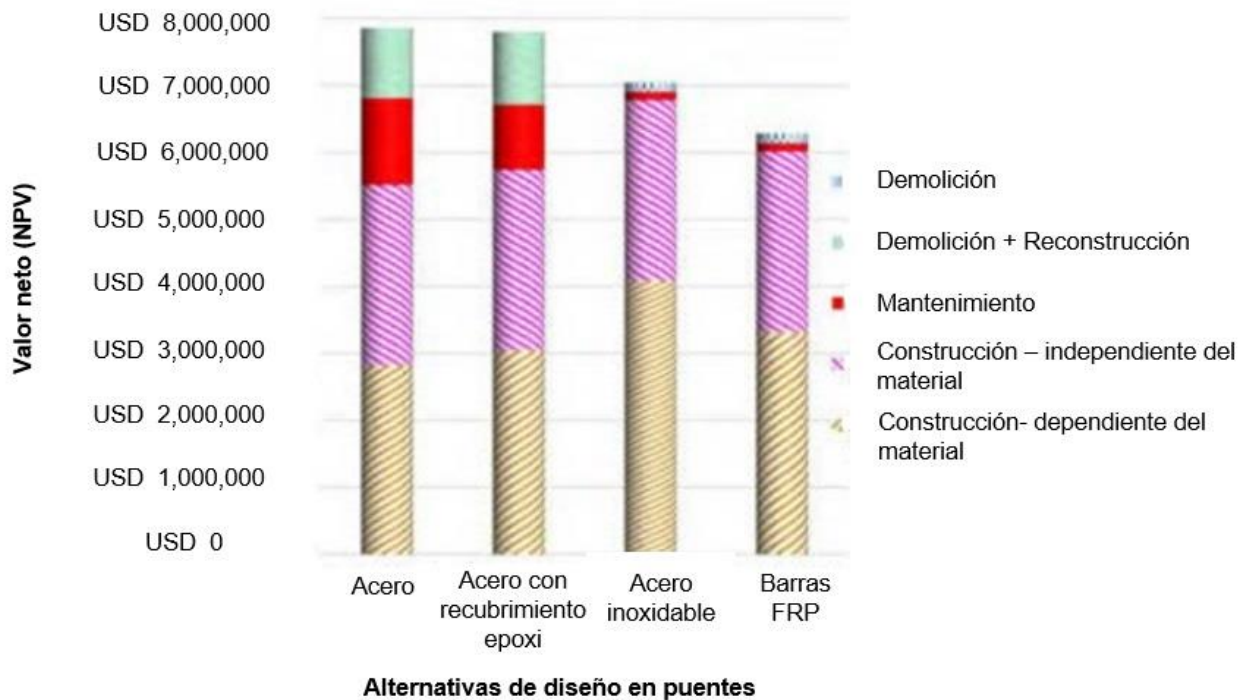


Figura 31. Estudio comparativo de costes del ciclo de vida empleando diferentes tipos de refuerzo. (*Journal of Construction Engineering and Management*, 148.)

El coste inicial de la estructura en este caso y como norma general es menor en la solución con acero. No obstante, las estructuras expuestas a procesos corrosivos a lo largo de 100 años necesitan de unas inversiones sustancialmente mayores que las realizadas con FRP que elevan su coste en torno al 20 % el coste que si sustituyendo el acero por FRP. Cabe añadir que al no requerir de grandes mantenimientos y menores medios en obra son más seguras a lo largo de su vida en servicio y durante su construcción con el coste social-económico no valorado que conlleva.

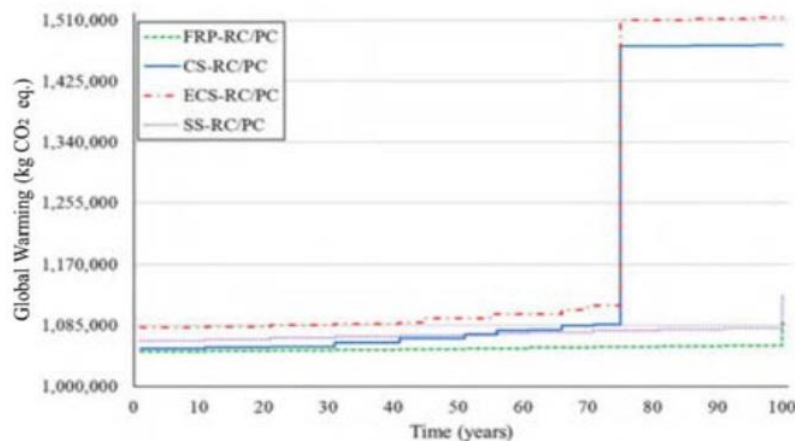


Figura 32. Estudio comparativo de huella medioambiental en un estudio LCA empleando diferentes tipos de refuerzo.

(*Journal of Construction Engineering and Management*, 148)

Desde el punto de vista de la afección medioambiental medido en kg CO₂ equivalentes emitidos a la atmosfera a lo largo del ciclo de su vida útil, al igual que en la valoración del coste económico, la durabilidad de las estructuras FRP es la característica diferencial. Durante el proceso de fabricación y construcción el uso de FRP tiene un impacto levemente menor que el uso de acero. Sin embargo, la suma de reparaciones y la reconstrucción considerada crea una gran diferencia en favor del uso de refuerzos FRP desde el punto de vista del impacto al medio ambiente.

Con el fin de proporcionar y desarrollar una herramienta o referencia con la que poder medir la sostenibilidad, la Comisión Europea desarrolló el ILCD International Life Cycle Data system, que desde 2005 ofrece un marco de referencia o guía que poder incorporar en los proyectos.

Un LCA debe comprender la fase de construcción y mantenimiento (toda la vida útil). La huella de carbono mide la cantidad de gases clasificados como “GHG”. Como medida de referencia principal en un LCA se toma el kg de CO₂ equivalente. Este sirve como parámetro de comparación en cuanto a la huella de carbono de los elementos a lo largo de su vida útil.

La ventaja de este método se sitúa en la facilidad de comparación entre diferentes tipologías de forma sencilla y visual.

Un estudio LCA realizado en islas Baleares analizó mediante este método un muelle de cajones durante todas sus fases de su vida útil. El muelle está dotado con una explanada de 32.000 m². En el estudio se consideraron los materiales y maquinaria involucrados en su construcción y mantenimiento.

En el análisis se considera un tercer factor relativo a la afección medioambiental directa de la actuación. En este ámbito entran las especies protegidas de la zona, afecciones por dragados u otras afecciones al ecosistema. La ley prohíbe su destrucción, y en casos como la familia de la posidonia exige su replantación en caso de ser necesaria su afección. Cabe decir, que las praderas de posidonia presentes en las costas mediterráneas absorben grandes cantidades de CO₂ contribuyendo a la vida de los ecosistemas oceánicos. No obstante, su replantación no es sencilla y conlleva grandes costes. Según el manual de Red Eléctrica, una plantación de 2 Ha de pradera en fragmentos rondara los 160.000 € de inversión.

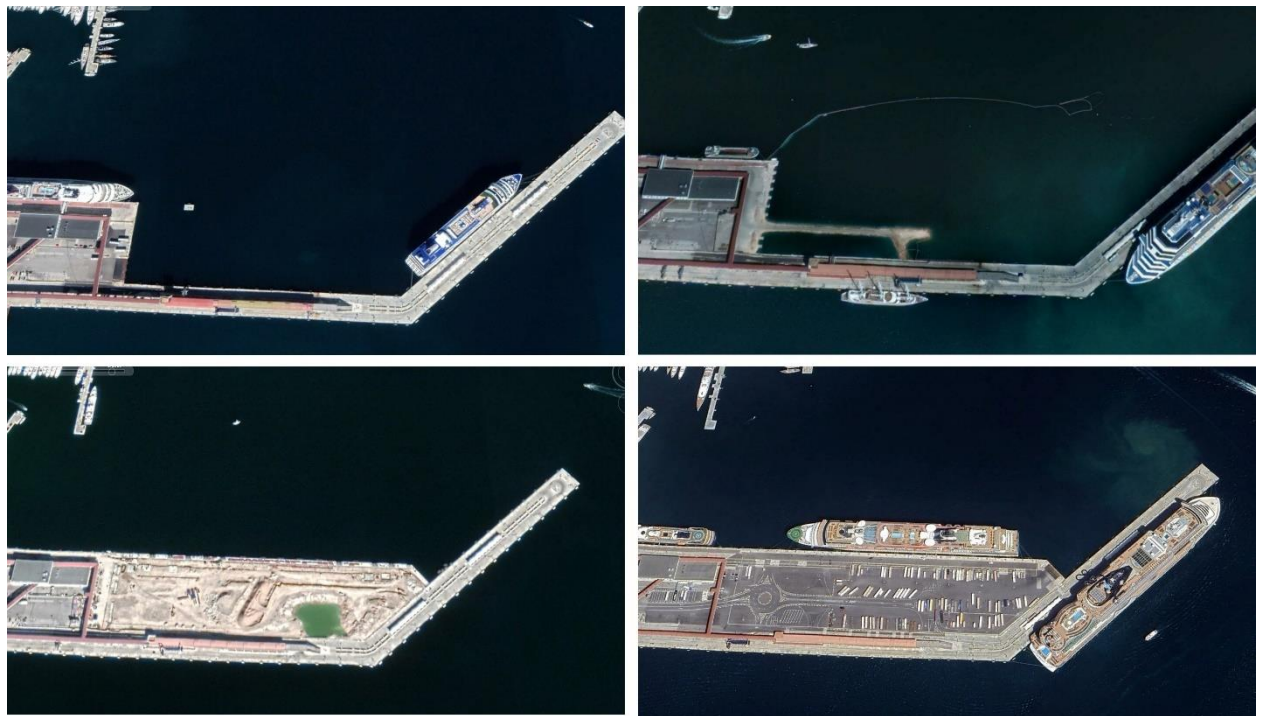


Figura 33. Muelle de cruceros de Palma de Mallorca. Fases de la actuación de ampliación del muelle. (GoogleEarth)

El modelo solo considera la huella causada por la maquinaria utilizada durante la fase constructiva y de mantenimiento. La fase de mantenimiento a lo largo de los 25 años considera una serie de actuaciones periódicas.

El muelle se encuentra en una zona de aguas abrigadas en un puerto con carrera de marea de 0,80 m en aguas abrigadas. Al tratarse de un proyecto en el que gran parte de los materiales provienen del material de dragado, el transporte o maquinaria fuera de obra se ve reducido de forma considerable en un área crítica de operación dentro de la ciudad.

De los 4 escenarios estudiados y de otros estudios relacionados, se encuentra que el porcentaje de emisiones se reparte en un rango del 75-80 correspondiente a la maquinaria y un 25-20 % restante a los materiales. Estos % incluyen el proceso de fabricación de los materiales que componen la mezcla. En la fase de mantenimiento la ratio 4-5/1 anterior se ve reducido. Esto se debe en gran parte a un buen plan de mantenimiento.

Un estudio realizado comparo los diferentes tipos de fibra con los refuerzos de acero en relación con la cantidad de CO₂ producida. Otro estudio de "Concrete Institute of Australia" · comparo el coste de los refuerzos de acero y de fibra de vidrio, concluyendo que su coste es menor. En este estudio se tuvo en cuenta la capacidad estructural requerida en una viga en los refuerzos y con ello ajustaba el volumen requerido en el proyecto.

9 MODELO PARA ANALISIS COMPETITIVO EN ARMADOS CON MATERIAL PRFV FRENTE AL ACERO TRADICIONAL

9.1 Introducción

El objetivo final del modelo es analizar las implicaciones que tiene en la geometría de los elementos estudiados, tanto de los elementos como de los armados, y a su vez analizar su coste económico y medioambiental a lo largo de la vida útil del elemento con el fin de ayudar en la toma de decisión del proyectista en la selección del material de refuerzo.

Se validará el diseño propuesto en cada solución según la indicado en la normativa ACI 440.11. Posteriormente se realizará un análisis económico y medioambiental sobre las diferencias entre el diseño en acero y PRFV.

El análisis comprenderá toda la vida útil de los elementos a lo largo de 100 años. Se divide en fase de construcción y de mantenimiento.

La fase constructiva comprende la valoración de la mano de obra, maquinaria y materiales, así como posibles afecciones de operación y ambientales. Para poder valorarlos adecuadamente se estima la programación de la obra y de los tajos representativos de la actuación.

En España, la mayoría de elementos ya construidas con refuerzos diferentes al acero consisten en espaldones más allá de cajones y los cubos realizados en LLaosteira.

Se analizarán elementos asimilables a vigas, espaldón, viga cantil con losa superior en un ambiente XS3. Estos elementos se caracterizan por tener una geometría característica que se encuentra en numerosos proyectos finalizados o en ejecución.

Los recubrimientos pueden ser un aspecto decisivo en cuanto al peso de los elementos, será especialmente destacado en elemento de gran esbeltez como los espaldones o los faldones típicamente dispuestos en muelles junto a la viga cantil. Además, estos elementos no suelen estar dispuestos en zonas donde deban soportarse grandes cargas sostenidas en el tiempo, siendo este uno de los aspectos menos cubierto por las normativas en el dimensionamiento de este tipo de perfiles. Se analizará la influencia de los recubrimientos en los diseños.

Se dimensionarán los recubrimientos siguiendo lo marcado en la ACI 440.11 en el caso de los elementos reforzados con PRFV y lo expuesto en el CE para los realizados con acero.

La resistencia a tracción de las barras de acero es de 510 MPa mientras que las de las barras de PRFV estudiadas, según especificación del fabricante es de 1020 MPa y en elementos curvos de 900 MPa. Los módulos elásticos del acero son 210.000 MPa. En el caso de las barras de PRFV el fabricante asegura 60.000 MPa y 50.000 MPa en elementos rectos y curvos respectivamente. El dimensionamiento de los elementos curvos deberá contar con una curva con radio mínimo $4 \varnothing$ de la barra.

En el CE la deformación de los elementos de acero se limita a un 0,01 % bajo carga de cálculo de tracción. En el caso de las barras de PRFV, en general y como veíamos en 4.3, se deberían esperar deformaciones mayores debido al comportamiento lineo-elástico del material para alcanzar la rotura.

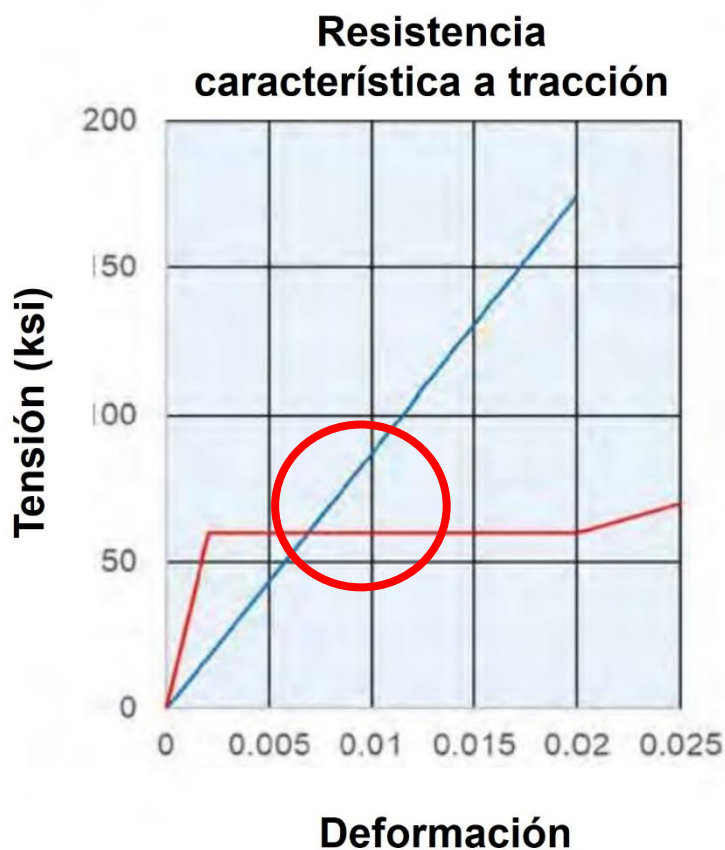


Figura 34. Ley de deformaciones del acero-PRFV en barras de armadura. (Brown et al., 2023)

Siendo así, muchos diseños se pueden ver condicionados por este factor. Se considera de este modo que las barras tienen la misma capacidad resistente si su sección tiene la misma área a efectos de dimensionamiento. Esta consideración se toma del lado de la seguridad dada la resistencia mayor de las barras de PRFV en esta zona limitante en los refuerzos de acero marcada con un círculo rojo e la imagen superior y al tipo de cargas esperable en los elementos estudiados.

Tabla 28. Especificaciones de barra de acero B 500 S. (Elaboración propia)

S.I	6	8	10	12	16	20	25	30	32	36
U.S.A	#2	#	#3	#4	#5	#6	#8	#9	#10	#11
(kg/m)	0,22	0,39	0,62	0,89	1,58	2,47	3,85	5,55	6,31	7,99

En consecuencia y dado que la densidad del acero es de 7.850 kg/m^3 mientras que la de las barras estudiadas 2.100 kg/m^3 , se podría decir que un kg de PRFV resiste 4 veces más que un kilo de acero.

Tabla 29. Especificaciones de barra de PRFV. (Elaboración propia)

U.S.A	#2	#3	#	#4	#	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11
EQUIVALENCIA S.I	6	10	12	13	15	16	20	22	25	29	32	36
(kg/m)	0,12	0,22	0,24	0,35	0,37	0,50	0,70	0,90	1,22	1,40	1,72	2,15
lb/ft	0,08	0,15	-	0,24	-	0,34	0,47	0,60	0,82	0,94	1,16	1,44

En las tablas anteriores se representa la caracterización de los refuerzos en cuanto al kilo de barra acero corrugado y de PRFV con resina del tipo vinilester. Cuando el $\varnothing$ aumenta su peso disminuye en proporción al acero. Esto se debe a la forma de trabajo de las capas de las barras de PRFV.

9.2 Bases de diseño

9.2.1 Tipología de elementos

Se toman como referencia para su análisis los siguientes elementos existentes en diferentes puertos en España de secciones de muelles o diques de proyectos ya realizados:

- Elemento tipo viga cantil
- Elemento tipo espaldón

9.2.2 Clasificación ambiental

En cuanto a la clasificación ambiental de los elementos estructurales reforzados con acero y acorde con el artículo 27 del Código estructural, la clasificación XS3 a los elementos estructurales de hormigón armado situados en la zona de carrera de mareas o en contacto con el oleaje y/o salpicaduras.

En artículo 43 del CE se indica que cualquier elemento en contacto con el agua de mar debe clasificarse como XA2.

Dentro de los tres tipos de elementos expuestos, la mayor exposición a los procesos corrosivos se ha comprobado la sufren los espaldones y las vigas cantiles. Esto se debe a la agresividad del ambiente al que están sometidos estos elementos. Otro factor importante es que tanto el canto

superior de la viga cantil como el de los espaldones tiene una geometría con esquina. Al existir dos caras o frentes de ataque de cloruros la exposición es mayor. Las patologías suelen surgir como consecuencia de las fisuras causadas por la corrosión del refuerzo que favorecen la pérdida del recubrimiento con el tiempo. A este efecto se suma la mayor capacidad de retención de humedad de las caras horizontales de los elementos que aceleran el proceso.

9.2.3 Tipo de cemento

Para la selección del cemento, en ambiente XS, el cemento debe ser MR, SR o SRC, según la RC-16. En el punto anterior 3.4.4, se expusieron los tipos de cemento más favorables en el diseño de elementos expuesto a ambiente marino a partir de lo marcado en el anejo 6 del CE. No obstante, el CE en su artículo 44 presenta la siguiente tabla que fija los recubrimientos en ambiente XS para 50 y 100 años de vida útil respectivamente. Siendo así, para la selección del cemento se debe recurrir a la siguiente tabla con el fin de evitar recubrimientos excesivos y desaconsejables desde el punto de vista constructivo.

Tabla 30. Tabla 44.2.1.1.b Recubrimiento mínimo (mm), c_{min} , para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Tipo de elemento	Cemento	Vida útil de proyecto (años)	Clase de exposición		
			XS1,	XS2	XS3
Hormigón armado	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	25	30	45
		100	30	35	50
	CEM II/B-S, B-P	50	30	35	65
		100	35	40	70
	Resto de cementos utilizables, según el artículo 28	50	40	45	*
		100	65	*	*

9.2.4 Áridos

Para determinar la cantidad de finos de la mezcla final se deberá seguir lo indicado en la tabla 30.4.1.a del CE. En ella se presentan las siguientes cantidades para la clase XS, XA y XM.

Tabla 31. Contenido máximo de finos en los áridos, extracto de tabla 30.4.1 a del CE. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

ÁRIDO	PORCENTAJE MÁXIMO QUE PASA POR EL TAMIZ 0,063 mm	CAT.	TIPOS DE ÁRIDOS
Grueso	1,50%	f1,5	Cualquiera
Fino	6%	f6	Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases de exposición XS, XD, XA, XF o XM ⁽¹⁾
	10%	f10	Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases de exposición XS, XD, XA, XF o XM ⁽¹⁾
	16%	f16	Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases de exposición X0 o XC y no sometidas a ninguna de las clases de exposición XA, XF o XM ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Consultar tabla 27.1.a del CE.

Además, se deberá cumplir lo indicado en el artículo 33. En él se limita la cantidad total de finos en el hormigón deberá ser inferior a 200 kg/m³. Esta cantidad es la resultante de sumar el contenido de partículas del árido grueso y del árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la componente caliza, en su caso, del cemento.

9.2.5 Armaduras

Para el dimensionamiento de las armaduras de acero se toman como referencia los realizados en proyectos ya ejecutados. La viga cantil se dimensiona tomando como referencia un armado diseñado para cargas de un patio off-shore. En el estudio del espaldón se toma como referencia el “Proyecto de recrecido del espaldón del dique de Levante” en el puerto de Alicante realizado en 2014 con una solución de refuerzos de acero tradicional. Para simplificar el estudio se considera el

espaldón de la imagen inferior correspondiente a la sección original del proyecto, como una sección compuesta por dos rectángulos superpuestos.

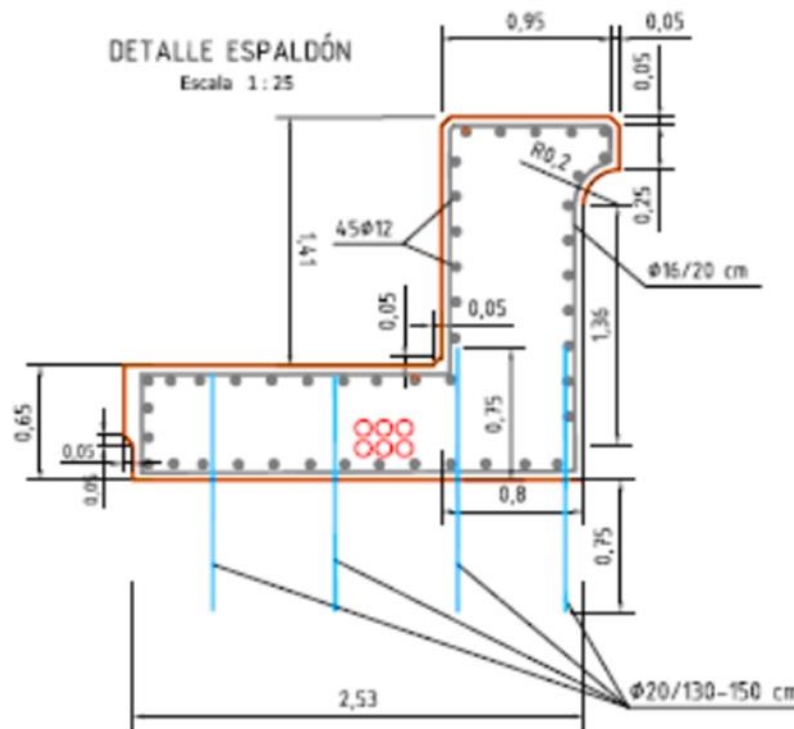
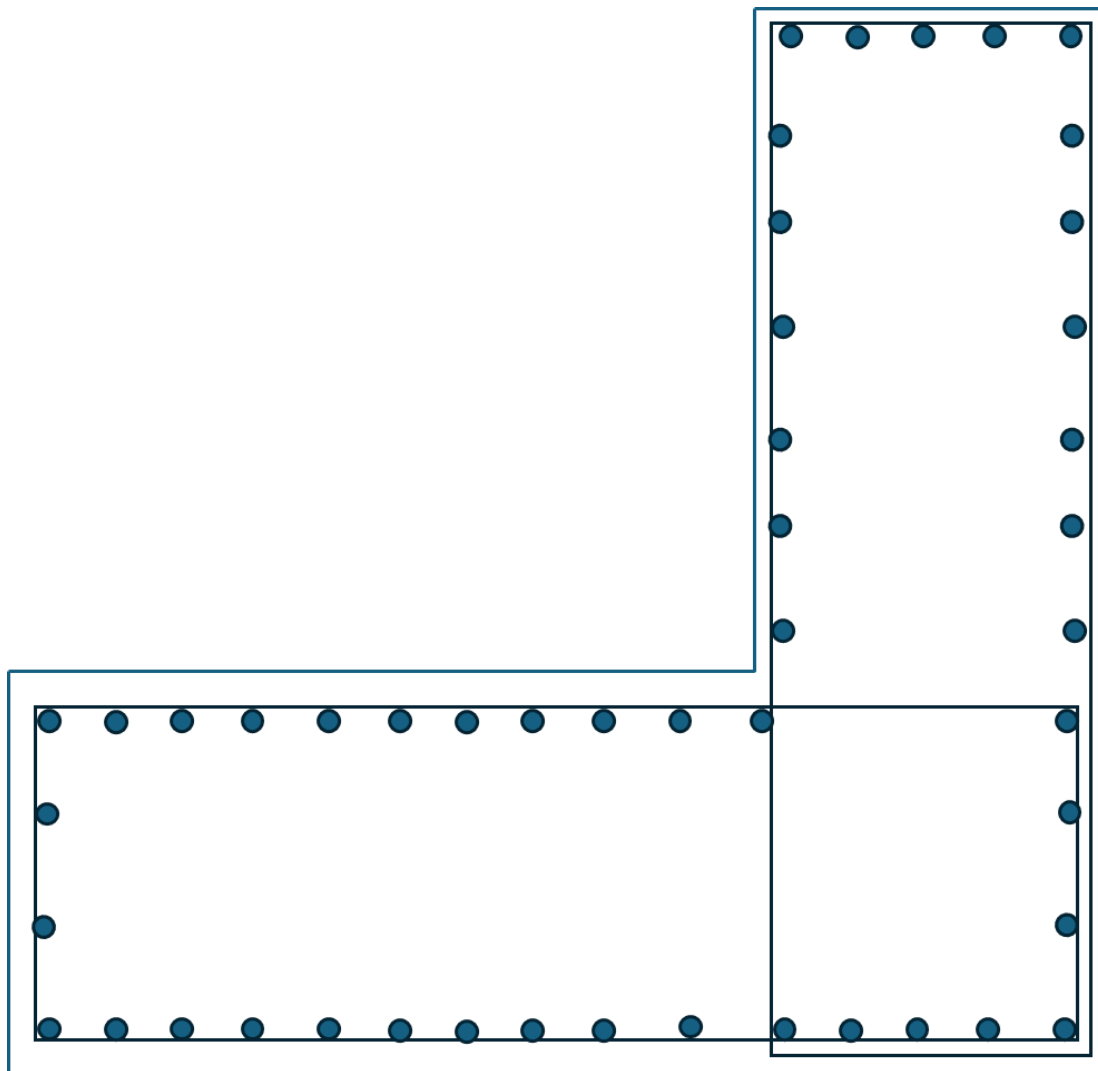


Figura 35. Sección de armado del espaldón del dique de Levante. (Autoridad Portuaria de Alicante, 2014).

Los armados en PRFV se han diseñado siguiendo los criterios marcados en 0 y 4.4 basados en la normativa ACI 440.11. Las armaduras longitudinales se arman siguiendo los criterios marcados para el acero cumpliendo lo marcado en el punto 25.4.2 de la ACI. En este caso el factor más restrictivo es la aplicación de 12"-inches (0.3048 cm) en la longitud de los anclajes de estas armaduras.

Para el diseño de los cercos, las limitaciones de forma suponen una modificación considerable en la geometría de estos con respecto a los armados en acero. Siguiendo este criterio se opta por la siguiente configuración en la geometría de los cercos estructurales en los diferentes elementos a estudiar.



*Figura 36. Esquema de geometría tipo de la disposición de las armaduras PRFV de los elementos estudiados.
(Elaboración propia)*

El hecho de no poder dar curvatura en obra a las barras y las limitaciones de forma que tienen ha condicionado la disposición de armados propuesta. A su vez la reducción de resistencia en elementos curvos puede ser un condicionante importante y que debe tenerse en cuenta en la fase de diseño. Se mantiene el $\emptyset$ de las armaduras con curvas considerando el margen mostrado en el círculo de trabajo marcado en Figura 34 dentro del rango de reducción de resistencias de un 30 % que aseguran los fabricantes en sus laboratorios.

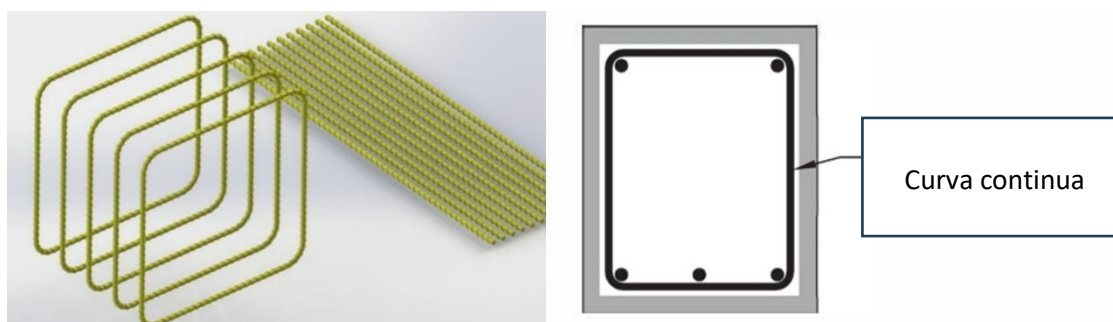


Figura 37. Geometría de armados según fabricante y ACI 440.11. (Pultron) y.(Brown et al., 2023)

9.2.6 Fase de construcción: programación de las obras

El dimensionamiento temporal de los trabajos de construcción se basa en las experiencias estudiadas en 4.5 y 4.6. También se considera como base para poder realizar el estudio comparativo las características de las barras en cada tipo de refuerzo. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 32. Comparativa de puesta en obra entre elementos reforzados con acero y PRFV. (Elaboración propia)

FASES PARA COLOCACIÓN DE ARMADURAS DE ACERO	VALORACIÓN PRFV /NOTAS
TRANSPORTE	4X más ligero. Puntos de fabricación más alejados debido a la “novedad” del material
RECEPCIÓN EN OBRA (GRUAS EN OBRA) PAQUETES DE 2.000 KG DE 12 M	4X menos tiempo o 4X medios menores de manipulación
ELABORACION: CORTE, DOBLADO.	Solo Corte (más rápido, seguro y con menos medios)
TRANSPORTE A TAJO EN OBRA (CAMIÓN Y GRUA)	4X menor
COLOCACIÓN (GRUA Y PERSONAL CUALIFICADO)	4X menor
VERTIDO DEL HORMIGÓN	Mejor comportamiento
ACOPIOS	Necesita de mayores precauciones para su acopio

9.2.7 Fase de operación y mantenimiento

En base a los estudios realizados y con la experiencia de proyectos y estudios anteriores se considera que, para un ciclo de vida útil de 100 años, los elementos estructurales de acero necesitarán de un mantenimiento correctivo importante debido a los procesos de corrosión. En cambio, en los elementos reforzados con PRFV este mantenimiento será del tipo preventivo caracterizado por actuaciones de pequeña envergadura.

Siguiendo este criterio y viendo que en muchos casos los espaldones y vigas cantiles necesitan de reparaciones importantes en un intervalo de 25-50 años desde su puesta en servicio, se considera la reconstrucción de este a los 50 años y 100 años. Se decide considerar su reconstrucción ya intentando ser realistas se considera más probable esta reconstrucción que su demolición. Desde el punto de vista del autor en 100 años la mayoría de los espaldones deberán dando abrigo a las instalaciones portuario en la mayoría de los casos y no la eliminación del entorno portuario.

Cabe comentar que las vigas cantiles sufren una menor exposición al ambiente marino que los espaldones. No obstante, la reducción de 15 mm en su recubrimiento y la mayor probabilidad de que se produzcan impactos de grúas, vehículos, barcos y otros que dañen el hormigón superficial que recubre las armaduras, causará reparaciones y/o una entrada temprana de los cloruros hacia las armaduras que repercutirá directamente en el coste de mantenimiento.

Debido a que el estudio comprende únicamente el elemento reparado del dique de Levante y la viga cantil de un muelle. Se debe considerar que en el caso de los elementos de acero los trabajos correctivos comprenden el 100 % y el 75 % del coste inicial de construcción.

En los elementos construidos en PRFV se considera un 5 % del coste inicial de construcción ya que no se espera ninguna intervención que conlleve la movilización de maquinaria utilizada durante la construcción. Este porcentaje, no es menor que el considerado en otros estudios como el mostrado en Figura 31.

9.3 Espaldón

La función principal de estos elementos dispuestos en la mayoría de los diques es controlar el rebase del oleaje. Por tanto, se encuentra en una zona de exposición alta al oleaje clasificada como XS3+XM3 por esta causa. En este estudio no se pretende diferencia entre diques en talud y vertical, no siendo objeto de análisis las características particulares del diseño del espaldón para cada tipología de diques.

Tabla 33. Condicionantes al hormigón en espaldones según CE. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

HORMIGÓN EN ESPALDÓN DE DIQUE (XA2 XS3 XM3)	
APERTURA DE FISURA	0,1 mm
RESISTENCIA MÍNIMA DE PROYECTO FCK	25 Mpa
RESISTENCIA CARACTERÍSTICA MÍNIMA ESPERADA EN EL HORMIGÓN	35 Mpa
MÁXIMA RELACIÓN AGUA-CEMENTO	0,45
TIPO DE CEMENTO	MR, SR o SRC, según Instrucción RC-16
CONTENIDO MÍNIMO DE CEMENTO (KG/M ³)	350
PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN	Máxima ≤ 30 mm
	Mínima ≥ 20 mm
ÁRIDO FINO	Cuarzo o mayoritariamente de naturaleza cuarcítica, pudiendo emplearse otros áridos que tengan un comportamiento equivalente respecto a su desgaste
ÁRIDO GRUESO	Coeficiente de Los Ángeles <30

En cuanto al contenido máximo de cemento, este dependerá del tamaño máximo del árido debiendo cumplir lo indicado por el CE en la siguiente tabla:

Tabla 34. Contenido máximo de cemento en clases de exposición XM. (Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, 2021)

Tamaño máximo del árido (mm)	CONTENIDO MÁXIMO DE CEMENTO (kg/m ³)
10	400
20	375
40	350

En cuanto al recubrimiento exigido en este ambiente siguiendo el criterio indicado en Tabla 13 y en el artículo 44 del CE, el recubrimiento para la clase XS3 será de un espesor de entre 45 y 70 mm. Siguiendo el mismo criterio indicado en 3.8 Recubrimientos para la clase XM3 se deberán añadir 15 mm adicionales al espesor indicado en la tabla anterior.

Siendo así el recubrimiento mínimo según el tipo de cemento utilizado oscilará entre los 65 y los 85 mm. A estos habrá que sumarles otros 5 o 10 mm adicionales en función del control en obra según en Tabla 14. En el caso de este espaldón el recubrimiento es de 50 mm al haberse diseñado bajo la normativa anterior vigente EHE-08.

Para la elección de la geometría en fase de proyecto, el Cedex realiza la siguiente recomendación: “Las geometrías deben ser lo más sencillas posibles, utilizando superficies planas sencillas y evitando curvaturas innecesarias.

Cumpliendo con los condicionantes marcados anteriormente para un recubrimiento máximo de 65 mm la composición de los cementos a utilizar es la siguiente:

Tabla 35. Cemento utilizable según CE para un recubrimiento máximo de 65 cm en ambiente XS3+XM. (Elaboración propia)

ACERO				
UNE-EN 197-1				
DENOMINACIÓN Y DESIGNACIÓN		COMPONENTES PRINCIPALES Y PROPORCION EN MASA (RANGO EN %)		
Cementos Portland con cenizas volantes	CEM II/B-V,	Clinker 65-79	Ceniza volante sílicea 21-35	Componentes minoritarios 0-5
Cementos Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	Clinker 90-94	Humo de sílice 6-10	Componentes minoritarios 0-5
Cemento de horno alto resistente a sulfatos	CEM III/A,	Clinker 35-64	Escoria de horno alto 36-65	Componentes minoritarios 0-5
Con escoria de alto horno	CEM III/B,	Clinker 20-34	Escoria de horno alto 66-80	Componentes minoritarios 0-5
Cementos puzolánicos	CEM IV,	Clinker 45-64	Ceniza volante sílicea 36-55	Componentes minoritarios 0-5

*Requiere la utilización de aditivos que mejoren las propiedades del hormigón frente al ataque a los cloruros

La ACI 440.11 especifica la utilización de cementos con resistencia moderada a los sulfatos en hormigones en ambiente marino.

Tabla 36. Cemento requerido según ACI 440.11.22 para un recubrimiento máximo de 65 cm en ambiente XS3+XM.

(Elaboración propia)

GFRP o PRFV			
ACI_440.11			
Clase de exposición	Tipos de cemento		
	ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157
Moderate sulfate	II	IS(MS), IP(MS)	MS

*No requiere la utilización de aditivos que mejoren las propiedades del hormigón frente al ataque a los cloruros

Para los armados se toma como referencia los armados mostrados en Figura 35 y Figura 36 para acero y PRFV respectivamente. Con estos condicionante se ha realizado un armado tipo adaptable para las diferentes geometrías.

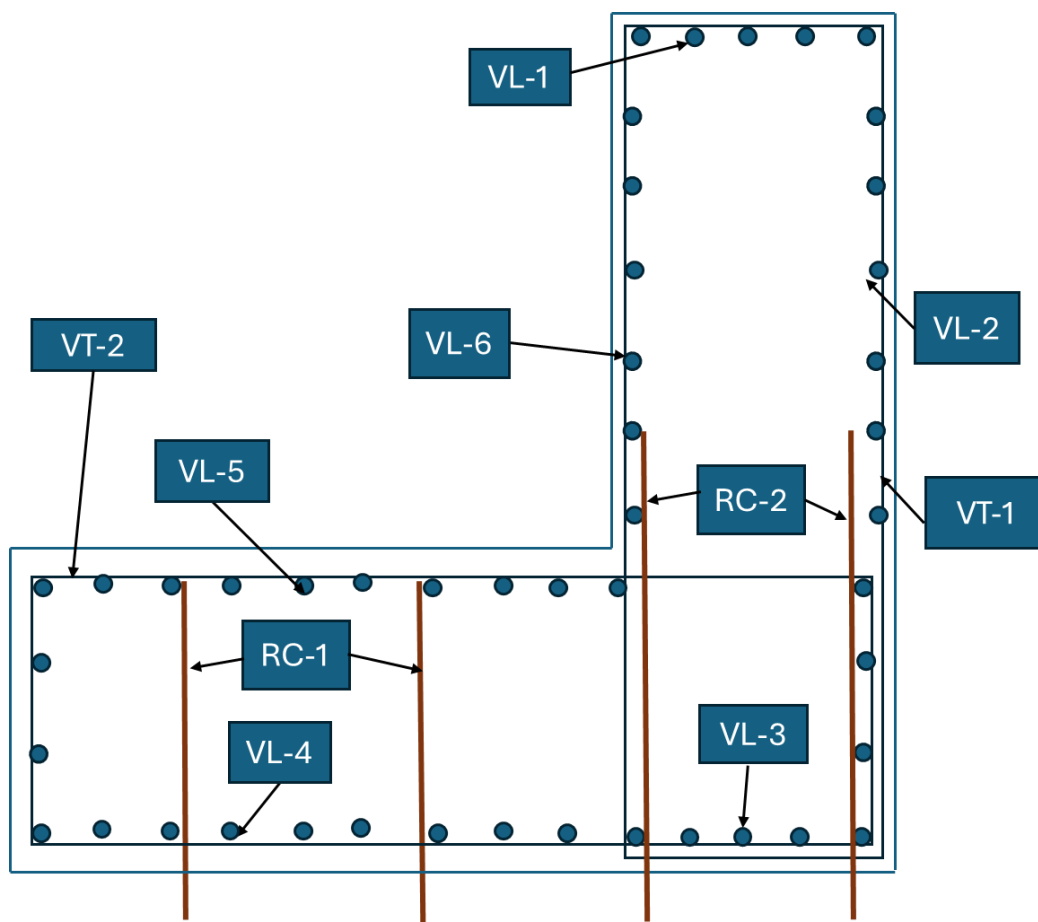


Figura 38. Sección de armados de la solución de FRP. (Elaboración propia)

El armado en acero mantiene el diseño original del espaldón de Alicante. Debido a los condicionantes geométricos que presentan las armaduras en PRFV se ha tenido que modificar la geometría de la armadura de piel.

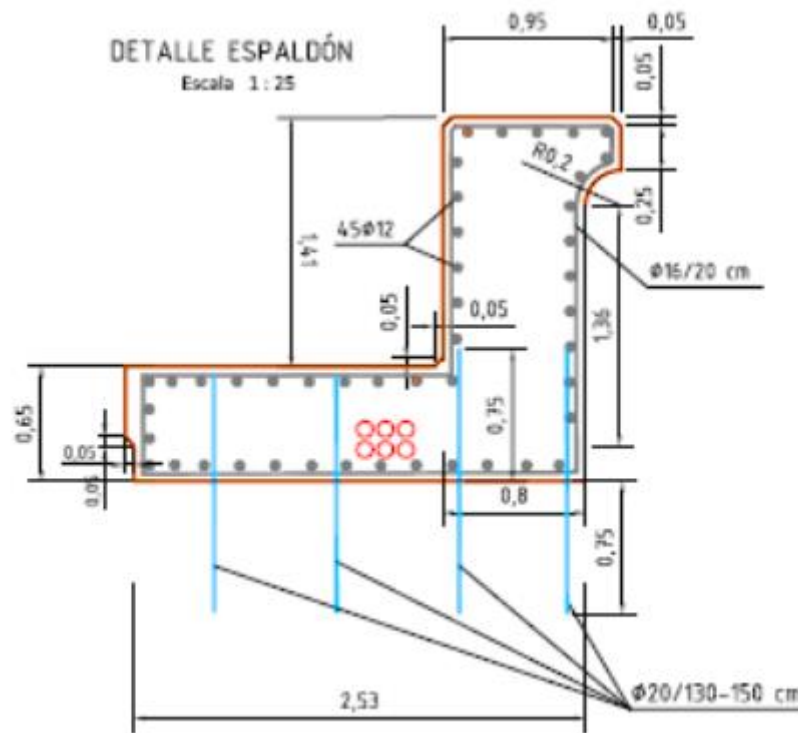


Figura 39. Sección de armados de la solución de acero. (Puerto de Alicante)

El modelo de armado realizado ha mostrado como manteniendo el diámetro de las barras para un espaldón de 200 m. Se requiere mayor longitud de armado para la solución en PRFV debido a los condicionantes en la geometría de las barras curvas.

No obstante, y a pesar de la mayor longitud de barra que ha requerido el diseño en PRFV del orden de un 20 % mayor. El menor peso del material ha dado una relación en el peso total de los armados de 315 % mayor en el diseño con acero.

La variación de espesor entre el espaldón armado en acero diseñado con la EHE-08 y el CE implica reducciones de armado inferiores al 1 %.

En la comparación entre los dos tipos de armado se han obtenido los siguientes resultados para la fase de construcción y a lo largo de los 100 años desde el punto de vista de la utilización de material de refuerzo (kg) empleado en armaduras en el proyecto (Ministerio de Fomento, 2008):

Tabla 37. Comparativa de utilización de armaduras durante 100 años en el espaldón tipo. (Elaboración propia).

	Fase construcción inicial		Vida útil (100 años)	
	Peso en Kg	(%)-EHE-08	Peso en Kg	(%)-CE
(CE) cada 65 años	30.958,14	1,00	83.586,97	1,00
(ACI) PRFV cada 100 años	9.858,30	0,32	19.716,60	0,24

En el dimensionamiento se considera el criterio marcado en 9.2.7 para una estructura cuyo estado después de 100 años es similar a la inicial. Se considera así, la reconstrucción del espaldón a los 65 y 100 años respectivamente.

No obstante, y sin considerar el precio de las barras de PRFV, la menor utilización de material se traduce en una relación 3/1 en la fase constructiva que se ve multiplicada durante su vida útil llegando a relaciones de 5/1.

Los modelos realizados del para cada tipo de material se pueden encontrar en los Anexos I y II.

9.4 Viga cantil + faldón

Las limitaciones en el diseño de este elemento son los mismos que para el espaldón salvo los requerimientos que implica la clasificación XM en espaldones de hormigón armado.

Siendo así el recubrimiento mínimo exigible en este ambiente según lo indicado en Tabla 13. El recubrimiento para la clase XS3 estará en un rango de entre 45 y 70 mm. Esta reducción proviene de los 15 cm adicionales que incorpora el CE para la clase XM3.

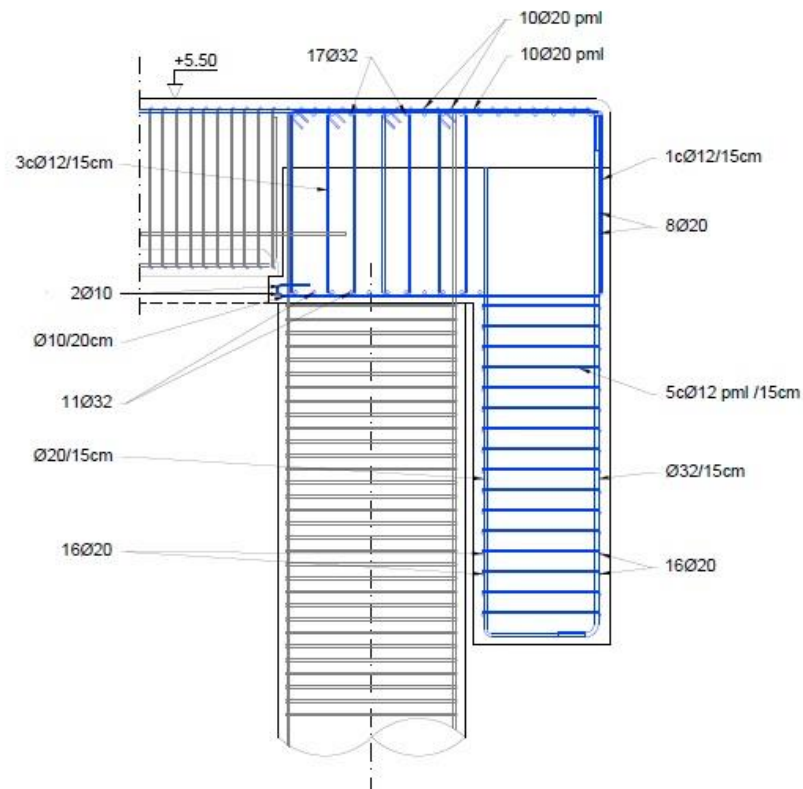


Figura 40. Detalle de armado viga longitudinal. (Elaboración propia)

La geometría propuesta en las armaduras de refuerzo del acero, son geometrías que pueden reproducirse para los diseños en PRFV. Las pequeñas diferencias en la geometría de las armaduras provienen de los cierres de los cercos de 0,10 m en el acero frente a un cerco prefabricado que no necesita de estos cierres. La longitud de anclaje necesaria se considera de 0,30 y de 0,3048 cm respectivamente para los armados de acero y PRFV respectivamente. Siendo una diferencia despreciable a efectos de cálculo.

Por tanto, las diferencias en kg/m del material son causa directa de la densidad de estos.

No obstante, se ha podido comprobar la viabilidad de este tipo de diseños desde el punto de vista estructural y geométrico cumpliendo las especificaciones normativas y recomendaciones de los fabricantes.

Los resultados obtenidos en el modelo del espaldón realizado para cada tipo de material de armado se pueden encontrar en los Anexos III y IV.

9.5 Valoración económica

En el modelo realizado, los resultados para cada tipo de refuerzo obtenidos con los que cuantificar estas reducciones se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 38. Cantidades de material requeridas para cada elemento según el material de refuerzo. (Elaboración propia)

	Espaldón			Viga con faldón		
	Volumen de hormigón (m ³)	Peso armaduras (kg)	Cuantía (kg/m ³)	Volumen de hormigón (m ³)	Peso armaduras (kg)	Cuantía (kg/m ³)
ACERO	596,80	30.958,14	51,87	1.250,00	162.141,13	129,71
PRFV	596,80	9.858,30	16,52	1.250,00	43.488,01	34,79

En la valoración económica se han utilizado precios de un fabricante del mercado asiático que cumple las especificaciones ASTM para este tipo de material. El fabricante facilita un precio inferior a 2 €/ kg para barras con un Ø de entre 8 y 45 mm. El precio de barra corrugada de acero B500-S según el generador de precios y dependiendo de la comunidad oscila los 1,02 €.

Con estos precios y las necesidades armado en cada tipo de material la competitividad económica del refuerzo de PRFV se puede producir desde la fase de proyecto

A partir de estos resultados, y utilizando la descomposición y coste que propone la base de datos del generador de precios de CYPE, se desglosa en materiales y coste de puesta en obra para cuantificar el ahorro total de la puesta en obra para la construcción de cada elemento de hormigón estudiado según el material de las armaduras:

Tabla 39. Resumen de costes según material de refuerzo en el espaldón L=200 m. (Elaboración propia)

	Espaldón				
	Coste hormigón (material)	Coste hormigón (puesta en obra)	Coste armado (material)	Coste de puesta en obra armado	Total del elemento
ACERO (€)	90.349,55	6.105,26	31.577,30	18.884,47	140.811,32
PRFV (€)	79.129,71	6.105,26	18.011,24	6.013,56	103.154,52
Relación P/A	0,88	1,00	0,57	0,32	0,73

Para el cálculo del precio del material hormigón se ha utilizado como referencia el precio del material propuesto por el generador de precios para cada tipología de hormigón requerido según el Código estructural como se ha tipificado anteriormente. En el caso del hormigón armado con PRFV se ha considerado un hormigón XA2.

En el coste de armaduras no se han considerado los elementos de sujeción ni los separadores, siendo el coste de la barra repercutido directamente para cada material. En el coste de puesta en obra de las armaduras de PRFV se ha considerado el obtenido en el acero multiplicado por un coeficiente. Este coeficiente se ha obtenido por medio de la relación directa de kg entre cada tipo de armado.

Tabla 40. Resumen de costes según material de refuerzo en la viga con faldón L=200 m. (Elaboración propia)

	Viga con faldón				
	Coste hormigón (material)	Coste hormigón (puesta en obra)	Coste armado (material)	Coste de puesta en obra armado	Total del elemento
ACERO (€)	177.700,00	12.787,50	165.383,95	98.906,09	454.777,54
PRFV (€)	165.737,50	12.787,50	79.321,31	26.527,69	284.374,00
Relación P/A	0,93	1,00	0,48	0,27	0,63

Para obtener el coste total a lo largo de la vida útil del elemento aplicaremos unos coeficientes basados en el criterio de mantenimiento y durabilidad seguido en el capítulo 8. Siendo así se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 41. Resumen de costes para 100 años de vida útil manteniendo la estructura en servicio. (Elaboración propia)

	Espaldón (construcción)	Espaldón (100 años)	Viga (construcción)	Viga (100 años)
ACERO (€)	140.811,32	380.190,56	454.777,54	1.227.899,36
PRFV (€)	103.154,52	206.309,03	284.374,00	568.747,99
Relación P/A	0,73	0,54	0,63	0,46

Los resultados obtenidos son acordes a los obtenidos en otros estudios como el llevado a cabo por (Nikhil Garg & Sandeep Shrivastava, 2019).

9.6 Valoración medioambiental

Para valorar la diferencia que supone en término de huella medioambiental la utilización de los diferentes tipos de refuerzo propuestos, se caracterizarán las diferencias que supone un tipo de diseño u otro.

La elección del tipo de cemento tendrá una gran influencia en la huella de carbono del hormigón, siendo menor en los cementos con alto contenido de escoria en su composición (datos base de datos ICE):

Tabla 42. Huella de carbono de diferentes cementos para ambiente marino. (Elaboración propia)

Factor de carbono CEMENTO- kg CO ₂ e/kg				
BASE DE DATOS ICE	Cement CEM II/B-V - 28% fly ash siliceous - Portland-fly ash cement	Cement CEM III/B - 73% GGBS - Blast furnace cement	Cement CEM III/A - 50.5% GGBS - Blast furnace cement	Cement CEM IV/A - 23% cement replacement - Pozzolanic cement
CÓDIGO ESTRUCTURAL	Cementos Portland con cenizas volantes (Ceniza volante sílicea 21-35)	Con escoria de alto horno (Escoria de horno alto 66-80)	Cemento de horno alto resistente a sulfatos (Escoria de horno alto 36-65)	Cementos puzolánicos (Ceniza volante sílicea 36-55)
kg CO ₂ e/kg	0,66	0,47	0,28	0,71

Con el fin de cuantificar esta reducción se utiliza como referencia el trabajo realizado por (Saravia de Los Reyes et al., 2020), sobre “Huella de carbono en una infraestructura portuaria a partir de un LCA”. En este trabajo, visto anteriormente en el capítulo 8, se estudian diferentes escenarios. En la composición de su estudio, se divide la fase constructiva y la fase de mantenimiento. Debido a las diferentes consideraciones tomadas en la fase de mantenimiento se utilizará como referencia la fase constructiva.

En él se expone y comprueba con otros estudios estos resultados como en la construcción de obra portuaria la maquinaria y los materiales tienen un consumo medido en kg CO₂-eq que se reparte en un rango de 80-85 % y 15-20 % respectivamente.

En estructuras diseñadas para ambiente marino, los aditivos son un componente importante. Este a pesar de representar un 1 % de la mezcla de forma aproximada conlleva un porcentaje de huella

de carbono medido en kg CO₂-eq mucho mayor del que supone en la dosificación. De forma un tanto genérica utilizaremos una tabla gráfica facilitada por Sika para cuantificar el potencial de calentamiento global [kg CO₂-eq.] para 1 m² de hormigón.

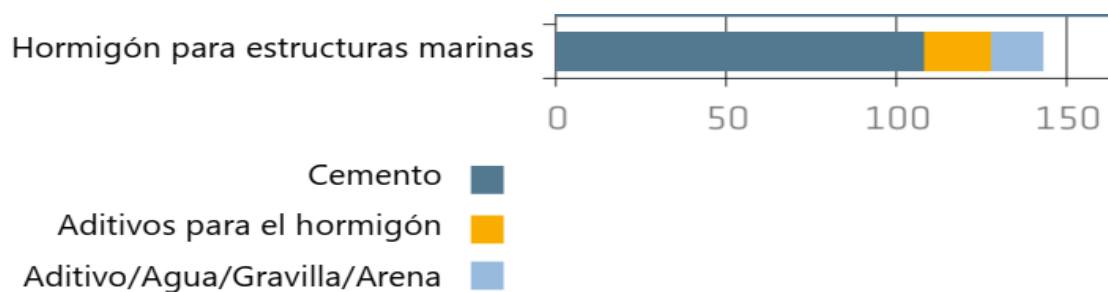


Figura 41. Evaluación del ciclo de vida (LCA) en kg CO₂-eq. (Sika Mix Design Tool)

De la imagen superior se concluye como los aditivos representan en torno a un 10-15 % de la huella medioambiental total de la mezcla final. Este porcentaje podrá eliminarse cuando diseñamos con PRFV ya que estos aditivos como hemos revisado en 3.7 se incorpora en la mezcla para protegerla de los cloruros principalmente. Por tanto y a modo teórico, basándonos en (Saravia De Los Reyes et al., 2020) del 15-20 % de la huella que representan los materiales, Obtendremos un ahorro de al menos un 10-15 %.

A su vez a lo largo de 100 años ha quedado demostrado que la cantidad de hormigón empleada en trabajos de mantenimiento y/o reconstrucción según el tipo de refuerzo será mucho mayor en estructuras reforzadas con acero.

En cuanto a las armaduras, la huella de carbono en barras de acero acorde a los datos del ICE se estima en 1,55 kg CO₂-eq por kg de refuerzo de acero empleado. Las barras de fibra de vidrio se componen de forma general en un 80 % de contenido de fibras y un 20 % de resinas.

Las barras de alta resistencia utilizadas en el dimensionamiento de los modelos, según el fabricante y basado en el proceso de fabricación de barras de acero, asegura que la huella de carbono de sus barras es un 15 % por ciento menor que el de los refuerzos de acero. Esta medida se basa en el kg de material utilizado en refuerzo de armaduras. Otros estudios como el llevado a cabo por (Nikhil Garg & Sandeep Shrivastava, 2019) determinaron en su estudio de vigas reforzadas que la utilización de PRFV supone un 43 % menos de emisiones en comparación al acero.

En este estudio también se estudiaron otro tipo de refuerzos mencionados anteriormente en el estado del arte como son las barras realizadas con basalto y carbono obteniendo resultados de en torno a un 50 % de reducción. Los resultados que obtuvieron se muestran en la siguiente imagen.

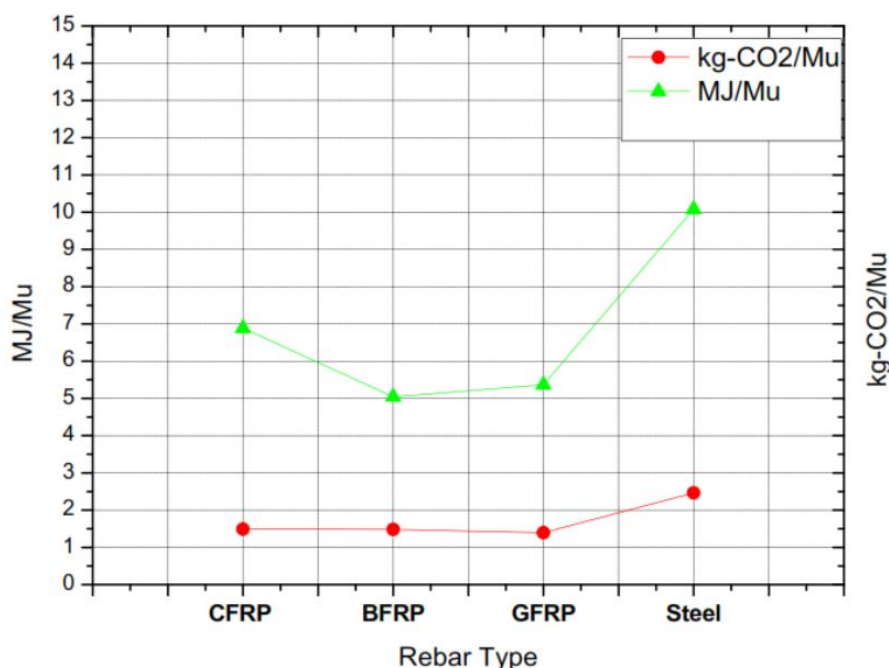


Figura 42. Gráfica de resultados de estudio comparativo en vigas reforzadas con barras de diferentes materiales. (Nikhil Garg & Sandeep Shrivastava, 2019)

En general y basándonos en la Tabla 32, se puede concluir que la huella de carbono producida durante la fase de obra será mucho menor en refuerzos PRFV. La menor duración de las obras, el menor consumo energético en obra para transformar las barras y los menores medios de transporte requeridos por las propiedades inherentes del material que compone las barras reducirá en enorme medida la huella producida.

Tomando el reparto expuesto anteriormente como referencia, del 80-85 % que se refiere a la maquinaria requerida, y a modo teórico, ya que para cada obra deberá estudiarse la distancia desde el punto de fabricación entre otros (factor a considerar debido a la mayor distancia de los puntos de fabricación de barras PRFV con respecto al acero), se obtienen las siguientes reducciones en coste de puesta en obra. Las relaciones obtenidas se pueden asimilar a la reducción medioambiental esperable en los recursos necesarios para la puesta en obra del hormigón y sus armados.

Tabla 43. Coste de recursos para puesta en obra del hormigón según tipo de armado. (Elaboración propia)

	Coste de recursos para puesta en obra del hormigón según tipo de armado			
	Espaldón (construcción)	Espaldón (100 años)	Viga(construcción)	Viga (100 años)
ACERO (€)	24.989,73	67.472,27	111.693,59	301.572,69
PRFV (€)	12.118,83	24.237,65	39.315,19	78.630,37
Relación P/A	0,48	0,36	0,35	0,26

Las relaciones obtenidas en la maquinaria (80-85 %) están en un rango del 52 % y el 65%. Si nos limitamos a los tajos relacionados con la disposición y trabajo con armaduras para la ejecución de elementos de hormigón podemos cuantificar estas en un rango entre el 67 % y el 72 % en función del peso total de armaduras requerido. No obstante, se deberán estudiar de forma específica para cada proyecto según la disponibilidad de medios y las limitaciones de transporte.

10 CONCLUSIONES

El estudio realizado con los parámetros establecidos ha conseguido demostrar como los materiales que pueden sustituir al acero para uso en armaduras de hormigón, en concreto, las barras realizadas con polímeros reforzados con fibra de vidrio o PRFV son competitivos como elementos de refuerzo de elementos de hormigón. Además de funcionar como refuerzos pueden aportar ventajas económicas y medioambientales en diversos proyectos de obra marítima. No obstante, esto deberá comprobarse para cada proyecto de forma específica.

El desarrollo del trabajo ha permitido sacar las siguientes conclusiones sobre la utilización de este tipo de refuerzos en obra portuaria:

- Se ha podido comprobar en la realización del modelo tipo viga cantil y espaldón como la longitud y tamaño de los elementos no influye en la competitividad de los refuerzos bajo el criterio de dimensionado seguido en la zona de trabajo de deformaciones del acero. No obstante, la movilización de menores medios en pequeñas reparaciones si puede ser una gran ventaja competitiva para refuerzos PRFV con respecto al acero.
- El ataque de los cloruros condiciona todos los diseños realizados con acero y aun así la corrosión acaba produciéndose a lo largo de 100 años de vida útil, requiriendo grandes reparaciones. Los PRFV y los FRP en general, no requieren ser diseñados frente al ataque de los cloruros, pues son inoxidables, y requieren un mantenimiento prácticamente nulo a lo largo de sus 100 años de vida útil.
- Desde el punto de vista de la dosificación del hormigón, la reducción o eliminación de los aditivos y la menor restricción en la utilización de cementos por las normativas permite una reducción económica y de huella medioambiental de los elementos ejecutados. Esta reducción es aún mayor en los medios necesarios durante la puesta en obra.
- La herramienta creada para dimensionar armados en función de la geometría del elemento incluida en los anexos permite valorar la competitividad económica de los diferentes refuerzos estudiados según la localización y los precios de armaduras disponibles en cualquier geografía para los diseños propuestos. Una de las conclusiones extraídas que los volúmenes de armado son semejantes a pesar de las restricciones geométricas, siendo la densidad de los refuerzos la que marca una gran diferencia en las cuantías necesarias.

- Desde el punto de vista de la geometría de los elementos, la reducción de recubrimientos del orden del 50 % permite pequeñas reducciones en la cantidad de hormigón utilizado. En casos en que la geometría de los elementos este muy limitada por otros factores, esta reducción puede ser muy importante para el encaje de los elementos.

En elementos rectangulares como la sección superior de un espaldón o un faldón, cuya geometría es esbelta, la reducción de 35 mm en el espesor del recubrimiento conllevará ahorros del orden del 6-7 % en el hormigón utilizado considerando el ancho de la sección de 1 m. Esta ratio se verá reducido de forma lineal con el aumento de la anchura del elemento.

A lo largo del trabajo realizado se han podido sacar otras conclusiones sobre la competitividad de los refuerzos de PRFV y de acero a considerar de forma más específica en cada proyecto:

- Tanto los espaldones como los faldones son elementos expuestos al oleaje durante su construcción. Generalmente estos elementos tienen una longitud considerable no ejecutable en una jornada de trabajo exigiendo medios auxiliares que encarecen su ejecución. La posible exposición de las armaduras a la salpicadura o contacto con agua de mar, especialmente en zonas de carrera de marea elevada es más ventajosa la colocación de armados de PRFV frente al acero en estos elementos. Cabe añadir que existen estudios de curado del hormigón con agua de mar, demostrando que mejoran las resistencias iniciales de este siendo una opción de ahorro económico-medioambiental en la utilización de refuerzos alternativos al acero.
- Otro factor para tener en cuenta de forma específica en cada proyecto es la posible interferencia en las zonas de operación portuaria. Los elementos tipo viga y espaldón estudiados en el modelo suelen necesitar trabajos de rehabilitación o reconstrucción previa demolición antes de acabar su vida útil esperada. Esto implica que la operación portuaria puede verse interferida o incluso parada por estos trabajos.

Además, en caso de interferencia y/o parada, el menor tamaño y despliegue de medios necesarios mostrado en la Tabla 32 muestra como esta se puede considerar del orden de $\frac{1}{4}$ tanto en espacio como en tiempo para los tajos previos al hormigonado. Este factor deberá tenerse en cuenta de forma particular para cada proyecto como se hizo en la construcción de la pasarela de acceso al faro de Cudillero. Otro ejemplo claro que muestra este tipo de ventaja competitiva es el mostrado en la ejecución de losas prefabricadas en el puerto Rotterdam 4.6.

- Desde el punto de vista económico de las barras realizadas en PRFV, el fabricante cuyas especificaciones se incorporan en 9.2, asegura que los costes de fabricación de las barras se han reducido un 50 % en los últimos años.

En cambio, y según datos de la cámara de comercio, el precio del acero ha evolucionado entre enero de 2010 y los últimos cinco años a precios de entre 3 y 4 veces superiores.

Esta tendencia muestra como los refuerzos en PRFV son cada vez más competitivos desde el punto de vista económico reduciendo en un orden de 8 veces la diferencia de precio en los últimos 15 años.

- Las restricciones geométricas existentes no son un gran condicionante en la mayoría de los diseños teóricos. No obstante, la limitación de ciertas geometrías puede condicionar algunos diseños. Este problema puede verse reducido o eliminado si desde la primera fase de los diseños se considera la utilización de PRFV en los armados.
- El avance de las normativas en todo el mundo, así como de los avances tecnológicos de los fabricantes favorecerá la optimización de los diseños con el consecuente ahorro medioambiental y económico que supone. Así mismo dará seguridad a los proyectistas para incorporar estos diseños.

En España con la aprobación del EC-2 y su Anejo R esperada en 2024, se dará seguridad a los proyectistas para que consideren los armados de FRP como alternativa al acero en sus diseños.

- Las estructuras diseñadas con armados PRFV deberán tener mayor deformaciones y abertura de fisura que las diseñadas en acero. Esto se debe principalmente a que la entrada de cloruros ya no es un condicionante y a las características del material. Las resistencias del PRFV permiten mayores deformaciones para desarrollar sus resistencias.

En esta línea, su uso será menos favorable en elementos estructurales en los que se asocien problemas de funcionalidad derivados de las deformaciones como pueden ser vigas utilizadas en edificación.

En cambio, los elementos estructurales que no trabajen a ELS y por tanto no estén limitados por las deformaciones en los diseños serán más favorables. Este es el caso de los espaldones, vigas cantiles y/o faldones estudiados.

11 PROPUESTA DE LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Las líneas futuras de investigación podrían seguir algunas de las siguientes líneas para avanzar en la incorporación de este tipo de armaduras en diferentes tipos de proyecto:

- El estudio de otros elementos estructurales o la sustitución parcial o total de las armaduras de estos bien sea con armaduras realizadas a partir de fibras de vidrio u otras como las de aramida, carbono o basalto. Estos podrán realizarse en elementos tipo viga o espaldón como los estudiados, o en otros elementos como las losas portuarias donde ya existen aplicaciones.
- Una tipología de estructura donde tiene un gran potencial los refuerzos de PRFV debido a su menor peso con respecto al acero son los diques flotantes y los pantalanes de los puertos.
- El desarrollo de modelos de durabilidad específicos en elementos armados con barras de PRFV dará la perspectiva necesaria para que los proyectistas puedan demostrar la competitividad de estos en los diversos proyectos.
- Otro elemento de cara a futuros estudios identificado con una gran ventaja competitiva considerando las características del material son los cercos de pilares o pilotes de edificios o muelles respectivamente.

Estos elementos podrían sustituir a los cercos de acero al no sufrir deformaciones durante su vida en servicio manteniendo el resto de los refuerzos de acero. De esta forma se reducirán en gran medida los costes y los tiempos necesarios para su puesta en obra.

- Otra línea de investigación necesaria es el estudio en otro rango de deformaciones y de abertura de fisura que permita optimizar más las resistencias de este tipo de refuerzos.
- A su vez los avances tecnológicos y normativos en cambio constante requieren de una actualización de este tipo de estudio para incorporar los nuevos cambios y mejoras competitivas que se desarrollen.

Bibliografía

A.ILKI et al. (2023). *Fibers Symposium*,. pp 977-985,.

ANDRADE, C., ALONSO, C., SARRIÁ, J Y CASTELLOTE, M. (1998). *Conceptos básicos sobre corrosión de armaduras. Durabilidad de estructuras de hormigón: Vida útil, refuerzo y reparación.*

Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73-87.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73))

Brown, V. L., Gold, W., & Shield, C. (2023). The New ACI Code 440.11-22. En A. Ilki, D. Çavunt, & Y. S. Çavunt (Eds.), *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient* (Vol. 349, pp. 1837-1846). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32519-9_184

Carlos Domingo Force. (2012). *Los inicios de las obras de hormigón en contacto con agua.* Universidad Politécnica de Catalunya.

Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB, boletín GEHO nº 12. (1996). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Duy Nguyen, P., Hiep Dang, V., Anh Vu, N., & Eduardovich, P. A. (2020). Long-term Deflections of Hybrid GFRP/Steel Reinforced Concrete Beams under Sustained Loads. *Civil Engineering Journal*, 6, 1-11. [https://doi.org/10.28991/cej-2020-SP\(EMCE\)-01](https://doi.org/10.28991/cej-2020-SP(EMCE)-01)

Enrique Dapena García. (2009). *Materiales pétreos* (Universidad Politécnica de Madrid).

Estructuras de hormigón armado sostenibles e innovadoras. (2024, marzo 1). Armaduras de polímeros reforzados con fibras (FRP).

Gestión de la conservación en el entorno portuario: Una guía básica. (2012). Organismo Público Puertos del Estado.

Gold, W. J. (2023). Comparing Global Codes for FRP Reinforced Concrete. En A. Ilki, D. Çavunt, & Y. S. Çavunt (Eds.), *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient* (Vol. 350, pp. 977-985). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_100

Hwan OH, B y Seok Jang,B. (2003). Chloride diffusion analysis of concrete structures considering effects of reinforcements. *ACI Materials Journal*.

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. IECA. (2013). *Guías técnicas: Hormigón en ambiente marino*.

Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (with Portland Cement Association). (2016). *Design and control of concrete mixtures* (Sixteenth edition). Portland Cement Association.

Mangat, P.S. y Molloy, B.T. (1995). Chloride binding in concrete containing pfa, gbs or silice fume under sea water exposure. *Magazine of concrete Research*, 47(171).

Miguel Ángel Bermudez Odriozola. (2007). *Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: Zona de carrera de mareas y zona sumergida*. Universidad Politécnica de Madrid.

Ministerio de Fomento. (1991). *Instrucción de Hormigón Estructural*. Centro de Publicaciones.

Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural*. Centro de Publicaciones.

- Nikhil Garg & Sandeep Shrivastava. (2019, marzo). *Environmental and Economic Comparison of FRP Reinforcements and Steel Reinforcements in Concrete Beams Based on Design Strength Parameter*. UKIERI Concrete Congress, Natioanl Institute of Technology, Jalandhar (Punjab), India.
- Pérez, M. A. (Ed.). (2014). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación* (1st ed.). OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.210>
- Real Decreto 470/2021, de 29 de junio. (2021). *Código Estructural*.
- Saravia de Los Reyes, R., Fernández-Sánchez, G., Esteban, M. D., & Rodríguez, R. R. (2020). Carbon Footprint of a Port Infrastructure from a Life Cycle Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7414. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207414>
- Soriano Peña, A. (2005). *ROM 0.5-05 recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias* (1a. ed). Puertos del Estado.
- Victor D.Lanza Fernández & Pilar Alaejos Gutiérrez. (s. f.). *Recomendaciones para la construcción de un dique durable cpn hormigón armado*.
- Vitrubio Polión, M., Rodríguez Ruiz, Delfín., & Oliver Domingo, J. L. (2006). *Los diez libros de arquitectura* (1a. ed. en Alianza Forma, 5a. reimp). Alianza.
- Working Group in the Commite for Propagating Japanese Technical Standards Abroad. (2020). *TECHNICAL STANDARDS AND COMMENTARIES FOR PORT AND HARBOUR FACILITIES IN JAPAN*. THE OVERSEAS COASTAL AREA DEVELOPMENT INSTITUTE OF JAPAN.

ANEXO I

REHABILITACIÓN ESPALDÓN DE ALICANTE -ACERO CÓDIGO ESTRUCTURAL (L=200 m)

Longitud espaldón (m)	200
Cara superior espaldón (m)	0,95
Paramento exterior (m)	2,06
Paramento interior (m)	1,41
base superior (m)	1,73
Canto base (m)	0,65
Cara inferior espaldón (m)	0,95
Cara inferior viga (m)	2,53
Recubrimiento (m)	0,065
Longitud anclaje (m)	0,3
Longitud de perfiles (m)	12
Longitud cierre cerco (m)	0,1
Longitud de solape (m)	0,48
Longitud anclaje refuerzo (m)	0,75

DESCRIPCIÓN	Número	Longitud [m]	Calibre ϕ	kg /m	Medición [kg]	Total [kg]	€/kg	Total [€]	€
VL-1	5	207,65	12	0,89	924,04		1,02	5 ϕ 12	
VL-2	11	207,65	12	0,89	2.032,89		1,02	5 ϕ 12	
VL-3	5	207,65	12	0,89	924,04		1,02	5 ϕ 12	
VL-4	8	207,65	12	0,89	1.478,47		1,02	5 ϕ 12	
VL-5	4	207,65	12	0,89	739,23		1,02	5 ϕ 12	
VL-6	9	207,65	12	0,89	1.663,28		1,02	5 ϕ 12	
VL-7	8	207,65	12	0,89	1.478,47		1,02	5 ϕ 12	
VT-1	1334	6,68	15	1,39	12.393,87		1,02	ϕ 15	
VT-2	1334	3,99	15	1,39	7.389,23		1,02	ϕ 15	
RC-1	267	1,5	20	2,47	989,24		1,02	2 ϕ 20	
RC-2	267	1,43	20	2,47	945,38		1,02	2 ϕ 20	

30.958,14

31.577,30

Relación Coste acero/ PRFV	1,75
Volumen de hormigón (m³)	596,80
Cuantía acero (kg/m³)	51,87

ANEXO II

REHABILITACIÓN ESPALDÓN DE ALICANTE -PRFV (L=200 m)

Longitud espaldón (m)	200
Cara superior espaldon (m)	0,95
Paramento exterior (m)	2,06
Paramento interior (m)	1,41
base superior (m)	1,73
Canto base (m)	0,65
Cara inferior espaldón (m)	0,95
Cara inferior viga (m)	2,53
Recubrimiento (m)	0,03
Longitud anclaje (m)	0,3048
Longitud de perfiles (m)	12
Longitud cierre cerco (m)	0
Longitud de solape (m)	0,48
Longitud anclaje refuerzo (m)	0,75

DESCRIPCIÓN	Número	Longitud [m]	Calibre ϕ	kg /m	Medición [kg]	Total [kg]	€/kg	Total [€]
VL-1	5	207,58	12	0,24	247,11		1,93	5 ϕ 12
VL-2	11	207,58	12	0,24	543,65		1,93	5 ϕ 12
VL-3	5	207,58	12	0,24	247,11		1,93	5 ϕ 12
VL-4	8	207,58	12	0,24	395,38		1,93	5 ϕ 12
VL-5	4	207,58	12	0,24	197,69		1,93	5 ϕ 12
VL-6	9	207,58	12	0,24	444,80		1,93	5 ϕ 12
VL-7	8	207,58	12	0,24	395,38		1,93	5 ϕ 12
VT-1	1334,0	6,02	15	0,37	2.986,19		1,80	ϕ 15
VT-2	1334,0	7,81	15	0,37	3.874,10		1,80	ϕ 15
RC-1	267,0	1,46	20	0,66	256,70		1,72	2 ϕ 20
RC-2	267	1,53	20	0,66	270,19		1,72	2 ϕ 20

9.858,30

18.011,24

Relación Coste PRFV /Acero	0,570386
Volumen de hormigón (m³)	596,80
Cuantía PRFV (kg/m³)	16,52

ANEXO III

MEDICIONES VIGA TIPO ACERO

Longitud cantil (m)	200
Anchura (L-T) superior viga (m)	1,5
Anchura (L-T) inferior viga (m)	1,5
Canto viga (m)	1,5
Anchura cantil (m)	1
Canto cantil (m)	2,5
Canto losa (m)	0,5
Recubrimiento (m)	0,07

Longitud perfiles (m)	12
Long solape (m)	1,5
Long cierre cerco	0,1
Long anclajes (m)	0,3

DESCRIPCIÓN	Número	Longitud [m]	Calibre ϕ	kg /m	Medición [kg]	Total [kg]	€/kg	Total [€]
VIGA								
V1	4000	3,45	12	0,89	12.282,13		1,02	2 ϕ 12
V2	12	223,36	20	2,47	6.620,39		1,02	8 ϕ 20
V3	10	223,96	32	6,31	14.131,88		1,02	7 ϕ 32
V4	1334	5,78	12	0,89	6.862,36		1,02	1 ϕ 12
VT-1	7	1,5	20	2,47	25,94		1,02	7 ϕ 20
VT-2	10	1,5	32	6,31	94,65		1,02	7 ϕ 32
VT-3	10	1,5	32	6,31	94,65		1,02	7 ϕ 32
V7	15	223,96	20	2,47	8.297,72		1,02	10 ϕ 20
V8	2000	2,03	20	2,47	10.028,20		1,02	10 ϕ 20
V9	11	223,96	32	6,31	15.545,06		1,02	7 ϕ 32
FALDÓN								
V10	1334	4,11	32	6,31	34.579,25		1,02	1 ϕ 32
V11	1334	4,172	20	2,47	13.746,66		1,02	1 ϕ 20
V12	16	223,43	20	2,47	8.829,95		1,02	1 ϕ 20
V13	16667	2,09	12	0,89	31.002,29		1,02	5 ϕ 12
TOTAL					162.141,13		165.383,95	

Relación Coste Acero/PRFV	2,08
Volumen de hormigón (m³)	1.250,00
Cuantía acero (kg/m³)	129,71

ANEXO IV

MEDICIONES VIGA TIPO PRFV

Longitud cantil (m)	200
Anchura (L-T) superior viga (m)	1,5
Anchura (L-T) inferior viga (m)	1,5
Canto viga (m)	1,5
Anchura cantil (m)	1
Canto cantil (m)	2,5
Canto losa (m)	0,5
Recubrimiento (m)	0,03

Longitud perfiles (m)	12
Long solape (m)	1,5
Long cierre cerco (m)	0
Long anclajes (m)	0,3048

DESCRIPCIÓN	Número	Longitud [m]	Calibre ϕ	kg /m	Medición [kg]	Total [kg]	€/kg	Total [€]
VIGA								
V1	4000	3,410	12	0,24	3.247,57		1,93	2 ϕ 12
V2	12	223,44	20	0,66	1.771,69		1,72	8 ϕ 20
V3	10	224,05	32	1,69	3.782,01		1,82	7 ϕ 32
V4	1334	5,82	12	0,24	1.848,50		1,93	1 ϕ 12
VT-1	7	1,5	20	0,66	6,94		1,72	7 ϕ 20
VT-2	10	1,5	32	1,69	25,32		1,82	7 ϕ 32
VT-3	10	1,5	32	1,69	25,32		1,82	7 ϕ 32
V7	15	224,04	20	0,66	2.220,56		1,72	10 ϕ 20
V8	2000	2,08	20	0,66	2.748,25		1,72	10 ϕ 20
V9	11	224,05	32	1,69	4.160,22		1,82	7 ϕ 32
FALDÓN								
V10	1334	4,1928	32	1,69	9.441,46		1,82	1 ϕ 32
V11	1334	4,212	20	0,66	3.712,71		1,72	1 ϕ 20
V12	16	223,47	20	0,66	2.362,58		1,72	1 ϕ 20
V13	16667	2,05	12	0,24	8.134,88		1,93	5 ϕ 12
TOTAL						43.488,01		79.321,31

Relación Coste PRFV /Acero	0,48
Volumen de hormigón (m³)	1250,00
Cuántía PRFV (kg/m³)	34,79