

# HORMIGÓN ARMADO DE ALTA DURABILIDAD FRENTE AL AMBIENTE MARINO

Volumen I.

Hormigón de altas prestaciones  
para prevenir la corrosión

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE TRANSPORTES  
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX

Puertos del Estado



**HORMIGÓN ARMADO DE ALTA DURABILIDAD FRENTE AL  
AMBIENTE MARINO**

**VOLUMEN I. HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES PARA  
PREVENIR LA CORROSIÓN**

VÍCTOR D. LANZA FERNÁNDEZ

GONZALO PAZO COYOLA

SUSANA FERNÁNDEZ GARCÍA

ANA LOPE CARVAJAL

MARÍA RODRÍGUEZ DE SEGOVIA SÁEZ

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

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

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

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

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

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

**Volumen I:** Hormigón de altas prestaciones para prevenir la corrosión.

Autoría: Víctor D. Lanza Fernández, Gonzalo Pazo Coyola, Susana Fernández García, Ana Lope Carvajal y María Rodríguez de Segovia Sáez.

Año de la edición: 2026

**EDICIÓN DIGITAL:**

1ª edición electrónica: abril 2026

Formato: PDF

Tamaño: 15 MB

NIPO: 197-26-002-4

EDITA

Centro de Publicaciones

Secretaría General Técnica

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

© CEDEX: Servicio de Publicaciones

Todos los derechos reservados.

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

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

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

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

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

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

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

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

GUSTAVO SANTANA HERNÁNDEZ  
PRESIDENTE DE PUERTOS DEL ESTADO



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ

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



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN. MEJORAS DEL HORMIGÓN PARA PREVENIR LA CORROSIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>2. HORMIGÓN CON ADICIONES PUZOLÁNICAS</b> .....	<b>19</b>
2.1. REACCIÓN PUZOLÁNICA DE LAS ADICIONES .....	19
2.1.1. <i>Puzolanidad y modificación de la red porosa del hormigón</i> .....	20
2.1.2. <i>Cenizas volantes</i> .....	22
2.1.2.1. Tipos de cenizas en España .....	23
2.1.2.2. Otras clasificaciones de cenizas volantes .....	25
2.1.3. <i>Humo de sílice</i> .....	26
Humo de sílice en España.....	28
Otras clasificaciones del humo de sílice .....	29
2.1.4. <i>Escorias de alto horno</i> .....	29
2.1.4.1 Escorias en España .....	31
2.1.4.2 Otras clasificaciones de las escorias .....	31
2.1.5. <i>Máximo contenido de adiciones puzolánicas</i> .....	32
2.1.5.1. España .....	32
2.1.5.2. Estados Unidos y Canadá .....	34
2.2. ADICIONES EN HORMIGÓN EXPUESTO AL AMBIENTE MARINO.....	34
2.2.1. <i>Cenizas volantes</i> .....	35
2.2.2. <i>Humo de sílice</i> .....	38
2.2.3. <i>Escorias de alto horno</i> .....	39
2.2.4. <i>Cementos compuestos</i> .....	41
2.3. NORMATIVA SOBRE ADICIONES PUZOLÁNICAS EN HORMIGÓN ARMADO EXPUESTO AL AMBIENTE MARINO	41
2.3.1. <i>España: Código Estructural (2021) [7]</i> .....	41
2.3.2. <i>Reino Unido. Maritime Works. Part 1-4: General – Code of practice for materials (BS 6349-1-4:2013) [35]</i> .....	43
2.3.3. <i>Estados Unidos. Naval Facilities Engineering System Command (NAVFAC). 2021 [36]</i> 44	
2.3.4. <i>Japón: Technical Standards and Commentaries for port and harbour facilities in Japan. 2009. [37]</i> .....	45
2.3.5. <i>Australia: Guideline for the design of maritime structures (AS 4997-2005) [38]</i> .....	45
2.3.6. <i>Alemania: Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012. [39]</i> .....	45
2.4. EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES CON ADICIONES PUZOLÁNICAS EN AMBIENTE MARINO .....	45
2.4.1. <i>Construcciones con cenizas volantes</i> .....	45
2.4.1.1. Nuevo Canal de Panamá (entrada en servicio en 2016).....	45
2.4.1.2. The Jiaozhou Bay sea-crossing railway bridge (entra en servicio en 2011) .....	47
2.4.1.3. El puente Sea cliff (finalizado en 2005) .....	48
2.4.1.4. Túnel de St. Clair River (1994) .....	48

2.4.1.5.	Victoria and Alfred Waterfront (1993) .....	49
2.4.1.6.	Tampa Bay's Sunshine Skyway Bridge (1987) .....	49
<b>2.4.2.</b>	<b><i>Construcciones con humo de sílice</i></b> .....	<b>50</b>
2.4.2.1.	Puente del The Øresund Link (2000) .....	50
2.4.2.2.	Guide for the Use of Silica Fume in concrete (ACI) .....	51
2.4.2.3.	Hormigón estructural ligero con humo de sílice [17] .....	51
<b>2.4.3.</b>	<b><i>Construcciones con escorias</i></b> .....	<b>54</b>
2.4.3.1.	Nueva terminal de contenedores en Puerto de Reino Unido (anterior a 2010) .....	54
2.4.3.2.	Barreras contra tormentas del Scheldt oriental (1986) .....	54
<b>2.4.4.</b>	<b><i>Cementos compuestos</i></b> .....	<b>55</b>
2.4.4.1.	Marc Basnight Bridge. 2019 (Herbert C. Bonner bridge replacement) .....	55
2.4.4.2.	Nuevo Canal de Palamá (2016).....	56
2.4.4.3.	Dique de cierre en un puerto del Golfo Pérsico (2012) .....	57
2.4.4.4.	Tolva de bypass de arena. Bocana del Puerto de Durban, Kwazulu-Natal, Sudáfrica (2010) .....	57
2.4.4.5.	Muelle de cajones realizado con encofrado deslizante (anterior a 2010) .....	58
2.4.4.6.	Puente de Bandra-Warli (2009) .....	59
2.4.4.7.	Túnel del The Øresund Link (2000) .....	59
2.4.4.8.	Great Belt East Bridge (1998) .....	60
2.4.4.9.	The Storebælt Link (1998) .....	60
2.4.4.10.	The Confederation Bridge (1997) .....	61
<b>2.5.</b>	<b>ASPECTOS MÁS RELEVANTES DEL USO DE ADICIONES PUZOLÁNICAS EN HORMIGÓN ARMADO UBICADO EN AMBIENTE MARINO</b> .....	<b>62</b>
<b>3.</b>	<b>INHIBIDORES DE CORROSIÓN</b> .....	<b>64</b>
3.1.	FUNCIONAMIENTO DE LOS ADITIVOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN .....	64
3.2.	TIPOS DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN .....	68
3.2.1.	<i>Nitrito cálcico (CN)</i> .....	68
3.2.2.	<i>Nitratos</i> .....	69
3.2.3.	<i>Inhibidores Orgánicos</i> .....	70
3.2.3.1.	Aminas y alcanolaminas: DMEA, TETA y otros.....	70
3.2.3.2.	Carboxilatos .....	71
3.2.3.3.	Otros inhibidores orgánicos.....	72
3.2.4.	<i>Inhibidores migratorios</i> .....	72
3.3.	ESTUDIO DE LA EFICACIA DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN .....	73
3.3.1.	<i>ASTM G180 [65]</i> .....	73
3.3.2.	<i>ASTM G109 [66]</i> .....	74
3.3.3.	<i>UNE 83992-2:2012 EX [67]</i> .....	75
3.4.	NORMATIVA PARA INHIBIDORES DE CORROSIÓN .....	75
3.4.1.	<i>Código estructural</i> .....	75
3.4.2.	<i>ASTM C1582 [69]</i> .....	76

3.5.	INHIBIDORES COMERCIALES .....	76
3.5.1.	<i>Inhibidores para dosificar en el hormigón</i> .....	76
3.5.2.	<i>Inhibidores migratorios</i> .....	78
3.6.	APLICACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS REALES. ....	79
3.6.1.	<i>Edificio Estel. Barcelona (2018) [79]</i> .....	79
3.6.2.	<i>Pabellones B y C del Mercado de Mercabarna (Barcelona, 2018), Tablero de puente ferroviario en Pravia (Asturias, 2015), Puerto de Algeciras (2020) [80]</i> .....	79
3.6.3.	<i>Fundación Joan Miró. Barcelona (2004) [82]</i> .....	81
3.7.	HORMIGÓN EXPUESTO A SALES DE HIELO-DESHIELO EN LOS ALPES SUIZOS (1997) [85] .....	83
3.8.	ASPECTOS MÁS RELEVANTES DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN .....	84
<b>4.</b>	<b>CURADO INTERNO DEL HORMIGÓN</b> .....	<b>86</b>
4.1.	CONCEPTOS GENERALES Y TERMINOLOGÍA .....	86
4.1.1.	<i>Definición de Curado del hormigón</i> .....	88
4.1.2.	<i>Métodos de curado del hormigón</i> .....	89
4.1.3.	<i>Curado interno en hormigones de altas prestaciones</i> .....	90
4.1.3.1.	Principio de funcionamiento .....	90
4.2.	ÁRIDOS LIGEROS PARA EL CURADO INTERNO DEL HORMIGÓN .....	91
4.2.1.	<i>Caracterización y normativa reguladora</i> .....	91
4.2.2.	<i>Dosificación</i> .....	92
4.2.3.	<i>Caracterización de los áridos ligeros</i> .....	94
4.2.4.	<i>Efecto de los áridos ligeros en el hormigón</i> .....	97
4.2.4.1.	Retracción autógena y por secado .....	97
4.2.4.2.	Resistencia a compresión y módulo elástico .....	97
4.2.4.3.	Penetración de cloruros y coeficiente de difusión .....	98
4.2.4.4.	Rentabilidad económica .....	98
4.2.4.5.	Otras ventajas aportadas por los áridos ligeros .....	99
4.2.5.	<i>Implementación en infraestructuras</i> .....	100
4.2.5.1.	Pavimentos en carreteras y puentes .....	100
4.2.5.2.	Infraestructuras en ambiente marino .....	100
4.3.	POLÍMEROS SUPER ABSORBENTES PARA EL CURADO INTERNO DEL HORMIGÓN .....	104
4.3.1.	<i>Cinética del movimiento del agua en los polímeros. Trabajabilidad</i> .....	105
4.3.2.	<i>Endurecimiento y microestructura</i> .....	106
4.3.3.	<i>Efecto de los PSA en las características del hormigón</i> .....	107
4.3.4.	<i>Efectos en la retracción</i> .....	108
4.3.5.	<i>Dosificaciones</i> .....	108
4.3.6.	<i>Aplicaciones prácticas de Polímeros Super absorbentes</i> .....	109
4.3.7.	<i>Ambiente marino</i> .....	111
4.4.	OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	111

4.4.1.	<i>Polietilenglicol (PEG)</i> .....	111
4.4.2.	<i>Cenizas de cáscara de arroz</i> .....	112
4.5.	ASPECTOS MÁS RELEVANTES DE LOS HORMIGONES AUTOCURABLES .....	113
<b>5.</b>	<b>HORMIGÓN CON NANO ADICIONES</b> .....	<b>115</b>
5.1.	TIPOS DE NANO ADICIONES PARA EL HORMIGÓN .....	116
5.1.1.	<i>Nano sílice</i> .....	116
5.1.1.1.	Demanda de agua y dispersión de la nano sílice en el hormigón [188].....	117
5.1.1.2.	Mejora de propiedades del hormigón por el efecto de la nano sílice .....	117
5.1.1.3.	Nano sílice: Conclusiones .....	127
5.1.2.	<i>Nano alúmina</i> .....	127
5.1.3.	<i>Nano tubos y nano fibras de carbono.</i> .....	130
5.1.4.	<i>Nano arcillas</i> .....	130
5.1.5.	<i>Otras nano adiciones</i> .....	131
5.1.5.1.	Nano hierro.....	131
5.1.5.2.	Nano óxido de titanio .....	132
5.1.5.3.	Nano binders .....	132
5.2.	NANO ADICIONES Y DURABILIDAD FRENTE A LA CORROSIÓN [185] .....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	REACCIÓN PUZOLÁNICA EN LA PASTA DE CEMENTO .....	19
FIGURA 2.	DIAGRAMA TERNARIO CAO-SIO <sub>2</sub> -AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (WT%) SITUANDO LA COMPOSICIÓN QUÍMICA PRINCIPAL DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ADICIONES (MODIFIED AFTER GLASSER ET AL. 1987) [2] .....	20
FIGURA 3.	RED POROSA DEL HORMIGÓN, SEGÚN SETZER (BOLETÍN Nº12 GEHO – CEB) [4].....	21
FIGURA 4.	DISTRIBUCIÓN DE POROS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ADICIÓN PUZOLÁNICA. (METHA, P.K., MONTERIRO, P.J.M. CONCRETE. STRUCTURE, PROPERTIES AND MATERIAS) [5].....	21
FIGURA 5.	PERFIL DE POROSIMETRÍA A 28 DÍAS Y 1 AÑO, EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZA VOLANTE. (RILEM REPORT 7. FLY ASH IN CONCRETE) [6] .....	22
FIGURA 6.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE 13 CENIZAS ESPAÑOLAS (2002) [9].....	22
FIGURA 7.	ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE SILICIO Y MICROSÍLICE EN LA FÁBRICA DE SABÓN. A CORUÑA [14] ....	26
FIGURA 8.	MICROSÍLICE EN EL MEB [14] .....	26
FIGURA 9.	EFFECTO DEL HUMO DE SÍLICE EN LA GANANCIA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN (ACI). DURABILIDAD. [16].....	28
FIGURA 10.	ESQUEMA DE ALTO HORNO (WEB THERMOFISHER SCIENTIFIC) .....	29
FIGURA 11.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN QUE CONTIENE DIFERENTES PORCENTAJES DE ESCORIAS, COMPARADOS CON HORMIGÓN REALIZADO SÓLO COMO CEMENTO PORTLAND [20] .....	31
FIGURA 12.	RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL HORMIGÓN QUE CONTIENE DIFERENTES PORCENTAJES DE ESCORIAS, COMPARADOS CON HORMIGÓN REALIZADO SÓLO COMO CEMENTO PORTLAND [20] .....	31
FIGURA 13.	PENETRACIÓN DE CLORUROS EN UN HORMIGÓN DE 32MPA FABRICADO CON Y SIN CENIZAS VOLANTES. [26].....	36
FIGURA 14.	VIDA ÚTIL ESTIMADA EN FUNCIÓN DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO Y RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN. [26] .....	36

FIGURA 15. PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL HORMIGÓN CON HUMO DE SÍLICE. [15] .....	38
FIGURA 16. A LA IZQUIERDA COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO (A PARTIR DE LA RESISTIVIDAD) Y A LA DERECHA COEFICIENTE DE DIFUSIÓN NO ESTACIONARIO A PARTIR DEL ENSAYO NTB492. PUNTOS HUECOS CORRESPONDEN A RELACIÓN A/C 0,4 Y LOS PUNTOS RELLENOS A A/C 0,5. LAS LÍNEAS CONTINUAS SON MORTEROS CURADOS A 100% HR Y 20°C; LAS LÍNEAS PUNTEADAS SON MORTEROS CURADOS A 65%HR Y 20°C. [32] .....	39
FIGURA 17. EFECTO DE LAS ESCORIAS EN EL HORMIGÓN TRAS CURARSE 90 DÍAS Y SER ENSAYADO EN EL ENSAYO DE DIFUSIÓN ASTM C1556 [33]. .....	40
FIGURA 18. HORMIGONES CON 3 CEMENTOS DIFERENTES Y A/C 0,45. [34].....	40
FIGURA 19. ESQUEMA DEL MURO EN AMBIENTE MARINO [40].....	49
FIGURA 20. CORROSIÓN EN UNA BARRA DE ACERO DESPASIVADA (AZHER, S.A. (2005) A PREDICTION MODEL FOR THE RESIDUAL FLEXURAL STRENGTH OF CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAMS) .....	64
FIGURA 21. PERIODO DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN EN LA VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO EXPUESTA A LOS CLORUROS. [51] .....	65
FIGURA 22. INTENSIDAD DE CORRIENTE Y POTENCIAL DE LA REACCIÓN DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS DEL HORMIGÓN [50,53] .....	66
FIGURA 23. EFECTO DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN SOBRE LA REACCIÓN DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS EN EL ARMADO [50]. .....	67
FIGURA 24. INTENSIDAD DE CORROSIÓN EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN MOLAR ENTRE NITRITOS Y CLORO [56] .....	68
FIGURA 25. DIMETIL ETANOL AMINA .....	70
FIGURA 26. TRIETILENTETRAAMINA.....	70
FIGURA 27. TARTRATO SÓDICO .....	71
FIGURA 28. BENZOATO SÓDICO .....	71
FIGURA 29. GLUTAMATO SÓDICO .....	71
FIGURA 30. EFICACIA DE DIFERENTES INHIBIDORES ORGÁNICOS (AMINAS Y CARBOXILOS) EN ENSAYO DE LABORATORIO. [55].....	71
FIGURA 31. ENSAYO ASTM PARA EL ESTUDIO DE LA EFICACIA DE INHIBIDOR MIGRATORIO EN BASE AMINA. [63] .....	72
FIGURA 32. CELDA DE ENSAYO. [65] .....	73
FIGURA 33. MONTAJE ELÉCTRICO DEL ENSAYO. [65].....	73
FIGURA 34. PROBETAS PARA EL ENSAYO ASTM G109. [66] .....	74
FIGURA 35. DIAGRAMA DEL ENSAYO UNE 83992-2. [67].....	75
FIGURA 36. EFECTIVIDAD DE UN INHIBIDOR DE CORROSIÓN. [73].....	77
FIGURA 37. EFECTIVIDAD DEL INHIBIDOR DE CORROSIÓN. [76] .....	78
FIGURA 38. APLICACIÓN DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN EN SUPERFICIE. [79] .....	79
FIGURA 40. MEDIDAS DE INTENSIDAD DE CORROSIÓN A DIFERENTES EDADES. NAVES DE BARCELONA. [80]....	80
FIGURA 41. MEDIDAS DE INTENSIDAD DE CORROSIÓN A DIFERENTES EDADES. TABLERO DE PUENTE. [80].....	80
FIGURA 42. PIEZA DE HORMIGÓN RECIÉN FABRICADA SOBRE LA QUE SE APLICA INHIBIDOR DE CORROSIÓN [81] .....	81
FIGURA 43. UBICACIÓN DEFINITIVA DE LAS PIEZAS TRATADAS [81].....	81
FIGURA 44. ZONAS ESTUDIADAS EN EL EDIFICIO JOAN MIRÓ. [82] .....	81
FIGURA 45. MEDIDAS DE INTENSIDAD DE CORROSIÓN A DIFERENTES EDADES. [82] .....	82

FIGURA 46. ESCUELA DE PESCA DE LANZAROTE (2020) [84] .....	82
FIGURA 47. TORRES DE REFRIGERACIÓN DE GAS NATURAL EN SAGUNTO [84] .....	82
FIGURA 48. MUELLE ERCROS EN HUELVA [84] .....	82
FIGURA 49. ALMACÉN DE SALES DE DEHIELO. DEMARCACIÓN DE CARRETERAS DE TERUEL [84] .....	82
FIGURA 50. LONJA DE SANLUCAR (2020) [84] .....	82
FIGURA 51. TORRESBLANCAS. ALICANTE (2014) [84] .....	83
FIGURA 52. ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO EXPUESTOS A LAS SALPICADURAS DE SALES DE DESHIELO. [85] .....	83
FIGURA 53. SEGUIMIENTO DE LA INTENSIDAD DE CORROSIÓN DURANTE 18 AÑOS [85].....	84
FIGURA 54. REPRESENTACIÓN DE RETRACCIÓN QUÍMICA Y AUTÓGENA DURANTE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. [1] .....	88
FIGURA 55. COMPARACIÓN ENTRE CURADO EXTERNO Y CURADO INTERNO [91] .....	90
FIGURA 56. DENSIDADES DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ÁRIDOS LIGEROS [7] .....	91
FIGURA 57. FÓRMULA DE CÁLCULO DE SUSTITUCIÓN POR VOLUMEN DE ÁRIDO NORMAL POR ÁRIDO LIGERO.	92
FIGURA 58. ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN NECESARIO PARA REALIZAR HORMIGÓN CON CURADO INTERNO [93]. EJEMPLO DE UN HORMIGÓN CON UN CONTENIDO DE 350KG/M3 DE CEMENTO, RELACIÓN W/C=0,33 Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO DEL 15%. .....	93
FIGURA 59. DIFERENCIA DE DOSIFICACIONES COMPARANDO UN HORMIGÓN CONVENCIONAL Y OTRO CON PRESENCIA DE ÁRIDOS LIGEROS. ....	94
FIGURA 60. COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ENTRE ÁRIDO NORMAL Y ÁRIDO LIGERO (VAYSBURD A (1992) DURABILITY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE AND ITS CONNECTIONS WITH THE COMPOSITION OF CONCRETE, DESIGN, AND CONSTRUCTION METHODS. ACI SPECIAL PUBLICATION 136:295-31) [111] .....	95
FIGURA 61. DISTANCIA DE ALCANCE DEL AGUA DESDE LA SUPERFICIE DEL AL A LO LARGO DEL TIEMPO. [117].	96
FIGURA 62. RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN COMPARANDO HORMIGÓN SIN AL (HPC) Y CON AL (IC HPC), PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN EN ROJO, EN CASOS REALES DE APLICACIÓN SOBRE LOSAS DE PUENTES. [123].....	98
FIGURA 63. COMPARACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS EN HORMIGONES (EN AZUL RELACIÓN W/C DE 0,3 Y EN ROJO RELACIÓN W/C 0,5). COMPARANDO PARA CADA UNO DE ELLOS, EL HORMIGÓN SIN AL (P) Y CON AL (IC). [123].....	98
FIGURA 64. PERFILES DE CLORUROS COMPARANDO LOS DE HORMIGÓN CON ÁRIDOS CONVENCIONALES (AN) Y OTROS CON AL EN AMBIENTE XS2. [124] .....	98
FIGURA 65. PERFILES DE CLORUROS COMPARANDO LOS DE HORMIGÓN CON ÁRIDOS CONVENCIONALES (AN) Y OTROS CON AL EN AMBIENTE XS3. [124] .....	98
FIGURA 66. ZONA ESPECIALMENTE HABILITADA PARA PROBETAS QUE HABRÁN DE ENSAYARSE PARA COMPARAR CON MUESTRAS DE OBRA Y REALIZAR SEGUIMIENTO DEL PUENTE HZM [128] .....	101
FIGURA 67. PERFILES DE CLORUROS PARA UNA EDAD DE 25 AÑOS COMPARANDO HORMIGÓN CONVENCIONAL (ND) CON HORMIGÓN ALIGERADO (LWA) CON DISTINTAS DOSIFICACIONES DE ESCORIAS. [129] .....	101
FIGURA 68. PERFIL DE CLORUROS PARA LA MUESTRA L1 CON AL A 1 AÑO. [130] .....	102
FIGURA 69. COMPARACIÓN DE RESISTIVIDAD DE LAS DISTINTAS MEZCLAS. L, SON LAS QUE CONTIENEN AL; N TIENEN ÁRIDO CONVENCIONAL. [130] .....	102
FIGURA 70 [142] .....	104
FIGURA 71. RADIOGRAFÍA DE NEUTRONES DEL CEMENTO PARA HACER SEGUIMIENTO DEL TRANSPORTE DE HUMEDAD DESDE LOS PSA [152].....	105
FIGURA 72. CORONA DE HIDRATACIÓN TEÑIDA EN AZUL, APROXIMADAMENTE 1 MM DE ESPESOR EN AL COMO COMPARATIVA CON LOS PSA [152]. .....	105

FIGURA 73. GRADO DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO CON W/C=0,25. COMPARANDO CONTENIDOS EN SAP DE 0%, 0,35% Y 0,70%. [151] .....	106
FIGURA 74. COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON W/C 0,35 Y DISTINTAS DOSIFICACIONES DE PSA. [159]. .....	107
FIGURA 75. RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DOSIFICACIONES CON W/C DE 0,3 Y 0,4 Y CONCENTRACIÓN DE PSA ENTRE 0 Y 0,15%. [154] .....	107
FIGURA 76. ESQUEMA DEL MÉTODO DE “LA BOLSA DE TÉ”, CON UNA PRIMERA MEDICIÓN DE LA BOLSA HIDRATADA (A), Y UNA SEGUNDA MEDICIÓN PARA LA HIDRATACIÓN DE LOS POLÍMEROS (B) [164] .....	108
FIGURA 77. ESQUEMA DEL MÉTODO DE FILTRACIÓN. [165] .....	108
FIGURA 78. FISURAS EN EL MURO DE REFERENCIA SIN PSA. EL MURO CON PSA NO SUFRIÓ FISURAMIENTO. [166] .....	109
FIGURA 79. VISTA GENERAL DE LA ESTRUCTURA DEL PABELLÓN DE LA COPA DEL MUNDO DE 2006. [168] .....	111
FIGURA 80. RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN COMPARANDO HORMIGONES CON ÁRIDO LIGERO Y OTROS CONTENIENDO, ADEMÁS DE ÁRIDO LIGERO, POLIETILENGLICOL (PEG) [175] .....	112
FIGURA 81. GRÁFICAS COMPARANDO CAPACIDAD DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO ENTRE HORMIGÓN DE REFERENCIA Y OTROS CON HUMO DE SÍLICE (SF) Y CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ (RHA) [180] .....	112
FIGURA 82. TAMAÑO DE PARTÍCULA Y ÁREA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA REFERIDA A COMPONENTES DE HORMIGÓN. [183] .....	115
FIGURA 83. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA. [184] .....	119
FIGURA 84. EFECTO DE LA ADICIÓN DE NANO SÍLICE EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO. [192] .....	120
FIGURA 85. RELACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN-EDAD, PARA DIFERENTES CONTENIDOS DE NANO SÍLICE. [190] .....	121
FIGURA 86. EFECTO DE LA ADICIÓN DE NANO SÍLICE EN LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE CL <sup>-</sup> DE UNA SOLUCIÓN DE NH <sub>4</sub> CL. [192] .....	123
FIGURA 87. EFECTO DE LA ADICIÓN DE NANO SÍLICE EN LA PROFUNDIDAD DE NEUTRALIZACIÓN DE LA PASTA. [192] .....	124
FIGURA 88. CORRELACIÓN ENTRE COEF. DE MIGRACIÓN-RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (IZDA.) Y ENTRE COEF. DE DIFUSIÓN-RESISTIVIDAD ELÉCTRICA. [189] .....	124
FIGURA 89. COEFICIENTES DE MIGRACIÓN DE CLORUROS. [184] .....	125
FIGURA 90. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL HORMIGÓN. [184] .....	126
FIGURA 91. MÓDULO ELÁSTICO DE MUESTRAS CON DISTINTOS PORCENTAJES DE NANO ALÚMINA. [194] .....	128
FIGURA 92. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MUESTRAS CON DISTINTOS PORCENTAJES DE NANO ALÚMINA. [194] .....	128
FIGURA 93. INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE NANO ALÚMINA EN EL PORCENTAJE DE POROS A 7 DÍAS. [195] .....	129
FIGURA 94. RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO CON DIFERENTE DOSIS DE NANO SÍLICE Y NANO HIERRO FRENTE A MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND Y CON HUMO DE SÍLICE. [183] .....	132
FIGURA 95. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN APARENTES SEGÚN EL NANO MATERIAL EMPLEADO. [185] .....	133

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. REQUISITOS QUÍMICOS. CENIZAS VOLANTES. CÓDIGO ESTRUCTURAL [7] .....	24
(LÍMITES EXPRESADOS EN MASA DE CENIZA SECA) .....	24
TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL HUMO DE SÍLICE [14] .....	27
TABLA 3. REQUISITOS ESENCIALES DEL HUMO DE SÍLICE. CÓDIGO ESTRUCTURAL [7] .....	28
TABLA 4. REQUISITOS ESENCIALES DEL HUMO DE SÍLICE. ASTM. ....	29
TABLA 5. COMPOSICIÓN DE LAS ESCORIAS [14] .....	30
TABLA 6. COMPOSICIÓN DE LAS ESCORIAS .....	32
TABLA 7. CEMENTOS CON CENIZAS VOLANTES SEGÚN RC-16 [11] .....	32
TABLA 8. CEMENTOS CON HUMO DE SÍLICE SEGÚN RC-16 [11] .....	32
TABLA 9. CEMENTOS CON HUMO DE SÍLICE SEGÚN RC-16 [11] .....	33
TABLA 10. CEMENTOS CON MÁS DE UNA ADICIÓN SEGÚN RC-16 [11] .....	33
TABLA 11. ESTUDIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LAS CENIZAS EN MEJORAR LA VIDA ÚTIL. [27] .....	37
TABLA 12. RECUBRIMIENTO PARA 50 AÑOS DE VIDA ÚTIL .....	42
TABLA 13. VALORES LÍMITES DE DOSIFICACIÓN Y PROPIEDADES DEL HORMIGÓN, CON ÁRIDO DE DENSIDAD NORMAL Y 20 MM DE TAMAÑO MÁXIMO, EXPUESTOS A CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS EN AGUA DE MAR DEL REINO UNIDO, PARA ALCANZAR UNA VIDA ÚTIL DE 50 AÑOS .....	43
TABLA 14. DOSIFICACIONES CON PUZOLANA NATURAL. CANAL DE PANAMÁ [40] .....	46
TABLA 15. DOSIFICACIÓN DEL PUENTE ØRESUND [40] .....	51
TABLA 16. DOSIFICACIONES CON PUZOLANA NATURAL. CANAL DE PANAMÁ. [40] .....	56
TABLA 17. DOSIFICACIÓN DEL TUNEL ØRESUND. [40] .....	59
TABLA 18. DOSIFICACIÓN DEL TUNEL ØRESUND. [49] .....	60
TABLA 19. DOSIFICACIONES EN DIFERENTES PARTES DEL PUENTE STOREBAELT. [40] .....	61
TABLA 21. INHIBIDORES COMERCIALES MIGRATORIOS (APLICADOS EN SUPERFICIE). ....	78
TABLA 22. TIPOS DE RETRACCIÓN E INFLUENCIA DEL CURADO EN CADA UNA DE ELLAS .....	87
TABLA 23. DOSIFICACIONES CON ÁRIDOS LIGEROS EN AMBIENTE MARINO. LCA: ÁRIDO GRUESO LIGERO. NCA: ÁRIDO GRUESO ESTÁNDAR. LFA: ÁRIDO FINO LIGERO; NFA: ÁRIDO FINO ESTÁNDAR. ....	94
TABLA 24. COMPARATIVA ENTRE LA NORMA ASTM C1761/C1761M (TOWEL ABSORPTION) [112] Y EL MÉTODO CENTRIFUGADO [113] PARA EL CÁLCULO DE LA ABSORCIÓN .....	96
TABLA 25. REFERENCIAS DE OBRAS MARÍTIMAS CON PRESENCIA DE ÁRIDOS LIGEROS. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN, DENSIDADES Y TIPOS DE ÁRIDOS LIGEROS UTILIZADOS. [105] .....	102
TABLA 26. RESULTADOS DE LA POROSIMETRÍA DE MERCURIO EN PASTA DE CEMENTO A 56 DÍAS. [153] .....	107
TABLA 27. RESULTADOS DE LA FISURACIÓN DEL HORMIGÓN EN LA PLATAFORMA DE HORMIGÓN. [167] .....	110
TABLA 28. DIÁMETROS DE PORO CRÍTICO, UMBRAL Y POROSIDAD TOTAL. [189] .....	118
TABLA 29. RESULTADOS DE POROSIMETRÍA DE INTRUSIÓN DE MERCURIO EN ESTUDIO. [190] .....	119
TABLA 30. VALORES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE HORMIGONES ANALIZADOS. [189] .....	121
TABLA 31. PROPIEDADES MECÁNICAS ANALIZADAS PARA HORMIGÓN ENDURECIDO. [184] .....	122
TABLA 32. PROPIEDADES MECÁNICAS ANALIZADAS PARA HORMIGÓN ENDURECIDO REFERIDAS AL HORMIGÓN DE CONTROL. [184] .....	122
TABLA 33. PENETRACIÓN DE CLORUROS MEDIANTE ENSAYO ACELERADO ASTM 1202. [190] .....	126

TABLA 34. VARIACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SEGÚN ADICIÓN Y EDAD. POROSIDAD A 7 DÍAS. [195]	129
TABLA 35. PROPIEDADES DE NANO ARCILLAS Y NANO PARTÍCULAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO DENSIDAD, TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA Y ÁREA DE SUPERFICIE ESPECÍFICA. ....	133

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1. VISTA GENERAL DEL CANAL DE PANAMÁ (PIXABAY.COM).....	46
FOTOGRAFÍA 2. PUENTE DE FERROCARRIL JIAOZHOU BAY SEA-CROSSING [41].....	47
FOTOGRAFÍA 3. PILA EN LA ZONA DEL PUENTE EXPUESTA A AMBIENTE MARINO EN TODAS SUS POSIBILIDADES: SUMERGIDO, CARRERA DE MAREAS, SALPICADURAS Y AMBIENTE AÉREO [41].....	47
FOTOGRAFÍA 4. PUENTE SEA CLIFF [26] .....	48
FOTOGRAFÍA 5. TÚNEL DE ST. CLAIR [27].....	48
FOTOGRAFÍA 6. MURO EN AMBIENTE MARINO [40] .....	49
FOTOGRAFÍA 7. TAMPA BAY'S SUNSHINE SKYWAY BRIDGE (PIXABAY.COM) .....	50
FOTOGRAFÍA 8. PUENTE DEL THE ØRESUND LINK ( WWW.FREEPIK.ES) .....	50
FOTOGRAFÍA 9. GULLFAKS C PLATFORM 1989. HORMIGÓN CON HUMO DE SÍLICE [43] .....	51
FOTOGRAFÍA 10. CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO MUELLE EN LA ZONA INFERIOR DERECHA DE LA FOTOGRAFÍA [45]	54
FOTOGRAFÍA 11. BARRERA CONTRA LAS TORMENTAS (WWW.FREEPIK.ES) .....	54
FOTOGRAFÍA 12. CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE MARC BASNIGHT EN PRIMER PLANO, Y PUENTE A SUSTITUIR (HERBERT C. BONNER) EN LA ZONA DERECHA DE LA FOTOGRAFÍA. [46] .....	55
FOTOGRAFÍA 13. VISTA GENERAL DEL CANAL DE PANAMÁ (PIXABAY.COM).....	56
FOTOGRAFÍA 14. DIQUE CON ELEMENTOS PREFABRICADOS EN L [40] .....	57
FOTOGRAFÍA 15. SISTEMA DE DECANTACIÓN Y BOMBEO DE ARENA. PUERTO DE DURBAN [40].....	58
FOTOGRAFÍA 16. CONSTRUCCIÓN DEL NUEVO MUELLE EN LA ZONA INFERIOR DERECHA DE LA FOTOGRAFÍA [45]	59
FOTOGRAFÍA 17. PUENTE STOREBAELT (MARTIN FALBISONER. COMMONS.WIKIMEDIA.ORG ).....	60
FOTOGRAFÍA 18. THE CONFEDERATION BRIDGE (DENNIS JARVIS. <a href="https://www.flickr.com/people/archer10/">HTTPS://WWW.FLICKR.COM/PEOPLE/ARCHER10/</a> ).....	61
FOTOGRAFÍA 19. ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO COLOCADOS EN CARRERA DE MAREAS PARA ENSAYAR INHIBIDORES DE CORROSIÓN [57] .....	69
FOTOGRAFÍA 20. CURADO SUPERFICIAL CON AGUA POR ASPERSIÓN ( <a href="https://shutterstock.com">HTTPS://SHUTTERSTOCK.COM</a> ).....	89
FOTOGRAFÍA 21. ÁRIDO LIGERO DE ARCILLA EXPANDIDA. ( <a href="https://www.arlita.es">HTTPS://WWW.ARLITA.ES</a> ) .....	89
FOTOGRAFÍA 22. POLÍMEROS SUPERABSORBENTES. ( <a href="https://www.sapgel.com">HTTPS://WWW.SAPGEL.COM</a> ) .....	89
FOTOGRAFÍA 23. FIBRAS DE CELULOSA. ( <a href="https://inforceglobal.com">HTTPS://INFORCEGLOBAL.COM</a> ).....	89
FOTOGRAFÍA 24. DETALLE DE LA EJECUCIÓN DE LA LOSA DE HORMIGÓN DE UN PUENTE. EL COLOR VERDE DE LAS ARMADURAS SE DEBE A QUE ESTÁN REVESTIDAS CON RESINA EPOXI. [123] .....	100
FOTOGRAFÍA 25. UBICACIÓN DE LOS PUENTES FABRICADOS EN EL ESTADO DE INDIANA EN 2013. [123] .....	100
FOTOGRAFÍA 26. ESTUDIO DE LA CONSERVACIÓN DE PLATAFORMA DE ALMACENAMIENTO DE CARGAS (UNIN PACIFIC) CONSTRUIDO EN 2005 (DALLAS, TX, EEUU) TRAS 8 AÑOS DE USO [125] .....	100
FOTOGRAFÍA 27. PLATAFORMA DE HORMIGÓN ALIGERADO EN CONSTRUCCIÓN. PROYECTO FLOTAGEN. [131][132].....	103
FOTOGRAFÍA 28. PLATAFORMA FLOTAGEN EN ACTIVO DESDE 2019. [131][132] .....	103

FOTOGRAFÍA 29. PLATAFORMA SOUTH ARNE (1999) [135].....	103
FOTOGRAFÍA 30. TARSUUT ISLAND (1981) HECHA A BASE DE CAJONES SUMERGIBLES ALIGERADOS [136] .....	103
FOTOGRAFÍA 31. BARCOS DE HORMIGÓN ALIGERADO (SENTIDO HORARIO DESDE ARRIBA A LA IZQUIERDA) PERALTA FABRICADO EN 1920, VIDAL, ARMAND CONCIDERE, Y YOGN DE 1943 [137] .....	103
FOTOGRAFÍA 32(SAPGEL.COM) .....	104
FOTOGRAFÍA 33. MONITORIZACIÓN DE CORROSIÓN MEDIANTE ELECTRODOS DE NÍQUEL. [166] .....	109
FOTOGRAFÍA 34. VISTA DE LOS DOS MUROS FABRICADOS PARA EL ENSAYO, 2M X 1,5M X 0,05M. [166] .....	110
FOTOGRAFÍA 35. ENSAYO ASTM C 1698 Y POSICIONAMIENTO DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA EN EL ARMADO DEL MURO PARA SEGUIMIENTO Y CONTROL. [166].....	110
FOTOGRAFÍA 36. EJECUCIÓN DE LA PLATAFORMA DE HORMIGÓN BAJO CARPA PARA PROTEGER DEL VIENTO Y DEL CALOR. [167].....	110
FOTOGRAFÍA 37. OBRA DE REPARACIÓN DE DEPÓSITO DE AGUA, EN THÜRINGEN, ALEMANIA, CON PSA MEDIANTE MORTERO PROYECTADO. [168] .....	110
FOTOGRAFÍA 38. APLICACIÓN DE HORMIGÓN PROYECTADO EN LYNBBY, DINAMARCA. [142] .....	110
FOTOGRAFÍA 39. MONTAJE FINAL DEL PABELLÓN DE LA COPA DEL MUNDO DE FÚTBOL DE 2006. [168] .....	111
FOTOGRAFÍA 40. NANO SÍLICE EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. [188] .....	117

## 1. INTRODUCCIÓN. MEJORAS DEL HORMIGÓN PARA PREVENIR LA CORROSIÓN

El hormigón armado en ambiente marino está expuesto a mayor riesgo de corrosión de sus armaduras debido a la presencia de cloruros en el ambiente. Con el paso del tiempo, los cloruros exteriores avanzan a través del recubrimiento de hormigón, y cuando alcanzan concentración suficiente en las armaduras, la protección que tiene el acero por estar embutido en hormigón desaparece, quedando el armado desprotegido e iniciándose la corrosión.

Para evitar la corrosión de las armaduras se controlan, de forma simultánea, dos factores fundamentales: el espesor de recubrimiento colocado y la calidad del hormigón que conforma este recubrimiento.

Este estado del arte se centra en el estudio de aquellas herramientas que actúan sobre la calidad del hormigón para hacer que sus prestaciones sean óptimas y ralenticen lo máximo posible el acceso de los cloruros desde el exterior.

El documento se ordena desde las medidas más consolidadas para mejorar la durabilidad del hormigón hasta aquellas más novedosas y de las que sólo se tienen estudios de laboratorio.

El primer capítulo está destinado al estudio de los hormigones con adiciones puzolánicas. Estas adiciones ya están recogidas en la normativa. En España, el Código Estructural recomienda su uso en ambiente marino, y cuando la zona es de carrera de mareas y salpicaduras, incluso obliga a que se utilicen para garantizar la vida útil de las estructuras. En este capítulo se expone, en primer lugar, cuáles son las adiciones puzolánicas más comunes, sus características y cómo modifican las propiedades del hormigón. A continuación, se recoge de la bibliografía en qué manera afectan a los hormigones en ambiente marino, y se muestran ejemplos de obras ubicadas en este ambiente que las han utilizado. De esta manera, se ha podido constatar el aumento de la concentración de adiciones en el hormigón y cómo se combinan varias adiciones en un mismo hormigón para optimizar la durabilidad, sin perder propiedades mecánicas a edades tempranas.

El segundo capítulo se dedica a los inhibidores de corrosión, productos químicos que, cuando se utilizan como aditivo del hormigón en la concentración adecuada, pueden prevenir la corrosión del acero de armado, sin producir efectos adversos en las propiedades del hormigón. Se han recopilado los tipos de inhibidores que existen y cómo funcionan, diferenciando aquellos que se dosifican en el hormigón de los que se añaden sobre las superficies del hormigón ya colocado. Se recoge también la normativa que les aplica, cómo se puede evaluar su eficacia y, finalmente, qué productos comerciales existen en España y cómo ha sido su comportamiento en casos reales de aplicación en obras expuestas al ambiente marino.

El tercer capítulo se centra en los hormigones autocurables. Optimizar la calidad del recubrimiento depende, tanto de la adecuada selección de los materiales que forman el hormigón, como de su correcta ejecución. Para ello, uno de los factores determinantes es llevar a cabo un curado adecuado del hormigón. Una posibilidad novedosa para alcanzar este objetivo es la utilización de hormigones autocurables, para lo cual se adiciona al hormigón un componente con capacidad para retener agua y liberarla en el hormigón ya endurecido durante las 72 horas siguientes a la puesta en obra. Estos compuestos para el autocurado cobran mucha relevancia cuando las exigencias al hormigón son muy altas, lo que obliga a dosificar con elevados contenidos de cemento y relaciones agua/cemento muy bajas. Ahora bien, también se han identificado aplicaciones prácticas cuando las condiciones ambientales son adversas y favorecen el secado superficial del hormigón. Las dos opciones principales que se recogen en este documento son los áridos ligeros y los polímeros superabsorbentes. En ambos casos se expone cómo se caracterizan y dosifican estos componentes en el hormigón, cómo afectan a las propiedades del material, así como ejemplos prácticos de aplicación.

Finalmente, el capítulo cuarto se dedica a las nano adiciones. El uso de materiales nanométricos en el hormigón es muy novedoso y se encuentra actualmente en fase de investigación. La adición más estudiada en el hormigón es la nano sílice, que actúa como nano adición puzolánica en el hormigón.

En este capítulo se compara la eficacia de la nano sílice frente al uso de micro sílice (humo de sílice), adición normalizada y tratada en profundidad en el primer capítulo. Se evalúa cómo afecta esta nano adición a las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón. A continuación, se valoran otras nano adiciones; entre ellas, la nano alúmina, que aumenta el módulo de elasticidad y la resistencia a la abrasión del hormigón; las nano fibras y nano tubos de carbono, cuya adición tiene el efecto de nano armado; las nanoarcillas, que modifican la estructura final del cemento hidratado, mejorando las propiedades mecánicas y disminuyendo la permeabilidad. Y, por último, se exponen las posibles aplicaciones del nano hierro, nano óxido de titanio y los nano cementos. Se finaliza el capítulo con una valoración del comportamiento frente a los procesos de corrosión de las nano adiciones más importantes.

## 2. HORMIGÓN CON ADICIONES PUZOLÁNICAS

Se conoce como adiciones a aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos, o con hidraulicidad latente que pueden añadirse al cemento, mortero u hormigón, con la finalidad de mejorar algunas de las características físicas y/o químicas, o bien para conferirles algunas especiales [1].

En el caso de la adición al cemento, éstas se incorporan generalmente en el molino de cemento, junto con el clinker y el regulador de fraguado. Si la adición se hace a los morteros u hormigones, se añade a la mezcla como complemento de la cantidad de cemento o como sustitución de una parte, pero sin que esta sustitución de lugar a que la cantidad de cemento sea inferior a los mínimos especificados, en el caso español, en el Código Estructural [1].

Este capítulo se centra en la utilidad de 3 adiciones puzolánicas para mejorar la durabilidad del hormigón expuesto al ambiente marino: las cenizas volantes, las escorias granuladas de alto horno y el humo de sílice.

### 2.1. REACCIÓN PUZOLÁNICA DE LAS ADICIONES

La actividad puzolánica de una adición incluye todas las reacciones químicas que tienen lugar entre los componentes activos de la adición, la portlandita formada durante la hidratación del cemento portland y el agua.

De forma genérica, se puede indicar que la combinación de silicatos, aluminosilicatos o aluminatos con el  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presentes en el agua como producto de la hidratación del cemento reaccionan dando productos hidratados con capacidad conglomerante. Se puede esquematizar la reacción como [2]:

<p>A = <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></p> <p>C = <math>\text{CaO}</math></p> <p>H = <math>\text{H}_2\text{O}</math></p> <p>S = <math>\text{SiO}_2</math></p>	<p><math>\text{AS} + \text{CH} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{C-A-H}</math></p> <p>(Los guiones representan estequiometría variable)</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Los productos de reacción que se forman en estas reacciones entre la adición puzolánica y la portlandita son los mismos que se producen en la hidratación del cemento, ya que la composición química del cemento y de la mezcla adición-portlandita son similares (Figura 2). Por tanto, diferentes tipos de adición puzolánica producirán los mismos aluminatos y silicatos hidratados [3]. De esta manera, la formación de nuevos silicatos cálcicos hidratados va a mejorar las propiedades mecánicas y va a disminuir la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada, a la vez que permite fijar la portlandita, evitando problemas de lixiviación por aguas puras o ataque al hormigón por aguas ácidas, mejorando así la durabilidad de los hormigones con adiciones [1].

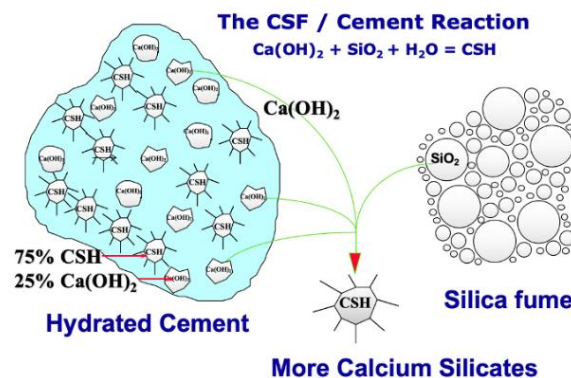


Figura 1. Reacción puzolánica en la pasta de cemento

(<https://scancemmaterials.com/silica-fume/>)

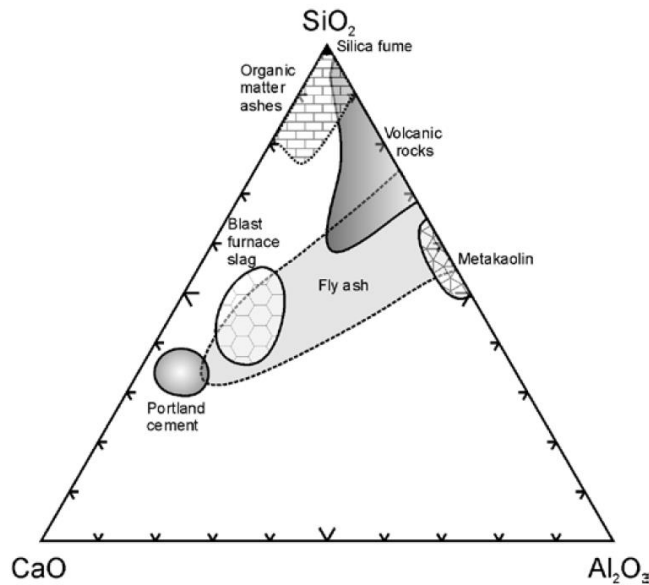


Figura 2. Diagrama ternario CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (wt%) situando la composición química principal de los principales tipos de adiciones (modified after Glasser et al. 1987) [2]

### 2.1.1. PUZOLANICIDAD Y MODIFICACIÓN DE LA RED POROSA DEL HORMIGÓN

Las adiciones puzolánicas reaccionan con la portlandita del hormigón, fijándola y formando nuevos silicatos cálcicos que van rellenando los huecos que ocupaba la portlandita y los que inicialmente deja la hidratación del cemento. Por tanto, las adiciones puzolánicas tienen la capacidad de modificar la red porosa del hormigón y, por tanto, su capacidad para contener y transportar agua.

El documento GEHO-CEB [4] indica que la permeabilidad del hormigón está decisivamente influida por la estructura porosa de la pasta de cemento, que a su vez se define por dos parámetros fundamentales:

- La **porosidad fundamental** está relacionada con los poros interconectados a través de los cuales es posible el transporte de líquidos y/o gases y/o el intercambio de sustancias disueltas.
- La **distribución del tamaño de los poros** influye sobre el tipo y velocidad de los mecanismos de transporte. El tamaño de los poros permite clasificarlos en: poros de compactación, poros de aire ocluido, poros capilares y poros de gel. Los poros capilares y los macroporos (aire ocluido y compactación) son los más estrechamente relacionados con la durabilidad.

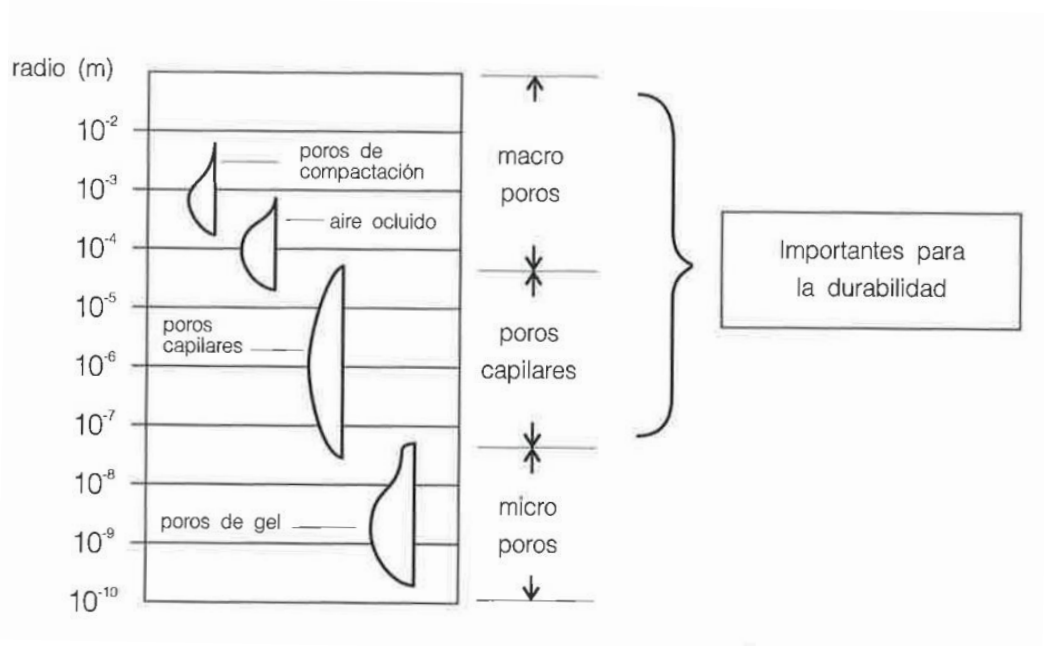


Figura 3. Red porosa del hormigón, según Setzer (Boletín nº12 GEHO – CEB) [4]

Entendido como se define la red porosa del hormigón, el manual de hormigón de Metha [5] define cómo actúan sobre ella las adiciones puzolánicas. Para ello, se apoya en el trabajo de laboratorio realizado con cementos con 0, 10, 20 y 30% de puzolana natural, ensayados con la misma relación agua-material cementante. Se evaluó la distribución de la red porosa del hormigón tras 28, 90 y 365 días (Figura 4) para obtener que, cuando se supera el 20% de adición, tras un año de curado, no se identifican en el hormigón poros superiores a 0,1  $\mu\text{m}$ . Por tanto, se elimina gran parte de los poros importantes desde el punto de vista de la durabilidad, ya que la reacción puzolánica produce el afinamiento de su tamaño, transformando los huecos capilares grandes en una red microporosa.

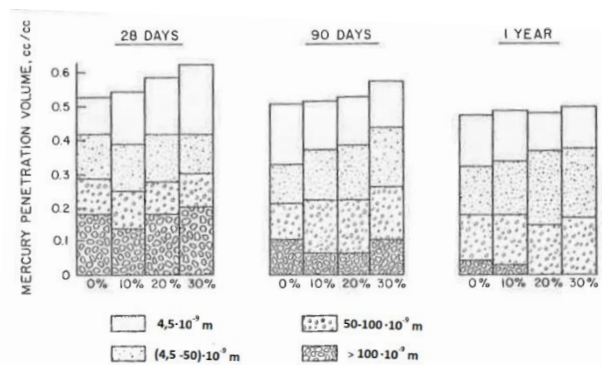


Figura 4. Distribución de poros en función del tipo de adición puzolánica. (METHA, P.K., MONTERIRO, P.J.M. Concrete. Structure, properties and materias) [5]

Son dos los procesos físicos de la reacción puzolánica que modifican la red porosa del hormigón:

- La formación de productos secundarios de hidratación del cemento (principalmente silicato cálcico hidratado) alrededor de las partículas puzolánicas, que tiende a llenar los huecos capilares grandes con material microporoso. El proceso de transformación de un sistema con huecos capilares grandes en un sistema microporoso se denomina **refinamiento del tamaño de poro**.
- La sustitución de cristales grandes y orientados de hidróxido cálcico por productos de reacción de baja cristalinidad, menor tamaño y más desorientados. Se produce, por tanto, el **refinamiento del tamaño de grano**.

También el documento Report nº7 de RILEM [6] muestra trabajos similares de evaluación de la distribución de poros del hormigón en función del porcentaje añadido, en este caso, de cenizas volantes.

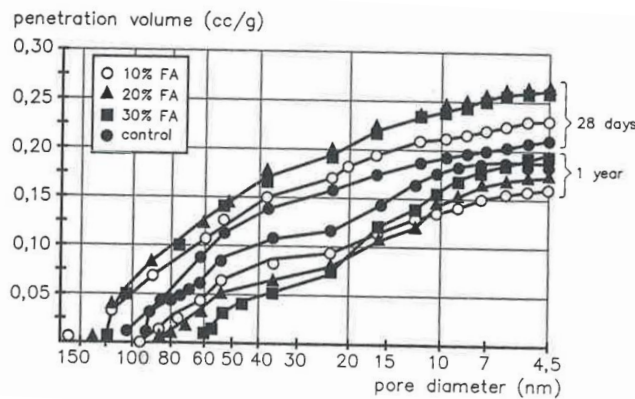


Figura 5. Perfil de porosimetría a 28 días y 1 año, en función del contenido de ceniza volante. (RILEM Report 7. Fly Ash in Concrete) [6]

Los resultados son similares en ambos estudios: las adiciones puzolánicas mejoran la permeabilidad del hormigón, refinando su red porosa.

### 2.1.2. CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados [7].

Para entender la reacción puzolánica de las cenizas en el hormigón, en primer lugar, hay que analizar los compuestos que forman una ceniza y cómo se presentan. Las cenizas volantes están compuestas [3,8] principalmente por esferas vítreas formadas durante el enfriamiento rápido del residuo de combustión del carbón pulverizado. La composición de estas esferas depende mayormente de la composición del carbón original y de la temperatura. Es la composición de la fase vítrea de las cenizas la que determina su reactividad, al ser la sílice amorfa en el vidrio la responsable principal de la actividad puzolánica de las cenizas, ya que reacciona con la portlandita para formar gel CSH.

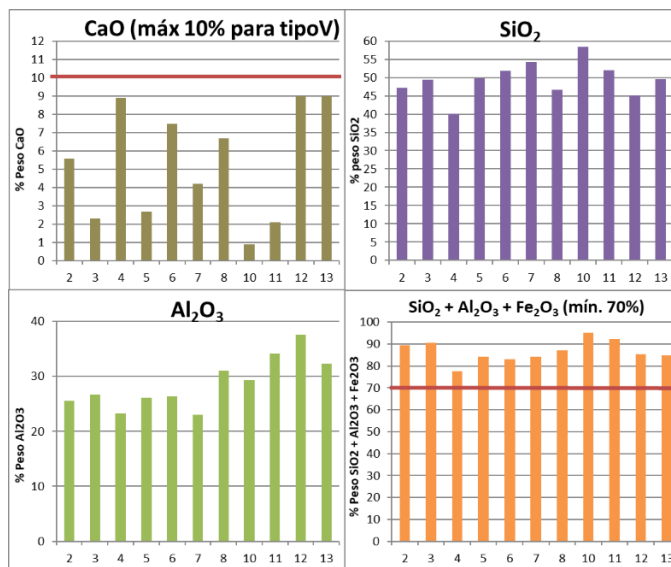


Figura 6. Composición química de 13 cenizas españolas (2002) [9]

Además del contenido en sílice vítrea y aluminio, las mayores diferencias en la fase vítrea están en la cantidad de calcio que contienen. Los carbones con bajo contenido de calcio (antracita, bituminosos y algunos lignitos) dan partículas vítreas de aluminosilicatos. Los carbones sub-bituminosos y algunos lignitos resultan en aluminosilicatos cálcicos.

Los efectos de las cenizas volantes sobre el hormigón son [1,10]:

- En el hormigón fresco:
  - Aumento del tiempo de fraguado, tanto del inicio como del final del mismo, permitiendo reducir la cantidad de agua para una consistencia concreta.
    - Aumento de la cohesión y trabajabilidad del hormigón.
    - Reducción de la exudación y segregación.
    - Al disminuir la cantidad de cemento, disminuye el calor de hidratación.
    - Aumento del volumen de material cementante, al ser la densidad de las cenizas inferior a la del cemento.
- En el hormigón endurecido:
  - Si se mantiene el hormigón en medio húmedo y a temperatura moderada, la resistencia a largo plazo puede llegar a superar a la resistencia del hormigón sin cenizas volantes.
  - La resistencia inicial se reduce.
- Durabilidad:
  - La reserva alcalina de los hormigones con cenizas puede ser menor que la de los fabricados sin ellas. Sin embargo, no modifica considerablemente la protección de las armaduras ya que, aunque puede disminuir la reserva alcalina, aumenta su impermeabilidad.

#### 2.1.2.1 Tipos de cenizas en España

Las cenizas volantes adicionadas durante la fabricación del cemento, (Anejo 3 de la RC-16) [11] pueden ser silíceas (V) o calcáreas (W). Las primeras tienen propiedades puzolánicas; las segundas pueden tener, además, propiedades hidráulicas.

La ceniza volante silícea (V) es un polvo fino de partículas esféricas que tiene propiedades puzolánicas. Consta esencialmente de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos.

El contenido de dióxido de silicio reactivo no será inferior al 25% en masa.

La proporción de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ) será menor del 10,0% en masa, y el contenido de óxido de calcio libre, determinado por el método descrito en la norma UNE-EN 451-1, no excederá del 1,0% en masa. Las cenizas volantes que tienen un contenido de óxido de calcio libre superior al 1,0% en masa, pero inferior al 2,5% en masa son también aceptables con la condición de que el requisito de la expansión (estabilidad) no sobrepase los 10 mm cuando sea ensayada conforme a la norma UNE-EN 196-3, usando una mezcla de un 30% en masa de ceniza volante silícea y un 70% en masa de un cemento tipo CEM I.

La ceniza volante calcárea (W) es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas. Consta esencialmente de óxido de calcio reactivo ( $\text{CaO}$ ), dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos. La proporción de óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) reactivo será superior a un 10 % en masa. Si esta proporción no supera el 15% en masa se exigirá, además, que el contenido en masa de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) reactivo sea superior al 25%.

En caso contrario, su resistencia a compresión, determinada conforme a la norma UNE-EN 196-1, será de al menos  $10 \text{ N/mm}^2$  a 28 días.

La ceniza, como componente del cemento, deberá cumplir también lo especificado en el Anejo 2 de la RC-16 [11]:

- la relación  $\text{SiO}_2/(\text{CaO}+\text{MgO})$ , en tanto por ciento en masa, debe ser superior a 3,5, siendo CaO el óxido de calcio reactivo definido en la norma UNE-EN 197-1.
- la ceniza volante silíceas molida a finura Blaine equivalente a la del cemento de referencia, con una tolerancia de  $\pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$ , y mezclada con éste en proporción cemento/material puzolánico igual a 75/25 en masa, deberá cumplir el ensayo de puzolanidad a la edad de 8 días o 15 días, según la norma UNE-EN 196-5.
- La ceniza volante silíceas (V) molida a finura Blaine equivalente a la del cemento de referencia ( $\pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) y mezclada con éste en proporción cemento/ceniza o puzolana natural igual a 75/25 en masa, deberá presentar una resistencia a compresión a la edad de 28 días igual o superior al 75 por ciento de la resistencia del cemento de referencia a la misma edad (índice de actividad resistente, IAR), según el método de ensayo de la norma UNE-EN 196-1. El cemento de referencia, tanto para el ensayo de puzolanidad como para el de resistencia, será el CEM I con un contenido en clínker de  $\text{C3A} \leq 5,0\%$ .

Cuando las cenizas volantes se adicionan al hormigón, el Código Estructural [7] no diferencia tipos de ceniza (V o W) como hace la RC-16 [11], aunque la limitación al calcio que realiza la norma implica que sólo se pueden utilizar cenizas silíceas (V). Además, no se fijan límites al contenido de  $\text{SiO}_2$  reactiva, pero se evalúa indirectamente a través del Índice de Actividad Resistente.

Aunque están reglamentadas, las cenizas calcáreas no se utilizan en cementos puzolánicos, y no se pueden adicionar al hormigón, por tanto, el estudio se centrará en el uso de cenizas volantes silíceas ( $\text{CaO} < 10\%$ ).

Tabla 1. Requisitos químicos. Cenizas volantes. Código Estructural [7]

(Límites expresados en masa de ceniza seca)

Cloruros	$\leq 0,10 \%$
Pérdida por calcinación	$\leq 5\%$ : Categoría A
$\text{SO}_3$	$\leq 3,0 \%$
CaO libre	$\leq 2,5 \%$ (por encima del 1,5% hay que garantizar la estabilidad a volumen)
CaO reactivo	$\leq 10,0 \%$
Finura (retenidos en el tamiz 45 micras)	Clase N: $\leq 40\%$ Clase S: $\leq 12\%$
Índice de actividad	$\geq 75\%$ a 28 días $\geq 85\%$ a 90 días
Estabilidad a volumen	$< 10 \text{ mm}$
Agua necesaria para la muestra	$\leq 95\%$ de la del cemento de referencia (Sólo para categoría S)

### Puzolanas naturales

Las puzolanas son sustancias naturales de composición silíceas o silico-aluminosa o combinación de ambas. Las puzolanas son también puzolánicas: finamente molidas y en presencia de agua reaccionan, a la temperatura ambiente normal, con el hidróxido de calcio disuelto  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia.

Aunque el origen es muy distinto, la composición es similar y propiedades de las puzolanas naturales y de las cenizas volantes equivalentes.

Las puzolanas están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros óxidos. La proporción de óxido de calcio reactivo es de poca importancia para el endurecimiento. Las puzolanas deben prepararse correctamente, es decir, deben ser seleccionadas, homogeneizadas, secadas o tratadas térmicamente y pulverizadas, dependiendo de su estado de producción o de suministro. Las puzolanas naturales solo pueden adicionarse al cemento. Su adición directa al hormigón no está recogida en el Código Estructural.

En la normativa española, las exigencias a las puzolanas naturales como componente del cemento son las mismas que las exigencias a las cenizas volantes:

- El contenido de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) no será menor del 25% en masa.
- la relación  $\text{SiO}_2/(\text{CaO}+\text{MgO})$ , en tanto por ciento en masa, debe ser superior a 3,5.
- La puzolana molida a finura Blaine equivalente a la del cemento de referencia y mezclada con éste en proporción cemento/material puzolánico igual a 75/25 en masa, deberá cumplir el ensayo de puzolanidad a la edad de 8 días o 15 días. A 28 días tendrá un índice de actividad resistente superior al 75%.

Los tipos de cementos que se pueden obtener con cenizas volante (V) tienen un equivalente con propiedades similares en cementos con puzolana natural (P), siempre y cuando la composición de ambas adiciones sea similar.

En este capítulo, las propiedades del hormigón con cenizas volantes y la aplicación de esta adición a estructuras en ambiente marino se hace extensible a los hormigones con puzolana natural. Por ello, en los ejemplos de estructuras portuarias con ceniza volante se han incluido estructuras realizadas con puzolanas naturales.

#### 2.1.2.2. Otras clasificaciones de cenizas volantes.

En el caso de Estados Unidos [12], ASTM C618 diferencia dos tipos diferentes de cenizas en función de su composición química elemental: clase C y clase F.

Los cuatro constituyentes principales de una ceniza varían de forma considerable:  $\text{SiO}_2$  (35-60%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10-30%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4-20%) y  $\text{CaO}$  (1-35%). La suma de los 3 primeros componentes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) debe superar el 70% para que sea clasificada como ceniza de clase F, mientras que sólo debe superar el 50% para que sea de clase C. Las cenizas de clase C generalmente contienen más del 20% de  $\text{CaO}$ , por lo que la suma de silicio, aluminio y hierro es considerablemente inferior al 70%.

En Canadá [13] se emplea una división en tres grupos:

- Clase F: bajo contenido de calcio (< 8wt%  $\text{CaO}$ )
- Clase CI: contenido intermedio de calcio (8-20 wt%  $\text{CaO}$ )
- Clase CH: alto contenido de calcio (> 20wt%  $\text{CaO}$ )

Cuando se utilicen estudios de adiciones puzolánicas con clasificaciones de Estados Unidos o Canadá, se considerarán equivalentes a las cenizas silíceas europeas (V), las cenizas tipo F.

### 2.1.3. HUMO DE SÍLICE

El humo de sílice es un subproducto que se origina en la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos eléctricos de arco para la producción de silicio y ferrosilicio [7].



Figura 7. Esquema de obtención de silicio y microsíllice en la fábrica de Sabón. A Coruña [14]

Este material, también llamado microsíllice o sílice activa, es un producto de gran finura que se recoge en filtros de mangas, y cuya composición es de microesferas de sílice amorfa en un porcentaje comprendido entre el 85 y 98% [14].

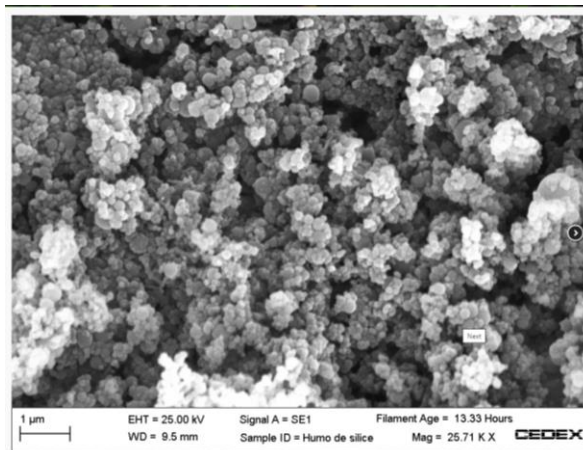


Figura 8. Microsíllice en el MEB [14]

La composición del humo de sílice variará en función del producto que se quiere obtener en el proceso industrial. La siguiente tabla muestra la composición del humo de sílice en España, en función del material de origen [14]. Se observa cómo, en todos los casos, el contenido en sílice amorfa es muy elevado.

Tabla 2. Composición química del humo de sílice [14]

COMPOSICIÓN (%)	SILICIO	FERRO-SILICIO	OTRAS ALEACIONES	HUMO DE SÍLICE PRODUCIDO EN ESPAÑA
SiO <sub>2</sub>	92	74-98	87	+95
C libre	2,6	2,5	1,7	-
SiC	1,8	0,2	0,5	-
MgO	0,6	0,6	1,0	0,22
Si libre	0,3	0,1	0,1	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,5-3	1,0	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	1-2,5	0,3	-
CaO	0,5	0,3	6,0	0,68
Na <sub>2</sub> O	0,1	1	0,2	0,10
K <sub>2</sub> O	0,6	1	1,6	0,22
S total	0,2	0,4	0,6	-
SO <sub>4</sub>	-	-	-	0,076
Cl	-	-	-	0,006
Pérdida al fuego(1.000°C)	2,8	3,0	4,0	2,78

El humo de sílice es una adición puzolámica por ser un material muy rico en sílice amorfa. Esta actividad puzolánica es efectiva a partir del segundo día de fabricación del hormigón, y evoluciona con la edad. Se considera que a los 90 días la actividad puzolánica del humo de sílice ha finalizado [14]. La rapidez con que evoluciona esta adición puzolánica se relaciona con la elevada finura del humo de sílice que, con diámetro de partícula medio de 0,15 micras, aporta entre 50.000 y 100.000 partículas de humo por cada grano de cemento en el hormigón [15].

Pero la elevada finura del humo de sílice, además de acelerar la reacción puzolánica, modifica la trabajabilidad del hormigón: aumenta la cohesión, pero también aumenta la demanda de agua, siendo necesario el uso de superplastificantes para que la consistencia sea adecuada [15].

Al igual que sucede con el resto de las adiciones, el humo de sílice hace más homogénea a la red porosa del hormigón, disminuyendo el número de poros de mayor tamaño. La reducción de poros también hace que poros continuos se transformen en poros discontinuos, reduciendo por tanto la permeabilidad, y de esta manera, mejorando la durabilidad [16].

El humo de sílice mejora la resistencia a compresión del hormigón. La mayor ganancia se produce entre 3 y 28 días de edad.

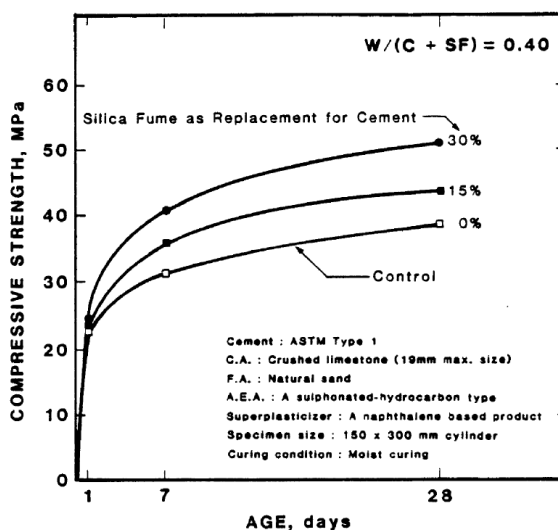


Figura 9. Efecto del humo de sílice en la ganancia de resistencia a compresión (ACI). Durabilidad. [16].

Las propiedades del humo de sílice en el hormigón (aumento de la cohesión, aumento de la resistencia a compresión y disminución de la porosidad) determinan sus aplicaciones principales [3]:

- Hormigón proyectado: el humo de sílice da cohesión al hormigón fresco, facilitando la puesta en obra y mejorando la eficiencia de las fibras.
- Hormigón de alta resistencia: con el uso de humo de sílice y superplastificantes se alcanzan resistencias de hasta 130 MPa en hormigones fabricados in situ. Trabajar con altas resistencias permite mejoras en el diseño, reduciendo secciones en elementos a compresión, o permitiendo el aumento de luces en elementos a flexión.
- Hormigón ligero estructural [17]: es un hormigón 25 a 30% más ligero que el hormigón estructural, que se obtiene sustituyendo todo o parte del árido grueso por árido ligero. Para alcanzar altas resistencias se incorporan al hormigón adiciones puzolánicas (entre ellas el humo de sílice) y superplastificantes, que permiten mantener la relación agua-material cementante por debajo de 0,45. El menor peso de este hormigón en puentes permite menos armado, mayores luces, recrecidos sin modificar cimentaciones, etc.
- Hormigón de alta durabilidad: se introduce para proteger al hormigón de la reacción álcali sílice y/o de los cloruros.

### Humo de sílice en España

El humo de sílice, adicionado durante la fabricación del cemento (Anejo 3 de la RC-16) [11] , debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Contenido de dióxido de silicio amorfo de, al menos, el 85% en masa.
- Pérdida por calcinación inferior al 4% en pasa (empleando un tiempo de calcinación de una hora).
- Superficie específica (BET) de, al menos, 15 m<sup>2</sup>/g.

De esta manera se controla la finura, reactividad e impurezas del material.

El humo de sílice, junto con las cenizas volantes, son las únicas adiciones que pueden ser añadidas durante la fabricación del hormigón. En este caso, las características de la adición quedan fijadas por el Código Estructural, tal como se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3. Requisitos esenciales del humo de sílice. Código Estructural [7]

Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	≥ 85%
Cloruros	≤ 0,30 %
Pérdida por calcinación	< 4%
Sulfatos (SO <sub>3</sub> )	≤ 2,0 %
CaO libre	≤ 1,0 %
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	15,0 – 35,0
Índice de actividad resistente	≥100%
Silicio elemental	≤ 4,0 %

A diferencia de lo que ocurriría con las cenizas volantes, no existen diferentes tipos de humo de sílice. Además, las exigencias a esta adición son iguales, independientemente de que se añadan en el cemento o durante la fabricación del hormigón.

Otras clasificaciones del humo de sílice.

En el caso de Estados Unidos, la norma ASTM C1240 [18] y la norma AASHTO M307 [19] indican las exigencias fijadas al humo de sílice para su utilización en el hormigón. La siguiente tabla recoge las exigencias de ASTM, similares a las españolas y a las de ASSTHO.

Tabla 4. Requisitos esenciales del humo de sílice. ASTM.

Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	≥ 85%
Pérdida por calcinación	< 6%
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	≥15,0
Índice de actividad resistente	≥105%
Silicio elemental	≤ 4,0 %
Partículas de más de 45 micras	≤ 10,0 %

**2.1.4. ESCORIAS DE ALTO HORNO**

El alto horno [14] es la instalación utilizada para la obtención del arrabio, que a su vez es la materia prima con la que se fabrica el acero. El alto horno se alimenta con minerales de hierro, coque y fundentes. Los productos finales obtenidos son el arrabio y la escoria, que fluyen juntos en estado líquido hasta decantarse por diferencia de densidad y separarse.

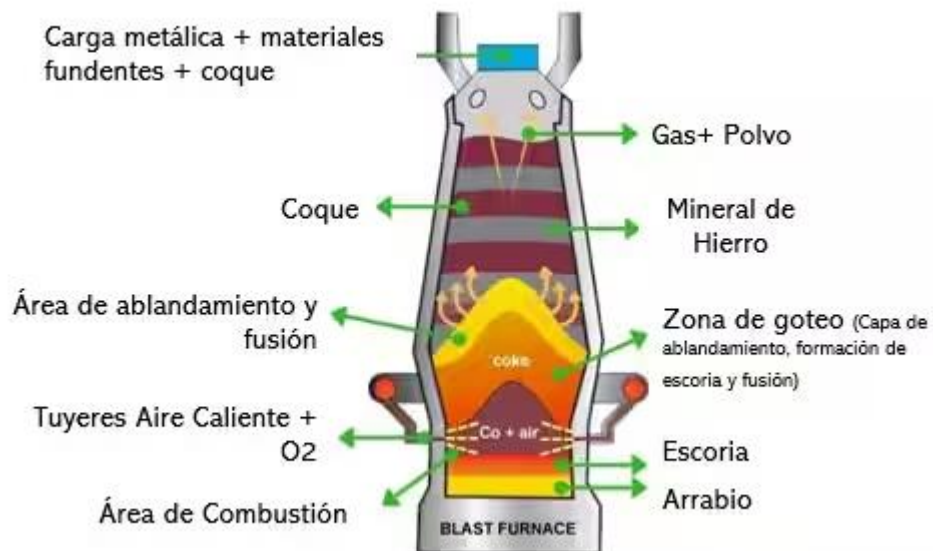


Figura 10. Esquema de alto horno (Web Thermofisher Scientific)

El tipo de escoria obtenido dependerá del proceso de enfriamiento empleado. En el cemento se utiliza la escoria granulada, que se obtiene al enfriar la escoria fundida sobre un chorro de agua fría, formándose partículas alveolares cortantes, similares a una arena. Esta escoria se seca y muele (finura Blaine de 400 a 500 m<sup>2</sup>/kg) hasta obtener una finura similar o menor a la del cemento portland.

La composición media de las escorias (datos de la factoría de Gijón [14]) son:

Tabla 5. Composición de las escorias [14]

Compuesto	Porcentaje
CaO	38-42
SiO <sub>2</sub>	32-37
MgO	7-9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-14
S	<1
FeO	0,4-0,8
MnO	0,2-0,6
TiO <sub>2</sub>	0,3-0,5
Índice basicidad (CaO +MgO)/(SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	≤1,2
Índice de basicidad simple CaO/SiO <sub>2</sub>	≤1,3

La escoria granulada, al conservar su calor de cristalización, tiene una gran riqueza energética y una hidraulicidad latente que permite formar, en contacto con agua, una serie de productos hidratados que cristalizan dando origen a un cuerpo sólido y estable frente a la acción del agua. La reacción es mucho más lenta que en el caso del cemento, existiendo tres vías para acelerarla: utilización de activantes químicos, aumento de la superficie específica y aumento de temperatura. De las 3 vías, los activantes químicos es la más utilizada, y en especial la activación básica, que consiste en aumentar el pH de la disolución acuosa por encima de 12, acelerando la disolución de los componentes. Los activantes básicos más utilizados son el cemento y la cal.

Los productos principales de hidratación que se forman en la mezcla entre cemento portland y escorias son esencialmente los mismos que los formados en la pasta de cemento hidratada: silicato cálcico - alcalino hidratado (CSH), ya que cuando el cemento con escorias se hidrata, las escorias reaccionan con los hidróxidos sódico, potásico y cálcico para formar CSH adicional [20].

Las escorias en los cementos hacen que el hormigón sea más fácil de colocar y compactar. Así, los ensayos han mostrado cómo al aumentar el contenido en escorias es necesario disminuir la relación agua/material cementante para mantener igual la consistencia del hormigón.

Las escorias también producen un aumento claro en el tiempo de fraguado del hormigón. Una sustitución del 35 a 40% por escorias, produce un aumento de 1 hora en el tiempo de fraguado.

Respecto a las resistencias, estas se ven reducidas a edades tempranas. El porcentaje de reducción estará relacionado con el grado de finura del cemento con escorias. Si embargo, a edades mayores, los cementos con escorias pueden incluso sobrepasar la resistencia del hormigón equivalente con cemento portland.

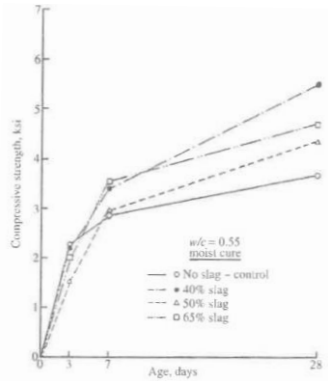


Figura 11. Resistencia a compresión del hormigón que contiene diferentes porcentajes de escorias, comparados con hormigón realizado sólo como cemento Portland [20]

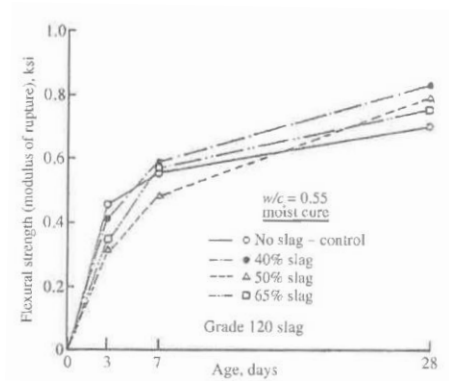


Figura 12. Resistencia a flexión del hormigón que contiene diferentes porcentajes de escorias, comparados con hormigón realizado sólo como cemento Portland [20]

El tiempo de curado es muy importante en el caso de los cementos con escorias. Los hormigones deben mantenerse en condiciones de temperatura y humedad adecuados durante el primer periodo de endurecimiento para que desarrolle toda su capacidad potencial de resistencia y durabilidad. A partir del 30% de escorias, el hormigón se hace aún más susceptible a la pérdida de resistencias por falta de curado.

La permeabilidad de los hormigones con escorias es muy inferior a la permeabilidad obtenida sin ellas. Y a mayor contenido de escorias, menor permeabilidad final se obtendrá. Como en el caso de las cenizas, la microestructura de la matriz cementante varía según avanza la reacción de las escorias con el hidróxido sódico, potásico y cálcico, que se genera en la hidratación del cemento Portland. Esta disminución de permeabilidad se traduce en una clara disminución de la penetración de los cloruros en el hormigón expuesto al ambiente marino.

Las escorias, desde un punto de vista estricto, no son una adición puzolánica, sino un componente del cemento con propiedades hidráulicas que se activa con el pH que aporta el clinker. Aun así, se incluye en el capítulo de las adiciones puzolánicas, ya que la mezcla escoria/cemento da productos de hidratación esencialmente iguales a los de la pasta de cemento y refinan la red porosa del hormigón, al igual que sucede con el humo de sílice o las cenizas volantes.

#### 2.1.4.1 Escorias en España

La Instrucción para recepción de cementos RC-16 [11] indica que la escoria granulada de horno alto [11] debe cumplir:

- Estar constituida, al menos en dos tercios de su masa, por fase vítrea.
- Relación en masa  $(CaO + MgO) / (SiO_2) > 1,0$ .
- La suma de óxidos de calcio, magnesio y silicio  $(CaO + MgO + SiO_2)$  no podrá ser inferior a dos tercios de su masa. El resto, contiene óxido de aluminio  $(Al_2O_3)$  junto con pequeñas cantidades de otros compuestos.

#### 2.1.4.2 Otras clasificaciones de las escorias

La norma ASTM C989 caracteriza a las escorias que se van a utilizar como adición a morteros y hormigones. Se clasifican las escorias en 3 grupos, en función del índice de actividad que tengan. En el caso de esta adición, la actividad se evalúa comparando los resultados de resistencia de un mortero con cemento portland y de un mortero con un 50% de sustitución de cemento por escoria.

La Tabla 6 muestra los tipos de escorias, así como las exigencias físicas y químicas que la norma fija para ellas.

Tabla 6. Composición de las escorias

Propiedades físicas		
Cantidad retenida en el tamiz de 45 micras	20	
Contenido de aire de mortero de escorias (%máximo)	12	
Propiedades químicas		
Máximo Contenido de sulfuros (%S)	2,5	
Contenido máximo de sulfatos (%SO <sub>3</sub> )	4	
Índice de actividad de las escorias (50/50)		
	Índice de actividad 7 días	Índice de actividad 28 días
Grado 80	---	70
Grado 100	70	90
Grado 120	90	100

### 2.1.5. MÁXIMO CONTENIDO DE ADICIONES PUZOLÁNICAS

#### 2.1.5.1. España

Las **cenizas volantes** pueden ser un componente del cemento. En este caso, en España se regula según la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-16) [11]. Los cementos con cenizas volantes que recoge la Instrucción son:

Tabla 7. Cementos con cenizas volantes según RC-16 [11]

CEM II	Cemento Portland con cenizas volantes	CEM II/A-V	6-20% cenizas
		CEM II/B-V	21-35% cenizas

Por tanto, el cemento con mayor contenido de **ceniza posible** tendrá un **35%**. Lo mismo sucede con las **puzolanas naturales** (P).

En el caso del **humo de sílice**, el único cemento que recoge la Instrucción es:

Tabla 8. Cementos con humo de sílice según RC-16 [11]

CEM II	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	6-10% humo de sílice
--------	-------------------------------------	------------	----------------------

Por tanto, ningún cemento podrá exceder el **10 % de humo de sílice**.

Finalmente, en el caso de **las escorias**, los tipos de cementos que define la Instrucción RC-16 son:

Tabla 9. Cementos con humo de sílice según RC-16 [11]

CEM II	Cemento Portland en escoria	CEM II/A-S	6-20% escoria
		CEM II/B-S	21-35% escoria
CEM III	Cemento de alto horno	CEM III/A	36-65% escoria
		CEM III/B	66-80% escoria
		CEM III/C*	81-95% escoria

\* No permite su uso el código estructural para hormigón armado

**El mayor contenido de escorias de un hormigón armado en ambiente marino será del 80%.**

Las cenizas volantes y el humo de sílice también pueden ser **adiciones al hormigón**, en cuyo caso quedan reguladas por el Código Estructural (la normativa no prohíbe adicionar escorias, pero requiere de un estudio específico). En ambos casos, se utilizará en el hormigón un CEM I. El contenido máximo de cenizas volantes es del 35% del peso de cemento, y en el caso del humo de sílice, del 10% del peso de cemento. En hormigón pretensado, el contenido de cenizas se baja hasta el 20% del peso de cemento.

Suponiendo un hormigón con 350 kg/m<sup>3</sup> de CEM I, se podrá añadir a cada metro cúbico 122,5 kg de cenizas volantes o 35 kg de humo de sílice, resultando en un 26% y 9% de adición en porcentaje de material cementante, respectivamente.

Finalmente, los cementos españoles pueden contener más de una adición puzolánica. Son los cementos puzolánicos y los cementos compuestos.

Tabla 10. Cementos con más de una adición según RC-16 [11]

CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/A	11-35% de ceniza, puzolana y/o humo de sílice*
		CEM IV/B	36-55% de ceniza, puzolana y/o humo de sílice*
CEM V	Cemento compuesto		18-30 de puzolana y/o ceniza
		CEM V/A	18-30% de escorias
			40-64% Clinker
			31-49% de puzolana y/o ceniza
	CEM V/B**	31-49% de escorias	
		20-38% Clinker	

\* El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%

\*\*No permite su uso el código estructural para hormigón armado

Por tanto, **los cementos IV permiten aumentar el contenido en cenizas más humo de sílice hasta alcanzar el 55% de adición puzolánica (con un máximo de 10% de humo de sílice).**

Finalmente, los **cementos V** permiten, además, mezclar cenizas con escorias. En el caso de hormigón armado estructural, se podrá adicionar **como máximo un 30% de cenizas más un 30% de escorias.**

### 2.1.5.2. Estados Unidos y Canadá

La mayor parte de los cementos utilizados en construcción en Estados Unidos son cemento Portland, según las especificaciones de la norma ASTM C 150, o cementos con adiciones, según la norma ASTM C 595.

La ASSHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) tiene normas equivalentes (M85 para cemento Portland y M240 para cementos con adiciones); y lo mismo sucede con la normativa canadiense (Canadian Standards Association CSA). Así, la norma CAN/CSA 3—A5—M88 designa al cemento Portland en cinco clases diferentes (Types 10, 20, 30, 40, or 50), correspondiendo a los cinco tipos de cemento portland que define la norma ASTM C 150 (Types I, II, III, IV, or V), y la norma CAN/CSA—A362 describe los cementos con adiciones.

Cuando los cementos puzolánicos están definidos por la norma ASTM C595 (cementos combinados puzolánicos), la norma considera cemento portland-puzolánico al cemento hidráulico consistente en la mezcla uniforme de cemento Portland o cemento Portland con escorias y componente puzolánico, obtenida moliendo ambos de forma conjunta o mezclado el cemento Portland con la ceniza finamente molida. Se definen los siguientes tipos de cemento:

- Tipo IS: Cemento Portland con Escorias. El límite superior para las escorias es del 95% del total de material cementante. Cuando se excede el 70% de escorias, el cemento puede contener también hidróxido cálcico.
- Tipo IP. Cemento Portland puzolánico. El contenido de adición puzolánica máximo será del 40% del material cementante.
- Tipo IT. Cemento Portland ternario. Con hasta 70% de la mezcla escoria + caliza + puzolana, en el que el contenido de puzolana no puede superar el 40% y el contenido de caliza no puede superar el 15%.

La misma norma ASTM C595 fija las condiciones que deben cumplir las diferentes adiciones para ser parte del cemento.

Tanto las escorias como las cenizas volantes pueden ser también adiciones directas al hormigón. Las condiciones que deben cumplir quedan descritas en las normas ASTM C618 y ASTM C989, para las cenizas y las escorias, respectivamente. Las escorias se suelen adicionar al hormigón entre el 25 y 70% del total de material cementante dosificado, según ACI [20], acorde a lo que la norma ASTM C595 utiliza para definir el cemento IS. En el caso de las cenizas adicionadas al hormigón, ACI no indica rangos recomendados, especificando tan solo que la proporción de cemento y adición debe ser seleccionada en cada caso acorde a las necesidades [8].

No define la normativa americana el cemento con humo de sílice. Por tanto, esta adición puzolánica sólo se adiciona en el hormigón. La norma ASTM C1240 determina las condiciones que debe cumplir el humo de sílice cuando se utiliza como adición al hormigón. El manual de uso del humo de sílice en el hormigón, editado por el US Department of Transportation [15], indica que, para hormigones de altas prestaciones, el contenido típico de humo de sílice que se utiliza está entre el 4 y el 15% del peso de cemento.

## **2.2. ADICIONES EN HORMIGÓN EXPUESTO AL AMBIENTE MARINO**

El American Concrete Institute edita una guía para el diseño y construcción de estructuras portuarias y costeras de hormigón (ACI 357.3R-14. [21]). Este documento indica que estas estructuras deben realizarse con un hormigón específicamente diseñado para las condiciones ambientales severas a las que están expuestas. Y en este sentido, se indica que la reducción de la permeabilidad del hormigón y la prevención de reacciones químicas expansivas, como la reacción álcali árido o el ataque por sulfatos, se pueden prevenir por el uso de cenizas volantes, escorias o humo de sílice, como parte del material cementante. Anterior a esta guía, se lleva a cabo una guía para el diseño y construcción de estructuras

fijas offshore (ACI 357R-84 Reapproved 1997. [22]). De igual manera, en el apartado destinado a materiales y durabilidad, se vuelve a indicar que el uso de materiales puzolánicos mejora la protección frente a la corrosión del armado de estas estructuras. Finalmente, el documento ACI más actualizado es un estado del arte sobre estructuras de hormigón flotantes (ACI357.2R10. [23]). Cuando se valora el hormigón empleado en estas estructuras, se indica que este hormigón requiere frecuentemente del uso de adiciones puzolánicas.

Por tanto, el uso de adiciones puzolánicas (cenizas volantes, escorias y/o humo de sílice) disminuye de forma significativa la permeabilidad del hormigón y, por tanto, aumenta el tiempo necesario para que los cloruros alcancen el armado y se inicie la corrosión. Por ello, el hormigón en ambiente marino requiere frecuentemente del uso de adiciones puzolánicas que, junto con los superplastificantes, permiten disminuir al máximo su permeabilidad y, por tanto, maximizar su vida útil por corrosión [21–24].

Uno de los estudios más completos que se ha llevado a cabo para dar valor al uso de adiciones puzolánicas en ambiente marino es el llevado a cabo en la Isla de Moose, en el estado de Washington (Estados Unidos) [25]. Este proyecto de investigación, ubicado en el Atlántico Norte, se inicia en 1936 para el estudio del hormigón en ambiente marino. Desde entonces, se han llevado a cabo más de 40 programas de investigación en este tipo de ambiente. Los resultados obtenidos en hormigones con y sin adiciones puzolánicas situados en zona de carrera de mareas han mostrado que los hormigones que incorporan cenizas volantes, escorias y humo de sílice aumentan de forma significativa su resistencia a la penetración de los cloruros. Este beneficio parece incrementarse con el aumento del contenido de adición puzolánica. Hasta ahora, se conocen los resultados con contenidos de cenizas de hasta el 25%, de escorias hasta el 80% y de humo de sílice hasta el 20%. Actualmente, hay ensayos en curso para valorar el comportamiento de contenidos de hasta el 56% de cenizas volantes.

Decidir el contenido óptimo de adiciones, qué adición utilizar o si utilizar más de una no dependerá sólo de los resultados de durabilidad a largo plazo. Otros factores como la resistencia inicial del hormigón, la disponibilidad de materiales, el calor de hidratación o la necesidad de curado prolongado tienen que ser valorados para optimizar el contenido ideal de adición a emplear.

A continuación, se exponen de forma específica para cada adición puzolánica, los beneficios que aportan al hormigón expuesto al ambiente marino.

### 2.2.1. CENIZAS VOLANTES

El **American Concrete Institute (ACI)** [8] ha realizado una Guía para el uso de cenizas volantes en el hormigón. En este documento, el apartado 3.2 muestra la influencia que tienen las cenizas volantes en las propiedades del hormigón endurecido, y el apartado 3.2.10 expone que una de las propiedades que se mejora es la protección frente a la corrosión.

En primer lugar, es importante señalar que, aunque la reacción puzolánica puede bajar el pH del hormigón, al consumir  $\text{Ca(OH)}_2$ , se ha demostrado que el ambiente en el interior del hormigón es similar en hormigones con y sin adición, manteniéndose, por tanto, la pasividad de las armaduras cuando el hormigón contiene cenizas volantes.

A esto, hay que sumar el efecto beneficioso de las cenizas al disminuir la velocidad de ingreso de agua, cloruros y oxígeno. La adición de cenizas volantes disminuye de forma significativa el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón. A edades cortas (28 días), la disminución puede ser pequeña, pero se hace muy importante con el paso del tiempo. Así, tras un año, puede ser significativo, y con el paso del tiempo, se llega al alcanzar una disminución respecto al mismo hormigón sin cenizas de un orden de magnitud.

En el mismo sentido, la asociación para el desarrollo de las cenizas publica un documento resumen del desarrollado por el centro de investigación británico **Building Research Establishment (BRE N° 62)** para explicar el uso de cenizas volantes en ambiente marino [26]. En este documento se valora cómo mejora la resistencia del hormigón a los cloruros con la adición de cenizas volantes, mostrando los

perfiles de cloruros obtenidos tras sumergir en agua de mar hormigones con 0%, 20% y 40% de cenizas volantes durante dos años.

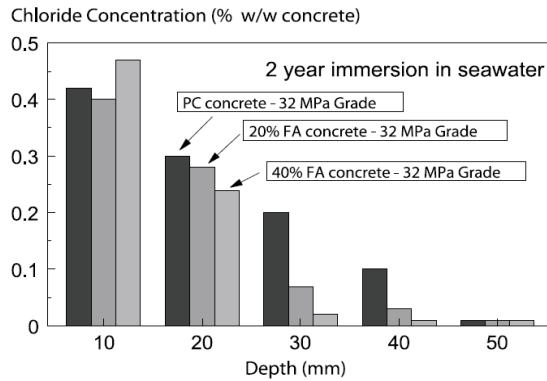


Figura 13. Penetración de cloruros en un hormigón de 32MPa fabricado con y sin cenizas volantes. [26]

Además de los perfiles de cloruros, se utiliza la resistividad del hormigón como herramienta para conocer los beneficios de las cenizas volantes para resistir ambiente agresivo por cloruros. Así, demuestra que el uso de cenizas volantes proporciona siempre hormigones de alta resistividad, mientras que hormigones fabricados con cemento portland son siempre hormigones de baja resistividad. A partir de estos resultados experimentales se muestran las siguientes figuras que recogen de forma numérica cómo hormigones de alta resistividad mejoran la vida útil de las estructuras en ambiente marino.

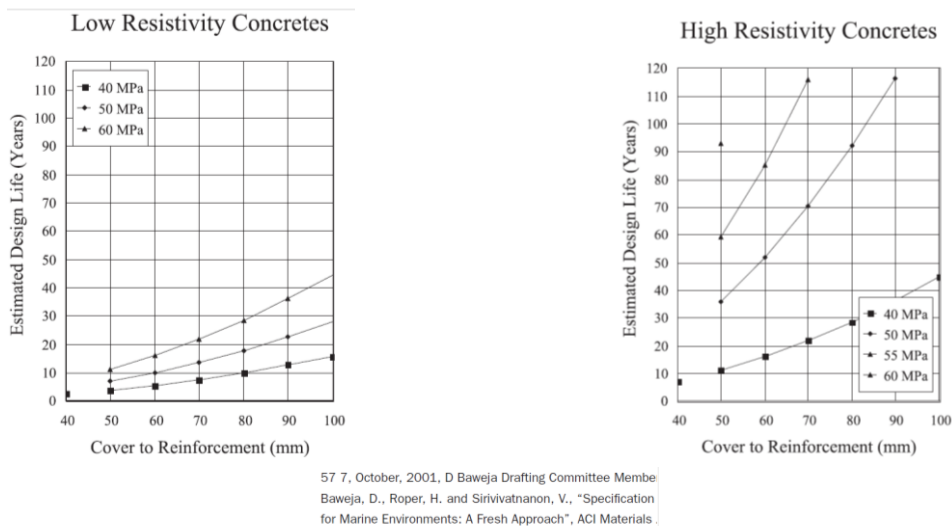


Figura 14. Vida útil estimada en función del espesor de recubrimiento y resistividad del hormigón. [26]

La **Portland Cement Association (PCA)** publica en 2007 un completo documento que recoge los beneficios de las cenizas volantes en el hormigón [27].

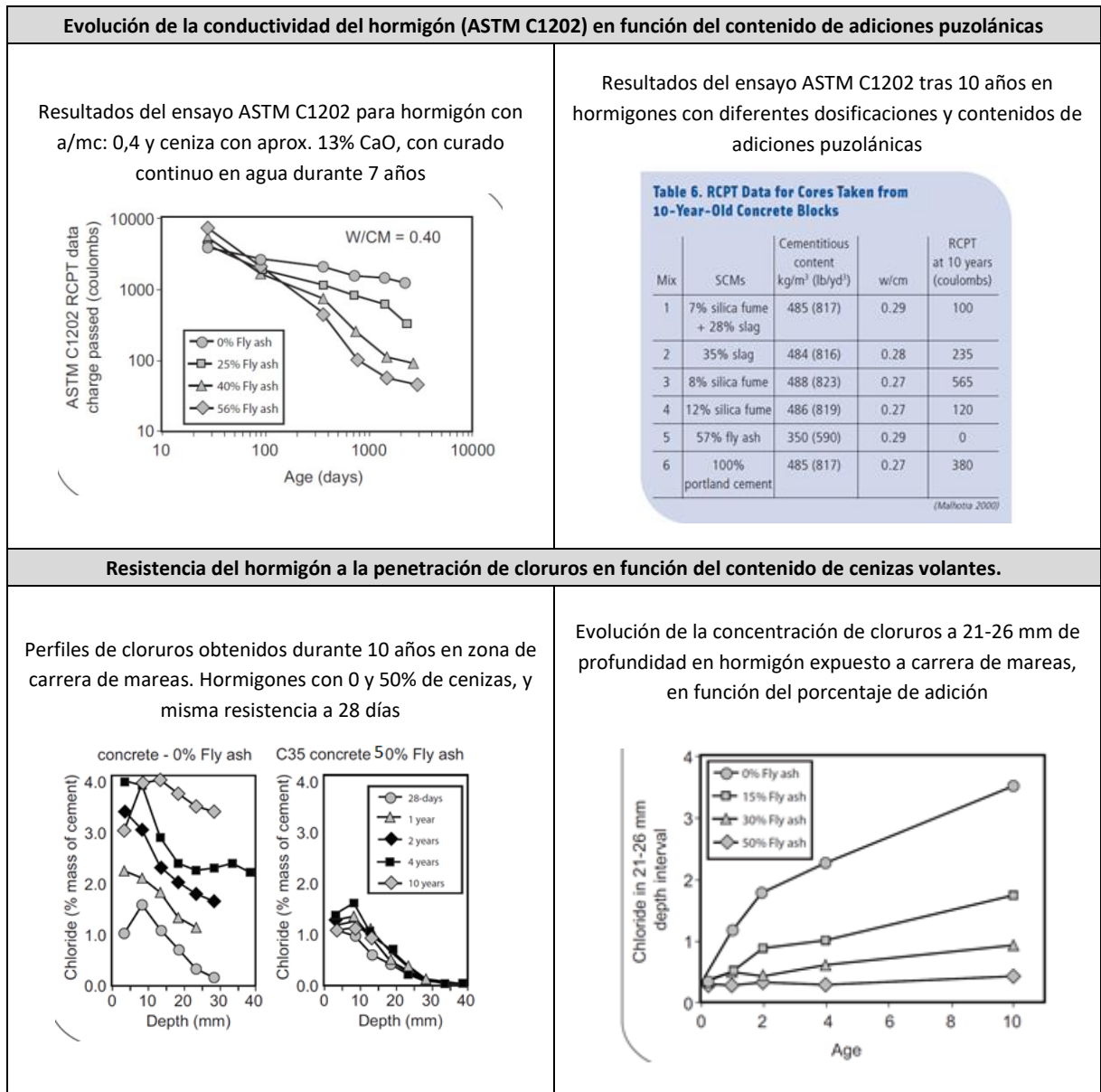
En primer lugar, indica que históricamente el contenido de cenizas en los hormigones se ha movido en el rango del 15% al 25% del total de material cementante. Actualmente, estos contenidos se están aumentando sensiblemente y, por ejemplo, niveles entre el 30 y 50% han sido utilizados en cimentaciones y presas para controlar los aumentos de temperatura. Aún más, se están estudiando dosificaciones incluso mayores, de entre el 40 y 60%, que proporcionan hormigones con buenas propiedades mecánicas y de durabilidad. Estos contenidos elevados de cenizas conllevan alargar los tiempos de fraguado y retardar las ganancias de resistencias, lo que puede retrasar los procesos constructivos. Por tanto, en cada obra concreta habrá que encontrar el porcentaje óptimo que maximice los beneficios económicos, ambientales y técnicos sin impactar en el proceso constructivo de la obra.

En el caso concreto de las estructuras en ambiente marino, el mismo documento de la PCA indica que las cenizas aportan beneficio al disminuir la permeabilidad al agua y a los gases, debido al refinamiento de los poros que produce la adición, tal como ya se ha expuesto anteriormente. Pero para medir la efectividad de estas adiciones, los ensayos de permeabilidad son difíciles de evaluar cuando se estudian hormigones de baja relación agua material cementante y adiciones puzolánicas.

Si en el documento del BRE se recurría a la resistividad, en este documento de la PCA se acude al ensayo también eléctrico propuesto por ASTM C1202 para conocer la eficacia de distintas adiciones, indicando que, aunque es un ensayo de conductividad y no de permeabilidad, es resulta un indicativo razonable de la resistencia a los cloruros de estos hormigones.

Las siguientes figuras resumen algunos de estos estudios, que demuestran la alta efectividad de las cenizas en la mejora del comportamiento del hormigón armado frente a la corrosión por cloruros.

Tabla 11. Estudios para la evaluación de la efectividad de las cenizas en mejorar la vida útil. [27]



Por tanto, parece que las cenizas volantes son un instrumento importante para mejorar la durabilidad del hormigón en ambiente marino.

### 2.2.2. HUMO DE SÍLICE

El manual para el uso del humo de sílice llevado a cabo por el **US Department of Transportation** muestra de forma gráfica las principales aplicaciones de esta adición, incluida la mejora de la resistencia del hormigón al ambiente marino.

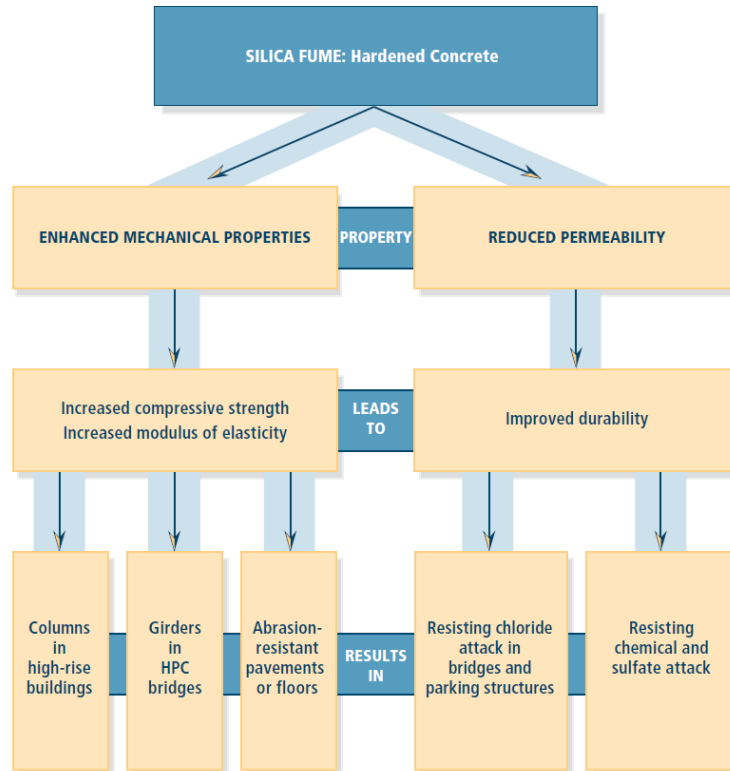


Figura 15. Propiedades y aplicaciones del hormigón con humo de sílice. [15]

Además, el **American Concrete Institute (ACI)** ha realizado una Guía para el uso del humo de sílice en el hormigón [16]. En este documento (ACI 243R96, Reapproved 2000: Guide for the Use of Silica Fume in concrete), el capítulo 6 está enfocado a las aplicaciones del humo de sílice.

El punto 6.12 indica que la resistencia que el humo de sílice aporta a la penetración de cloruros hace que esta adición sea importante para ambiente marino.

Diferentes agencias americanas han investigado intensamente la aplicación del humo de sílice en ambiente marino:

- El departamento de transporte de Florida demuestra que las pilas de puentes realizadas con hormigón con humo de sílice muestran un comportamiento significativamente mejor que las realizadas previamente con hormigón sin adicionar.
- El mismo departamento de Texas, y de Alabama realizan estudios similares con iguales conclusiones para la realización de pilas expuestas al ambiente marino.
- Igualmente, el departamento de Transporte de Maine utiliza el humo de sílice en puentes, muelles, diques exteriores, así como en otros elementos de hormigón de defensa del litoral.
- En la línea de ferrocarril del Pacífico sur se realizaron 192 elementos pretensados prefabricados para la construcción de 3 puentes con humo de sílice.

Otros estudios, como los realizados en un muelle sueco construido en 1977, en el que se han utilizado hormigones con y sin humo de sílice, o distintos estudios en hormigones en campo que recoge un trabajo de revisión realizado por centro noruego de investigación SINTEF [28], muestran las buenas prestaciones que el humo de sílice aporta al hormigón en ambiente marino.

También en 2017, la empresa productora de humo de sílice Elkem Silicon realiza un trabajo de revisión del papel del humo de sílice en el hormigón sostenible. Se recogen las siguientes estructuras en las que se ha empleado humo de sílice para prevenir la corrosión en ambiente marino [29]:

- El Puente de Oresund, entre Dinamarca y Suecia (construido entre 1995 y 1999), y el puente Bandra-Worli Sea en La India (inaugurado en 2009) usaron como material cementante opc+ms y opc+fa+ms.
- El Puente Nordhordland (inaugurado en 1994): hormigón ligero de 55MPa at 1900kg/m<sup>3</sup> se utiliza para construir un puente flotante. El East Sea Bridge en Shanghai (inaugurado en 2005), de 32 km de longitud, utilizan cementos de 3 y 4 componentes para el hormigón en ambiente marino.

Finalmente, la publicación de 2003 realizada por M. Alexander y J. Mackechnie [30] realiza una correlación entre coeficientes de difusión medidos experimentalmente a los 3 años y ensayos eléctricos de laboratorio a 28 días. A partir de esta correlación, estudia cómo se comportan el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias en ambiente marino. Así, concluye que el cemento portland necesita recubrimientos muy elevados (75 mm y superiores), a lo que hay que sumar que es necesario alcanzar categoría resistente 60 o superior, lo que obliga a aumentar el contenido de cemento. Grandes espesores de recubrimiento y elevados contenidos de cemento ocasionan problemas de retracción y de temperatura de hidratación. Cuando se añade humo de sílice (10%), el recubrimiento necesario desciende hasta 60 mm. En el caso de las cenizas volantes y las escorias, la mejora en durabilidad es aún mayor, requiriendo sólo recubrimientos de 50 mm para garantizar la durabilidad.

### 2.2.3. ESCORIAS DE ALTO HORNO

El uso de cementos con escorias en hormigones de buena calidad reduce la permeabilidad del hormigón, lo que conlleva reducir la penetración de los cloruros que despasivan el armado en el hormigón [20][31].

Esta disminución de la permeabilidad se ve reflejada en el coeficiente de difusión que los hormigones con escorias presentan. Así, el estudio realizado por Ortega Et. Al. [32] evalúa el coeficiente de difusión en ensayos de laboratorio del hormigón con y sin escorias, en estado estacionario a partir de ensayos de resistividad en el hormigón saturado, y en estado no estacionario a partir del ensayo NTB-492.

Los resultados recogidos en la Figura 16 muestran cómo, a partir de 90 días, todos los resultados son mejores en hormigones fabricados con escorias (con contenido entre el 66 y 80%), que en hormigones fabricados con cemento portland.

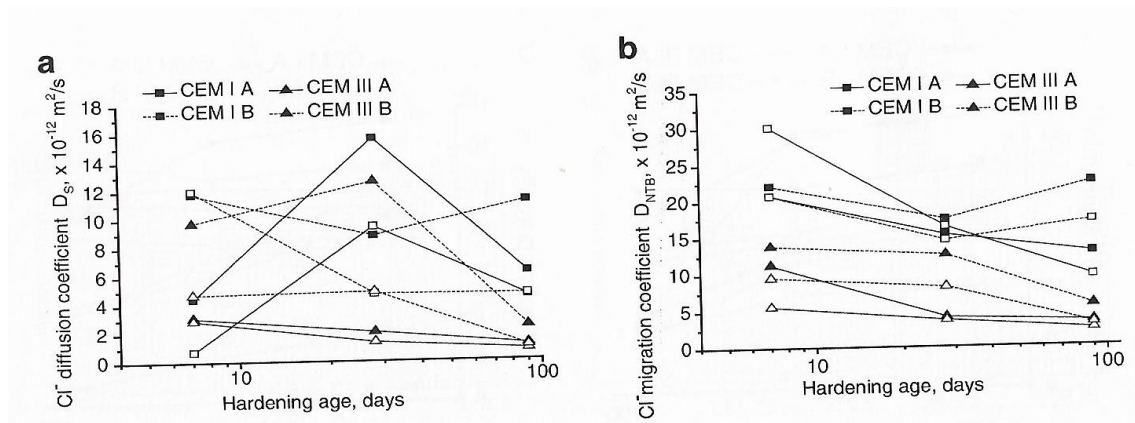


Figura 16. A la izquierda coeficiente de difusión en estado estacionario (a partir de la resistividad) y a la derecha coeficiente de difusión no estacionario a partir del ensayo NTB492. Puntos huecos corresponden a relación a/c 0,4 y los puntos rellenos a a/c 0,5. Las líneas continuas son morteros curados a 100% HR y 20°C; las líneas punteadas son morteros curados a 65%HR y 20°C. [32]

Resultados similares se obtienen en hormigones con diferentes contenidos de escorias y ensayados tras 90 días siguiendo el ensayo de difusión ASTM C 1556 [33].

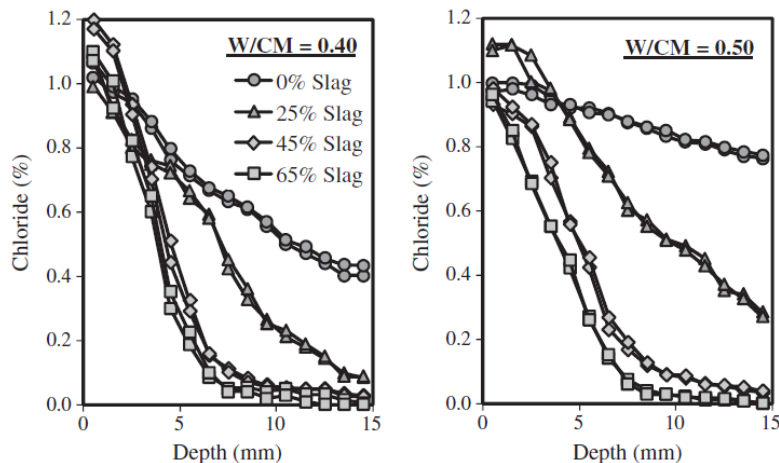


Figura 17. Efecto de las escorias en el hormigón tras curarse 90 días y ser ensayado en el ensayo de difusión ASTM C1556 [33].

Se observa claramente cómo aumentar el contenido de escorias se traduce automáticamente en mejor comportamiento del hormigón frente a los cloruros.

En el mismo sentido, se muestran los resultados obtenidos por Elkey, W, Et. Al [34], al evaluar la resistividad del hormigón con escorias (CEM III/B), con cenizas volantes (CEM II/B-V) y cemento Portland (CEM I).

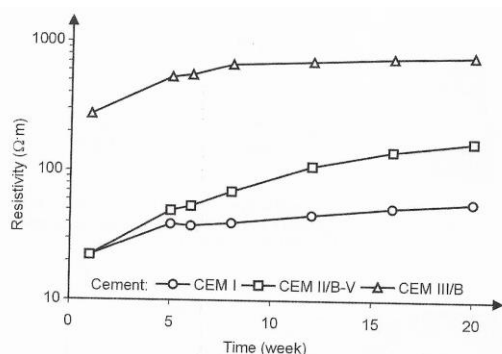


Figura 18. Hormigones con 3 cementos diferentes y a/c 0,45. [34]

El cemento con escorias se diferencia claramente del resto de cementos desde la primera semana, con resistividad 3 veces superior a la del resto de cementos. En cambio, el hormigón con cenizas volantes se comienza a diferenciar del cemento portland a partir de la octava semana. Por tanto, las escorias dan resistencias a los cloruros muy elevadas desde edades muy tempranas.

La experiencia más significativa de cementos con escorias en estructuras marinas se ubica en Holanda. Desde 1930 se han realizado muchas estructuras en ambiente marino con este tipo de cemento, y tras más de 50 años de vida de servicio se ha demostrado que la corrosión en estas estructuras es prácticamente inexistente. Además, estudios realizados a este respecto en el mar del norte han mostrado cómo hormigones sumergidos durante 17 años presentan coeficientes de difusión hasta 10 veces menores, y resistividades entre 3 y 10 veces más que el mismo hormigón realizado con cemento Portland.

#### 2.2.4. CEMENTOS COMPUESTOS

Para mejorar las propiedades del hormigón, como en el caso de hormigones de altas prestaciones, se utilizan cementos ternarios: cementos con escorias y otras puzolanas, como el humo de sílice o las cenizas volantes. El uso de estos materiales se está incrementando [20].

La combinación de humo de sílice con cenizas o escorias permite alcanzar elevadas resistencias y durabilidades, sin retrasar sensiblemente el tiempo de endurecimiento del hormigón. Así, se proponen dos soluciones posibles [29]:

- 8-10% de humo de sílice con 20-30% de cenizas volantes.
- 6-10% de humo de sílice con 40-60% de escorias de alto horno.

Con este objetivo de conjugar altas resistencias, alta durabilidad y tiempos de endurecimiento rápidos, la combinación de escorias y humo de sílice encuentra aplicaciones en hormigones de altas prestaciones, como en la construcción de rascacielos (Scotia Plaza en Toronto o Society Townen en Ohio). También en la construcción de tableros de puentes (Ohio Department of Transportation define la dosificación con 30% de escorias, 4,5% de humo de sílice y a/mc de 0,38 para tal fin) [20].

De forma más concreta, el productor de microsílíce Elkem Silicon [29] fija las siguientes características de hormigón para ser colocado en ambiente marino:

- La resistencia mínima debe ser de 45 MPa
- La relación agua-cemento no debe superar 0,38
- Adicionar humo de sílice
- El contenido de material cementante debe estar comprendido entre 380-450 kg/m<sup>3</sup>, incluyendo el 5 - 10% humo de sílice, incluyendo, además: cenizas volantes entre 25 – 40%, o escorias entre el 60 – 75%.
- El recubrimiento en todos los hormigones expuestos a ambiente marino debe ser de 75 mm.

La combinación de escorias con cenizas volantes ya se utiliza en usos comunes en Estados Unidos. Además, se ha aplicado en distintos campos: pistas de aterrizaje en Iowa, Minesota y Winsconsin; o en túneles para la construcción de contrapesos de hormigón en masa de bajo calor de hidratación [20].

### 2.3. NORMATIVA SOBRE ADICIONES PUZOLÁNICAS EN HORMIGÓN ARMADO EXPUESTO AL AMBIENTE MARINO

El beneficio de las adiciones puzolánicas para prevenir la corrosión en ambiente marino queda claramente reflejado en la bibliografía consultada. Por ello, las diferentes normativas terminan recogiendo esta tendencia, recomendando o imponiendo su uso para hormigones expuestos a los cloruros. A continuación, se recogen las normas más significativas.

#### 2.3.1. ESPAÑA: CÓDIGO ESTRUCTURAL (2021) [7]

El Artículo 44 del Código Estructural fija los recubrimientos para ambiente marino. Se muestran los espesores necesarios para obtener 50 años de vida útil, en función del tipo de cemento utilizado.

Tabla 12. Recubrimiento para 50 años de vida útil

Tipo de elemento	Cemento	Recubrimiento, mm. (50 años de vida útil)		
		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%	25	30	45
	CEM II/B-S, B-P	30	35	65
	Resto de cementos utilizables	40	45	*

En el ambiente más agresivo, de carrera de mareas y salpicaduras (XS3), de forma implícita, se dificulta el uso de los cementos que no menciona, ya que se obliga a recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En el caso de los ambientes XS2 y XS1, sí es posible utilizar cementos incluso sin adiciones. Sólo se excluyen en ambiente marino las adiciones de esquistó calcinado, puzolana calcinada y cenizas volantes calcáreas.

Se desarrollan, a continuación, las exigencias para ambiente XS3, ya que son las más restrictivas.

En el caso de las **cenizas volantes**, se utilizarán cementos con concentración de **cenizas entre el 21-35%** de cenizas volantes (CEM II/B-V).

Aunque hasta ahora en este documento se ha tratado a la puzolana natural como una adición del cemento equivalente a las cenizas volantes, el Código Estructural las diferencia cuando el hormigón se ubica en ambiente marino. La normativa permite el uso de ambas adiciones en ambiente XS3, pero en el caso de las puzolanas naturales (CEM II/B-P; 21-35% de puzolana natural) se impone un aumento del recubrimiento de 20 mm, respecto a lo exigido a las cenizas volantes. Por tanto, **la normativa española, basándose en la experiencia de las materias primas disponibles en España, aunque reconoce la utilidad de las puzolanas naturales en el ambiente marino más agresivo, les presupone un peor funcionamiento que a las cenizas volantes, obligando a colocar mayor recubrimiento.**

Si se utilizan **escorias**, para obtener el mismo resultado que con las cenizas volantes, es necesario utilizar cementos CEM III/A o CEM III/B, es decir, **contenido de escorias entre el 36 y 80%**. Es posible disminuir el contenido de escorias hasta el 21%, pero en ese caso hay que aumentar el recubrimiento 20 mm.

Y para humo de sílice, se tendría que utilizar cemento CEM II/A-D u hormigones con más de un **6% de humo de sílice**.

Se pueden utilizar cementos formados por la **mezcla de cenizas volantes y humo de sílice (CEM IV)**. La suma de ambas adiciones puede variar en un rango entre el **11 y 55%**, estando el porcentaje de humo de sílice limitado a un máximo del 10%.

La instrucción RC-16 también incluye cementos que mezclan cenizas y escorias (CEM V). con un contenido máximo de cada adición del 30%. Sin embargo, **los cemento CEM V (cenizas más escorias) no aparecen dentro de los recomendados para ambiente XS3.**

En España no se pueden mezclar el humo de sílice y las escorias.

**2.3.2. REINO UNIDO. MARITIME WORKS. PART 1-4: GENERAL – CODE OF PRACTICE FOR MATERIALS (BS 6349-1-4:2013) [35]**

La norma inglesa BS 6349 proporciona recomendaciones para los materiales usados en el diseño y construcción de estructuras en ambiente marino.

Al igual que el Código Estructural, esta norma presenta una tabla de ambientes de exposición, recubrimientos, tipos de cemento, contenido mínimo de cemento y vida útil de la estructura. Se muestra, a modo de ejemplo, las exigencias para XS2/3 (de carrera de mareas) y XS3 (salpicaduras, spray) si se quiere alcanzar una vida útil de 50 años.

Tabla 13. Valores límites de dosificación y propiedades del hormigón, con árido de densidad normal y 20 mm de tamaño máximo, expuestos a corrosión de las armaduras en agua de mar del Reino Unido, para alcanzar una vida útil de 50 años

Compressive strength class <sup>A)</sup> , maximum water/cement ratio <sup>B)</sup> , <sup>C)</sup> and minimum cement or combination content (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>D)</sup>											Permissible cement and combination designations with additional restrictions (where appropriate)
Nominal cover, in millimetres <sup>E)</sup> , <sup>F)</sup>											
30 + Δc	35 + Δc	40 + Δc	45 + Δc	50 + Δc	55 + Δc	60 + Δc	65 + Δc	70 + Δc	75 + Δc	80 + Δc	
<i>XS2/3 – Frequently wetted lower tidal, backfilled</i>											
—	—	C40/50 0.35 360	C35/45 0.40 360	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 340	C25/30 0.55 340	C20/25 0.55 340	C20/25 0.55 340	C20/25 0.55 340	C20/25 0.55 340	IIIA with 46% to 65% ggbs IIIB IIB-V+SR (25% to 35% fly ash) <sup>G)</sup>
—	—	—	C40/50 0.35 360	C35/45 0.40 360	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 360	C25/30 0.55 340	C25/30 0.55 340	C20/25 0.55 340	C20/25 0.55 340	IIIA with 36% to 45% ggbs IIB-V with 21% to 24% fly ash <sup>G)</sup>
—	—	—	—	—	—	—	—	C40/50 0.35 360	C35/45 0.40 360	C35/45 0.40 360	CEM I CEM II/A-L(LL), II/A, II/B-S
<i>XS3 – Infrequently wetted upper tidal, splash/spray, “dry” internal faces of submerged structures</i>											
—	—	—	C40/50 0.35 380	C35/45 0.45 360	C32/40 0.50 360	C28/35 0.55 340	C25/30 0.55 340	C20/25 0.55 340	C20/25 0.55 340	C20/25 0.55 340	IIIA with 46% to 65% ggbs IIIB with >66% ggbs IIB-V+SR (25% to 35% fly ash) <sup>G)</sup>
—	—	—	—	C40/50 0.35 380	C35/45 0.40 360	C32/40 0.45 360	C28/35 0.50 360	C25/30 0.55 340	C25/30 0.55 340	C20/25 0.55 340	IIIA with 36% to 45% ggbs IIB-V with 21% to 24% fly ash <sup>G)</sup>
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	C40/50 0.35 360	CEM I CEM II/A-L(LL), II/A, II/B-S

<sup>A)</sup> Characteristic strength class: cylinder/cube (MPa). Lightweight aggregate concrete should conform to the equivalent strength classes.  
<sup>B)</sup> Maximum free water/cement ratio in accordance with BS EN 206-1:2000.  
<sup>C)</sup> Where there is difficulty in conforming to the strength required at 28 days because of the characteristics of the cement type or the combination then, provided that a systematic regime of checking is established to ensure conformity to the free water/cement ratio recommendation, the 28 day strength recommendation may be relaxed.  
<sup>D)</sup> Minimum cement content depends on maximum aggregate size (see Notes on Table 1, Table 2 and Table 3).  
<sup>E)</sup> Expressed as the minimum cover to reinforcement plus an allowance for deviation, Δc, to allow for workmanship and tolerance. An additional 10 mm should be allowed for prestressing strand.  
<sup>F)</sup> A dash (—) signifies that greater cover is recommended.  
<sup>G)</sup> The designation of cement type CEM IIB-V is deemed to contain 21% to 24% fly ash for the purposes of this table. The designation of IIB-V+SR contains 25% to 35% fly ash and is thus equivalent to a CEM IIB-V containing 25% to 35% fly ash as specified in BS EN 197-1.

Los dos ambientes indicados en la tabla 13 engloban el ambiente XS3 español. Comparando la tabla española e inglesa, esta segunda es menos restrictiva, ya que permite utilizar cementos sin adiciones, aunque emplear CEM I o cualquier CEM II/A obliga a recubrimientos superiores a 70 mm en carreras de marea y 80 mm en las salpicaduras y zona de spray.

Los cementos se agrupan en 3 calidades distintas:

- Las mejores prestaciones se obtienen con cementos que contengan entre 46 y 80% de escorias, así como con cementos con contenido de cenizas entre el 25% y 35%.
- En el segundo grupo, el contenido de cenizas está entre el 21 y 24%, y el de escorias entre el 35 y 45%.
- El tercer grupo engloba al resto de cementos puzolánicas (CEM II/A) y el cemento portland.

La normativa inglesa no contempla el humo de sílice de forma explícita en estas tablas para obtener los mismos resultados. Ahora bien, en los comentarios de la norma se indica que el humo de sílice puede ser beneficioso cuando se adiciona hasta un 10% del contenido total del material cementante, y también cuando se adiciona en un 5% en conjunción con cemento portland y cenizas o escorias.

### 2.3.3. ESTADOS UNIDOS. NAVAL FACILITIES ENGINEERING SYSTEM COMMAND (NAVFAC). 2021 [36]

El documento “Marine Concrete with Service Life Modeling”, realizado por “Naval Facilities Engineering Systems Command” (NAVFAC), es una guía de especificaciones que determina las exigencias para hormigón armado expuesto a ambiente corrosivo por cloruros cuyo proyecto exige una vida útil de servicio.

El documento define las exigencias de recepción y control del hormigón y sus componentes, y añade notas, que son recomendaciones que se deben introducir en el proyecto.

Sobre **el cemento**, indica el cuerpo del documento que:

- El cemento será tipo I, II o V. Deben tener contenido en C3A inferior al 10% y máximo contenido de álcalis del 0,8% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>.
- Los cementos deberían ser combinados con adiciones puzolánicas en el hormigón utilizado. Se consideran adiciones las cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, puzolanas naturales o calcinadas y cenizas ultrafinas.

Además, las notas añaden:

- Usar cemento Tipo II (resistencia media a los sulfatos) o Tipo V (alta resistencia a los sulfatos) en proyectos que se ubiquen en ambientes C3 a C5, y cuando se utilicen sales fundentes.
- Las estructuras portuarias son obras que tardan más de un año en ser ejecutadas. Con el tiempo los hormigones ganan resistencia. Se anima a los ingenieros de proyecto a diseñar los elementos estructurales con las resistencias que se alcancen a 56 y 90 días, mejor que a 28 días. Esto permite al constructor colocar hormigones con menos contenido de cemento portland, mejorando el precio, la sostenibilidad y la durabilidad de las estructuras.

Sobre **las adiciones puzolánicas**, el cuerpo del documento indica:

- El hormigón debería contener siempre adiciones puzolánicas independientemente de que los áridos sean reactivos o no.

Y las notas añaden:

- Se anima al ingeniero del proyecto a prescribir el uso de adiciones puzolánicas. Se produce una mejora considerable en la sostenibilidad, durabilidad y coste inicial del hormigón colocado. Por ejemplo, reemplazar un 50% del cemento por cenizas volantes tipo F se ha demostrado efectivo para conseguir las condiciones de resistencia, baja permeabilidad, retracción y capacidad para conseguir una estructura que cumpla con la vida útil de diseño, con menor coste y menor huella de carbono.
- Sustituciones por encima del 50% de cemento necesitan un estudio.

En cambio, este documento no aconseja el uso de humo de sílice en obras marítimas. Debe ser utilizado solo en obras realizadas fuera de Estados Unidos continental, cuando no haya disponibles escorias de alto horno o cenizas volantes tipo F.

Además, el máximo contenido de humo de sílice que se permite es del 7% del peso total de material cementante.

En caso de que fuera necesaria su utilización, se debe examinar cada metro cúbico de hormigón con humo de sílice colocado para asegurarse de que el humo de sílice está disperso correctamente en el hormigón. Para ello, un laboratorio especializado debe realizar análisis por microscopía del hormigón y documentar los resultados obtenidos. También se debe asegurar que el contratista utiliza fabricantes de hormigón con solvencia, experimentados en la dosificación, mezcla, colocación y curado del hormigón con humo de sílice.

### **2.3.4. JAPÓN: TECHNICAL STANDARDS AND COMMENTARIES FOR PORT AND HARBOUR FACILITIES IN JAPAN. 2009. [37]**

Japón dispone de normativa específica para la construcción de puertos e instalaciones portuarias. La parte II de la normativa se centra en definir las acciones y los requisitos de resistencia de materiales, y dentro de esta parte, el capítulo 11 define los materiales.

El punto 8 indica que, de los distintos tipos de cemento, aquellos que presentan características de resistencia al agua de mar son: los cementos de bajo calor de hidratación, los de escorias de alto horno y los de cenizas volantes. Estos cementos tienen la ventaja de tener un comportamiento excelente frente al agua de mar, buen aumento de la resistencia a largo plazo, y bajo calor de hidratación. En cambio, presentan la desventaja de ser hormigones de baja resistencia inicial. Por lo tanto, cuando se usan estos tipos de cemento, debe cuidarse especialmente el curado inicial del hormigón.

### **2.3.5. AUSTRALIA: GUIDELINE FOR THE DESIGN OF MARITIME STRUCTURES (AS 4997-2005) [38]**

La norma australiana para el diseño de estructuras en ambiente marino realiza algunas recomendaciones para el hormigón estructural en estructuras marítimas, entre ellas, colocar resistencia característica mínima de 40 MPa, contenido mínimo de material cementante de 400kg/m<sup>3</sup> y no superar la relación agua/material cementante de 0,4.

Respecto al material cementante, se puede utilizar cemento portland o cemento portland con adiciones, si bien se indica que los cementos con adiciones pueden mejorar la resistencia del hormigón a la penetración de los cloruros, además de disminuir el calor de hidratación, reduciendo la probabilidad de que se produzcan fisuras por retracción térmica. Cuando se utilizan cementos con adiciones se debe prestar especial atención a la colocación y curado para garantizar que el hormigón colocado cumpla sus prestaciones.

### **2.3.6. ALEMANIA: RECOMMENDATIONS OF THE COMMITTEE FOR WATERFRONT STRUCTURES HARBOURS AND WATERWAYS EAU 2012. [39]**

El libro es un manual para el diseño, ejecución y mantenimiento de estructuras portuarias. Tan solo en el capítulo referente a muelles y superestructuras se dedica un apartado al hormigón. En este apartado se indica que el ambiente de exposición de las estructuras es el factor crítico que marcará la selección del hormigón, determinando los requerimientos mínimos del hormigón, espesor de recubrimiento y ancho máximo de fisura. No se realizan indicaciones respecto a los tipos de cemento que se aconseja o no utilizar.

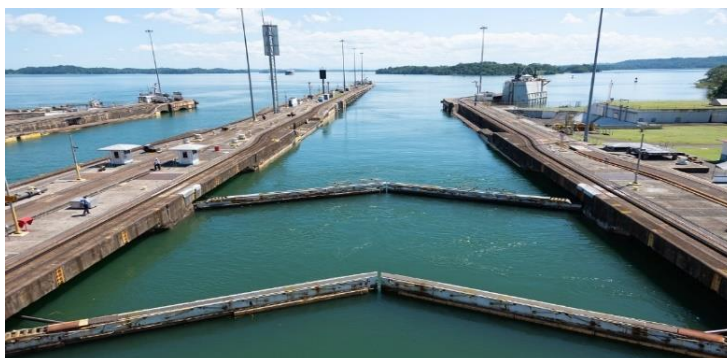
## **2.4. EJEMPLOS DE CONSTRUCCIONES CON ADICIONES PUZOLÁNICAS EN AMBIENTE MARINO**

### **2.4.1. CONSTRUCCIONES CON CENIZAS VOLANTES**

En este apartado se incluyen, además de los hormigones realizados con la adición de cenizas volantes, aquellas construcciones realizadas con la adición de puzolanas naturales.

#### **2.4.1.1. Nuevo Canal de Panamá (entrada en servicio en 2016)**

En 2016 entra en servicio el tercer juego de esclusas del Canal de Panamá. Es una obra en la que se colocan 5 millones de toneladas de hormigón, lo que la convierte en la obra con mayor volumen de hormigón colocado [40].



Fotografía 1. Vista general del Canal de Panamá (pixabay.com).

Aunque el canal original se realiza con hormigón en masa, se decide que la nueva estructura esté armada por motivos sísmicos. Se definen dos tipos de hormigón: marino y estándar. El hormigón marino se coloca en la cara exterior de la estructura, y debe cumplir requerimientos más estrictos. El hormigón se fabrica in situ, se coloca por bombeo y debe tener relación a/c máxima de 0,4. Se fija el ensayo ASTM C1202 como criterio de aceptación del hormigón, desde el punto de vista de la durabilidad.

La Tabla 14 muestra las dosificaciones colocadas con cemento resistente a los sulfatos y puzolanas naturales, así como sus propiedades físicas principales: consistencia, contenido de aire, densidad y resistencia a compresión a 28 y 90 días.

De las 8 dosificaciones utilizadas, 4 contienen cemento (siempre de resistencia media a los sulfatos) y puzolanas naturales. Las otras 4 dosificaciones contienen también humo de sílice y se valorarán en apartados posteriores. El contenido de puzolana es del 13 y 23% del material cementante, para las dosificaciones sin humo de sílice. La relación agua-cemento varía entre 0,29 y 0,35.

Tabla 14. Dosificaciones con puzolana natural. Canal de Panamá [40]

Planta hormigón	Atlántico		Pacífico	
	Dosificación	Dosificación	Dosificación	Dosificación
Dosificación	375 (23PN OSF)	332 (13PN OSF)	375 (23PN OSF)	332 (13PN OSF)
Tipo de cemento	Panamá CEM II	Panamá CEM II	Panamá CEM II	Panamá CEM II
Cemento kg/m <sup>3</sup>	288,75	289	288,75	289
Puzolana kg/m <sup>3</sup>	86,38	43	86,87	43
Conglomerante total kg/m <sup>3</sup>	375	332	375	332
w/c ratio	0,30	0,34	0,35	0,34
Aditivos kg/m <sup>3</sup>	4,5	1,99	4,31	2,63
Cono mm	80	100	110	95
Aire ocluido %	1,6	1	2,2	1,1
Densidad kg/m <sup>3</sup>	2539	2548	2597	2570
Resistencia a 28 días MPa	50,1	42,6	53,0	45,3
	49,5	41,3	53,8	44,5
Resistencia a 90 días MPa	52,2	56,6	54,8	60,5
	55,0	56,4	---	61,2

2.4.1.2. The Jiaozhou Bay sea-crossing railway bridge (entra en servicio en 2011)

El Puente Jiaozhou [41] se ubica en China. Tiene una longitud total de 16,337 km, de los cuales 2,006 km se encuentran sobre el mar, con la parte inferior de sus pilas sumergidas en agua de mar y, por tanto, expuestas a ambiente de carrera de mareas y salpicaduras.



Fotografía 2. Puente de ferrocarril Jiaozhou Bay sea-crossing [41]

El Puente se realiza con un cemento Portland 52.5 R (II) (normativa China) suministrado por Shanshui cement corporation. Además, como adición puzolánica se utiliza una ceniza volante clase F. Finalmente, se emplea armado de acero resistente a la corrosión, tipo Cr10Mo1 alloy, en la sección del puente que pasa sobre el mar.

Con estos materiales, se definen dos tipos de hormigón:

- C40, con relación agua / material cementante de 0,33 para las pilas sobre tierra. 315 kg de cemento y 135 kg de ceniza volante F (30% de cenizas volantes).
- C50, con relación agua / material cementante de 0,30 para las pilas sobre el mar. 336 kg de cemento y 144 kg de ceniza volante F (30% de cenizas volantes).



Fotografía 3. Pila en la zona del puente expuesta a ambiente marino en todas sus posibilidades: sumergido, carrera de mareas, salpicaduras y ambiente aéreo [41]

2.4.1.3. El puente Sea cliff (finalizado en 2005)

El puente Sea Cliff [26] se ubica en Australia. Es un puente de 665 m de longitud, ubicado en ambiente marino.



Fotografía 4. Puente Sea Cliff [26]

El puente se diseña para una vida útil de 100 años. Para ello, la primera intención fue llevarlo a cabo con un cemento de escorias (60% escorias y 40% portland), combinado con humo de sílice. El hormigón presentaba muy baja resistencia inicial y necesitaba un tiempo de curado adicional, lo que habría retrasado los plazos de construcción. Para evitarlo, se fabrica finalmente con cemento portland y 25% de cenizas volantes. Tras la ejecución, se demuestra experimentalmente que el conglomerante y dosificación seleccionada garantizan la vida útil de la estructura.

2.4.1.4. Túnel de St. Clair River (1994)

Este túnel [27] se construye entre 1993 y 1994 entre Sarnia, Ontario, y Port Huron, en Michigan. El agua del terreno contiene cloruros (4000 ppm) y sulfatos (155 ppm). El ambiente combinado con la presión hidrostática de 35 m produce la penetración de cloruros y sulfatos, tanto por difusión como por permeabilidad.



Fotografía 5. Túnel de St. Clair [27]

Los requerimientos que se exigieron al hormigón del túnel fueron:

- Contenido de cemento entre 400 y 550 kg/m<sup>3</sup>
- Relación agua / material cementante: 0,36
- Resistencia a compresión a 28 días: superior a 60 MPa
- Coeficiente de difusión:  $0,6 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s a 120 días
- Permeabilidad al agua inferior a  $25 \cdot 10^{-15}$  m/s a 40 días

Para conseguir estos requerimientos, se valoran dosificaciones con 6% de humo de sílice, 30% de cenizas volantes tipo C y relación agua-material cementante entre 0,29 y 0,32. Al iniciar la obra, se decide eliminar el humo de sílice y la mayor parte del túnel se realiza con cenizas volantes (25 a 35%) como única adición puzolánica. Esta dosificación no conseguía cumplir con el requisito de coeficiente de difusión a 120 días. Sin embargo, a los 3 años, se extraen testigos y se observa la buena calidad del hormigón, con resultados del ensayo ASTM C1202 por debajo de los 300 Culombios.

#### 2.4.1.5. Victoria and Alfred Waterfront (1993)

En Ciudad del Cabo (Sudáfrica) se realiza la completa transformación de una zona poco utilizada del puerto [40]. Una de las estructuras que incluye esta transformación es la realización del muro que rodea la nueva zona residencial en la costa. Este muro se encuentra en ambiente marino, y una parte de él se realiza con hormigón armado, tal como se observa en la siguiente figura y fotografía.



Fotografía 6. Muro en ambiente marino [40]

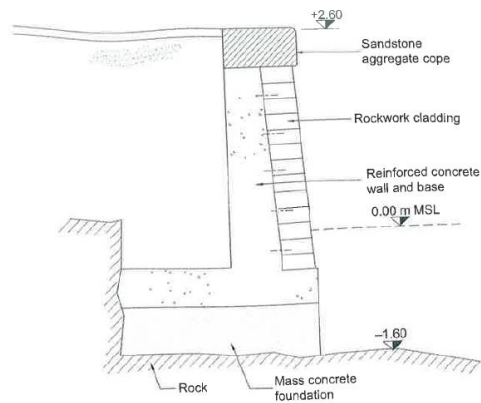


Figura 19. Esquema del muro en ambiente marino [40]

Para el hormigón del muro se utiliza cemento Portland más un contenido de cenizas volantes entre el 30% y 35%, con un contenido mínimo de material cementante de 420 (kg/m<sup>3</sup>) y una relación máxima agua cemento de 0,40. También se indica que se podrá sustituir la adicción de cenizas volantes por escoria de alto horno granulada, con concentración entre 45 y 55% del material cementante.

#### 2.4.1.6. Tampa Bay's Sunshine Skyway Bridge (1987)

Otro ejemplo de Puente en ambiente marino realizado con cenizas volantes para garantizar su vida útil es el Tampa Bay's Sunshine Skyway Bridge (finalizado en 1987) [42]. Tanto las pilas como el tablero se realizan con cenizas volantes.

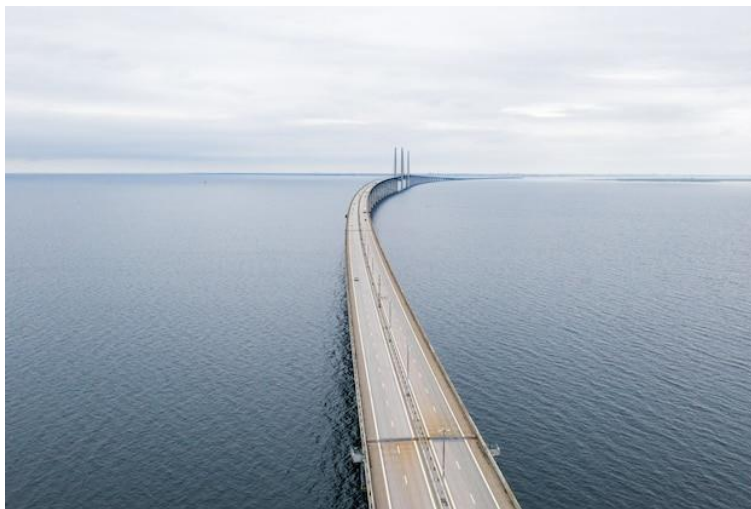


Fotografía 7. Tampa Bay's Sunshine Skyway Bridge (pixabay.com)

## 2.4.2. CONSTRUCCIONES CON HUMO DE SÍLICE

### 2.4.2.1. Puente del The Øresund Link (2000)

En el año 2000 entra en servicio en Dinamarca la estructura The Øresund Link [40].



Fotografía 8. Puente del The Øresund Link ( [www.freepik.es](http://www.freepik.es))

Al hormigón del puente, situado en ambiente marino, se le realizan las siguientes especificaciones:

- Contenido mínimo de material cementante:  $340 \text{ kg/m}^3$
- Contenido mínimo de cemento Portland:  $325 \text{ g/m}^3$
- Límites del contenido en Micro sílice: 5%
- Máxima relación agua/cemento: 0.40 (Tipo A) y 0.45 (Tipo B)

El hormigón Tipo A es utilizado para la zona de carrera de mareas, entre el nivel -3 m y +6 m. El tipo B para el resto del puente. Los datos exactos se representan en la siguiente tabla en función de la zona y del tipo del tipo de hormigón.

Tabla 15. Dosificación del Puente Øresund [40]

Datos en kg/m <sup>3</sup>	Dosificación	
	A	B
Cemento Portland	375	341
Micro sílice	12,5	12,5
Agua	145	154
Agua/cemento	0,36	0,42

#### 2.4.2.2. Guide for the Use of Silica Fume in concrete (ACI)

El documento del ACI sobre humo de sílice [16] detalla el uso exitoso del humo de sílice en algunas estructuras europeas situadas en ambiente marino:

- Gullfaks C platform es la primera plataforma offshore que se lleva a cabo con hormigón sin aligerar y humo de sílice. Se realiza en el Mar del Norte, en 1989. La estructura de hormigón (gravity base structure) tiene una altura de 262 m, y se lleva a cabo con 240.000 m<sup>3</sup> de hormigón.



Fotografía 9. Gullfaks C platform 1989. Hormigón con humo de sílice [43]

- Durante 1986 y 1987, los segmentos de hormigón pretensado que forman el túnel que conecta Lolland y las islas de Falsten, en Dinamarca, se realizan con humo de sílice.
- El túnel submarino de Karsto, en Noruega, se realiza con humo de sílice.
- En Noruega, las partes de la planta eléctrica que quedan sumergidas en agua marina para aprovechar los movimientos del mar y generar electricidad, se realizan con humo de sílice.


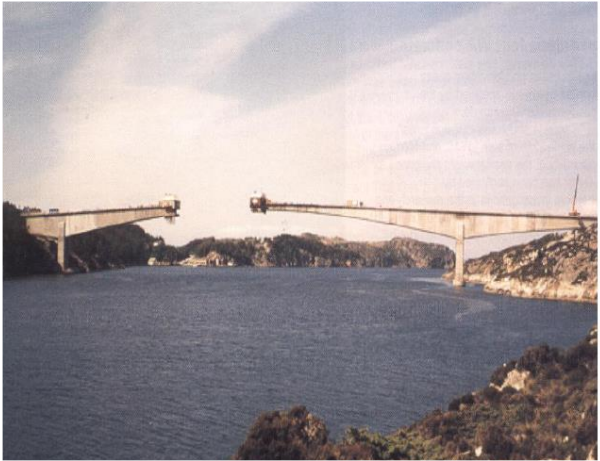
#### 2.4.2.3. Hormigón estructural ligero con humo de sílice [17]




El hormigón ligero estructural es un hormigón 25 a 30% más ligero que el hormigón estructural. Este hormigón se obtiene sustituyendo todo o parte del árido grueso por árido ligero. Para alcanzar altas resistencias se incorporan al hormigón adiciones puzolánicas, combinados con superplastificantes que permitan relación agua/material cementante inferior a 0.45, cuando se va a exponer al ambiente marino.

Es un material que se está utilizando en la construcción de puentes. El menor peso de este hormigón hace que:

- Requiera menos armado
- Permita mayores luces
- Permita recrecidos sin modificar cimentaciones
- Reduzca las fuerzas sísmicas

A continuación, se muestran algunas estructuras en ambiente marino realizadas con árido ligero y humo de sílice. En las siguientes figuras se muestra la dosificación utilizada.

Puente flotante de Nordhordland [44]	Noruega
<p><b>1999</b></p> <p>Dosificación del hormigón ligero de los 10 pontones del puente flotante.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento: 410 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Humo de sílice: 33 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Agua: 200 l/m<sup>3</sup></li> <li>• Resistencia a compresión &gt;55 MPa</li> </ul>	
El puente Stolma [44]	Noruega
<p><b>1998</b></p> <p>Dosificación del tablero del puente</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento I-52,5: 450 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Humo de sílice: 35 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Agua: 208 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Resistencia a compresión &gt;60 MPa</li> </ul>	

<p><b>Plataforma offshore Heidrun [17]</b></p>	<p><b>Mar del Norte. Noruega</b></p>
<p><b>1995</b></p> <p>Dosificación del hormigón</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento: 420 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Humo de sílice: 20 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Resistencia a compresión &gt;60 MPa</li> </ul>	
<p><b>Puente Stovset [44]</b></p>	<p><b>Noruega</b></p>
<p><b>1994</b></p> <p>Dosificación del hormigón de la zona central del tablero del puente</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cemento: 425 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• Humo de sílice: 30 kg/m<sup>3</sup></li> </ul>	
<p><b>Sistema de perforación CIDS [44]</b></p>	<p><b>Canadá</b></p>
<p><b>1984</b></p> <p>Hormigón de 45 MPa</p> <p>Aire ocluido: 6-8 %</p> <p>Dosificación en la losa:</p> <p>557kg/m<sup>3</sup> cemento + 61 kg/m<sup>3</sup> cenizas volantes</p> <p>Muros de conexión:</p> <p>460 kg/m<sup>3</sup> + 46 kg/m<sup>3</sup> humo de sílice</p>	

### 2.4.3. CONSTRUCCIONES CON ESCORIAS

#### 2.4.3.1. Nueva terminal de contenedores en Puerto de Reino Unido (anterior a 2010)

Se diseña la viga cantil de la terminal de contenedores para proporcionar resistencia a la corrosión y resistencia a ciclos de hielo deshielo, evitando también fisuras por retracción en edades tempranas. Para ello, se diseña el hormigón con aireante y con fibra de polipropileno.

La dosificación detallada de la viga cantil es [45]:

- Clase resistente C32/40
- Contenido de cemento entre  $375 \text{ kg/m}^3$  y  $450 \text{ kg/m}^3$
- Cemento tipo IIIB (70% de escorias)
- Relación agua cemento máxima de 0,45
- Contenido de aire de  $5 \pm 1,5\%$
- Fibra de polipropileno, con dosificación nominal de  $0,9 \text{ kg/m}^3$

Se presta especial atención al proceso de curado del hormigón para asegurar los beneficios potenciales que ofrece utilizar un cemento con escorias.



Fotografía 10. Construcción del nuevo muelle en la zona inferior derecha de la fotografía [45]

#### 2.4.3.2. Barreras contra tormentas del Scheldt oriental (1986)



Fotografía 11. Barrera contra las tormentas ([www.freepik.es](http://www.freepik.es))

Esta estructura se ubica en los Países Bajos [40]. Los elementos de hormigón de la barrera contra tormentas se diseñan para una vida útil de 200 años. Se definen las siguientes dosificaciones para los distintos elementos de la barrera:

- Para el muelle: 350 kg/m<sup>3</sup> de un CEM III/B, con relación agua cemento de 0,45.
- Para las vigas superiores: 325 kg/m<sup>3</sup> de un CEM III/B, con relación agua cemento de 0,45.
- Para la parte superior de las barreras: 325 kg/m<sup>3</sup> de un CEM III/B, con relación agua cemento de 0,44.
- Para la parte inferior de las barreras: 400 kg/m<sup>3</sup> de un CEM III/B, con relación agua cemento de 0,38.

Esta obra se evaluó durante los siguientes 20 años. El comportamiento del hormigón frente a los cloruros fue correcto, debido principalmente al uso de cemento de escorias, la adopción de medidas suficientes para controlar la apertura máxima de fisura, un control de la ejecución correcto y un curado del hormigón adecuado.

#### 2.4.4. CEMENTOS COMPUESTOS

En el apartado 2.2.4 se definían los cementos compuestos. La utilización de hormigones con contenido elevado de cenizas volantes, puzolanas naturales o escorias tiene siempre la consecuencia de ser hormigones que necesitan más tiempo para ganar resistencia. El humo de sílice es una adición puzolánica de elevada finura, por lo que las reacciones puzolánicas son más rápidas, y la velocidad de ganancia de resistencia es mayor. Por ello, añadir humo de sílice a otras adiciones puzolánicas permite alcanzar mayores resistencias en un menor periodo de tiempo, sin tener que renunciar a las grandes ventajas que ofrecen las adiciones puzolánicas, respecto a la mejor durabilidad que aportan frente a la penetración de cloruros.

Tan solo en el caso de una estructura portuaria en Sudafrica (apartado 2.4.4.4) se combina el uso de cenizas volantes con escorias de alto horno. Por la documentación disponible, parece que la decisión se adopta por abaratar costes y/o disponibilidad de materiales, y no por motivos técnicos.

##### 2.4.4.1. Marc Basnight Bridge. 2019 (Herbert C. Bonner bridge replacement)

El Puente Gervert C. Bonner, situado en la North Carolina Highway 12, presentó problemas desde su construcción, en 1963. En 2019, el Puente se reemplaza por el puente Marc Basnight [46].



Fotografía 12. Construcción del puente Marc Basnight en primer plano, y puente a sustituir (Herbert C. Bonner) en la zona derecha de la fotografía. [46]

Con el objetivo de conseguir una vida útil de 100 años, NCDOT (North Carolina Department of Transportation) solicita en la licitación dosificaciones de hormigón robustas, que incluyan el uso generalizado de cenizas volantes, escorias, humo de sílice y baja relación agua cemento, con nitrito de calcio como inhibidor de corrosión. Además, se exige que todo el hormigón que se coloque en obra sea armado con acero inoxidable para proporcionar protección adicional frente a la corrosión y reducir los futuros costes de mantenimiento.

2.4.4.2. Nuevo Canal de Panamá (2016)

Tal como se indicó en el apartado de obras con cenizas volantes, en 2016 entra en servicio el tercer juego de esclusas del Canal de Panamá [40].



Fotografía 13. Vista general del Canal de Panamá (pixabay.com)

De las 8 dosificaciones utilizadas, 4 de ellas contienen puzolana natural (ya comentadas en el apartado 2.4.1.1). Otras 4 añaden además humo de sílice. La Tabla 16 muestra las dosificaciones colocadas con cemento resistente a los sulfatos, puzolanas naturales y humo de sílice, así como sus propiedades físicas principales: cono, contenido de aire, densidad y resistencia a compresión a 28 y 90 días.

Tabla 16. Dosificaciones con puzolana natural. Canal de Panamá. [40]

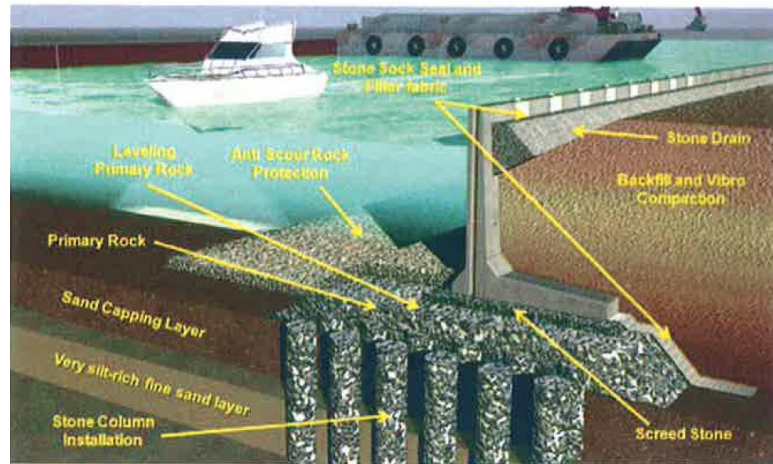
Planta hormigón	Atlántico		Pacífico	
Dosificación	375 (15PN 5SF)	332 (12,5PN 5,8SF)	375 (15PN 5SF)	332 (12,5PN 5,8SF)
Tipo de cemento	Panamá CEM II	Panamá CEM II	Panamá CEM II	Panamá CEM II
Cemento kg/m <sup>3</sup>	300	264	300	264
Puzolana kg/m <sup>3</sup>	56,3	47	56,3	46
Humo de sílice kg/m <sup>3</sup>	18,8	19	18,8	19,5
Conglomerante total kg/m <sup>3</sup>	375	330	375	328
w/c ratio	0,29	0,34	0,30	0,29
Aditivos kg/m <sup>3</sup>	4,5	2,63	4,5	2,3
Cono mm	110	120	75	100
Aire ocluido %	1,9	1,6	2,0	1,6
Densidad kg/m <sup>3</sup>	2653	2508	2534	2525
Resistencia a 28 días MPa	57,8 58,1	52,1 51,5	61,4 61,0	44,7 48,4
Resistencia a 90 días MPa	68,4 66,3	58,4 57,8	78,3 ---	58,1 60,1

2.4.4.3. Dique de cierre en un puerto del Golfo Pérsico (2012)

Se realiza un dique de hormigón armado formado por elementos prefabricados en L.

Para alcanzar la vida útil de 100 años exigida por la propiedad se llevan a cabo las siguientes actuaciones [40]:

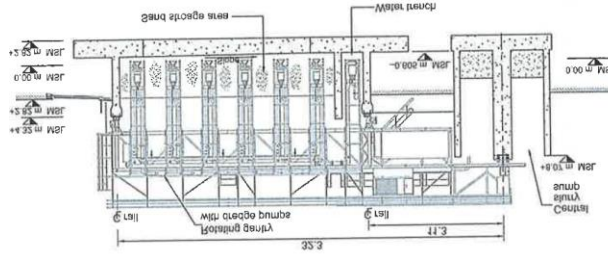
- Se utiliza un cemento ternario, formado por cemento portland, cenizas volantes y humo de sílice, en proporción 70:25:5.
- La relación agua-material cementante es de 0,37, y el contenido en material cementante es de 410 kg/m<sup>3</sup>.
- Se coloca un recubrimiento de 75 mm para garantizar los 100 años de vida útil.



Fotografía 14. Dique con elementos prefabricados en L [40]

2.4.4.4. Tolva de bypass de arena. Bocana del Puerto de Durban, Kwazulu-Natal, Sudáfrica (2010)

Adyacente a la bocana del Puerto de Durban, se ha llevado a cabo una trampa para arena, para así evitar que ciegue el canal de entrada al puerto. La arena de la trampa es dragada periódicamente para mantener operativa la trampa. Parte de esta arena entra en una instalación de hormigón que la decanta y bombea a través de tuberías hasta las playas de la ciudad, para evitar que desaparezcan por la barrera que implica los diques del puerto [40].



Fotografía 15. Sistema de decantación y bombeo de arena. Puerto de Durban [40]

Aunque esta estructura no se sitúa en el mar, se encuentra expuesta a las carreras de mareas, por lo que sufre periódicamente llenados y vaciados con agua de mar y, además, está expuesta a la abrasión de la arena en circulación.

El proyecto especificaba utilizar para este ambiente un hormigón con contenido mínimo de material cementante de  $420 \text{ kg/m}^3$ , y utilizar o 25-30% de cenizas volantes, o bien, 40-50% de escorias de alto horno. Finalmente, el contratista utilizó, por ser la solución más económica, como conglomerante un cemento CEM II-A-M (V-L), con un 12% de cenizas volantes, y lo combinó con escorias hasta obtener un cemento que tuviera un 45% de adición puzolánica. Para cumplir con los requisitos de durabilidad, se combinó este conglomerante con un espesor de recubrimiento de 75 mm.

#### 2.4.4.5. Muelle de cajones realizado con encofrado deslizante (anterior a 2010)

En el norte de África se realiza un muelle con cajones fabricados con encofrado deslizante, con 28 m de diámetro y 35 m de altura. Se plantea la dosificación del hormigón de los cajones teniendo en cuenta que la consistencia y tiempo de fraguado son fundamentales para ejecutar correctamente con encofrado deslizante.

La estructura se diseña para tener una vida útil de 100 años. Para comprobar la durabilidad del hormigón diseñado se utiliza el ensayo NORTEST (NT Build 443).

Las características principales de la dosificación adoptada son:

- Coeficiente de cloruros máximo de  $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  a 90 días (NT Built 443)
- Resistencia a compresión superior a 70 MPa
- Contenido de conglomerante:  $480 \text{ kg/m}^3$
- Relación agua /conglomerante 0,35
- Utilización de cemento CEM IIA-V (20% de cenizas volantes) más 5% de humo de sílice
- Utilización de retardador de fraguado y superplastificante



Fotografía 16. Construcción del nuevo muelle en la zona inferior derecha de la fotografía [45]

2.4.4.6. Puente de Bandra-Warli (2009)

El puente de Bandra-Warli (finalizado en 2009 en la India) se realiza con hormigones con más de una adición. Por ejemplo, en el caso de la cimentación de las pilas, en que preocupaba los gradientes de temperatura y temperatura máxima durante el fraguado del hormigón, se coloca un hormigón de tipo M60 con mezcla de cemento portland, cenizas volantes y humo de sílice [47].

2.4.4.7. Túnel del The Øresund Link (2000)

The Øresund Link, en Dinamarca, utiliza hormigón con humo de sílice para la fabricación de puentes, como ya se ha descrito anteriormente, pero en el caso del túnel, al 5% de humo de sílice se le añade un 15% de cenizas volantes [40].

Los requerimientos formulados para el túnel fueron:

- Contenido mínimo de cemento Portland: 275kg/m<sup>3</sup>
- Contenido mínimo de cenizas volantes: 15%
- Límites del contenido en Micro sílice: 5%

Los datos exactos se representan en la siguiente tabla en función de la zona y del tipo del tipo de hormigón.

Tabla 17. Dosificación del Tunel Øresund. [40]

Tipo de hormigón (datos en (kg/m <sup>3</sup> ))	Túnel Øresund	
	A	B
Cemento Portland	324	295
Cenizas Volantes	52	50
Micro sílice	12	15
Agua	143	143
Agua/cemento	0.39	0.42

2.4.4.8. Great Belt East Bridge (1998)

El catálogo de residuos utilizables en construcción del CEDEX [14], en las aplicaciones de las cenizas volantes indicaba que el puente Great Belt East Bridge, finalizado en 1998 en Dinamarca, se realiza con cemento, 47 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes y humo de sílice. La durabilidad del hormigón frente a la corrosión se convirtió en uno de los principales objetivos del diseño en proyecto, concretándose en el uso de baja relación agua cemento, uso de cenizas volantes y humo de sílice, plastificantes aireantes y áridos de calidad mejorada, junto con el uso de protectores frente a la evaporación durante el curado [48].

2.4.4.9. The Storebælt Link (1998)



Fotografía 17. Puente Storebaelt (Martin Falbisoner. commons.wikimedia.org )

Para la construcción de dos puentes y un túnel en Dinamarca se fijaron los siguientes requerimientos a las dosificaciones [49]:

- Contenido mínimo de cemento Portland: 300 kg/m<sup>3</sup>
- Contenido mínimo de cenizas volantes: 10%
- Límites del contenido en Micro sílice: entre el 5% y el 15%
- Máxima adición (Cenizas volantes + micro sílice): 25%
- Máximo contenido de agua: 135 l/m<sup>3</sup> (Tipo A) y 140 l/m<sup>3</sup> (Tipo B)
- Máxima relación agua/cemento: 0,35 (Tipo A) y 0,40 (Tipo B)
- Mínima resistencia a la compresión: 45 MPa

Y con estos condicionantes, se definen las siguientes dosificaciones:

Tabla 18. Dosificación del Túnel Øresund. [49]

Tipo de hormigón (datos en (kg/m <sup>3</sup> ))	Puente Oeste		Túnel Este		Puente Este	
	A	B	A	B	A	B
Cemento Portland	328	335	335	315	320	310
Cenizas Volantes	40 (10%)	40 (10%)	41 (10%)	40 (11%)	47 (12%)	47 (13%)
Micro sílice	20 (5%)	20 (5%)	21 (5%)	15 (4%)	20 (5%)	19 (5%)
Agua	131	133	131	161	133	138
Aire (vol %)	6	6	0.8	5	-	-

\* Se presenta entre paréntesis el porcentaje de cada adición, respecto al peso total de conglomerante.

Con breves variaciones, todas las dosificaciones adicionan 10% de cenizas volantes y 5% de microsílíce.

#### 2.4.4.10. The Confederation Bridge (1997)

El puente [40], ubicado en Canadá, une a las provincias de Prince Edward Island y New Brunswick. Entra en servicio en 1997.



Fotografía 18. The Confederation Bridge (Dennis Jarvis. <https://www.flickr.com/people/archer10/>)

El hormigón de la estructura se diseña para proporcionar una vida útil de 100 años. Además de estar expuesto a la corrosión, este hormigón sufre durante 6 meses de ciclos de hielo deshielo con agua de mar en invierno, y 2 meses de condiciones de abrasión severa en primavera.

Se fija como criterio para prevenir la corrosión alcanzar un coeficiente de difusión de  $0,35 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Para conseguir esta exigencia, se utiliza un cemento con humo de sílice (7,5%), superplastificante de base polinaftaleno y cenizas volantes. Se utiliza una relación agua/cemento de 0,30, y se alcanza una resistencia a compresión media de 72 MPa. A continuación, se detallan los materiales utilizados para algunas partes del puente.

Tabla 19. Dosificaciones en diferentes partes del Puente Storebaelt. [40]

	Vigas Marinas	Escudo contra el hielo	Secciones gruesas
Relación agua/cemento	0,30	0,25	0,36
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	145	142	159
Cemento + 7,5% de humo de sílice (kg/m <sup>3</sup> )	430	520	307
Cenizas volantes, Clase F (kg/m <sup>3</sup> )	45	60	133
Árido grueso (kg/m <sup>3</sup> ) D <sub>max</sub> 20 mm	1030	1100	1055
Arena	705	562	745
Agente retenedor de aire (l/m <sup>3</sup> )	0,18	0,35	0,09
Reductor de agua (l/m <sup>3</sup> )	1,80	1,60	-
Retardador del fraguado (l/m <sup>3</sup> )	-	0,58	-
Superplastificante (l/m <sup>3</sup> )	3,20	6,00	1,10

Con respecto a los escudos contra el hielo, se obtiene una resistencia media de 93 MPa.

## 2.5. ASPECTOS MÁS RELEVANTES DEL USO DE ADICIONES PUZOLÁNICAS EN HORMIGÓN ARMADO UBICADO EN AMBIENTE MARINO

### ADICIONES PUZOLÁNICAS

- Se conocen como adiciones a aquellos materiales que pueden añadirse al cemento u hormigón para mejorar algunas de sus características físicas y/o químicas.
- La actividad puzolánica de una adición incluye todas las reacciones químicas que tienen lugar entre los componentes activos de la adición, la portlandita formada durante la hidratación del cemento portland y el agua. Los productos de reacción que se forman son similares a los de la hidratación del cemento, ya que la composición química de cemento y la mezcla adición-portlandita son similares.
- Las adiciones puzolánicas mejoran la durabilidad del hormigón, refinando su red porosa y, por tanto, reduciendo su permeabilidad.

### TIPOS Y EFECTOS DE ADICIONES PUZOLÁNICAS

- Las cenizas volantes son los residuos sólidos de la combustión de carbones pulverizados en plantas termoeléctricas. Las puzolanas naturales son compuestos de origen natural con composición, prestaciones y exigencias normativas similares a las de las cenizas volantes.
- La escoria para cemento es un residuo de la obtención de acero en alto horno, obtenido al enfriar la escoria fundida sobre un chorro de agua fría. Este material se seca y muele hasta obtener una finura similar o incluso menor a la del cemento.
- Tanto las cenizas como las escorias aumentan el tiempo de fraguado, aumentan la cohesión y trabajabilidad del hormigón, reducen la exudación y segregación, y disminuyen el calor de hidratación. Estas dos adiciones necesitan curados prolongados del hormigón y disminuyen la resistencia en edades tempranas, aunque a edades mayores pueden incluso sobrepasar la resistencia del hormigón equivalente con cemento portland.
- El humo de sílice es un subproducto producido en hornos eléctricos de arco para la producción de silicio y ferrosilicio.
- El humo de sílice es una adición de elevada finura. Además de acelerar la reacción puzolánica (se considera finalizada a los 90 días), aumenta la cohesión, pero también aumenta la demanda de agua, siendo necesario el uso de superplastificantes para que la consistencia sea adecuada. El humo de sílice mejora la resistencia a compresión del hormigón. La mayor ganancia se produce entre 3 y 28 días de edad.
- Los conglomerantes aceptados por la normativa española no superan el 35% de cenizas volantes o puzolana (CEM II/B-V o CEM II/B-P), el 80% de escorias (CEM III/B) y 10% de humo de sílice (CEM II/A-D). En adiciones al hormigón tampoco se superan estas concentraciones. Ahora bien, la normativa española permitiría utilizar concentraciones muy superiores, mezclando adiciones: con hasta 30% de cenizas y/o puzolana más 30% escorias (CEM V/A), o con 35% de cenizas y/o puzolana más 10% de humo de sílice (CEM IV/B).
- Según el American Concrete Institute (ACI), está en aumento el uso de cementos con más de una adición puzolánica. En Estados Unidos son comunes los cementos con cenizas y escorias, y el humo de sílice se añade a cenizas y escorias para contrarrestar la baja resistencia inicial en hormigones con muy alta durabilidad.

### ADICIONES EN HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO

- El American Concrete Institute (ACI), en sus guías para construcción de estructuras portuarias, estructuras de hormigón flotantes y estructuras offshore, indica la importancia de las adiciones puzolánicas para prevenir la corrosión, las reacciones expansivas y el ataque químico por agua de mar. Insiste el ACI en esta valoración de las adiciones en sus Reports sobre cenizas volantes y sobre

humo de sílice. En este mismo sentido, se manifiestan BRE (Building Research Establishment), PCA (Portland Cement Association) y el US Department of Transportation.

- La normativa española (Código Estructural), la normativa británica para estructuras portuarias (BS 6349-1-4:2013), la normativa japonesa para estructuras portuarias (Technical Standards and Commentaries for port and harbour facilities in Japan), la normativa de la Marina de los Estados Unidos para estructuras portuarias (NAVFAC – Marine concrete with service life modelling) y la normativa australiana para el diseño de estructuras marítimas (AS 4997-2005) indican, de una manera u otra, la importancia de las adiciones puzolánicas para mejorar la durabilidad del hormigón en estructuras marinas.
- Estudios de campo y laboratorio han empleado medidas directas de perfiles de cloruros en el hormigón (ASTM C1556), medidas de resistividad del hormigón y ensayos de permeabilidad a los cloruros (ASTM C-1202 ó NTB-492) para demostrar el efecto beneficioso de las adiciones para mejorar la durabilidad del hormigón expuesto al ambiente marino.

Se han recopilado dosificaciones reales de estructuras en ambiente marino cuya durabilidad frente a la corrosión por cloruros se garantizó con el uso de adiciones. En 8 estructuras se han empleado cenizas (normalmente entre 25 y 35%) o escorias (contenido del 70%). El humo de sílice se emplea principalmente en hormigones aligerados (plataformas offshore y tableros de puentes), con concentraciones generalmente entre el 7 y 10%. Destaca que, en 10 estructuras, se ha combinado el uso de cenizas volantes (entre 10 y 25%) con el uso de humo de sílice (entre 5 y 7,5%). Es una solución que aúna alta resistencia a compresión, en especial a edades bajas, gracias al humo de sílice, con una disminución del calor de hidratación por las cenizas y con una muy elevada durabilidad del hormigón, debido a la disminución importante de la permeabilidad por el uso de las dos adiciones puzolánica.

### 3. INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Se define el inhibidor de corrosión ideal como el producto químico que, cuando se utiliza como aditivo del hormigón en la concentración adecuada, puede prevenir la corrosión del acero de armado, sin producir efectos adversos en las propiedades del hormigón [50].

#### 3.1. FUNCIONAMIENTO DE LOS ADITIVOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Para entender cómo actúa un inhibidor de corrosión, en primer lugar, es necesario conocer cómo se produce el proceso de corrosión por cloruros en el hormigón expuesto a ambiente marino.

El hormigón, debido a los compuestos formados durante la hidratación del cemento, presenta un pH muy elevado, alrededor de 13 [1]. En estas condiciones, el acero embebido en el hormigón se cubre con una capa de óxidos, transparente e imperceptible, que actúa de barrera impidiendo su oxidación. Se dice que el acero está pasivado [51].

Los cloruros tienen la capacidad de destruir esa capa de óxidos que protege al acero. Por tanto, cuando los cloruros alcanzan en concentración suficiente al armado, éste se despasiva y, con contenido suficiente de oxígeno y agua, el acero se corroe. El proceso de corrosión finaliza con la formación de óxidos de hierro hidratados, con un aumento de volumen que puede alcanzar el 600%, lo que se considera la principal causa de la expansión y fisuración del hormigón.

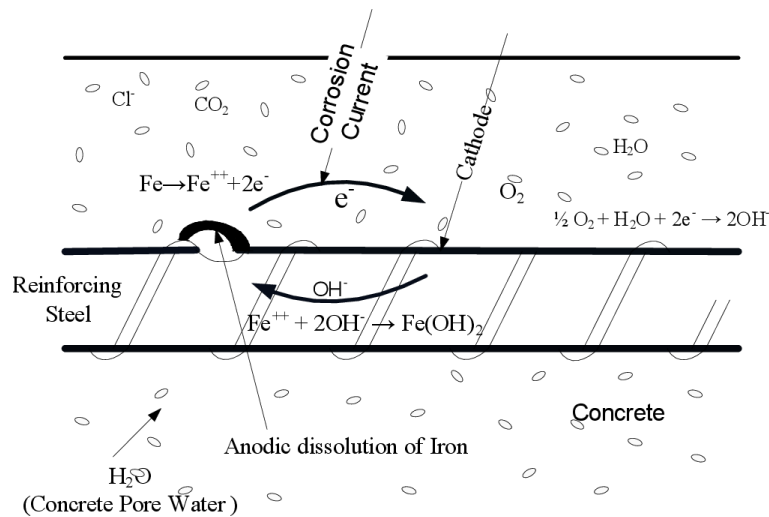


Figura 20. Corrosión en una barra de acero despasivada (Azher, S.A. (2005) A prediction model for the residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams)

Los años de vida útil por corrosión de una estructura de hormigón armado se pueden dividir en dos periodos:

- El periodo de iniciación, que comienza con el contacto del hormigón con el agua de mar y se extiende en el tiempo hasta que se alcanza una concentración de cloruros suficiente sobre las armaduras para que éstas se despasiven.
- El periodo de propagación es el periodo en que se produce la corrosión del acero.

La Figura 21 representa ambos periodos.

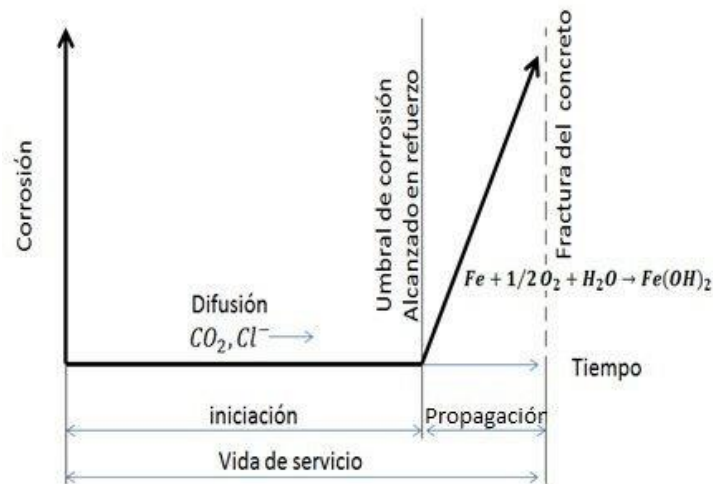


Figura 21. Periodo de iniciación y propagación en la vida útil de una estructura de hormigón armado expuesta a los cloruros. [51]

Expuestos los principios fundamentales del proceso de corrosión del armado del hormigón por cloruros, se pueden definir cómo actúa un inhibidor de corrosión[50]:

- Alargando el periodo de iniciación:
  - Mejora la resistencia del hormigón a la penetración de los cloruros
  - Aumenta la cantidad de cloruros que se pueden ver química o físicamente atrapados en el recubrimiento
  - Aumenta la cantidad de cloruros que el acero puede tolerar antes de que la capa de óxidos que cubre al armado se vea afectada y el acero se despasive (inicio de la corrosión)
- Ralentizando el periodo de propagación:
  - Aumenta la resistencia del hormigón a que el oxígeno alcance las armaduras y forme parte de la reacción catódica
  - Aumenta la resistencia eléctrica del hormigón (resistividad)
  - Modifica la composición química de los poros del hormigón, ya que es el electrolito que hace de puente eléctrico entra cátodo y ánodo.

Hay definiciones más estrictas de lo que es un inhibidor de corrosión. Por ejemplo, ISO 8044, lo define como sustancia química que disminuye la velocidad de corrosión, cuando está presente en el proceso de corrosión en una concentración adecuada, pero sin cambiar significativamente la concentración de cualquier otro agente corrosivo.” (ISO 8044 1989). En esta definición se excluyen otros métodos de protección contra la corrosión como recubrimientos bloqueadores de poros u otros materiales, que cambian las concentraciones de agua, oxígeno y cloruro. Sin embargo, algunos inhibidores también presentan como propiedad secundaria ser bloqueadores de poros [52].

La clasificación más común aplicada a los inhibidores de corrosión los divide en: catódicos, anódicos o mixtos. Para entender esta clasificación, es necesario entender el proceso de oxidación - reducción que se produce durante la corrosión de las armaduras. En la corrosión del armado se producen dos reacciones químicas simultáneas:

- Oxidación (Ánodo):  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2 e^-$
- Reducción (Cátodo):  $H_2O + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow 2 (OH)^-$

La Figura 22 muestra la relación entre intensidad de corriente de corrosión generada en el cátodo y en el ánodo ( $i_1$ ) y el potencial de corrosión en la superficie acero/hormigón ( $E_1$ ), en ausencia de inhibidores.

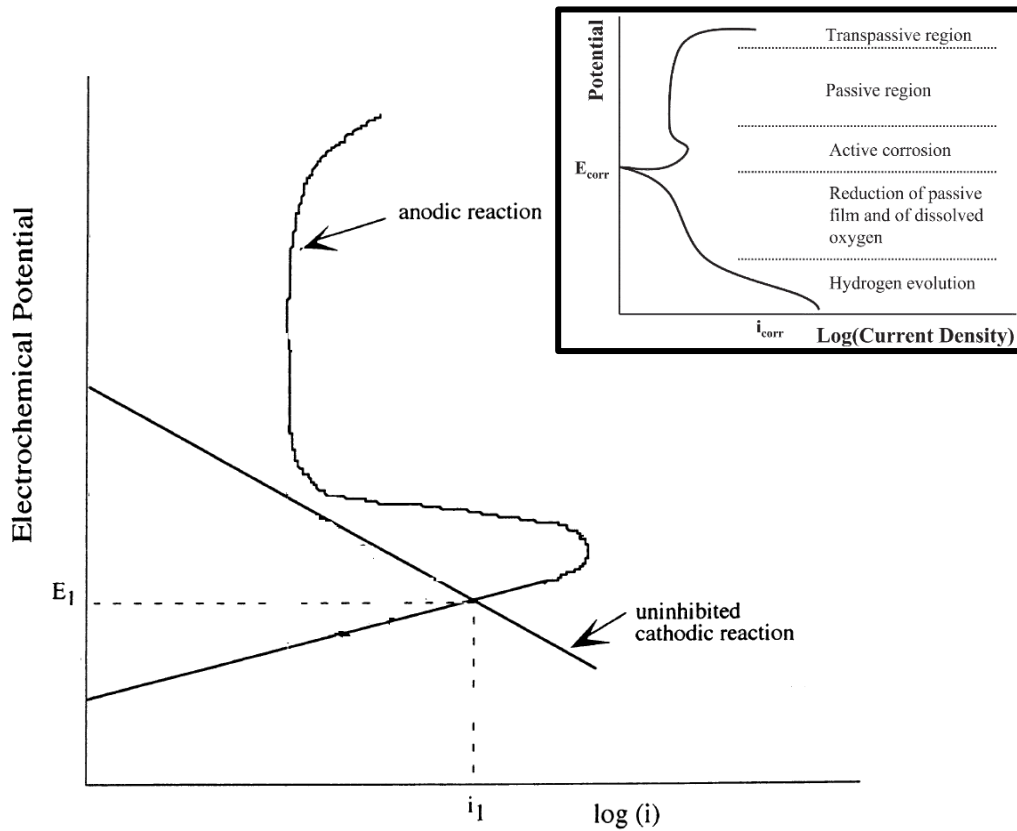


Figura 22. Intensidad de corriente y potencial de la reacción de corrosión de las armaduras del hormigón [50,53]

Sobre la figura anterior, la Figura 23 muestra cómo afecta cada tipo de inhibidor al proceso de corrosión:

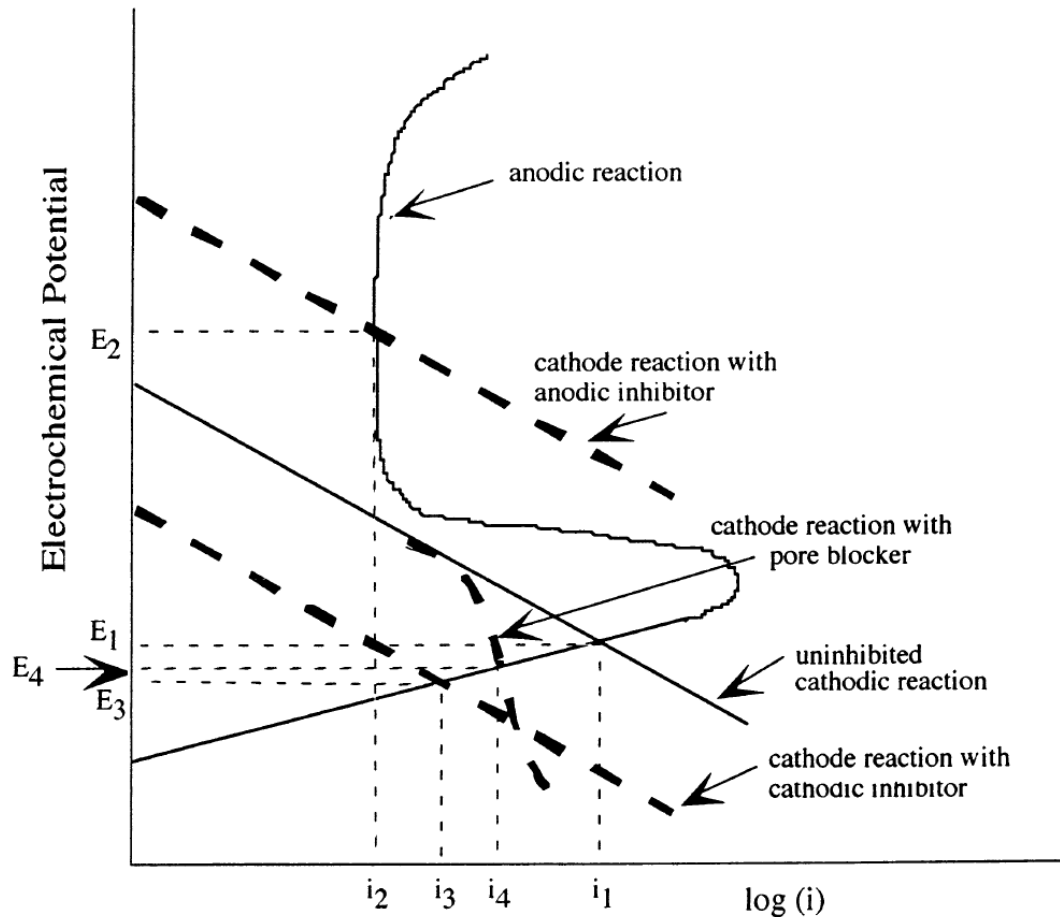


Figura 23. Efecto de los inhibidores de corrosión sobre la reacción de corrosión de las armaduras en el armado [50].

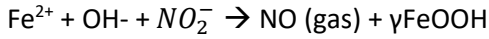
- Un **inhibidor tipo anódico** elevará el potencial hasta  $E_2$ , consiguiendo que las curvas anódica y catódica se crucen en la región pasiva de la curva anódica (línea discontinua etiquetada con "reacción catódica con un inhibidor anódico") y la densidad de corriente de corrosión se reduce a  $i_2$ , como se muestra en la figura [50]. El inhibidor anódico más común es el nitrito cálcico ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ). También se utilizan el nitrito sódico, el benzoato sódico y el cromato sódico [52].
- Un **inhibidor tipo catódico** simplemente reducirá la velocidad de la reacción catódica de modo que el potencial de corrosión y la intensidad de corriente se reducen, como lo indica la línea discontinua etiquetada "reacción catódica con inhibidor catódico", dando valores  $E_3$  e  $i_3$  [50]. Los más utilizados han sido el hidróxido sódico y el carbonato sódico, los cuales se supone que aumentan el pH en la zona próxima al armado, y reducen el transporte de oxígeno reforzando la capa pasiva que recubre al acero. También se han utilizado fosfatos, silicatos y polifosfatos [52].
- Un **inhibidor que bloquea los poros** limitará la entrada de oxígeno, reduce la corriente catódica, como lo muestra la línea "reacción catódica con bloqueador de poros", dando valores de potencial y corriente de  $E_4$  e  $i_4$ , respectivamente [50].
- Un **inhibidor mixto** actúa tanto en la reacción anódica como en la catódica. Reducen la velocidad de corrosión sin un cambio significativo en el potencial de corrosión. Generalmente funcionan por adsorción superficial sobre la superficie del acero en contacto con el inhibidor, formando una fina capa protectora. Forman este grupo los compuestos que tienen grupo hidrófobo, como las alcanolaminas (AMA) [52].

### 3.2. TIPOS DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN

#### 3.2.1. NITRITO CÁLCICO (CN)

Los nitritos son los primeros compuestos que se estudian como inhibidores de corrosión. Su aplicación en hormigón comienza en los años 50.

Los nitritos son inhibidores anódicos. Los iones nitrito ayudan a que la capa de óxidos que pasiva al acero esté formada por  $\gamma\text{FeOOH}$ , que es la forma de óxido de hierro más estable frente a los cloruros.



Estos inhibidores son eficientes tanto retrasando el inicio de la corrosión como ralentizando el proceso una vez iniciado [52]. Ahora bien, cuando el proceso de corrosión está avanzado, ninguna concentración de nitritos tiene capacidad inhibidora [54].

Respecto al alargamiento del periodo de inicialización, los nitritos son capaces de aumentar el umbral de cloruros para que se inicie la corrosión. De hecho, con la dosificación máxima admitida de nitritos, el umbral para que comience la corrosión puede pasar de 0,4% (pcem) hasta el 3% (pcem) [55].

Pero el aditivo será funcional dependiendo del contenido de nitritos y de cloruros presente. La efectividad de los nitritos se evalúa en términos de relación molar entre nitritos y cloro. Relaciones  $[\text{NO}_2^-]/[\text{Cl}^-]$  por encima de 0,5-0,6 son suficiente para prevenir la corrosión por cloruros, tal como se observa en la Figura 24.

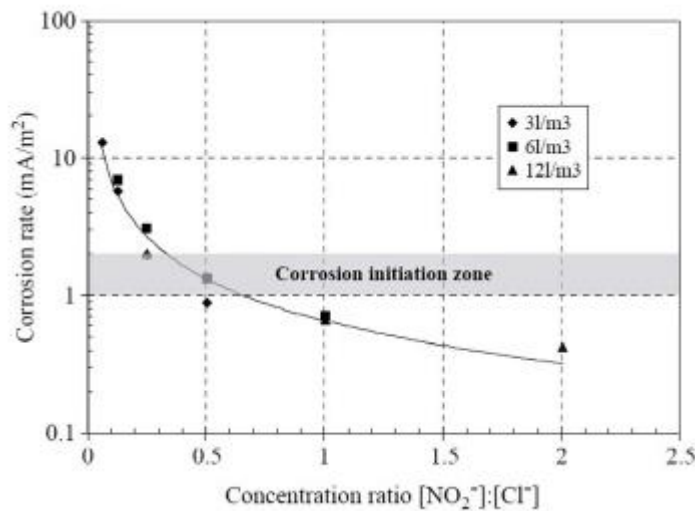


Figura 24. Intensidad de corrosión en función de la relación molar entre nitritos y cloro [56]

La dosificación mínima de inhibidor en el hormigón se calculará en función de la agresividad del ambiente en que está expuesto el hormigón, ya que este parámetro determinará la resistencia a los cloruros que deben mostrar las armaduras [55].

Son los inhibidores que mejores resultados presentan. Por ejemplo, en 2019 se publica un estudio de 10 años de duración realizado en Hawái para evaluar diferentes aditivos inhibidores de corrosión comerciales, con ensayos sobre hormigón en laboratorio y en ambiente marino de carrera de mareas.



Fotografía 19. Elementos de hormigón armado colocados en carrera de mareas para ensayar inhibidores de corrosión [57]

Los mejores resultados se obtuvieron con los inhibidores de nitritos, en comparación con los inhibidores de amina y carboxilato (que se expondrán en el apartado siguiente). Como conclusión final, este estudio recomienda una dosificación tipo para hormigones resistentes al ambiente marino que deberá tener una relación agua cemento de 0,35, el uso de aditivo de nitritos comercial (se ensaya Darex Corrosion Inhibitor y Rheocrete), con concentración de 20 l/m<sup>3</sup> de hormigón y el reemplazo de un 15% de cemento por cenizas volantes o de un 5% del cemento por humo de sílice, considerando que las adiciones puzolánicas complementarán la eficacia de los inhibidores para proteger al armado [57].

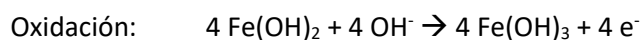
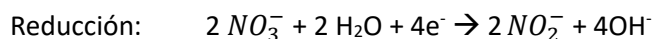
Los inhibidores de tipo nitrito, en estado fresco, pueden aumentar ligeramente el aire ocluido y mejorar la trabajabilidad del hormigón. También tienen efecto acelerador de fraguado. A edades cortas, la resistencia a compresión puede ser ligeramente mayor, aunque la resistencia final del hormigón (900 días) no se verá modificada, o es ligeramente inferior a la del mismo hormigón sin adición [56,58–60].

Ahora bien, aunque su efectividad es muy bien conocida, los nitritos presentan algunas limitaciones de seguridad y medioambientales, especialmente el nitrito sódico y potásico [55], de ahí que se utilice actualmente el nitrito cálcico. En general, los nitritos son un fuerte bactericida, pero también son compuestos muy tóxicos para organismos acuáticos [61]. Además, no son rentables, salvo que se fabriquen en gran volumen. Por tanto, están actualmente en desuso. En España, no se oferta actualmente por ninguna casa comercial de aditivos para hormigón.

### 3.2.2. NITRATOS

Los nitratos aparecen como una alternativa inorgánica a los inhibidores de nitritos. En comparación con los nitritos, los nitratos son más baratos y menos dañinos para el medio ambiente. Además, han sido utilizados tradicionalmente como aceleradores de fraguado, por lo que su compatibilidad con el hormigón está ya demostrada [55].

Como los nitritos, los nitratos se consideran un inhibidor aniónico, capaz de favorecer la pasivación del acero. Para ello, los nitratos favorecen la oxidación del Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> mediante la reducción de nitrato a nitrito. Las reacciones que se producen son:



Al igual que la efectividad de los nitritos está muy contrastada, existen dudas sobre la eficacia real de los nitratos como inhibidores de la corrosión. La mayoría de los estudios con resultados prometedores no proporcionan información completa sobre el contenido de cloruro que se ha alcanzado en el armado, o los aumentos del umbral de corrosión que obtienen son bajos [55].

Los nitratos son también aceleradores de fraguado, por lo que es posible que en los ensayos se esté afectando más al coeficiente de difusión, respecto a los hormigones de control, que al umbral de cloruros para que se inicie la corrosión [55].

### 3.2.3. INHIBIDORES ORGÁNICOS

Para evitar los problemas ambientales y de seguridad de los nitritos, desde los años 90 comienza el desarrollo de inhibidores de corrosión orgánicos: aminas, alcanolaminas, carboxilatos y mezclas emulsionadas de esteres, alcoholes y aminas [55].

Dentro del grupo de los inhibidores con base orgánica, las aminas y las alcanolaminas son muy de lejos los compuestos más utilizados [55].

Los compuestos orgánicos se clasifican generalmente como inhibidores mixtos, ya que tienen la capacidad de formar una capa protectora sobre la superficie del acero que cubre completamente la zona catódica y anódica [52]. Algunos de ellos también tienen efecto de bloqueador de los poros del hormigón, ralentizando el acceso hasta el armado de los cloruros y del oxígeno.

#### 3.2.3.1. Aminas y alcanolaminas: DMEA, TETA y otros

El dimetil etanol amina (DMEA) es el componente principal de muchos inhibidores de corrosión comerciales.

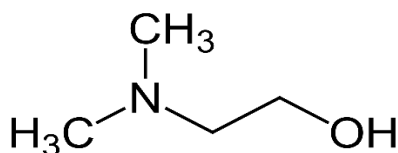


Figura 25. Dimetil etanol amina

Este compuesto se absorbe en la superficie del acero, formando una capa monomolecular que protege al acero del ataque de los cloruros. De hecho, DMEA contiene un grupo hidroxilo y un grupo amina, los cuales trabajan como grupos nucleófilos capaces de adsorberse sobre el acero, llegando incluso a formar un enlace de coordinación con el hierro.

La dosificación de estos compuestos se sitúa entre 10 y 15 l/m<sup>3</sup> hormigón (utilizando productos comerciales con concentración del 20%).

Los últimos estudios realizados muestran que este compuesto es capaz de aumentar el umbral de cloruros hasta el 1,2-1,3 % (pcem), cuando se utiliza cemento Portland. Pero también se ha ensayado este compuesto con cementos con adiciones puzolánicas. Los mejores resultados se alcanzaron con un hormigón que contenía 25% de cenizas volantes, 10% de humo de sílice y un 3% de inhibidor. Además, se consiguió un aumento de la resistencia del hormigón de hasta el 20%, al ensayar tras 90 días de curado.

El trietilentetraamina (TETA) es otra amina que ha mostrado buenos resultados.

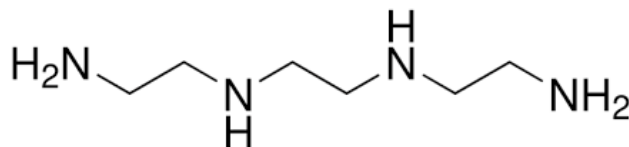


Figura 26. trietilentetraamina

Cuando se ensaya en el hormigón, se consigue aumentar el umbral de cloruros hasta 1.5-2% (pcem). Además, su utilización en 1% respecto al peso de cemento, no altera la trabajabilidad del hormigón fresco ni las propiedades mecánicas del hormigón endurecido [55].

Otro ejemplo de inhibidor orgánico son los inhibidores de amina y éster orgánico, compuestos que en el hormigón presentan un doble efecto: la amina forma una capa protectora sobre el acero y, además, el éster aporta un efecto hidrófugo, bloqueando el acceso al agua en los poros del hormigón. Por tanto, este tipo de amina presenta, además de una protección mixta (anódica y catódica), un efecto adicional de bloqueo de los poros del hormigón [52]. Estos inhibidores producen una disminución de la resistencia a compresión de entre el 10 y 20%, así como una disminución de la trabajabilidad del hormigón fresco, en especial cuando se ensaya con cemento de escorias. También aumenta ligeramente el contenido de aire ocluido del hormigón [58–60].

### 3.2.3.2. Carboxilatos

Los carboxilatos (sales con grupo carboxilo,  $-\text{COO}^-$ ) son otro de los componentes más comunes dentro del grupo de inhibidores orgánicos. Entre ellos, destaca el tartrato sódico, el benzoato sódico y el glutamato sódico [55].

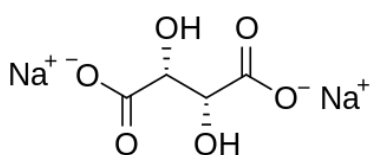


Figura 27. Tartrato sódico

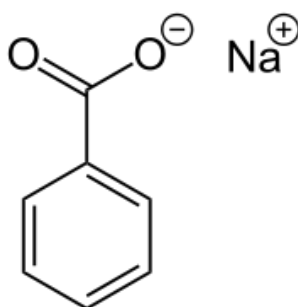


Figura 28. Benzoato sódico

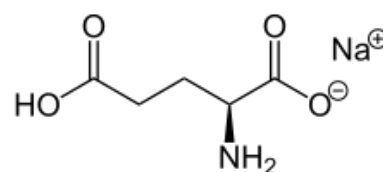


Figura 29. Glutamato sódico

La efectividad de estos inhibidores se ha cuantificado midiendo cómo varía el potencial de corrosión del acero en presencia de diferentes inhibidores (concentración 0,1M) con distintas concentraciones de cloruros. Los tres compuestos han tenido muy buen comportamiento frente a concentraciones bajas de cloruros (0,1M ClNa). Para concentraciones mayores, el mejor comportamiento es el de tartrato, que mantiene la misma eficiencia que en concentraciones bajas. El benzoato y glutamato, aunque en menor medida, también son efectivos.

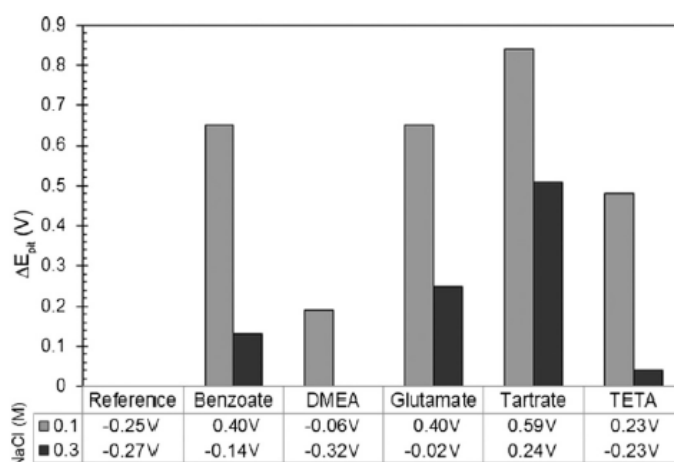


Figura 30. Eficacia de diferentes inhibidores orgánicos (aminas y carboxilos) en ensayo de laboratorio. [55]

Estos ensayos de laboratorio muestran mejor resultados con los carboxilatos que con las aminas, sobre todo con concentraciones elevadas de cloruros. Ahora bien, DMEA, TETA y el benzoato son los compuestos que han demostrado eficacia a largo plazo en ensayos sobre hormigón. El resto de los compuestos muestran resultados muy prometedores, pero en ensayos de laboratorio [55].

### 3.2.3.3. Otros inhibidores orgánicos

Los inhibidores poliméricos están ganando relevancia, ya que son productos de síntesis sencilla, bajo coste y su estructura presenta múltiples puntos de adsorción sobre la superficie del acero. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta ahora son escasos y poco concluyentes [55].

También los inhibidores de base sulfonada, como el TDS (Dodecylbenzenesulfonato de trietanolamina), son compuestos con resultados prometedores en los ensayos de laboratorio [55]. Este tipo de inhibidores funcionan correctamente retrasando el inicio de la corrosión, pero son poco efectivos una vez iniciado el proceso, y disminuyen sólo de forma leve la intensidad de corrosión [52].

### 3.2.4. INHIBIDORES MIGRATORIOS

Tanto de forma preventiva, antes de que se produzca el proceso de corrosión, como en trabajos de reparación, se utilizan los inhibidores migratorios: producto químico que se aplica en la superficie del hormigón, que debe penetrar hasta traspasar todo el recubrimiento y alcanzar la superficie de las armaduras.

En el caso de los procesos de reparación, la finalidad del inhibidor es reducir la velocidad de corrosión, y en el caso de utilizarse como medida preventiva, se aplica con la intención de retrasar el inicio de la corrosión y, una vez iniciada, ralentizar su avance [62].

Los inhibidores migratorios orgánicos suelen estar formados por dos componentes. Uno volátil (normalmente la alcanamina) y otro no volátil (un ácido).

La mayor complejidad en estos inhibidores es evaluar el avance que tienen en el recubrimiento del hormigón, y si son capaces de alcanzar las armaduras en concentración suficiente. Además, estos materiales se complementan en algunos productos comerciales con otros componentes bloqueadores de los poros y/o hidrófugos. Por tanto, aunque el producto final demuestre efectividad en la reducción de la velocidad de corrosión, es difícil saber qué parte es debida al inhibidor de corrosión, y cuál es por un bloqueo de la humedad y oxígeno exterior.

Los resultados experimentales que evalúan la velocidad de penetración son muy heterogéneos [52]. Además, cuando el inhibidor se divide en una parte más volátil y otra menos, es necesario que ambas alcancen a las armaduras, y en muchas ocasiones sólo la parte volátil, que es la que avanza más rápido, es monitorizada.

Hay estudios, como el llevado a cabo para la valoración de un inhibidor de base amina, en el que los resultados fueron positivos [63].



Figura 31. Ensayo ASTM para el estudio de la eficacia de inhibidor migratorio en base amina. [63]

Se utilizó espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) para llevar a cabo ensayos químicos de espectroscopía de conductividad electrónica (ESCA), y determinar así la composición elemental en la superficie de las muestras de acero, con el fin de evaluar la presencia del inhibidor sobre las barras. Estos ensayos permitieron conocer la capacidad del inhibidor para alcanzar el armado, por difusión líquida y vapor. Ahora bien, estos ensayos están limitados a hormigones llevados a cabo con cemento portland (450 kg/m<sup>3</sup>) y relaciones a/c de 0,4 y 0,6.

En cambio, otros estudios han mostrado resultados menos satisfactorios en la penetración de inhibidores migratorios en base amina en estructuras expuestas directamente al agua de mar, y por tanto, muy saturadas y con elevado contenido de sales [52].

Cuando se emplean inhibidores migratorios, hay que valorar sobre qué calidad del hormigón se ha testado el producto y cuál es la calidad sobre la que se quiere aplicar. La eficiencia de la migración disminuye según aumenta el espesor de recubrimiento y/o aumenta la calidad del hormigón. Se ha demostrado, por ejemplo, que pasar de 20 MPa a 30 MPa disminuye a la mitad la velocidad de migración [64]. También es importante conocer el contenido de cloruros que se tiene sobre las armaduras. Se ha probado, para un inhibidor migratorio en base alcanolamina, que la capa pasiva formada sobre el armado puede ser inestable si se ha superado el 1% de cloruros, expresado en peso de cemento. Por tanto, en algunos casos sería necesario aplicar el inhibidor en o sobre una reparación con mortero u hormigón, tras retirar el hormigón con cloruros, en lugar de confiar en la aplicación de estos productos sobre hormigones con contenido elevado de cloruros en la profundidad del armado. Siempre resulta más eficiente utilizar los inhibidores de corrosión como aditivos del hormigón que como producto aplicado sobre una superficie endurecida [64].

En resumen, los inhibidores de corrosión migratorios son productos difíciles de evaluar y los resultados son a veces contradictorios. Ahora bien, también son los compuestos comerciales que proporcionan más información técnica: documentos de idoneidad técnica y seguimiento del comportamiento en obras reales. En apartados posteriores, se describirán los resultados alcanzados en casos reales de aplicación en obra.

### 3.3. ESTUDIO DE LA EFICACIA DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

#### 3.3.1. ASTM G180 [65]

Este ensayo define un procedimiento para evaluar el comportamiento de potenciales aditivos del hormigón en inhibidores de corrosión. El ensayo no se lleva a cabo en hormigón, por lo que es una herramienta para evaluar potenciales inhibidores, pero no permite predecir el comportamiento final de éstos en obra.

El procedimiento consiste en la medida de la resistencia de polarización de una barra de acero en una celda de ensayo (Figura 32) que proporciona el montaje eléctrico de la Figura 33. Una disminución de la resistencia a la polarización del acero de un orden de magnitud por la adición del compuesto objeto de ensayo es un indicativo importante de que este aditivo puede ser un inhibidor de corrosión.

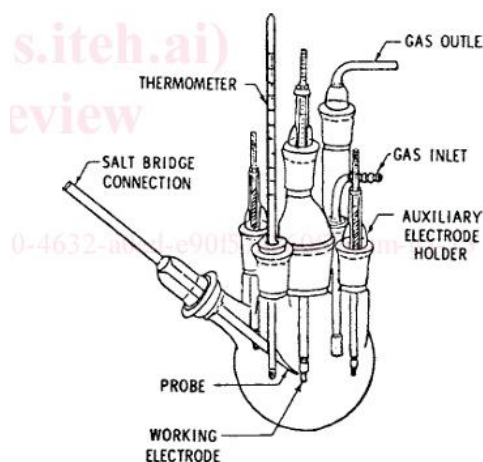


Figura 32. Celda de ensayo. [65]

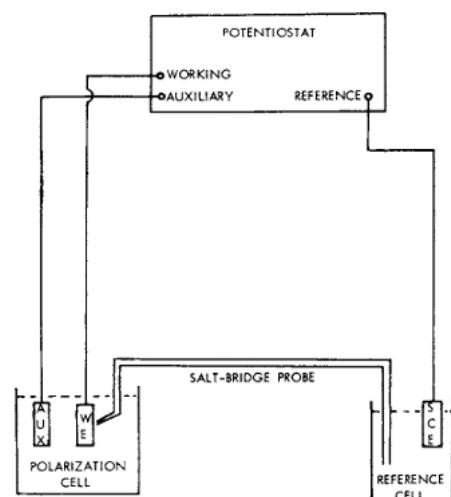


Figura 33. Montaje eléctrico del ensayo. [65]

La disolución de ensayo en la que se sumerge la barra de acero se obtiene del filtrado realizado tras mezclar 200 g de cemento con 1 litro de agua. Al producto resultante se añade hidróxido cálcico (4 g/l). y sobre esta disolución, se realiza el esquema eléctrico de la Figura 33. Los electrodos de medida serán:

- Electrodo de trabajo: acero templado
- Electrodo auxiliares: dos barras de grafito o de niobio platinizado, o una malla de platino
- Electrodo de referencia: Electrodo de calomelanos

Antes de iniciar las medidas, se añade a la disolución NaCl y el aditivo objeto de estudio.

El ensayo se realiza midiendo la resistencia de polarización ( $R_p$ ) de la barra de acero, aplicando una velocidad de 0,167 mV/s, desde -20 mV a +20mV.

El aditivo estudiado será un potencial inhibidor de corrosión si reduce en un orden de magnitud el valor de  $1/R_p$ , en comparación con el mismo ensayo sin el aditivo. En caso contrario, serán necesarios otros ensayos para determinar si es un inhibidor.

### 3.3.2. ASTM G109 [66]

Esta norma tiene como objetivo predecir, en probetas de hormigón, las propiedades de inhibición de corrosión que tendrán los aditivos químicos.

Para la realización del ensayo se fabrican probetas de hormigón siguiendo la disposición de las siguientes figuras.

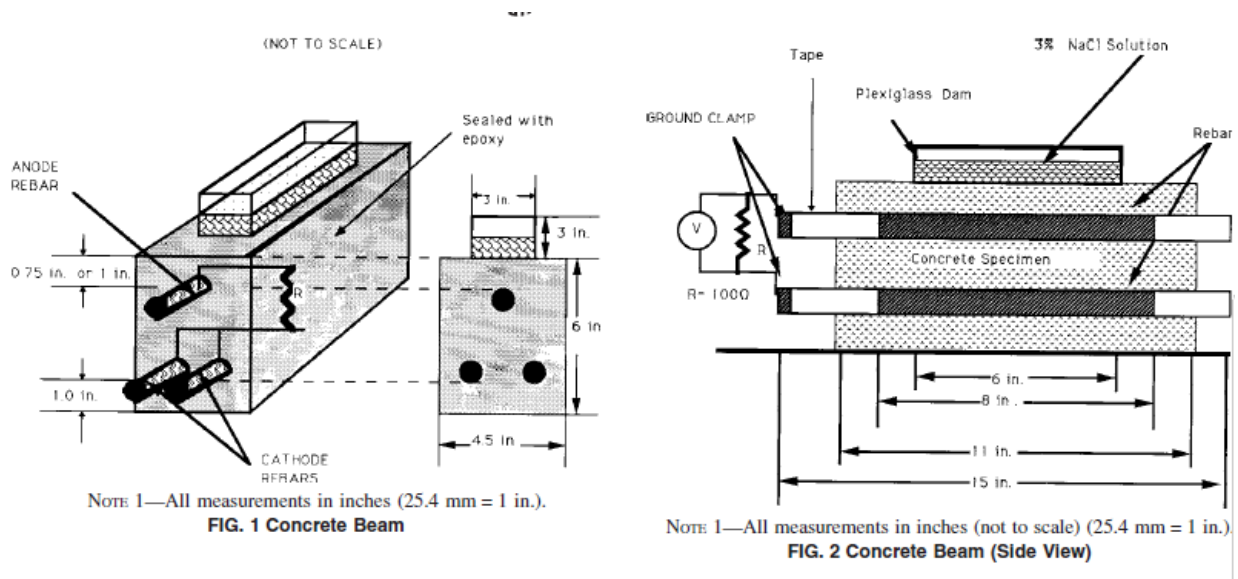


Figura 34. Probetas para el ensayo ASTM G109. [66]

Cada ensayo se realiza sobre 3 probetas de hormigón. Sobre cada una de ellas se coloca un depósito de metacrilato con cloruro sódico al 3%. En el interior del hormigón se colocan 3 barras, una superior y dos inferiores.

Para el seguimiento del ensayo se mide el voltaje que pasa a través de una resistencia de 100 ohmios que une la barra superior con las dos inferiores. La intensidad de corriente que está circulando será  $I = V/100$  (A). Estas medidas se llevarán a cabo a las dos semanas de iniciarse el ensayo y, a partir de ese momento, cada cuatro semanas. El ensayo se prolonga hasta que la cantidad de corriente integrada en la macrocelda sea de 150 C o superior.

Al finalizar el ensayo se rompen las probetas y se evalúa el porcentaje de área de las barras que se ha corroído. También se mide el contenido de cloruros inicial del hormigón (en la base de las probetas) y el contenido de cloruros en la profundidad de las barras.

### 3.3.3. UNE 83992-2:2012 EX [67]

La norma de ensayo española describe un procedimiento para determinar los efectos de la composición de un hormigón (tipo de cemento, adiciones, aditivos, etc.) sobre la resistencia a la penetración de los cloruros, la concentración crítica de cloruros que hacen que se inicie la corrosión y la velocidad de avance de la corrosión, una vez iniciado el proceso. Por tanto, esta norma permite evaluar cómo afecta el uso de inhibidores de corrosión al avance de la patología.

El ensayo consiste en exponer una probeta de hormigón, en la que se ha embebido una barra de acero, a una corriente eléctrica por medio de dos electrodos, uno colocado en una disolución de cloruro sódico y de cobre (II) en contacto con una cara de la probeta, y el otro electrodo colocado en la cara opuesta. Los iones cloruro penetran de forma acelerada debido a la acción del campo eléctrico, y migran desde el recipiente de la disolución hasta el electrodo de la cara opuesta, encontrando en su camino al acero y desencadenando la corrosión.

El tiempo desde que empieza el ensayo hasta que comienza la corrosión es indicativo de la resistencia del hormigón al paso de los cloruros. Para identificar el inicio de la corrosión se mide periódicamente el potencial de la armadura frente a un electrodo de referencia hasta alcanzar un potencial de -300 mV respecto a un electrodo de calomelanos saturado.

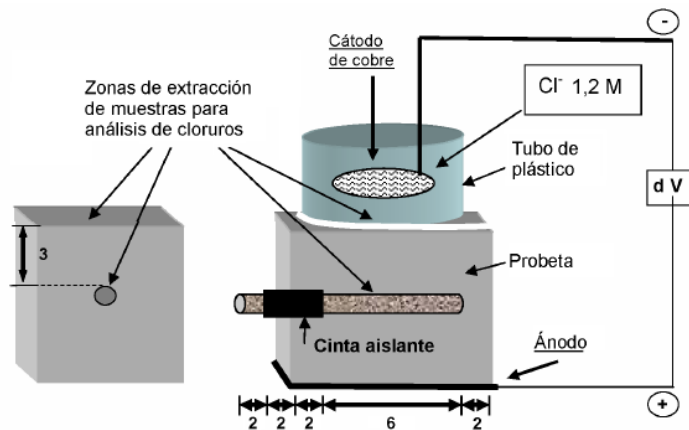


Figura 35. Diagrama del ensayo UNE 83992-2. [67]

Una vez iniciada la corrosión, es posible extraer la barra para medir con qué concentración de cloruros ha comenzado, o es posible monitorizar el proceso de corrosión, midiendo la intensidad de corrosión frente al tiempo. De esta manera, se puede saber si un inhibidor de corrosión modifica la concentración umbral para que se inicie la corrosión, y también si disminuye la velocidad de corrosión, una vez despasivada la armadura.

## 3.4. NORMATIVA PARA INHIBIDORES DE CORROSIÓN

### 3.4.1. CÓDIGO ESTRUCTURAL

El Código Estructural define como aditivo del hormigón a aquellas sustancias o productos que, incorporados en el hormigón antes del amasado en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada.

Los aditivos deben tener marcado CE, según la norma UNE-EN 934-2 [68]. La utilización de otros aditivos distintos a los contemplados en esta norma requiere de la aprobación previa de la dirección facultativa. Este es el caso de los inhibidores de corrosión, que no quedan recogidos expresamente en la norma.

### **3.4.2. ASTM C1582 [69]**

La norma ASTM C1582 fija las exigencias para aditivos inhibidores de corrosión para hormigón armado. En el caso de la resistencia a compresión, en los ensayos realizados a 3, 7, 28 días se admite una disminución de la resistencia a compresión y a flexión máxima del 20%. Se permite a la propiedad exigir este mismo criterio a los 6 y 12 meses.

Para comprobar la eficacia del aditivo se utilizará el ensayo ASTM G109, descrito anteriormente. Los criterios de aceptación para los inhibidores de corrosión son:

- Corriente integrada media de macrocelda:  $\leq 50$  C
- Área media corroída, respecto a la muestra de control  $\leq 1/3$
- El contenido de cloruros en la barra ensayada debe ser superior o igual al umbral de cloruros a la finalización del ensayo.

### **3.5. INHIBIDORES COMERCIALES**

A continuación, se describen los productos comerciales disponibles, con la descripción que las diferentes casas comerciales aportan sobre ellos.

#### **3.5.1. INHIBIDORES PARA DOSIFICAR EN EL HORMIGÓN**

Aunque no todos los productos comerciales proporcionan la misma información, tras la valoración conjunta de cuatro de ellos, se puede observar cómo todos los inhibidores consultados son productos orgánicos respetuosos con el medio ambiente, cuya base son aminas y carboxilatos. Funcionan como inhibidores catiónicos y aniónicos, retrasando el inicio de la corrosión (aumenta el umbral de cloruros para el avance del proceso) y retrasando su evolución, una vez iniciada la corrosión. La dosificación es muy variable, dependiendo del producto comercial utilizado. De forma global, pueden retrasar el tiempo de inicio de fraguado y pueden generar oclusión de aire, pero producen efectos mínimos sobre la trabajabilidad y la resistencia del hormigón [70–75].

La Tabla 20 muestra la composición química, dosificación y efectos sobre el hormigón de diferentes inhibidores disponibles en el mercado.

Tabla 20. Inhibidores comerciales dosificados al hormigón.

Composición Química	Dosificación	Efectos sobre el proceso de corrosión	Efectos sobre el hormigón
Inhibidor de corrosión orgánico, mezcla de aminas y carboxilatos. Es un producto de base biológica (67%)	La dosis es fija e independiente de los niveles de cloruros, de 0,6 l/m <sup>3</sup> hormigón.	Aumenta el umbral de cloruros para el inicio de la corrosión en un 54%, y reduce la intensidad de corrosión, una vez iniciado el proceso, en un 83%	Seguro y respetuoso con el medioambiente. Efecto mínimo sobre las propiedades del hormigón (trabajabilidad y resistencia). Puede causar un retraso del tiempo de fraguado inicial La combinación con algunos superplastificantes puede retrasar el tiempo de fraguado.
Inhibidor basado en carboxilato de amina	Dosificación de 10 l/m <sup>3</sup> de hormigón.	Actúa formando una película sobre la superficie del acero (cátodo) y evitando la disolución del metal por la formación de compuestos de baja solubilidad (ánodo).  Ensayos ASTM G109 muestran la efectividad de estos aditivos retrasando el inicio de la corrosión, y ralentizando el proceso una vez iniciado (ligeramente, según la Figura 36).	No influye negativamente en las características del hormigón fresco y endurecido.
Aditivo orgánico inhibidor de la corrosión	Debe adicionarse con el agua de amasado, con dosis de 3 a 5 kg/m <sup>3</sup> de hormigón.	Se absorbe sobre las barras del armado y forma una película protectora uniforme que abarca las zonas activas, tanto catódicas como anódicas.	

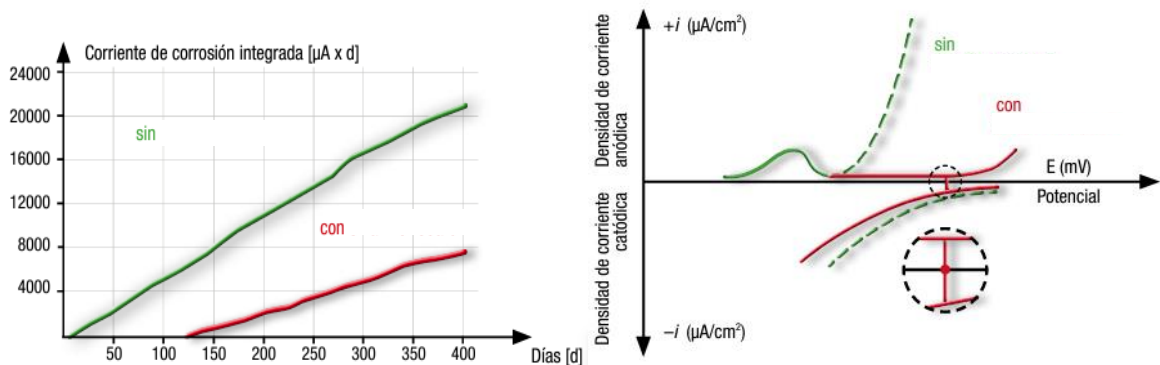


Figura 36. Efectividad de un inhibidor de corrosión. [73]

### 3.5.2. INHIBIDORES MIGRATORIOS

La valoración de 3 inhibidores de corrosión migratorios [76–78] muestra como todos tienen base orgánica, se aplican generalmente en un mínimo de dos capas y reducen la corrosión al tener capacidad para alcanzar al armado y crear sobre éste una capa protectora que lo protege de la corrosión.

Tabla 21. Inhibidores comerciales migratorios (aplicados en superficie).

Composición química	Dosificación	Efectos sobre el proceso de corrosión
Inhibidor de corrosión migratorio de superficie basado en aminocarboxilatos	Se aplica en spray, rodillo o brocha sobre las superficies de hormigón. 3,68 m <sup>2</sup> /l para aplicaciones normales.	Se reduce la corrosión en un 72%, comparado con la muestra sin tratamiento, y mejora el comportamiento de los inhibidores migratorios basados en aminoalcoholes (Figura 37).
Inhibidor de corrosión migratorio (líquido incoloro de baja viscosidad) a base de silano e inhibidores de corrosión organofuncionales.	Brocha o rodillo en superficies pequeñas y con pistola a baja presión (no pulverización) u otros medios en superficies de gran extensión. Se debe aplicar aproximadamente 0,6 Kg/m <sup>2</sup> en dos o tres capas, según aplicación.	Reduce la velocidad de corrosión de las armaduras, tanto por carbonatación como por cloruros, aumenta la resistividad del hormigón que recubre la armadura, y a nivel molecular, reduce la corrosión macrocelular (barra a barra) y la microcelular (en la misma barra).
Inhibidor de corrosión activo basado en componentes orgánicos.	La dosificación es de ~ 0.50 kg / m <sup>2</sup> (~ 480 ml/m <sup>2</sup> ). Normalmente, se necesitan de 2 a 3 capas para lograr el consumo requerido.	Penetra a través del hormigón, por mecanismos de difusión en fase líquida y vapor, alcanzando 25 a 40 mm de profundidad en 1 a 2 meses.  Forma una capa protectora monomolecular en la superficie del acero, retrasando el inicio de la corrosión y reduciendo la velocidad de avance.

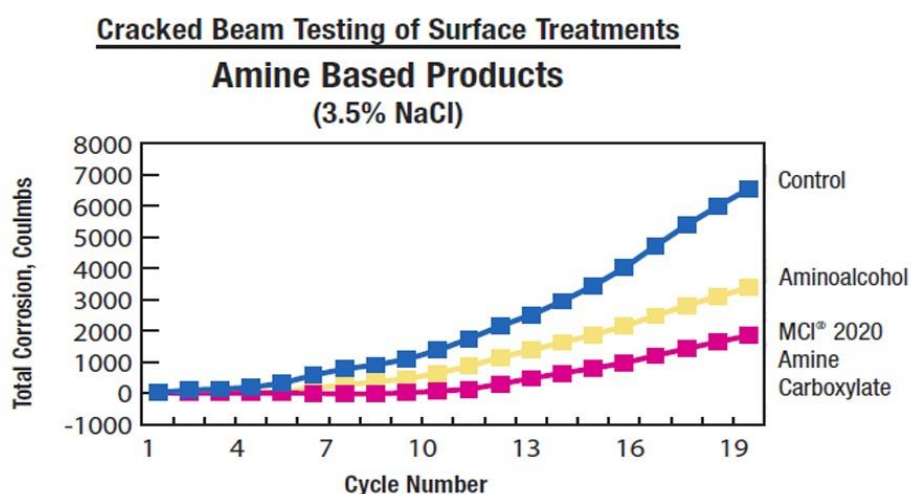


Figura 37. Efectividad del inhibidor de corrosión. [76]

### 3.6. APLICACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS REALES.

Se recoge, a continuación, la información más significativa sobre inhibidores de corrosión.

#### 3.6.1. EDIFICIO ESTEL. BARCELONA (2018) [79]

Dentro de las labores de cambio de uso del Edificio Estel se procedió a la protección de la estructura de hormigón mediante el empleo de inhibidores migratorios de corrosión.

La intervención consistió en la protección de la estructura frente al ambiente marino de Barcelona mediante la aplicación en pilares y losa de los forjados, en todas las plantas, de un sellador de superficie que utiliza una mezcla de silicatos reactivos, agentes activadores de superficie e inhibidores de corrosión migratorios para proteger al hormigón armado frente a la corrosión.

Según la información aportada por el fabricante del producto aplicado, la capa de protección colocada alcanza y se adhiere a la superficie de las armaduras, proporcionando una protección frente a la corrosión mucho más efectiva que la proporcionada por la capa de pasivado del acero en pH alcalino. También aumenta, en más del doble, el umbral de cloruros necesario para que la corrosión se inicie, además de reducirse la velocidad de corrosión de las armaduras una vez iniciado el proceso.



Figura 38. Aplicación de inhibidor de corrosión en superficie. [79]

#### 3.6.2. PABELLONES B Y C DEL MERCADO DE MERCABARNA (BARCELONA, 2018), TABLERO DE PUENTE FERROVIARIO EN PRAVIA (ASTURIAS, 2015), PUERTO DE ALGECIRAS (2020) [80]

Se realiza la evaluación de un agente inhibidor de corrosión aplicado en superficie sobre tres estructuras de hormigón para reducir la velocidad del proceso de corrosión ya iniciado, frenando así dicha patología. El compuesto, según declara el fabricante, penetra en el hormigón y protege al acero de la corrosión mediante un proceso de adsorción de la parte mineral en la superficie del armado.



Figura 39. Aplicación del inhibidor en el tablero del puente de Pravia. [80]

Para el estudio de las naves en Barcelona, se realizaron medidas electroquímicas antes de aplicar el producto inhibidor, tomadas 4 meses después de aplicar el producto, justo antes de colocar una pintura anticarbonatación. Finalmente, se tomaron valores de seguimiento a los 3 años. A continuación, se representan las medidas de intensidad de corrosión obtenidas.

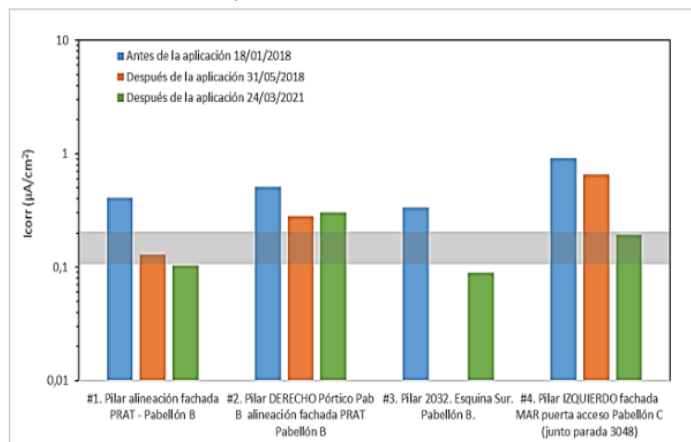


Figura 40. Medidas de Intensidad de Corrosión a diferentes edades. Naves de Barcelona. [80]

La grafica muestra que la corrosión existente debida a la presencia de iones cloruros ha disminuido de manera importante hasta situarse en un rango de corrosión baja o despreciable.

En el caso del estudio del tablero de un puente, se realizaron medidas electroquímicas antes de actuar sobre el puente, así como 2 años y medio después.

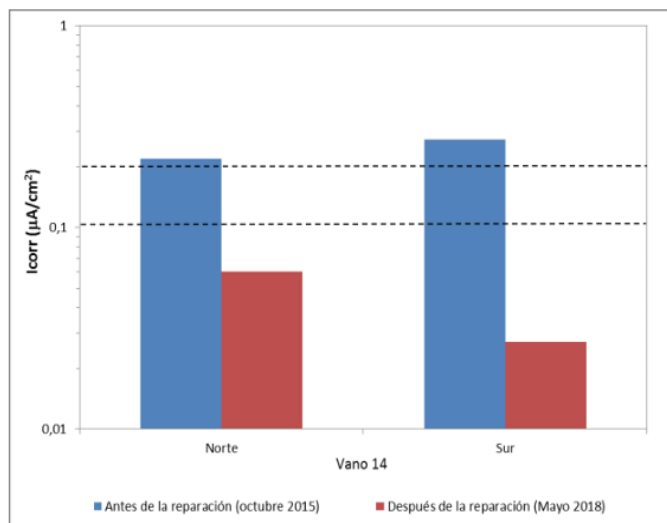


Figura 41. Medidas de Intensidad de Corrosión a diferentes edades. Tablero de puente. [80]

Como puede observarse en la Figura 40, las velocidades de corrosión tras el tratamiento son menores a  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  y, por tanto, se encuentran por debajo del umbral de despasivación.

Además de los casos anteriores, en que el producto se aplicaba en procesos de reparación de estructuras, se recoge el caso del Puerto de Algeciras, en el que este producto se aplicó como medida preventiva en los trabajos de ampliación de la zona portuaria dedicada al movimiento de mercancías [81].



Figura 42. Pieza de hormigón recién fabricada sobre la que se aplica inhibidor de corrosión [81]



Figura 43. Ubicación definitiva de las piezas tratadas [81]

No se disponen de datos de seguimiento de cómo ha funcionado el producto aplicado.

### 3.6.3. FUNDACIÓN JOAN MIRÓ. BARCELONA (2004) [82]

Un agente inhibidor de corrosión es aplicado sobre las superficies de hormigón de la estructura del edificio. En otras estructuras existentes, el fabricante indica que es capaz de frenar el proceso de corrosión de forma rápida y regenera las condiciones de pasividad de la estructura, ralentizando la patología. El compuesto es multifuncional y produce efectos complementarios. Así, por un lado, es una impregnación hidrófuga; esto es, un tratamiento del hormigón destinado a producir una superficie repelente al agua y, por otro, contiene compuestos que penetran hasta la armadura y la protegen. Por otro, si presenta corrosión activa, detiene esta corrosión gracias a la generación de una zona de alta resistividad que impide la progresión de las reacciones de corrosión.

El producto aplicado es una mezcla de alquilsilanos de baja polaridad que, según declara el fabricante, penetran a través de los poros del hormigón hasta alcanzar la armadura, creando una zona de alta resistividad a su alrededor que paraliza las reacciones de corrosión. Estos alquilsilanos están modificados con grupos reactivos que permiten su anclaje definitivo, tanto sobre la matriz de hormigón como sobre el acero y por su naturaleza no hidrosoluble, permiten un efecto anticorrosión prolongado en el tiempo.

Antes de la aplicación del producto inhibidor y durante 14 años después, se realizaron medidas electroquímicas de corrosión in situ. Dos años después de la aplicación del inhibidor, se protegieron los paramentos mediante una pintura acrílica anticarbonatación.

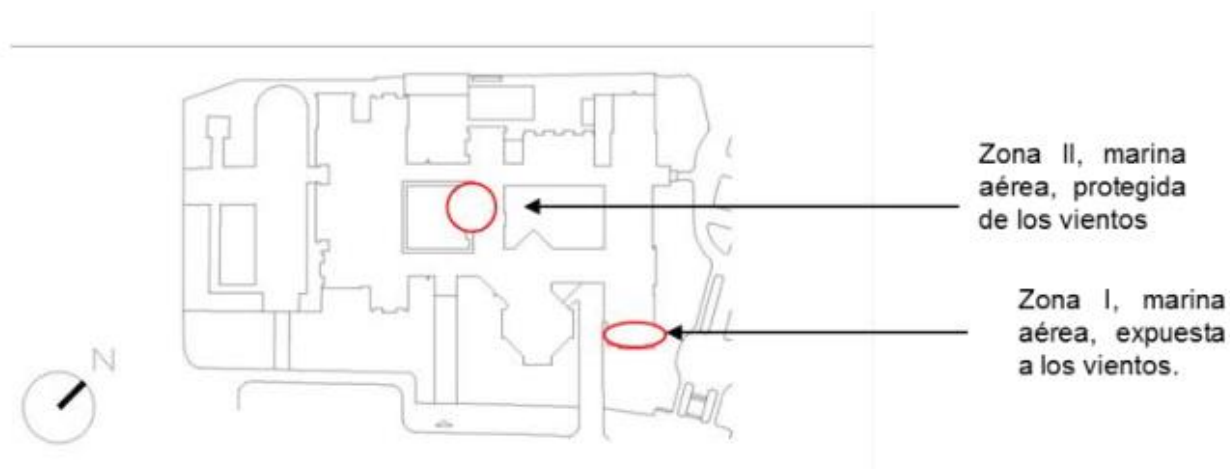


Figura 44. Zonas estudiadas en el edificio Joan Miró. [82]

A continuación, se presentan los valores de velocidad de corrosión registrados en cada una de las zonas evaluadas, antes de la reparación, 7 años y medio después de la reparación, tras 10 años y después de 14 años de la reparación.

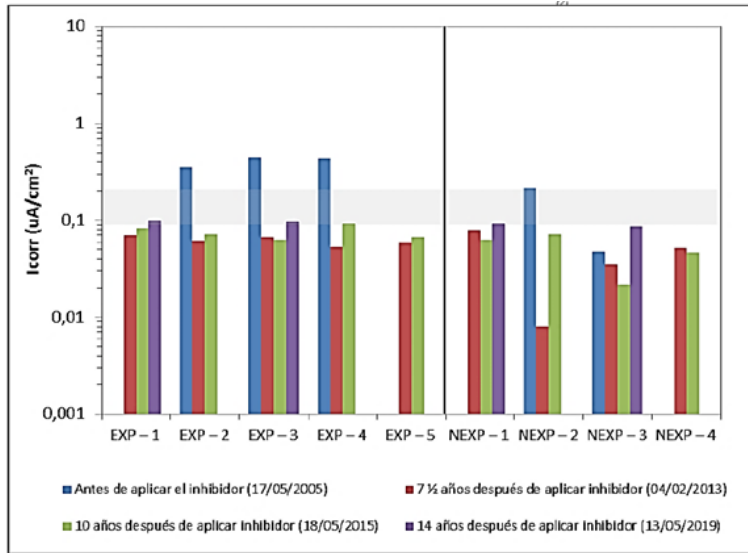


Figura 45. Medidas de Intensidad de Corrosión a diferentes edades. [82]

Como puede observarse en la figura anterior, las velocidades de corrosión tras el tratamiento son menores a  $0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y, por tanto, se encuentran por debajo del umbral de despasivación.

La efectividad del producto evaluado quedó contrastada en una obra que presentaba corrosión de armaduras debida a carbonatación y presencia de cloruros. La corrosión no ha vuelto a aparecer activa después de un periodo de 14 años desde el tratamiento.

Este mismo producto ha sido utilizado en otras estructuras expuestas a los cloruros [83,84]:



Figura 46. Escuela de Pesca de Lanzarote (2020) [84]



Figura 47. Torres de refrigeración de Gas Natural en Sagunto [84]

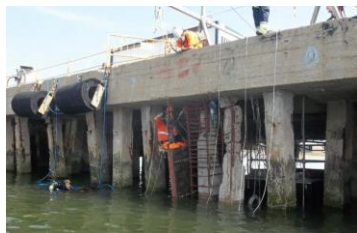


Figura 48. Muelle Ercros en Huelva [84]



Figura 49. Almacén de sales de dehielo. Demarcación de carreteras de Teruel [84]



Figura 50. Lonja de Sanlúcar (2020) [84]



Figura 51. Torresblancas. Alicante (2014) [84]

### 3.7. HORMIGÓN EXPUESTO A SALES DE HIELO-DESHIELO EN LOS ALPES SUIZOS (1997) [85]

Durante 18 años se monitorizan 3 piezas de hormigón llevadas a cabo con  $325 \text{ kg/m}^3$  de cemento CEM I 42,5, relación agua cemento de 0,45 y un aditivo inhibidor de corrosión basado en carboxilato de amina. Las piezas se ubican en los Alpes Suizos.

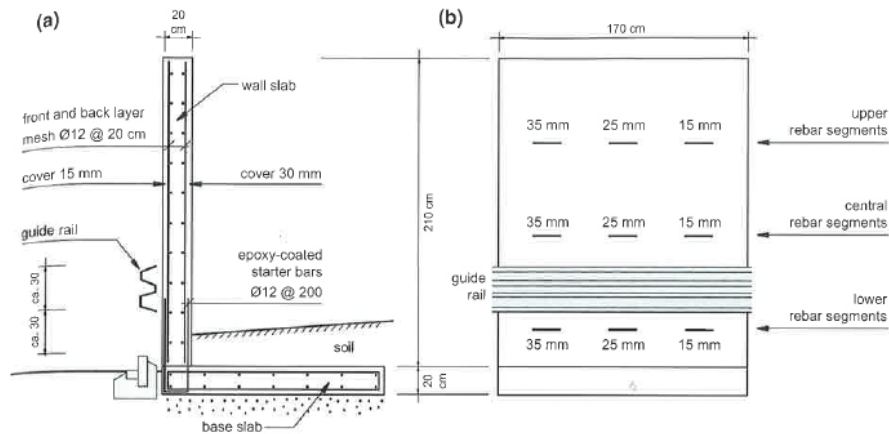
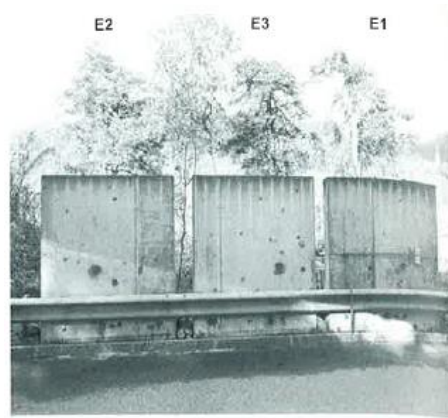


Figura 52. Elementos de hormigón armado expuestos a las salpicaduras de sales de deshielo. [85]

Cada 3 años, se llevaron a cabo medidas eléctricas para monitorizar el proceso de corrosión y tras 18 años, se realizaron catas para descubrir las armaduras y evaluar visualmente su estado.

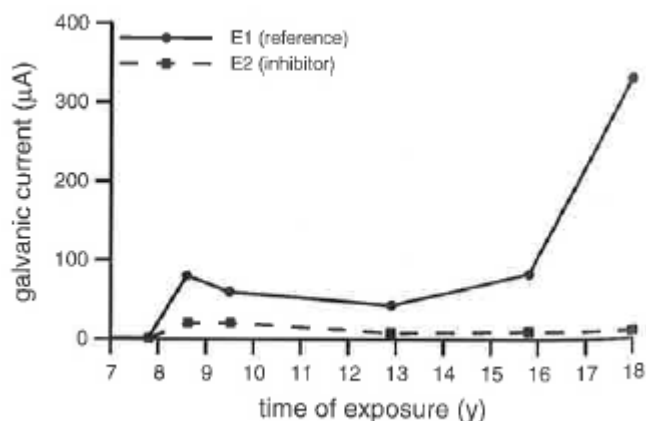


Figura 53. Seguimiento de la intensidad de corrosión durante 18 años [85]

En el hormigón sin inhibidor se inició la corrosión tras 8-9 años de exposición a los cloruros. En cambio, en el caso del empleo de inhibidor, tras 18 años de exposición no se observó corrosión en el hormigón con el inhibidor.

### 3.8. ASPECTOS MÁS RELEVANTES DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

- Los inhibidores de corrosión son un producto químico que, cuando se utiliza como aditivo del hormigón en la concentración adecuada, puede prevenir la corrosión del acero de armado, sin producir efectos adversos en las propiedades del hormigón.
- Los nitritos son los inhibidores que mejores resultados presentan. Son inhibidores anódicos que estabilizan la capa de óxido superficial que pasiva al acero en el hormigón. Este aditivo aumenta el umbral de cloruros para que se inicie la corrosión (alcanzando incluso el 3% en peso de cemento). En estado fresco aumentan ligeramente el aire ocluido y la trabajabilidad. Aunque a corto plazo pueden aumentar la resistencia, a largo plazo el efecto es mínimo. Presentan el gran inconveniente de ser un fuerte bactericida y resultar muy tóxico para organismos acuáticos, por lo que están en desuso. En España han sido sustituidos por completo por los inhibidores orgánicos.
- A partir de los años 90, se desarrollan inhibidores de corrosión orgánicos para evitar los problemas ambientales de los nitritos: aminas, alcanolaminas, caboxilatos y mezclas emulsionadas de esteres, alcoholes y aminas. Son inhibidores mixtos, ya que tienen la capacidad de formar una capa protectora sobre la superficie del acero que cubre completamente la zona catódica y anódica. El más común es el DMEA (dimetil etanol amina). A veces, se acompaña con un éster orgánico, aportando el segundo un efecto hidrófugo al hormigón, aunque además produce una disminución de hasta el 20% de la resistencia. Como los nitritos, aumentan el aire ocluido y la trabajabilidad del hormigón. Aunque el grupo de las aminas es el más testado a largo plazo en hormigón, los carboxilatos también presentan buenos resultados en laboratorio.
- Los inhibidores de corrosión no solo se emplean en forma de aditivo del hormigón que previene los procesos de corrosión. También se utilizan los inhibidores de corrosión migratorios: se trata de un producto químico que se aplica en la superficie del hormigón y que debe traspasar todo el recubrimiento y alcanzar la superficie de las armaduras. Los inhibidores migratorios se utilizan, tanto de forma preventiva al finalizar la construcción de una obra, como en trabajos de reparación. La mayor complejidad en estos inhibidores es evaluar el avance que tienen en el recubrimiento del hormigón, y analizar si son capaces de alcanzar las armaduras en concentración suficiente.
- Los inhibidores migratorios han demostrado baja eficacia cuando el recubrimiento es muy impermeable, la concentración de cloruros en el armado es muy elevada o el recubrimiento está muy saturado de agua o con alto contenido en sales.

- En España existe una norma experimental UNE para ensayar el efecto de los aditivos inhibidores de corrosión en el hormigón. Este ensayo presenta la ventaja de ser un método acelerado, pero el inconveniente de no estar acompañado de criterios estándar para validar el inhibidor. En Estados Unidos, ASTM proporciona un ensayo previo de criba para estudiar el efecto inhibidor de los aditivos, y un ensayo posterior para estudiar el inhibidor sobre hormigón. Este segundo ensayo (ASTM G109) presenta la ventaja de ir acompañado de criterios de aceptación (ASTM C1582), pero el inconveniente de ser un ensayo no acelerado, lo que conlleva periodos de tiempo largos para obtener resultados fiables.
- Todas las casas comerciales ofrecen inhibidores de corrosión como aditivo, y un equivalente migratorio para aplicar en superficie. En España, hoy en día todos los inhibidores comerciales son productos orgánicos. Cuando se dispone de la composición más detallada, suele ser una mezcla de aminas y carboxilatos (éster orgánico).
- Los ejemplos de aplicación recopilados son casos aportados principalmente por las casas comercializadoras de productos migratorios para inhibir la corrosión. Salvo en una estructura portuaria, el resto son estructuras que ya presentan problemas de corrosión. Aunque los ensayos de seguimiento son positivos, los productos aplicados son, no solo inhibidores de corrosión, sino también productos de sellado superficial e hidrófugos. Además, en algunos casos se completa la actuación con una pintura acrílica anti-carbonatación. Aunque la eficacia final de la actuación realizada se ha valorado como positiva en periodos de hasta 14 años, es difícil saber qué efecto tiene el inhibidor y qué efecto aporta el resto de los productos y actuaciones.
- El único trabajo de campo con aditivo de carboxilato de amina en la dosificación de un hormigón expuesto a sales de deshielo, en Suiza, ha mostrado resultados muy positivos tras 18 años de exposición a los cloruros, frente al mismo hormigón sin aditivo, que presentó corrosión a partir de los 8 años.

## 4. CURADO INTERNO DEL HORMIGÓN

La búsqueda de hormigones cada vez más durables y resistentes nos ha llevado a lo que actualmente se denomina Hormigón de Altas Prestaciones (HAP) [86]: con cementos más finos (mayor resistencia inicial), adiciones puzolánicas y dosificaciones con relaciones de agua-cemento bajas. Gracias a ello se reducen significativamente los "diámetros" de los poros capilares en la pasta del hormigón, dando lugar a hormigones menos porosos [87]. Esto se traduce en hormigones más resistentes y de gran durabilidad frente a ambientes agresivos. En contrapartida, se aumentan los efectos de la retracción (más pasta de cemento, relaciones a/c menores y necesidad de curados más prolongados), que se hacen visibles en forma de fisuras y se convierten en puerta de entrada para agentes químicos. Esto nos lleva a prestar especial atención a la hidratación del hormigón, de modo que se pueda reducir la fisuración y obtener un mejor producto. En este capítulo, se pretende recoger los distintos métodos de curado interno del hormigón disponibles en la actualidad, así como las nuevas líneas de investigación abiertas a este respecto, dirigido especialmente a su utilización en ambiente marino.

### 4.1. CONCEPTOS GENERALES Y TERMINOLOGÍA

**La hidratación del cemento** es el proceso por el cual se combinan los silicatos y aluminatos cálcicos del cemento con el agua de amasado, dando lugar a una masa rígida y dura [1]. Durante su puesta en obra, el proceso de hidratación del hormigón empieza en el momento de su amasado y mezcla de componentes con el agua, y se puede prolongar varios días tras su desmoldado. A lo largo de este proceso se producen también cambios dimensionales determinantes para la durabilidad del material [88].

Cuando, además del agua de amasado, incorporamos otras reservas de agua durante el periodo inicial de endurecimiento del hormigón, hablamos del **curado del hormigón** [89]. Este proceso consiste en el aporte de agua para contrarrestar la pérdida de ésta por efectos ambientales como el soleamiento y el viento, o por factores inherentes al proceso de fraguado, como el aumento de temperatura debido a las reacciones químicas de hidratación. Con el curado se pretende mantener el nivel de humedad que permita la máxima combinación posible del cemento con el agua. Ahora bien, cuando este proceso se hace liberando agua desde reservas incluidas en la propia masa del hormigón hablamos de **curado interno del hormigón**.

Para entender la importancia del curado del hormigón, es necesario definir previamente los distintos procesos de retracción que aparecen a lo largo de la vida del hormigón y su terminología. Hay que diferenciar las deformaciones que ocurren durante el fraguado del hormigón y las que ocurren ya en la fase de hormigón endurecido, así como los motivos que las producen [90].

El fenómeno de la retracción en el hormigón se puede manifestar de cuatro formas diferentes (Tabla 22). En todas ellas se producen tensiones en el hormigón que pueden derivar en fisuras, las cuales suponen una puerta de entrada de agentes químicos peligrosos para la estabilidad de hormigón y/o sus armaduras. Además, cuando la retracción se produce durante el periodo de hidratación del cemento, puede suponer una mayor permeabilidad y porosidad del hormigón, así como reducción de la resistencia del hormigón, tanto a compresión como a flexión. Todo ello supone una reducción de la durabilidad del elemento dañado.

Tabla 22. Tipos de retracción e influencia del curado en cada una de ellas.

Tipo de Retracción	Proceso	Efectos	Etapa
Plástica [1]	Se manifiesta mientras la masa está <b>en estado plástico</b> , antes de finalizar el fraguado, debido a una rápida evaporación del agua superficial. Intervienen acción del viento y altas temperaturas.	Se produce una desecación de las capas superficiales, lo que genera mayor porosidad, y puede finalizar en fisuración de afogado.	Fase de curado
Autógena* [88]	Las reacciones químicas que se producen <b>durante el fraguado</b> producen la pérdida de agua de los poros capilares durante la hidratación de la masa cementicia (autodesecación). Esto, junto a la variación de volumen tras el fraguado, produce retracción. Sucede los primeros días después del amasado y se acentúa con bajas relaciones de agua/cemento.	Se producen tensiones capilares internas que van haciendo más frágil el material, llegando a su fisuración.	
por Secado [1]	Aparece <b>una vez endurecida la masa</b> , debido al gradiente de humedad entre la masa de hormigón y las acciones de agentes atmosféricos y efectos térmicos	Se producen tensiones entre la zona exterior que pierde humedad y la parte interior que conserva una humedad mayor, lo que genera tensiones que llegan a producir la fisuración del hormigón.	Fase Post-curado
por Carbonatación [1]	Debido a la reacción química del CO <sub>2</sub> atmosférico, el cemento endurecido y de la presencia de agua se produce la descomposición de determinados componentes del cemento que ven reducido su volumen.	Con la reducción del tamaño de determinados componentes se generan tensiones, fisuras y la porosidad de la masa expuesta al ambiente.	
* En ciertos casos se menciona la retracción química como otro tipo de retracción adicional. En realidad, la retracción química quedaría englobada en la retracción autógena, ya que el volumen resultante de las reacciones químicas de hidratación del cemento resulta en un producto cuyo volumen es menor que el de los componentes por separado			

Durante la fase de curado, la retracción plástica es un fenómeno superficial que produce pérdida de las propiedades del hormigón allí donde es más importante para evitar procesos como la corrosión de las armaduras, en el recubrimiento de hormigón que separa a las armaduras del ambiente exterior agresivo. A esta retracción superficial se sumaría la retracción autógena, que se daría en toda la masa cementante, y que es propia de muy bajas relaciones a/c y alto contenido de cemento.

El proceso de curado del hormigón está destinado a minimizar estos procesos de retracción, garantizando así que el hormigón colocado en obra no pierda propiedades por el hecho de perder parte del agua de amasado por las condiciones ambientales a que está expuesto durante su endurecimiento.

En el caso del curado interno su efecto será muy significativo en lo que se refiere a la retracción autógena. La Figura 54 representa los cambios que se producen, en un entorno sellado, con la hidratación del cemento. C representa la masa de cemento, W la masa de agua, Hy es el volumen de productos hidratados y V el volumen de huecos generados a través de la retracción química. En la figura se observa como la retracción autógena es la manifestación externa de la retracción química, la cual se manifiesta internamente mediante la creación de huecos.

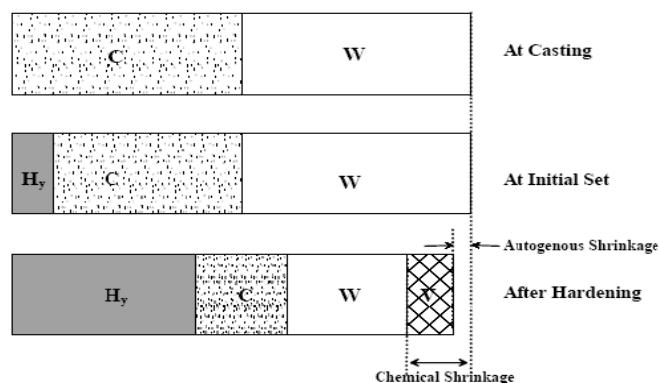


Figura 54. Representación de retracción química y autógena durante la hidratación del cemento. [1]

#### 4.1.1. DEFINICIÓN DE CURADO DEL HORMIGÓN

Una vez definidas las retracciones que sufre el hormigón, se exponen las definiciones de **curado del hormigón** halladas en diversas fuentes. En resumen, es un proceso para mantener la humedad relativa de la mezcla en su grado óptimo e “impedir la pérdida por evaporación de agua y controlar la temperatura durante el proceso inicial de hidratación de los componentes activos del cemento” [1], con todo ello seremos capaces de reducir significativamente los efectos de la retracción y mejorar la durabilidad.

De acuerdo con la **ISO 15673:2016**, “curado es el proceso que consiste en mantener el hormigón húmedo durante un período de tiempo, generalmente de varios días, a partir del momento en que se vierte, con el fin de que el cemento reciba suficiente agua para endurecerse y alcanzar la resistencia prevista. Un curado adecuado reducirá en gran medida la contracción, aumentará la resistencia del hormigón y debería reducir la fisuración de la superficie. El tiempo de curado dependerá de la temperatura y la humedad relativa del aire circundante, la cantidad de viento, la exposición directa a la luz solar, el tipo de mezcla de hormigón empleada y otros factores.”

El **Código Estructural**, en su artículo “52.5 Curado del hormigón”, le da una importancia decisiva al mismo y lo incorpora como parte del proceso constructivo, “vertido, compactación y curado” incluida en toda puesta en obra, pero, al igual que la ISO 15673, se refiere únicamente al curado externo del mismo, una vez desencofrado. No hace ninguna mención al curado interno del hormigón ni a la influencia que éste pueda tener en las propiedades físicas o en la durabilidad. Únicamente se hace una mención en lo referente al curado interno mediante aditivos en el Anejo 9, Recomendaciones para la Utilización de Hormigón Proyecto Estructural: “En el hormigón proyectado, aparte de los métodos de curado habituales, podrán utilizarse aditivos de curado interno”, pero sin entrar ni a definirlos ni a explicar su funcionamiento. Y en cuanto al Anejo 8, de áridos ligeros, no se menciona la posibilidad de usarlos como reservas internas de agua para el curado, ni su repercusión en las características del producto final.

El **American Concrete Institute (ACI)**, a través del ACI Committee 308 [91], en cambio, sí estableció desde 2010, el curado interno como “el aporte de agua a través de la inclusión, en la pasta de hormigón fresco, de reservas de agua mediante áridos ligeros previamente humedecidos, los cuales irán liberando agua según las necesidades de hidratación o repondrán la humedad perdida por evaporación o auto-secado” [92]. Posteriormente, en 2013, se modifica dicha definición definiendo el curado interno como el “proceso por el cual la hidratación del cemento continúa debido a la disponibilidad de agua interna que no forma parte del agua de mezclado” [93]

De este modo ha dejado de referirse exclusivamente a los áridos ligeros ya que, aun siendo un método probado, económico y eficiente para este propósito, no podía dejar fuera de dicha definición opciones igualmente eficientes como son los polímeros superabsorbentes y otros materiales por venir.

#### 4.1.2. MÉTODOS DE CURADO DEL HORMIGÓN

Entre todas las posibles formas de curado, se encuentran los siguientes métodos [90,91], de los cuales se escogerá el que mejor se adapte a las condiciones ambientales y a la extensión de hormigón a curar.

##### 1. Curado superficial

###### 1.1. Con agua

- encharcamiento
- aspersión o nebulizado

###### 1.2. Con vapor

- a presión normal
- a alta presión

###### 1.3. Con recubrimientos

- materiales humedecidos (textiles, arena, paja)



Fotografía 20. Curado superficial con agua por aspersión (<https://shutterstock.com>)

##### 2. Curado interno

###### 2.1. Áridos ligeros

###### 2.2. Polímeros superabsorbentes

###### 2.3. Productos derivados de la madera

###### 2.4. Aditivos reductores de la retracción (polietilenglicol) [94]

###### 2.5. Otros Productos (derivados del arroz, etc.)



Fotografía 21. Árido ligero de arcilla expandida. (<https://www.arlita.es>)



Fotografía 22. Polímeros superabsorbentes. (<https://www.sapgel.com>)



Fotografía 23. Fibras de celulosa. (<https://inforceglobal.com>)

##### Curado mediante sellado

###### 2.6. Membrana impermeable

###### 2.7. Compuestos impermeables de sellado (filmógeno).

### 4.1.3. CURADO INTERNO EN HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

Dentro de las características principales de los hormigones de altas prestaciones está la baja relación agua-cemento. Esto repercute en que hay que asegurar la correcta hidratación para reducir la porosidad y evitar la fisuración por retracción de los elementos construidos. Está demostrado que a bajas relaciones de agua cemento, se produce una mayor retracción autógena y por lo tanto, un riesgo de fisuración a corto y medio plazo. Una manera probada de reducir dicho riesgo es mediante el curado interno [95,96]. Éste se realiza mediante el aporte de elementos que sirvan de reservas de agua y que aseguren una hidratación del cemento reduciendo la aparición de fisuras y coqueas.

#### 4.1.3.1. Principio de funcionamiento

Las superficies expuestas al ambiente exterior sufren la evaporación del agua superficial por acción de reacciones exotérmicas iniciales y por las condiciones atmosféricas, como el viento y el soleamiento, de ahí que se le dé especial importancia al aporte de agua sobre la superficie expuesta, por lo que el curado con aporte de agua exterior es la solución mayormente adoptada. Con ello, se repone el agua que se pierde, evitando la desecación de la superficie y su consiguiente aumento de porosidad, permeabilidad y fracturación. Este sistema facilita la hidratación exterior, pero el alcance se reduce a la zona más superficial [97], tal como se observa en la Figura 1. A partir de ahí, es necesario llevar a cabo el curado interno: mejorar la hidratación de la pasta de cemento mediante aporte de reservas de agua que, sin generar perjuicio en la porosidad, resistencia y trabajabilidad, mejoren la durabilidad del hormigón.

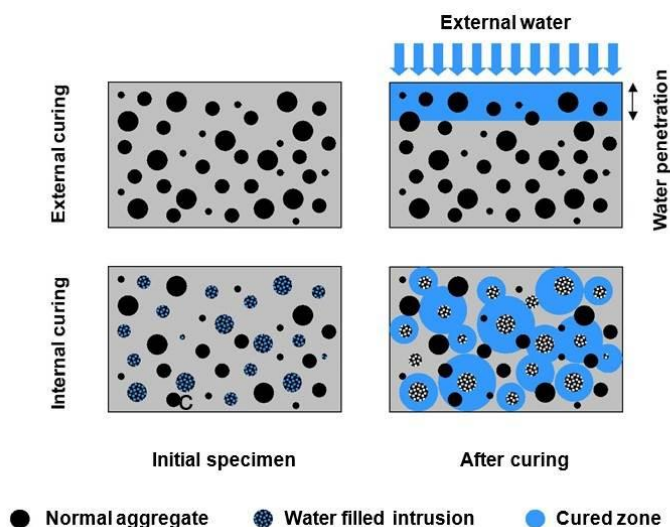


Figura 55. Comparación entre curado externo y curado interno [91]

Actualmente existen diversas vías para la realización del curado interno del hormigón. A continuación, se ordenan de mayor a menor, en función del grado de desarrollo de la tecnología:

- Áridos ligeros
- Polímeros superabsorbentes
- Productos derivados de la madera
- Aditivos reductores de la retracción (polietilenglicol)
- Otros Productos (derivados del arroz, cáscara y cenizas)

## 4.2. ÁRIDOS LIGEROS PARA EL CURADO INTERNO DEL HORMIGÓN

El origen de los áridos ligeros en la tecnología actual del hormigón está en Stephen J. Hayde [98], fabricante de ladrillos en EE.UU., que observó cómo el material situado en los hornos más cerca de los quemadores se hinchaba y adquiría una estructura porosa y aligerante permitiéndole incluso flotar en el agua. Con esos materiales de desecho fue investigando posibles usos hasta que empezó a machacarlo y añadirlo al hormigón, obteniendo así un hormigón de menor densidad. Posteriormente, desarrollaría un horno rotatorio para obtener un material esférico y homogéneo. En 1918 registró una patente para un proceso de cocción de arcilla, pizarra y esquisto, a 1220 °C. De este modo, pudo comercializarlo y emplearlo como árido ligero para el hormigón. Tal fue el efecto aligerante que se llevó a cabo la construcción de barcos de hormigón, de resistencia 28MPa, una densidad de 1697 kg/m<sup>3</sup> y muy poca permeabilidad, consecuencia del efecto por curado interno.

### 4.2.1. CARACTERIZACIÓN Y NORMATIVA REGULADORA

Los áridos ligeros pueden ser de origen natural, como la piedra pómez y la vermiculita, u obtenida mediante procesos artificiales, como la perlita y la arcilla. (Código Estructural, Anexo 8) [7]. En todos los casos, la característica más destacable de los áridos ligeros es su densidad aparente, entre los 200 y los 1.900 kg/m<sup>3</sup>.

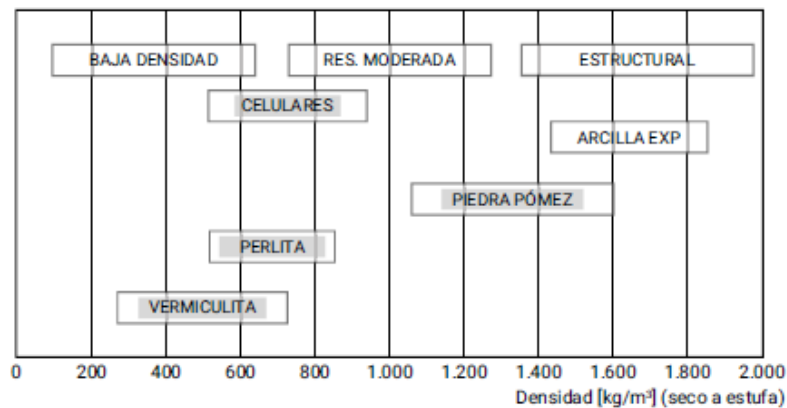


Figura 56. Densidades de los distintos tipos de áridos ligeros [7]

Por una parte, tenemos un material menos resistente que los áridos de densidad normal, lo cual repercute en su resistencia a compresión, resistencia al machaqueo y al desgaste por abrasión. Por otro lado, la alta absorción de estos áridos, que son más porosos, influye en un mejor comportamiento frente al deterioro por heladas y actúa como reserva de agua, que se irá liberando en función de las necesidades de hidratación del cemento, ayudando al curado interno del material. Esta última característica proporciona hormigones con menor fisuración por retracción, mejor hidratación de la masa de cemento y mayor protección frente a los ataques químicos externos, dificultando la difusión de cloruros y la carbonatación, proporcionando una mejora generalizada de la durabilidad del hormigón [99].

Estas dos facetas, menor resistencia y gran porosidad, habrá que tenerlas en cuenta a la hora de incorporar estos áridos ligeros a la masa del hormigón. El objetivo es conseguir las ventajas que proporciona la mayor porosidad del árido sin penalizar resistencia.

Los áridos ligeros deben tener marcado CE y estar conformes a la norma UNE-EN 13055-1:2003 [100], que describe sus requisitos físicos y químicos. Estos áridos no presentan antecedentes de reacción álcali-sílice, por lo que no necesitan su evaluación. La principal particularidad de estos áridos, debido a su baja densidad, es que la granulometría no deberá calcularse en peso, sino en volumen (Anejo D, informativo, de la citada norma). Debido a sus características no deberán aplicarse las limitaciones por

valores de absorción ni tampoco ensayar según la norma de desgaste de Los Ángeles para áridos gruesos o la limitación de friabilidad del árido fino, utilizando cuando sea necesario la determinación de la resistencia al machaqueo del Anejo A (normativo) de la norma UNE-EN 13055-1.

#### 4.2.2. DOSIFICACIÓN

El Código Estructural (CE) define el hormigón ligero (HL) como aquel cuya densidad aparente, medida en condición de seco hasta peso constante, se sitúa entre los 2.000 kg/m<sup>3</sup> y 1.200 kg/m<sup>3</sup> y que contiene una cierta proporción de árido ligero, excluyendo los hormigones celulares.

Conforme al CE, para una correcta fabricación y asegurar la durabilidad de hormigones con áridos ligeros es suficiente cumplir con las clases resistentes recogidas en el apartado 43.2.1, que establece los requisitos mínimos de dosificación del hormigón en función de la clase de exposición y, con ello, los requisitos de contenido mínimo de cemento y resistencia característica. En cuanto a puesta en obra se establece que los recubrimientos de armaduras se incrementarán 5 mm sobre lo indicado en el artículo 44 del C.E.

El ANEJO 8 del C.E. especifica que “la determinación precisa de la relación agua/cemento no es directa, dado que los áridos ligeros se presaturan parcialmente de agua y son capaces de una absorción adicional, por este motivo se sustituye la limitación a la relación agua/cemento por clase resistente”. En conclusión, “se establecen los ensayos previos como método de validación de la dosificación y del procedimiento de ejecución, como proceso único e indivisible”.

El cálculo de la dosificación para los hormigones ligeros viene con la dificultad añadida de calcular la cantidad de árido ligero necesaria para obtener el curado completo sin merma de resistencia y porosidad. A este respecto, Bentz y Snyder, 1999, establecieron una ecuación para el cálculo del volumen de árido ligero necesario [101] y en 2005 se estableció el método de dosificación [102].

$$C_f * CS * \alpha_{max} = S * \Phi_{LWA} * M_{LWA}$$

$$M_{LWA} = (C_f * CS * \alpha_{max}) / (S * \Phi_{LWA}).$$

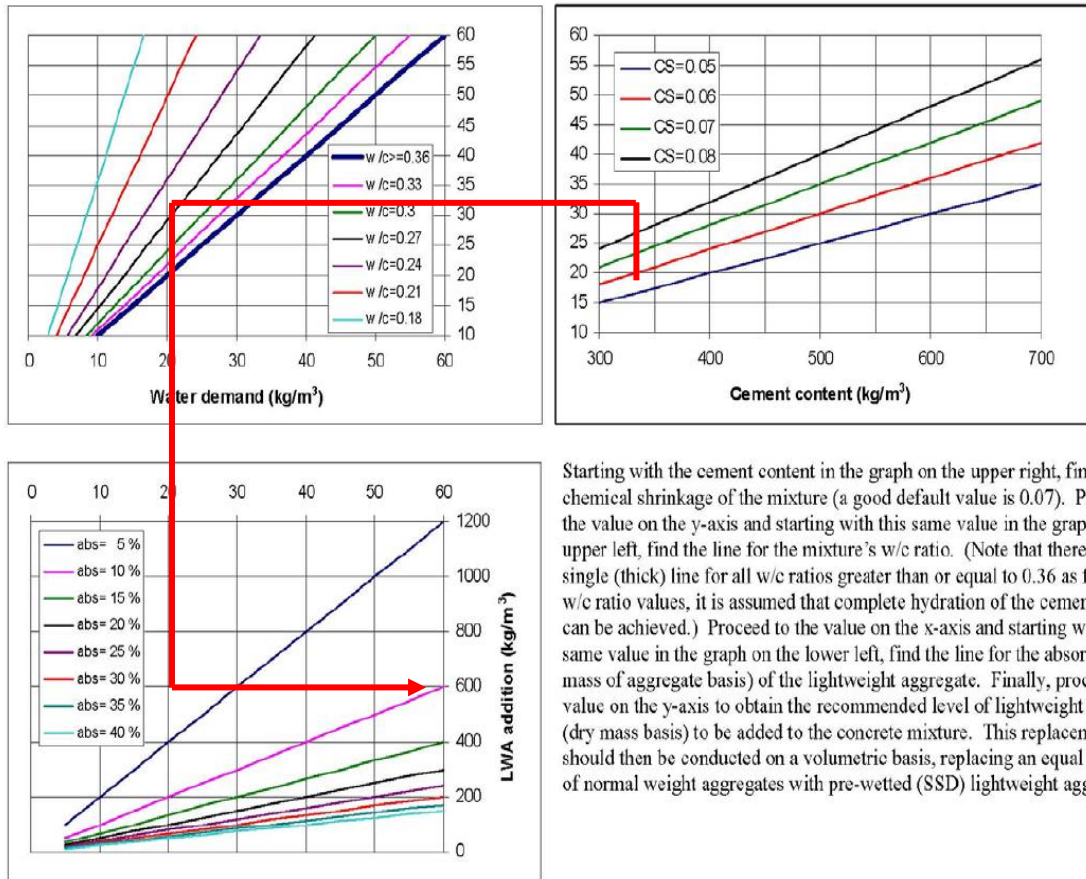
Figura 57. Fórmula de cálculo de sustitución por volumen de árido normal por árido ligero.

En dicha ecuación es necesario conocer cinco datos:

- $C_f$ : contenido de cemento de la mezcla
- $CS$ : retracción química del cemento (para estimación tomar 0,07g H<sub>2</sub>O/g cemento [93])
- $\alpha_{max}$ : grado máximo de hidratación esperado del árido ligero
- $S$ : capacidad de absorción de agua del árido ligero (el valor de absorción de 24 h)
- $\Phi_{LWA}$ : grado de saturación esperado del árido ligero expresado en función del valor de absorción tomado.

ACI ha redactado, a través de dos comisiones, una guía de referencia para el hormigón con curado interno, ACI 308-213R [93], donde incluye dosificación, mezcla, transporte, colocación, curado y acabado. Este documento, aunque incide en que es necesario llevar a cabo ensayos previos para ajustar la dosificación, aporta una solución gráfica a las ecuaciones anteriores para estimar el porcentaje de sustitución necesario para garantizar el curado interno del hormigón (Figura 58), conociendo previamente el contenido de cemento, la relación a/c y la absorción del árido ligero.

**MIXTURE PROPORTIONING WITH INTERNAL CURING**



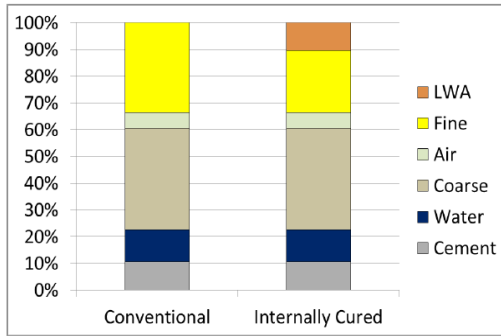
Starting with the cement content in the graph on the upper right, find the chemical shrinkage of the mixture (a good default value is 0.07). Proceed to the value on the y-axis and starting with this same value in the graph on the upper left, find the line for the mixture's w/c ratio. (Note that there is a single (thick) line for all w/c ratios greater than or equal to 0.36 as for these w/c ratio values, it is assumed that complete hydration of the cement powder can be achieved.) Proceed to the value on the x-axis and starting with this same value in the graph on the lower left, find the line for the absorption (dry mass of aggregate basis) of the lightweight aggregate. Finally, proceed to the value on the y-axis to obtain the recommended level of lightweight aggregate (dry mass basis) to be added to the concrete mixture. This replacement should then be conducted on a volumetric basis, replacing an equal volume of normal weight aggregates with pre-wetted (SSD) lightweight aggregates.

Figura 58. Estimación del porcentaje de sustitución necesario para realizar hormigón con curado interno [93]. Ejemplo de un hormigón con un contenido de 350kg/m<sup>3</sup> de cemento, relación w/c=0,33 y absorción del árido del 15%.

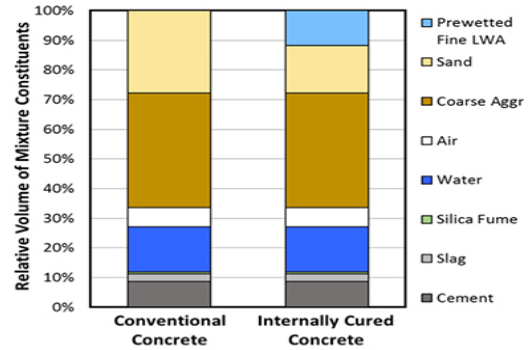
Con todo ello obtenemos el volumen de árido ligero necesario para sustituir en volumen al árido normal ( $M_{LWA}$ ). El parámetro fundamental del árido que determinará su contenido es su absorción: un árido con un 10% de capacidad de absorción tendrá que triplicar el volumen de uno con un 30% de absorción para igualar la cantidad de agua de curado requerida.

Una vez sabemos cómo calcular el árido necesario en volumen, queda ver qué fracción del árido nos interesa sustituir, si la fracción gruesa, la fina, o ambas. Habrá que definir qué fracción sustituir en base al tipo de obra, requisitos de proyecto, necesidad de mayor o menor distribución del árido.

En la Figura 59 se presentan dos ejemplos de sustitución de parte del árido normal fino por árido ligero fino.



Muestra de dosificación de hormigón con áridos ligeros previamente humedecidos [103]



Muestra de dosificación con humo de sílice, escorias y áridos ligeros previamente humedecidos [104]

Figura 59. Diferencia de dosificaciones comparando un hormigón convencional y otro con presencia de áridos ligeros.

A continuación, se muestran dosificaciones realizadas con árido ligero, para estructuras ubicadas en ambiente marino. Tal como se observa en la tabla, en todas las estructuras se ha completado el material cementante con adiciones puzolánicas: humo de sílice o cenizas volantes (Tabla 23) [105]. En estos casos concretos, se ha utilizado árido grueso ligero, total o parcialmente, y en dos casos, se ha empleado también árido fino ligero, parcial o totalmente.

Tabla 23. Dosificaciones con áridos ligeros en ambiente marino. LCA: árido grueso ligero. NCA: árido grueso estándar. LFA: árido fino ligero; NFA: árido fino estándar.

Project	w/b (%)	Material (kg/m <sup>3</sup> )							HRWR (Liter)
		C	SF	FA <sup>*1</sup>	LCA	NCA	LFA	NFA	
Inclined tower (Norway, 1984)	39	385	15	0	675 (Liapor)	0	0	600	10-12
Lightweight concrete floater (Norway, 1991)	30	430-500	40-80	0	540 (Liapor)	0	150 (Leca)	0	7-10
Snorre tension leg platform (Norway, 1990)	38	400	20	0	620 (Liapor)	0	0	650	5-8
Heidrun tension leg platform (Norway, 1993)	38	420	20	0	580 (Liapor)	0	0	630	5-10
Troll A gravity based platform (Norway, 1993)	36	435	15	0	240 (Leca 800)	460	0	910	5-10
Troll B catenary anchored floater (Norway, 1993)	36	435	15	0	240 (Leca 800)	460	0	910	5-10
Super-concrete island drilling system (Japan, 1984)	28	520	52	0	609 (not specified)	0	0	530	7.28
Floating concrete barge gate (USA, 2011)	30	357	0	89	623 (Stalite)	0	178 (Stalite)	368	0.7

\*1. FA = Fly Ash.

Finalmente, es muy importante resaltar que, aunque se disponga de reservas de agua que servirán para el curado interno, se puede requerir del curado externo para limitar los efectos del secado superficial, sobre todo en ambientes extremos [106] o, en su caso, aplicar barreras que eviten la evaporación superficial.

### 4.2.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS LIGEROS

De cara a un uso efectivo de los áridos ligeros como reservas de agua disponibles, es crucial cuantificar las propiedades de absorción y desorción del material a utilizar [107]. Cuando no existía una norma específica para áridos ligeros, a nivel internacional, se trabajaba con la ASTM C1498-04 [108] para el estudio de la absorción y desorción higroscópica en materiales de construcción, permitiendo tener una referencia de dicha característica en un período de 24 horas (a nivel europeo existe la UNE-EN 15148:2003) [109]. En Europa, también se dispone de la norma UNE-EN 1097-6 [110] para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua, y en el Anexo C se especifica su uso

para áridos ligeros. Con estas normas se puede comparar la absorción de arcillas, esquistos y pizarras usadas en construcción como áridos ligeros tras someterlos a los correspondientes tratamientos expansivos.

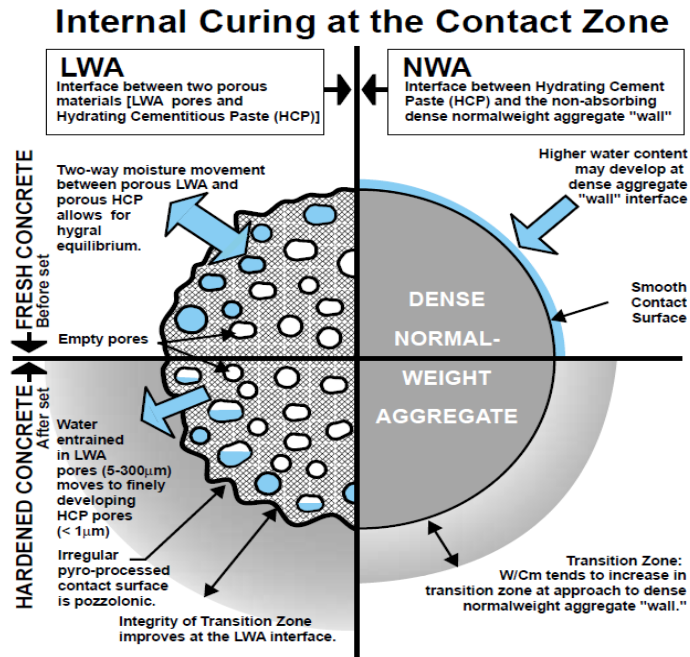


Figura 60. Comparación de características entre árido normal y árido ligero (Vaysburd A (1992) Durability of Lightweight Concrete and its Connections with the Composition of Concrete, Design, and Construction Methods. ACI Special Publication 136:295-31) [111]

En Estados Unidos, la norma ASTM C1761/C1761M “paper towel absorption [112]” estableció un método de cálculo para la absorción y desorción. Esta norma se ha visto posteriormente perfeccionada con el método de centrifugado [113]. Mediante el centrifugado se reduce la duración del ensayo (casi una cuarta parte con respecto a la norma ASTM), es un método más sencillo, mejora la correlación de los datos obtenidos, reduce la desviación de los resultados en más de la mitad con respecto a la norma y es hasta 10 veces más preciso cuando se comparan resultados entre distintos operarios, mejorando la precisión de los datos obtenidos. Por tanto, se recomienda su aplicación para la obtención de la absorción [113,114].

La Tabla 24 incluye los datos de 15 materiales de uso comercial en los EE.UU., comparando sus características con los dos métodos de ensayo.

Tabla 24. Comparativa entre la Norma ASTM C1761/C1761M (towel absorption) [112] y el método centrifugado [113] para el cálculo de la absorción

	LWA name	24 h paper towel absorption, %	24 h centrifuge absorption, %	24 h paper towel desorption, %	24 h centrifuge desorption, %
1	Gravelite (Riverlite LA)	16.0	16.4	90.6	92.4
2	Livlite (Riverlite AL)	30.5	30.0	92.2	97.5
3	TXI (Trinity) Frazier Park	17.7	17.5	88.7	95.2
4	Buildex Marquette	17.5	18.8	91.9	96.2
5	Buildex New Market	14.1	14.9	97.6	98.3
6	Haydite AX	10.0	12.4	96.9	97.5
7	Haydite DiGeronimo	15.6	17.1	95.8	97.3
8	Hydrocure	15.0	17.3	95.1	96.4
9	Norlite	19.1	17.4	95.5	95.7
10	TXI (Trinity) Boulder	17.9	19.0	86.9	89.8
11	TXI (Trinity) Streetman	18.9	20.1	85.3	88.0
12	Utelite	18.5	19.7	86.2	90.6
13	Solite LLC	12.2	16.4	96.0	97.1
14	Stalite	6.0	9.1	96.2	97.5
15	Expanded Slag	9.9	10.5	95.5	92.6

Para el cálculo de la desorción se han realizado estudios que han estimado que la liberación de la humedad retenida en el árido llega al 90% a las 24 horas, incluso en condiciones de humedad superiores a 93% [115]. Otros estudios han llegado a estimar que en el peor de los casos sólo se libera entre el 60 y el 70% de la humedad absorbida [116]. Como conclusión, en los casos más desfavorables se debe incrementar el volumen de áridos ligeros hasta un 30%, en comparación con los que tienen buen comportamiento, para estar seguros de cubrir las necesidades completas de hidratación del cemento.

En lo que respecta al tiempo necesario para liberar el agua y a la distancia recorrida por el agua soltada desde los áridos ligeros, se ha observado que gran parte del agua se libera entre las 12 y las 75 horas tras la mezcla de los componentes y que la distancia recorrida en esta franja de tiempo se ha estimado en no superior a 2 mm, según lo recogido en la Figura 61 [117].

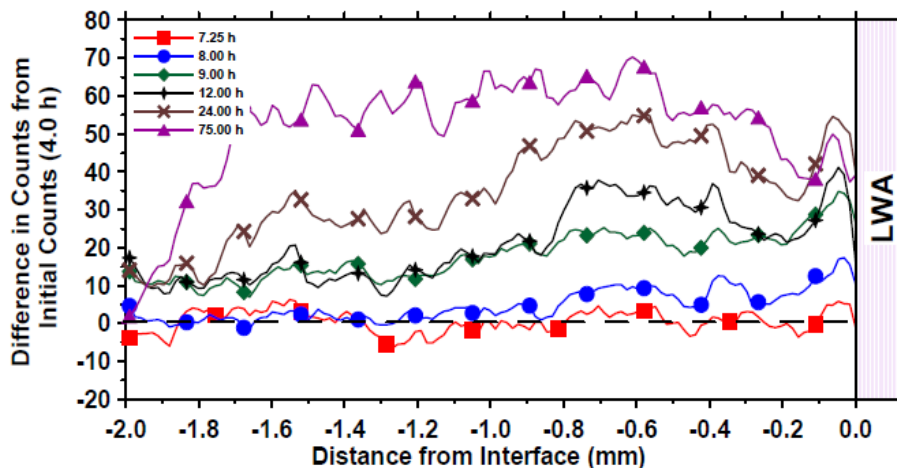


Figura 61. Distancia de alcance del agua desde la superficie del AL a lo largo del tiempo. [117]

#### 4.2.4. EFECTO DE LOS ÁRIDOS LIGEROS EN EL HORMIGÓN

##### 4.2.4.1. Retracción autógena y por secado

El curado interno del hormigón con áridos ligeros tiene como objetivo principal reducir la deformación y retracción autógena. Para medir cómo se reducen estos parámetros se utiliza la norma ASTM C1698 [118], norma destinada a medir las deformaciones que sufre un mortero o una pasta de cemento desde la finalización del fraguado hasta una edad determinada, en condiciones de estanqueidad.

Parece que es necesario superar el 20% de sustitución para tener efectos significativos. Por ejemplo, gracias a ensayos realizados en probetas expuestas a 50% de humedad durante los 27 días siguientes al desmoldado, se pudo observar la disminución de fracturación por secado en las muestras con aportación de árido ligero en su dosificación, obteniendo el mejor comportamiento con un reemplazo del 23,7% en volumen de árido ligero [119]. De igual manera, en los estudios realizados en hormigón de tableros de puente, se observó como la retracción se reduce a partir del 10% de sustitución de áridos normales por áridos ligeros, consiguiendo los mejores resultados a partir de 25% [120].

Ahora bien, en ocasiones, el curado interno del hormigón no consigue eliminar del todo los efectos de la retracción autógena. Las causas que interfieren son [92]:

- Los poros de los áridos ligeros no se saturan completamente de agua.
- Parte del agua de curado interno se ha perdido bien durante la mezcla o la aplicación del hormigón o mortero.
- El árido ligero no ha liberado toda el agua retenida en su interior por mala caracterización del material.
- Pérdida de agua por evaporación o secado.
- Las retracciones por reacción entre materiales puzolánicos e hidróxido de calcio no son resueltas por el agua de curado interno.
- Distribución irregular de los áridos ligeros.
- Confusión entre dilataciones térmicas y retracción autógena.

##### 4.2.4.2. Resistencia a compresión y módulo elástico

Los efectos de los áridos ligeros en la resistencia y el módulo elástico dependen de la dosificación, del tipo de cemento, de las condiciones de curado y de la edad del ensayo.

En hormigones de altas prestaciones los estudios concluyen que, para evitar la pérdida de resistencia mecánica, es necesario no superar la proporción del 10% de sustitución de áridos ligeros [121]. Por encima de dicha cifra, se produce una disminución gradual de la resistencia a compresión. En morteros de cemento portland desde los 7 días se observa una reducción del 25% en la resistencia a compresión para una dosificación del 23,7% de áridos ligeros.

Del mismo modo, se ha probado que la sustitución de 0,11 a 0,19 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de áridos en la fracción entre 9,5 y 2,36 mm por áridos ligeros mejoraba la durabilidad sin afectar a la resistencia. A partir de 0,26m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de sustitución, se hizo apreciable la reducción de la resistencia a compresión [122].

Por otro lado, como se refleja en la Figura 62 [123], en cementos con adiciones (humo de sílice, escorias de altos hornos, y combinación de ambas) y aporte de áridos ligeros para el curado interno, se observa un ligero incremento de la resistencia a compresión a partir de los 8 días y los 28 días en dosificaciones con hasta 14% de sustitución de gravilla por árido ligero. Cuando se alcanza un 16% de sustitución, ya sí se aprecia una reducción de la capacidad resistente debido al árido ligero. Por tanto, en cementos con adiciones, la reducción de la resistencia debido al aporte controlado de áridos ligeros sería menor.

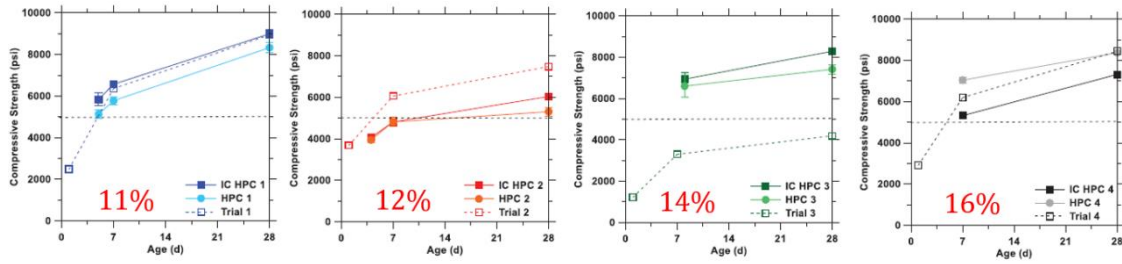


Figura 62. Resultados de resistencia a compresión comparando hormigón sin AL (HPC) y con AL (IC HPC), porcentaje de sustitución en rojo, en casos reales de aplicación sobre losas de puentes. [123]

La siguiente figura muestra cómo también el módulo elástico disminuye por la presencia de AL (Figura 63), lo que deberá ser tenido en cuenta para valorar esfuerzos y deformaciones en las estructuras que los incluyan. Dicha reducción no es siempre negativa ya que resulta beneficioso a la hora de reducir el estrés residual debido a la retracción, y a mejorar la absorción de las deformaciones, incrementando su durabilidad.

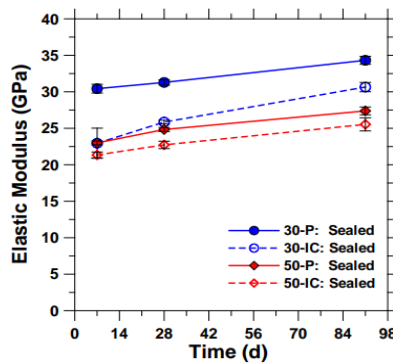


Figura 63. Comparación de módulos elásticos en hormigones (en azul relación w/c de 0,3 y en rojo relación w/c 0,5). Comparando para cada uno de ellos, el hormigón sin AL (P) y con AL (IC). [123]

4.2.4.3. Penetración de cloruros y coeficiente de difusión

Los estudios realizados en el análisis de la penetración de cloruros y coeficientes de difusión en ambiente marino [124] han permitido demostrar que una buena selección del árido ligero, es decir, con una densidad alta y capa exterior íntegra y sin fracturar, proporcionará la misma resistencia a los cloruros que un hormigón con árido convencional. Las Figura 64 y Figura 65 muestran los perfiles de cloruros en ambiente XS2 y XS3, respectivamente. Se observa cómo el hormigón con Stalite (pizarra expandida) iguala y se aproxima a los valores con árido convencional. [124]

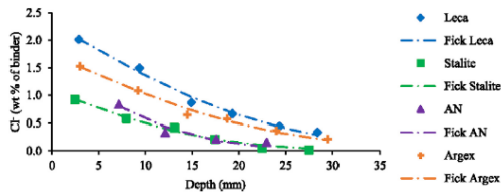


Figura 64. Perfiles de cloruros comparando los de hormigón con áridos convencionales (AN) y otros con AL en ambiente XS2. [124]

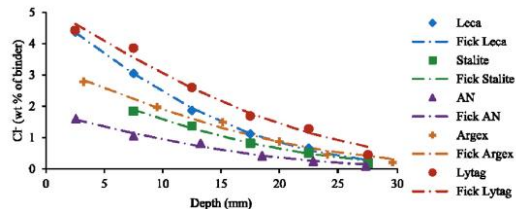


Figura 65. Perfiles de cloruros comparando los de hormigón con áridos convencionales (AN) y otros con AL en ambiente XS3. [124]

4.2.4.4. Rentabilidad económica

La rentabilidad económica del hormigón se hace en base a modelizaciones en las que se incluye la estimación de diversos factores, como son: el diseño inicial, el coste de ejecución de obra, el período de toma de datos, mantenimiento y reparaciones a realizar, y la vida útil estimada. El hecho de

introducir un material previamente humedecido, como los áridos ligeros, a la mezcla hace que el precio del hormigón sea superior al de un hormigón convencional. Partimos de un producto más caro que un hormigón común, por lo que el coste inicial es superior. Sin embargo, al reducir la fisuración superficial se obtiene una mayor durabilidad y esto reduce los costes de mantenimiento y reparación. Los cálculos realizados para pavimentos de carreteras en 2013 [125] estimaron un ahorro al final de los 60 años de vida útil de entre el 0,9% y el 7,6%.

#### 4.2.4.5. Otras ventajas aportadas por los áridos ligeros

Además del curado interno del hormigón, el uso de áridos ligeros proporciona otras ventajas adicionales, que aumentan su utilización en la construcción de puentes y de estructuras marinas, debido a [17]:

#### HORMIGÓN ESTRUCTURAL LIGERO EN PUENTES:

- Menor peso del material
  - El hormigón estructural con árido ligero es entre un 25 y un 30% menos pesado que el convencional
  - Requiere menos armado y pretensado
  - Aumenta la capacidad de carga viva del tablero
  - Permite mayores luces
  - Permite secciones mayores sin aumentar la carga muerta
  - Permite recrecidos sin modificar cimentaciones
  - Reduce las fuerzas sísmicas
- Mayor durabilidad:
  - Presenta baja permeabilidad
  - Alta resistencia a ciclos de hielo deshielo
  - Buena resistencia a las sales de deshielo y a los agentes químicos
  - Se reduce la microfisuración debido a la alta compatibilidad elástica entre los áridos y el mortero, reduciendo las tensiones internas del material
  - Mejor interfase entre pasta y árido
  - Proporciona superficies no pulidas y con mayor resistencia al desgaste, mejorando la seguridad en el rodaje

#### HORMIGÓN EN ESTRUCTURAS MARINAS

Además de la buena durabilidad de hormigón con árido ligero, su menor densidad hace que sean hormigones utilizados cuando es necesario mejorar la flotabilidad de la estructura, como es el caso de instalaciones de perforación, plataformas offshore, muelles flotantes, plataformas flotantes para aerogeneradores, etc.

#### 4.2.5. IMPLEMENTACIÓN EN INFRAESTRUCTURAS

##### 4.2.5.1. Pavimentos en carreteras y puentes

Los áridos ligeros han sido ampliamente utilizados en EE.UU. como solución para el curado interno en la fabricación de pavimentos de hormigón de carreteras.

En 2007, sólo en la región norte del estado de Texas, se contaba con una gran producción de hormigón aligerado para la mejora de su durabilidad [122], superando los 420.000 m<sup>3</sup> en dos años. Desde entonces, distintas Divisiones de Transportes de varios estados de los EE.UU. se han interesado en el estudio de este tipo de hormigones y los han incorporado a sus infraestructuras, ejecutado puentes y carreteras con dichos pavimentos. El estado de Kansas publicó en 2022 [126] trabajos de seguimiento de sus pavimentos con curado interno y destacó la mejora potencial de los áridos ligeros en vista a la durabilidad e incremento de vida útil, estando pendiente de comprobaciones de campo cada cinco años a lo largo de veinte años de vida, para afinar las estimaciones e implementarlas en las modelizaciones futuras. En el estado de Florida, en 2015, se realizaron estudios de deformabilidad de tableros, mejorando dichas características mediante curado interno por áridos ligeros [127]. En el estado de Indiana, se ejecutaron cuatro puentes en 2013 [123] comprobando el buen comportamiento en retracción y durabilidad (Fotografía 24 y Fotografía 25). En el estado de Texas (2013), se ha realizado el seguimiento del comportamiento y la estimación de costes y vida útil tanto en carreteras como en pavimentos de centrales de carga (Fotografía 26) y en viales residenciales [125], obteniendo resultados favorables en términos económicos y de durabilidad. Finalmente, en el estado de Oregón (2013) se llevó a cabo la evaluación de las dosificaciones utilizadas para la ejecución de tableros de puentes, obteniendo resultados favorables [120].

Al menos otros seis estados de los EE.UU. han incluido el curado interno en la ejecución de puentes y pavimentos de hormigón para el transporte de vehículos. [123]



Fotografía 24. Detalle de la ejecución de la losa de hormigón de un puente. El color verde de las armaduras se debe a que están revestidas con resina epoxi. [123]



Fotografía 25. Ubicación de los puentes fabricados en el estado de Indiana en 2013. [123]



Fotografía 26. Estudio de la conservación de plataforma de almacenamiento de cargas (Unin Pacific) construido en 2005 (Dallas, TX, EEUU) tras 8 años de uso [125]

##### 4.2.5.2. Infraestructuras en ambiente marino

El comportamiento del hormigón en ambiente marino se lleva estudiando activamente desde 1930 [128], y en lo que respecta al hormigón con áridos ligeros, desde 1978 [129]. Para la realización de predicciones, a partir de bases a datos reales fiables, es necesario el seguimiento de las obras en ambiente marino mediante zonas de pruebas, donde se exponen probetas al mismo ambiente marino que el hormigón de obra. Este es el caso del puente Hong Kong-Zumai-Macao, Figura 66.



Figura 66. Zona especialmente habilitada para probetas que habrán de ensayarse para comparar con muestras de obra y realizar seguimiento del puente HZM [128]

Para ello, existen campañas de ensayos en campo, como la llevada a cabo en muestras de hormigón con áridos ligeros (con una sustitución de 50% en volumen) en la isla de Treat, en EEUU, junto la frontera con Canadá [129]. Se estudiaron piezas con 12 y 25 años de edad. Las condiciones a las que fueron expuestas corresponden a las de un ambiente XS3, en plena carrera de mareas, y con más de 100 días de exposición al año a periodos de hielo-deshielo. El hormigón de 25 años contenía árido ligero de esquisto expandido, relaciones a/c variables y adiciones de entre 0 y 65% de escorias. El hormigón de 12 años es el empleado para una estructura apoyada en el fondo marino, con relación a/c 0,33, 8,5% de humo de sílice, árido ligero de pizarra expandida y resistencia a compresión de 73,6 MPa. Se pudo verificar que el comportamiento del perfil de penetración de cloruros a la edad de 25 años (Figura 67) era prácticamente idéntico entre un hormigón con y sin áridos ligeros. Las escorias mejoraron notablemente la resistencia a los cloruros.

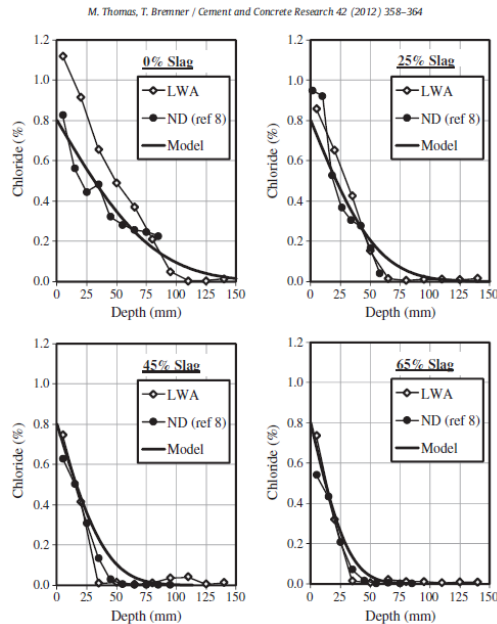


Figura 67. Perfiles de cloruros para una edad de 25 años comparando hormigón convencional (ND) con hormigón aligerado (LWA) con distintas dosificaciones de escorias. [129]

Actualmente, se tienen buenas referencias de obras realizadas en ambiente marino con presencia de áridos ligeros, así como del cumplimiento de las características más exigentes. Aunque se conoce que el uso de áridos ligeros puede reducir la resistencia a compresión a partir de ciertos porcentajes de sustitución, se ha demostrado que ello no impide obtener altas resistencias (Tabla 25) [105].

Tabla 25. Referencias de obras marítimas con presencia de áridos ligeros. Resistencias a compresión, densidades y tipos de áridos ligeros utilizados. [105]

Type	Project (year)	Country	28 days strength (MPa)	28 days density (kg/m <sup>3</sup> )	Product name of LWA	Concrete volume (m <sup>3</sup> )
Offshore and floating structure	Inclined tower (1984)	Norway	71	1915	Liapor 8	-
	Lightweight concrete floater (1991)		43	1570	Liapor K and 7 (with Leca FA)	-
	Snorre tension leg platform (1991)		65	1970	Liapor 8	1100
	Heidrum tension leg platform (1995)		71	1941	Liapor 8	65000
	Troll A gravity based platform (1995)		70-75	2250	Leca 800	66000
	Troll B catenary anchored floater (1995)		70-75	2250	Leca 800	20000
	Multi-purpose unit heavy lifter (2009)		42	1565	Liapor F 6.5	20000
	Hibernia offshore oil platform (1997)	Canada	80	2170	Stalite	66000
	C-Boat 500 concrete barge (1982)	Japan	50	1800	not specified	1000
	Concrete batching plant (1985)		45	1900	not specified	14300
Floating (pontoon) bridge	Bergsøysundet	Norway	55	1900	Liapor 8	4800
	Bridge (1992) with 7 pontoons					
	Nordhordland bridge (1994), cable-stayed with 10 pontoons		55	1900	Liapor 8 (with Leca FA)	8500

En lo que respecta a otras características de durabilidad, un estudio realizado en Taiwan en 2022 para comprobar el comportamiento de hormigón de altas prestaciones con áridos ligeros en plataformas para aerogeneradores en alta mar [130] demostró el excelente comportamiento de la mezcla y el cumplimiento de los requisitos de penetración de cloruros (Figura 68), resistencia a compresión, módulo de elasticidad dinámico, resistividad (Figura 69) y prueba de corrosión acelerada. En este caso, el hormigón estaba compuesto por un cemento Portland con adiciones de humo de sílice y escorias.

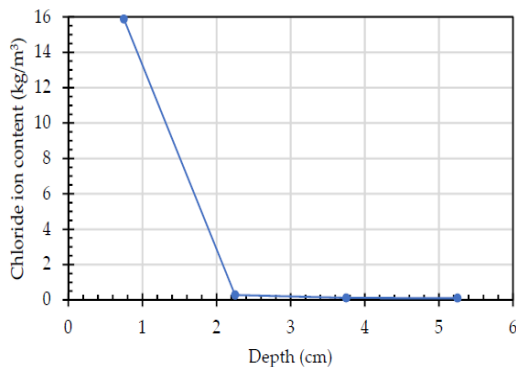


Figura 68. Perfil de cloruros para la muestra L1 con AL a 1 año. [130]

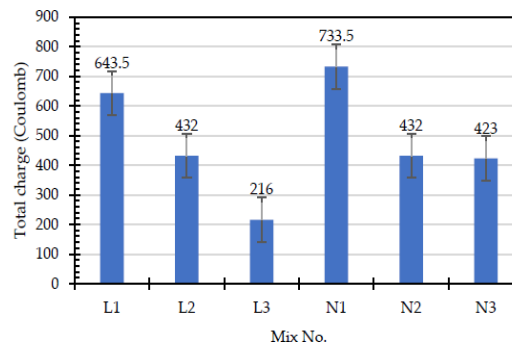
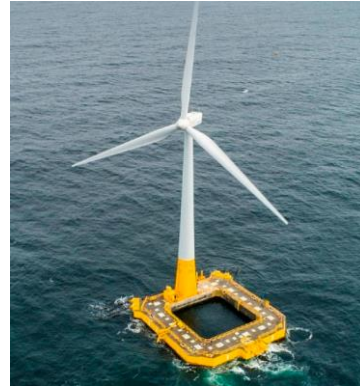


Figura 69. Comparación de resistividad de las distintas mezclas. L, son las que contienen AL; N tienen árido convencional. [130]

En esa misma línea, en 2018, se llevó a cabo la construcción de una plataforma flotante para un aerogenerador en la costa atlántica francesa, proyecto FLOATGEN [131][132] (Fotografía 27 y Fotografía 28). La estructura es de hormigón armado pretensado, con un ancho de 36 m, altura de 9,5 m y el hormigón autocompactante, a base de áridos ligeros, la clasificación C55/67 (altas prestaciones) conforme al Eurocódigo 2, UNE-EN 1992-1-1, y una densidad de 2.000 kg/m<sup>3</sup>.



Fotografía 27. Plataforma de hormigón aligerado en construcción. Proyecto FLOTAGEN. [131][132]



Fotografía 28. Plataforma FLOTAGEN en activo desde 2019. [131][132]

En los estudios comparativos de costes para el proyecto de Ideol [133], se demostró que el uso de hormigón de estas características para la plataforma flotante de un aerogenerador reducía entre 40 y 50% las emisiones de CO<sub>2</sub> y en un 50% los costes de ejecución frente a la misma estructura hecha de acero.

A continuación, se exponen ejemplos de estructuras en ambiente marino atendiendo a su tipología, en las que se han incluido áridos ligeros en su ejecución:

- Puente flotante de Nordhorland [44], Puente de Stolma [44] y Puente Stovset [44]: dosificaciones e imágenes recogidas en el apartado 2.4.2.3 del capítulo de adiciones puzolánicas (Página 51).
- Plataformas de extracción de gas y petróleo Offshore: Plataforma South Arne (1999), Hibernia Offshore platform, Canadá (1997), Plataforma Heidrun (1995) y Plataforma Heidrun (1995) [134]



Fotografía 29. Plataforma South Arne (1999) [135]

- Cajones flotantes y barcos:



Fotografía 30. Tarsiut Island (1981) hecha a base de cajones sumergibles aligerados [136]



Fotografía 31. Barcos de hormigón aligerado (sentido horario desde arriba a la izquierda) Peralta fabricado en 1920, Vidal, Armand Concidere, y Yogn de 1943 [137]

Los ejemplos más recientes de hormigones aligerados para plataformas de extracción offshore siempre van ligados a hormigones con adiciones de probada eficacia a la penetración de cloruros (humo de sílice y cenizas volantes). El porcentaje de sustitución del árido se sitúa entre el 40% y el 60% en volumen. Los hormigones situados en tales ambientes, conforme a la normativa noruega NS 3473, requerirán cumplir la clasificación C65-C75 para hormigones de densidad normal y de LC55 y LC65 para hormigones ligeros. Otras prestaciones que deben alcanzar estos hormigones son una baja permeabilidad y alta estanqueidad al agua. Estos requisitos se obtienen principalmente con bajas relaciones agua/cemento y adiciones puzolánicas [138].

Un testimonio de especial importancia respecto a la durabilidad de dichos hormigones en ambiente marino son los cascos de hormigón armado en barcos de antigüedad entre 50 y 80 años [137], poniéndose de relieve que con la tecnología de entonces se obtuvieron mezclas de hormigón de gran compacidad y reducida carbonatación. Los ensayos se realizaron sobre probetas extraídas de los cascos en ambiente XS1, barcos atracados en el río Powel, EE.UU. La carbonatación ha resultado ser muy baja, entre 1 y 5 mm, y las barras de armado extraídas con las muestras, con un recubrimiento de 25 mm, no han sufrido corrosión.

### 4.3. POLÍMEROS SUPER ABSORBENTES PARA EL CURADO INTERNO DEL HORMIGÓN

Los polímeros super absorbentes (PSA) son un material muy estudiado por su capacidad de retención inicial de agua y posterior liberación durante el curado del hormigón [139]. Es un material polimérico, compuesto generalmente por poliacrilato de sodio, producido mediante la polimerización de hidróxido de sodio y ácido acrílico. Por su estructura en red y capacidad hidrofílica, este material posee capacidad de retener grandes cantidades de agua. Tal es su capacidad de absorber agua destilada, que en peso supone entre 100 y 400 veces el peso del polímero en seco [140]. En el caso práctico de agua potable y en condiciones de hormigonado, la absorción se sitúa entre 12 y 40 gramos de agua por gramo de material seco [141].

En su aplicación a morteros y hormigones se ha comprobado que una vez ha comenzado el fraguado, el polímero irá liberando gradualmente el líquido retenido según las necesidades de hidratación de la pasta de cemento

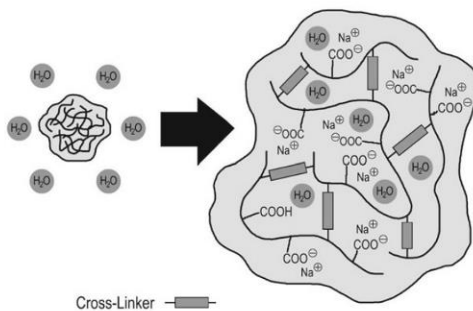


Figura 70 [142]



Fotografía 32(sapgel.com)

Los orígenes de la química de estos polímeros se remontan a principios de 1960, cuando se desarrollan materiales poliméricos por sus capacidades superabsorbentes. La primera publicación en hacer referencia a los PSA como agentes de curado interno en el hormigón se lleva a cabo en 1998, cuando Tsuji et al. [141] valoran la aplicación de estos polímeros en el hormigón. Posteriormente, Jensen y Hansen [143] describieron este material como un nuevo agente de curado interno frente a la retracción autógena producida durante el endurecimiento del cemento [144].

Desde entonces el estudio de PSA se ha centrado en los hormigones de baja relación agua-cemento, en los cuales se acentúa severamente la retracción autógena. Además, el autocurado con PSA se ha probado que genera otros beneficios, como la mejora del comportamiento frente a ciclos de hielo-deshielo, frente a la carbonatación y a la difusión de cloruros.

Visto el gran interés generado, desde RILEM se han creado hasta tres comités técnicos para la caracterización y estudio de distintas aplicaciones de PSA, 196-ICC (2002), 225-SAP (2014) y 260-RSC (2021) [106,145,146] desarrollando y ampliando el conocimiento de este agente de curado.

#### 4.3.1. CINÉTICA DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN LOS POLÍMEROS. TRABAJABILIDAD

La gran capacidad de absorción de agua en los polímeros superabsorbentes es debida a una alta concentración de iones en el polímero, que resultan en una atracción del agua a su interior por ósmosis. Ahora bien, la absorción va a verse directamente afectada por la concentración de iones en el medio acuoso, reduciéndose la efectividad del polímero a mayor concentración de sales disueltas. De igual manera, la temperatura, el tipo de cemento, así como el tipo de superplastificante utilizado influyen también en la capacidad de absorción [147,148], por lo que, previamente, se habrán de probar los efectos que los distintos elementos y las condiciones de fabricación que se vayan a producir tendrán en el comportamiento del aditivo superabsorbente.

Además de las condiciones ambientales, el diámetro de los polímeros, referido generalmente en seco, será otro factor que afecta, tanto a la velocidad de absorción como a la capacidad de retención. Así, mayor diámetro necesitará de más tiempo para alcanzar su total saturación: una hora para diámetros de 500 $\mu\text{m}$  y 1 minuto para menores tamaños cercanos a los 50 $\mu\text{m}$ ; por otro lado, a mayor tamaño, más capacidad de absorción por gramo de material seco: 16ml/g para 500 $\mu\text{m}$  y 11ml/g para 50 $\mu\text{m}$  [149].

En cuanto a la liberación del agua desde los polímeros hacia la pasta cementicia, se ha comprobado que, dependiendo de las condiciones de la pasta y de la temperatura de curado, aproximadamente en un periodo de entre uno y dos días tras el amasado se ha hecho la transferencia total de agua a la masa de cemento. A su vez, se ha observado que la difusión del agua del polímero al cemento es similar a la de los áridos ligeros con la pasta de cemento [150], en algún caso algo menor [151], produciéndose de manera homogénea en el entorno más cercano a los agentes de curado, para ser posteriormente redistribuida a zonas más lejanas (Figura 71) en función de las necesidades de hidratación [152].

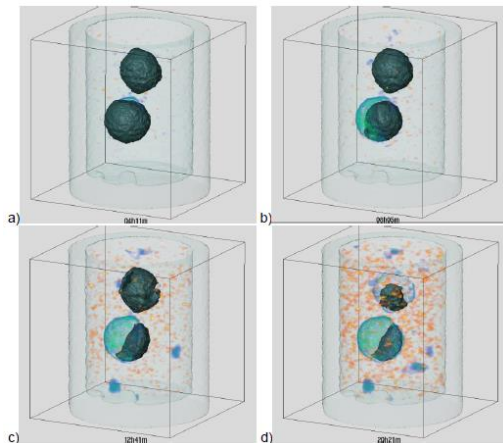


Figura 71. Radiografía de neutrones del cemento para hacer seguimiento del transporte de humedad desde los PSA [152].

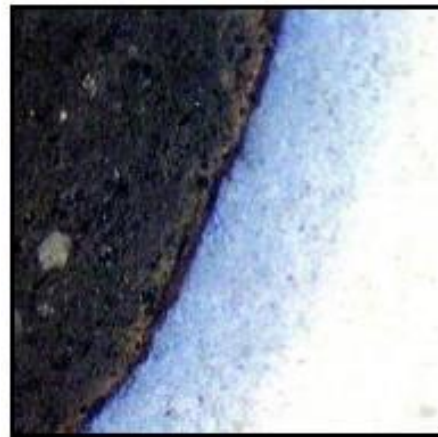


Figura 72. Corona de hidratación teñida en azul, aproximadamente 1 mm de espesor en AL como comparativa con los PSA [152].

El uso de polímeros superabsorbentes disminuye la trabajabilidad (ensayo de embudo en V y ensayo de consistencia) del hormigón, siendo peor cuanto mayor es el contenido dosificado [153]. La absorción del agua en los polímeros tiene como consecuencia directa la disminución de la trabajabilidad y escurrimiento del hormigón, ya que el hormigón fresco dispondrá de menos agua libre. Por ello, hay que considerar el uso de superplastificantes en la dosificación y, en algunos casos, la posibilidad de añadir agua para compensar este efecto [154], controlando en todo momento su influencia en el aumento de porosidad. Además, los distintos tamaños de partículas de polímeros y la técnica de incorporación adoptada (en seco, previamente humedecidos, previamente humedecidos y

con agua añadida al amasado) hará que la consistencia varíe, lo que hará necesario ajustar las operaciones de amasado para obtener la consistencia adecuada. Lo habitual es recurrir a superplastificantes para contrarrestar la reducción de la trabajabilidad por aplicación de PSA.

### 4.3.2. ENDURECIMIENTO Y MICROESTRUCTURA

De cara al endurecimiento e hidratación de la pasta de cemento, se observa que la utilización de PSA conlleva una mejor hidratación y mayor humedad relativa en la pasta. Un análisis no destructivo realizado a través de difracción de rayos X, absorción de Nitrógeno y análisis FT-IR (espectroscopía de infrarrojos) permitió comprobar que existe una mejora producida por una mayor hidratación del cemento [155], que se manifiesta en un incremento de hidróxido de calcio. Igualmente, se aprecia mayor polimerización de los silicatos debido a la presencia de los PSA, todo ello a expensas de un ligero incremento en la porosidad total.

Del estudio realizado en 2006 por Igarashi y Watanabe [151], se confirma un mayor grado de hidratación en los hormigones que contienen estos aditivos, ahora bien, esta mejora se manifiesta a partir de los 14 días. Además, hay diferencia de comportamiento cuando se añade un 0,35% en peso de cemento, pero no se apreció mejora destacable en la hidratación por doblar la cantidad de polímeros hasta 0,70%, ver Figura 73.

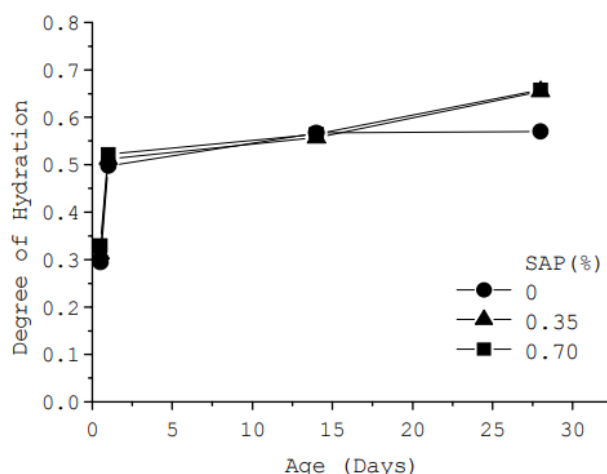


Figura 73. Grado de hidratación del cemento con w/c=0,25. Comparando contenidos en SAP de 0%, 0,35% y 0,70%. [151]

Se observa que la porosidad aumenta debido a que el tamaño de los polímeros hidratados, una vez ceden el agua a la pasta de cemento, dejan poros del mismo volumen que el polímero hidratado. En lo referente a su distribución por la masa, según los estudios de tomografía y distribución en 3D, se confirma que, si se evitan agrupamientos del material con un buen amasado, se adquiere una distribución homogénea de los mismos en el hormigón [156].

Para no perjudicar con una excesiva porosidad, se tiene en cuenta una proporción adecuada de polímeros de modo que su influencia se mantenga en positivo sin perjudicar alguna característica, como es el caso de la resistencia y la capilaridad. Unas cantidades cercanas al 0,2% del peso del cemento permiten reducir la retracción y mejorar las propiedades de durabilidad del hormigón [157], como se verá en el siguiente punto.

En este mismo sentido, la investigación llevada a cabo por Dang et al [153], muestra cómo la estructura porosa del hormigón con PSA se modifica, con variaciones en los tamaños de los poros. Así, se produce un incremento en los poros de menor tamaño: poros de gel y pequeños poros capilares; a la vez que se reducen los poros capilares grandes y poros de aire (Tabla 26). Finalmente, se establece una mejor distribución del agua liberada por el polímero, que se traduce en un cemento más hidratado, especialmente en las zonas de transición intersticial de los polímeros. Esto se debe a que los polímeros,

según liberan su carga de agua al cemento, van reduciendo su tamaño. Así, durante el fraguado del cemento se va generando una estructura rígida alrededor de las partículas de polímeros. Pero, según se reduce el volumen de estos polímeros por la liberación de agua, también se crean poros donde antes estaban alojados los PSA. Para que tenga mayor peso la mejora en la hidratación del cemento alrededor de las partículas de PSA que el volumen de poros generado, es importante el tamaño y calidad de los polímeros superabsorbentes, así como su correcta distribución en la masa de hormigón.

Tabla 26. Resultados de la porosimetría de mercurio en pasta de cemento a 56 días. [153]

Samples	Total pore volume (mL/g)	Porosity (%)	Pore size distribution (mL/g)			
			3–10 nm	10–100 nm	100–1000 nm	>1000 nm
PC-Z	0.0675	12.3197	0.0087	0.0284	0.0158	0.0146
S02b-0	0.0611	11.2134	0.0102	0.0248	0.0128	0.0133
S02b-10	0.0704	12.6239	0.0119	0.0332	0.0142	0.0111
S02b-10K	0.0621	11.2504	0.0108	0.0329	0.0124	0.0060

Note: S02b-10 and S02b-10K are pre-absorbed, and S02b-0 is non-absorbed.

### 4.3.3. EFECTO DE LOS PSA EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

La presencia de los PSA afecta a algunas propiedades del hormigón endurecido, como la resistencia a compresión, aunque también mejora algunos aspectos, como la permeabilidad, difusión, resistencia a hielo-deshielo y carbonatación.

La resistencia a compresión se puede ver reducida frente a la de un hormigón sin PSA, si bien algunos estudios han igualado la resistencia a compresión con la del hormigón patrón a 28 días [158], siendo la proporción de PSA determinante para alcanzar estos resultados (Figura 74). En este caso, para conseguir una resistencia a compresión similar a la del hormigón sin PSA deberemos situarnos en una dosificación entre 0,10% [154] y 0,15% de PSA sobre el peso del cemento, ver Figura 75. Por regla general la resistencia a compresión se reduce cuando superamos el 0,5% de la masa del cemento [159].

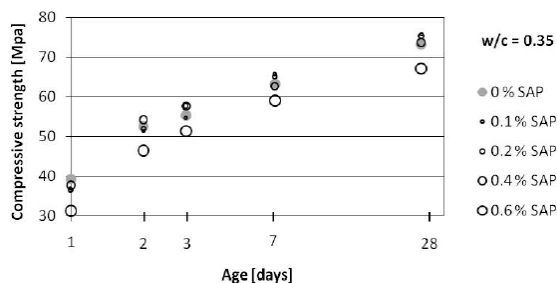


Figura 74. Comparación de resistencia a compresión con w/c 0,35 y distintas dosificaciones de PSA. [159].

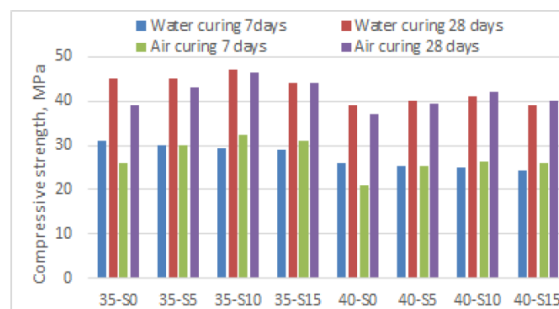


Figura 75. Resistencia a compresión para dosificaciones con w/c de 0,3 y 0,4 y concentración de PSA entre 0 y 0,15%. [154]

La resistencia a la carbonatación se ve mejorada con la presencia de los polímeros debido a la buena hidratación y consecuente compacidad de la matriz de cemento. No detiene el avance de la carbonatación, sin embargo, a los 28 días reduce el fenómeno entre un 15% y un 25% dependiendo del tratamiento de hidratación que se les dé a los polímeros, siendo también su dosificación de 0,2% del peso del cemento.

En lo que respecta a la difusión de cloruros, el hormigón mejora por los mismos motivos que para la carbonatación, la mejor hidratación de la masa de cemento repercute en una estructura porosa más fina, reduciéndose entre un 17% y un 27% la difusión de cloruros. [160].

Otro aspecto destacable en cuanto a las mejoras de las propiedades del hormigón son las que afectan a los ciclos hielo-deshielo. La resistencia del hormigón es mayor con la incorporación de estos polímeros [146].

#### 4.3.4. EFECTOS EN LA RETRACCIÓN

Cuando se trata de evaluar la retracción, se aprecia el efecto positivo de los PSA durante todo el periodo de curado: retracción plástica y autógena.

La retracción plástica tiene lugar cuando el hormigón está iniciando su fraguado y parte del agua, que no se ha combinado con el cemento, se desplaza a la zona superficial y se expone al ambiente exterior, donde se produce su rápida evaporación. Como consecuencia de ello, la zona más expuesta al ambiente se ve privada de la humedad que necesita para la hidratación del cemento y se generan tensiones capilares que no son absorbidas por la masa de hormigón, fracturándose ésta. El uso de PSA favorece la retención del agua en la matriz y permite reducir el efecto de la retracción plástica, incluso en condiciones desfavorables de exposición al viento, reduciendo la aparición de fisuras.

Técnicas pioneras en la medida de la retracción autógena se han desarrollado a raíz del estudio de los PSA. Desde 1989, Jensen y Hansen han trabajado en un método que permita medir con garantías la deformación autógena, prácticamente desde el inicio del amasado. En 1995 ambos investigadores publicaron un método de medida [161]. Posteriormente fue desarrollado y mejorado entre Lura y Jensen [162], permitiendo que el método fuera validado por la ASTM en 2009 establecido desde entonces como “ASTM C1698 Standard Test Method for autogenous Strain of Cement Paste and Mortar” [118].

#### 4.3.5. DOSIFICACIONES

Para una adecuada dosificación se hace necesario, en primer lugar, caracterizar debidamente los PSA. Para ello, necesitaremos conocer tres datos: la capacidad de absorción y desorción de los polímeros, la estabilidad química del producto frente a la mezcla con cemento y áridos, y el tamaño de la partícula para asegurar una correcta distribución por la masa de hormigón.

Para determinar la absorción y desorción, el Comité Técnico 260-RSC de RILEM [163] y ensayos interlaboratorios [164], han establecido dos métodos verificados para su cálculo. El llamado “método de la bolsa de té” (Figura 76) y el “método de filtración” (Figura 77) [165].

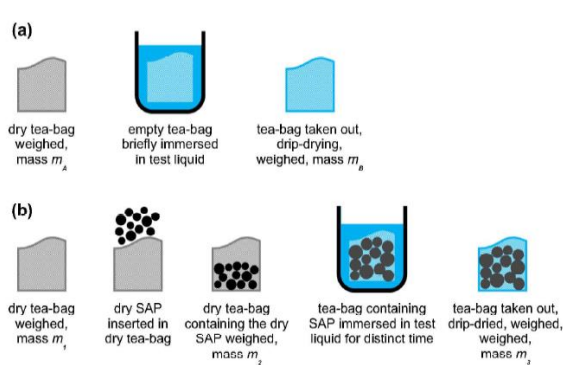


Figura 76. Esquema del método de “la bolsa de té”, con una primera medición de la bolsa hidratada (a), y una segunda medición para la hidratación de los polímeros (b) [164]

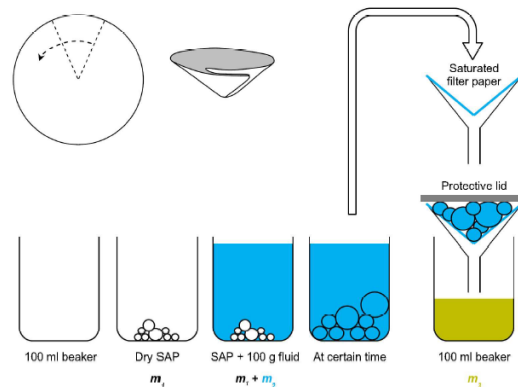


Figura 77. Esquema del Método de Filtración. [165]

Los PSA tienen diferentes formas de aplicación a la hora de incorporarse a la dosificación. La primera de ellas consiste en mantener la relación w/c de la dosificación de hormigón y se suministra el PSA en seco. En tal caso, los polímeros se hidratan con el agua de la mezcla, reduciendo la trabajabilidad de la mezcla y obligando a aumentar la dosis de superplastificante. Una segunda forma es incluyendo los polímeros ya hidratados, descontando el agua absorbida de la relación w/c obtenida.

La tercera forma de suministrarlo a la dosificación es calculando previamente el agua necesaria para compensar la retracción autógena [106] y añadir los PSA ya hidratados a la mezcla, con lo que aumentaríamos la relación w/c de la dosificación inicial con un suplemento para compensar las retracciones previamente calculadas. La necesidad de adaptar la dosificación a cada uso particular nos obliga a realizar ensayos de ajuste previos para dar con la dosificación exacta.

Una estimación de contenido de PSA para la eliminación total de la retracción autógena, suponiendo una absorción de 15g/g en una dosificación con relación agua-cemento de 0,30 y cemento portland sin adiciones estaría en 0,33% de PSA por masa de cemento. Sin embargo, los ensayos para determinar la influencia en las demás características del hormigón son necesarios para definir el contenido total de estos aditivos.

#### 4.3.6. APLICACIONES PRÁCTICAS DE POLÍMEROS SUPER ABSORBENTES

Hasta la fecha son pocas las aplicaciones prácticas realizadas con PSA. Aunque la utilización de los polímeros superabsorbentes no es tan extendida como la de los áridos ligeros, se han realizado aplicaciones prácticas de consideración que han probado su eficacia.

En 2023 se dieron a conocer los resultados de la aplicación de PSA en muros de hormigón. Se construyeron dos muros de 14m x 2,75m x 0,8m [166]. Se aplicaron dos tipos de PSA (1,1% en peso de cemento) en uno de ellos, dejando el otro muro de referencia. Se usó una clasificación C35/45 para el muro de referencia y C30/37 en el de PSA. El cemento empleado fue CEM III-B 42.5N LH/SR. Se incluyó agua adicional para la mitigación de la retracción de acuerdo a las recomendaciones RILEM [106], por lo tanto, el muro de referencia obtuvo una relación a/c de 0,44 y el de PSA una relación a/c de 0,66. En el muro con PSA se redujo la retracción autógena hasta un 55% a los 7 días. Tras dos años de estudio en el muro con PSA, no se detectaron fisuras ni indicios de corrosión, mientras que el muro de referencia mostró fisuras a los 28 días (Figura 78) y comienzo de corrosión en la zona fisurada a los 6 meses tras su desencofrado.

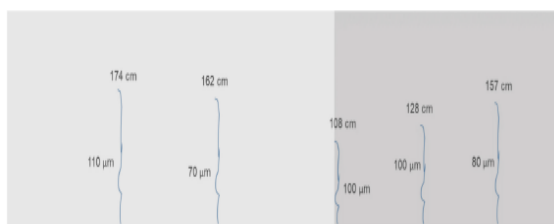
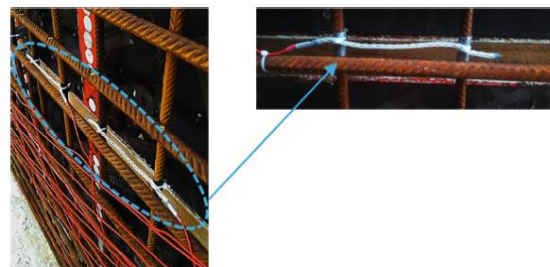
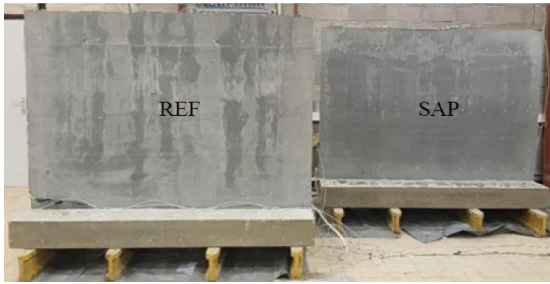


Figura 78. Fisuras en el muro de referencia sin PSA. El muro con PSA no sufrió fisuramiento. [166]

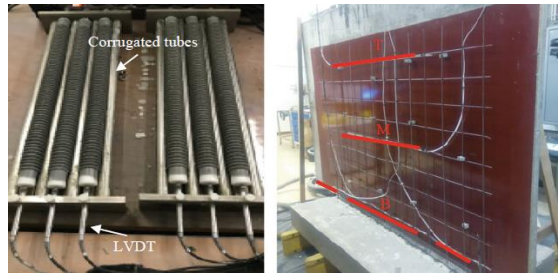


Fotografía 33. Monitorización de corrosión mediante electrodos de níquel. [166]

Un estudio realizado en 2020 sobre la aplicación de PSA en un muro de hormigón de altas prestaciones a escala ([166], Fotografía 34 y Fotografía 35) demostró que el muro con esta adición de polímeros, a los cuatro meses de su ejecución, no presentaba fisuras, mientras que el muro de referencia, sin polímeros, presentaba fisuras de 180 µm y que llegaban hasta la mitad de la altura del mismo. Se utilizó un PSA de 100 µm, capacidad de absorción de 27 g/g y 0,3% en peso de cemento. Se incluyó agua adicional para la mitigación de la retracción, de acuerdo con las recomendaciones RILEM [106].

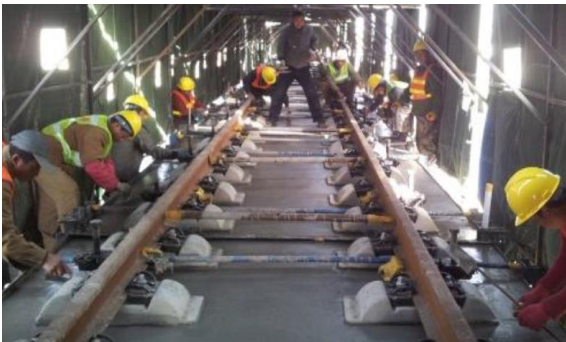


Fotografía 34. Vista de los dos muros fabricados para el ensayo, 2m x 1,5m x 0,05m. [166]



Fotografía 35. Ensayo ASTM C 1698 y posicionamiento de sensores de fibra óptica en el armado del muro para seguimiento y control. [166]

La mayor aplicación con PSA se realizó en China (2014), en la construcción de vías de ferrocarril en la línea Lanzhou-Urumqi, donde se vertieron 800.000 m<sup>3</sup> de hormigón con polímeros. El objeto, en este caso, fue reducir principalmente la pérdida por retracción plástica del agua en los primeros instantes de su aplicación y evitar la fisuración del hormigón, al estar en un entorno muy árido y con mucho viento [167][12, lo que obligó a ejecutar la construcción bajo carpas (Fotografía 36). La reducción de la fisuración fue del 85%, aumentando las distancias entre fisuras por cinco y reduciendo el ancho de las fisuras cuando éstas se producían (Tabla 27).



Fotografía 36. Ejecución de la plataforma de hormigón bajo carpa para proteger del viento y del calor. [167]

Concrete type	Construction technology	Age of observation [month]	Crack ratio [%]	Crack spacing [m]	Maximum crack width [mm]
NC	Using pumping process, concrete slump up to 200 mm; curing by spreading water, possibly not in a timely manner sometimes	7	87.5	2.6	0.80
ICC	Using bucket process, concrete slump no more than 140 mm; curing by film-forming curing agent	13	2.5	11.7	0.10

Tabla 27. Resultados de la fisuración del hormigón en la plataforma de hormigón. [167]

La primera aplicación para reducir el efecto de hielo-deshielo mediante hormigón con PSA se llevó a cabo en 2011, en la reparación de un depósito de agua de la estación eléctrica de Hohenwarte II en Thüringen, Alemania (Fotografía 37). El hecho de que el depósito esté en contacto con el agua hace que el hormigón esté saturado y sea vulnerable al daño por ciclos de hielo-deshielo. En este caso se aplicó hormigón proyectado que contenía PSA [168].

Se ha experimentado también con la aplicación de hormigón proyectado en Lyngby, Dinamarca (Fotografía 38).



Fotografía 37. Obra de reparación de depósito de agua, en Thüringen, Alemania, con PSA mediante mortero proyectado. [168]



Fotografía 38. Aplicación de hormigón proyectado en Lyngby, Dinamarca. [142]

La primera estructura realizada con hormigón de altas capacidades en cuyo interior contuviera PSA fue el pabellón de la copa del mundo de 2006 en Kaiserslautern [168]. Se trata de una estructura de hormigón con fibras, de finos y esbeltos pilares entrecruzados de un espesor de 20 mm, sin armadura de refuerzo (Figura 79 y Fotografía 39). El hormigón, con una relación agua-cemento de 0,21, usa como materiales CEM I 42,5 R HS, microsílíce, arena de cuarzo y basalto. El tamaño de los polímeros es de 200  $\mu\text{m}$  y su contenido de 0,4% del peso de cemento.

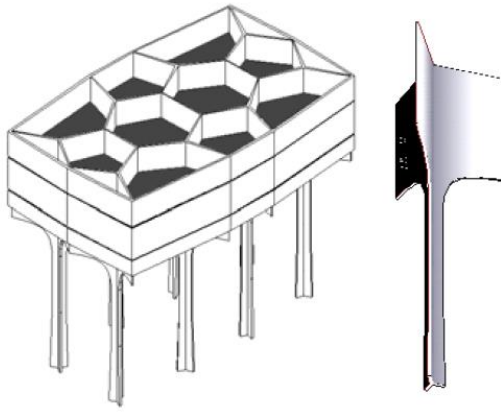


Figura 79. Vista general de la estructura del pabellón de la copa del mundo de 2006. [168]



Fotografía 39. Montaje final del pabellón de la copa del mundo de fútbol de 2006. [168]

#### 4.3.7. AMBIENTE MARINO

La investigación sobre el uso de PSA en el hormigón lleva poco más de dos décadas. En lo que respecta a las propiedades y los comportamientos frente al avance de cloruros en ambiente marino, se han establecido las dosificaciones, las limitaciones y las ventajas frente a la penetración de cloruros [160,169]. Sin embargo, hasta la actualidad, no se han encontrado obras civiles en ambiente marino con aplicación de PSA.

#### 4.4. OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Además de los áridos ligeros y los polímeros superabsorbentes, hoy en día se están llevando a cabo investigaciones sobre otros productos para mejorar la hidratación interna, así como las características mecánicas y químicas del hormigón.

Muchos de ellos son tan novedosos que requieren de un mayor estudio y comprobación, así como análisis de su afección a las propiedades del hormigón y su repercusión en el coste del precio final. A continuación, se describen los más significativos.

##### 4.4.1. POLIETILENGLICOL (PEG)

Es un polímero sintético [170] [171], esto le confiere distintas propiedades: soluble en agua y otros solventes, muy poco tóxico, estable química y térmicamente. Su peso molecular varía desde PEG 300 (g/mol) hasta PEG 10000000 (g/mol). Todo ello lo hace un potencial aditivo muy versátil.

Su uso se extiende a varias industrias:

- Farmacéutica: como excipiente en jarabes, vitaminas, cápsulas, etc.
- Cosmética: ungüentos, lubricante, etc.
- Alimentación: espesante y potenciador de sabor, etc.
- Automotriz: lubricante, desmoldeante, antiestático, etc.

En el campo del hormigón, los estudios realizados [172–175] han utilizado un rango que va desde el PEG 300 hasta el PEG 6000. Con él se consigue que el agua quede retenida, reduciendo su evaporación y reteniendo la humedad, mejorando así la capacidad de curado interno y la liberación progresiva del agua para su combinación con la masa de cemento.

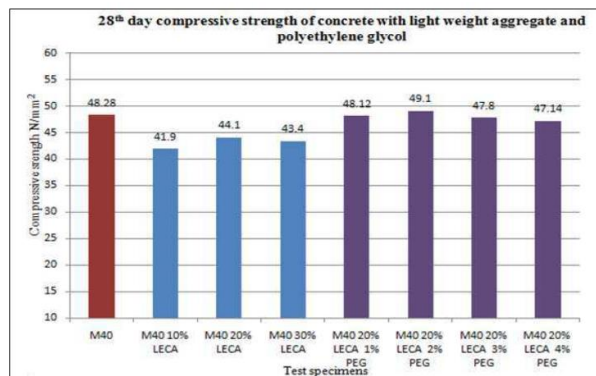


Figura 80. Resultados de resistencia a compresión comparando hormigones con árido ligero y otros conteniendo, además de árido ligero, polietilenglicol (PEG) [175]

Las dosificaciones para las que se manifiestan mejoras en las resistencias a compresión y flexión varían en función del peso molecular. Para un PEG 600, combinado con áridos ligeros, la mejora de las características de consistencia, resistencia a compresión y a flexión se consiguen con una concentración del 2% con respecto al peso de cemento [175]. En cuanto a un PEG 4000, la dosificación óptima se obtuvo con un 1,5% y para un PEG 6000, la dosificación bajó a 1% para la mejora de dichos valores [172]. Ello podría indicar un aumento de la efectividad con el aumento el peso molar de dichos compuestos.

#### 4.4.2. CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ

En el grupo de los materiales de origen biológico usados como adición al hormigón destaca la ceniza de cáscara de arroz. Se trata de un residuo muy específico y su disponibilidad dependerá de la cercanía de zonas de cultivo agrícola. La cáscara se calcina a temperaturas bajas de 550 °C y posteriormente se muele hasta un tamaño de 5,6 µm [176]. Destaca por un elevado contenido de SiO<sub>2</sub>, entre 88% y 95%, por lo que supera el 70% requerido en la ASTM C618 para considerarlo material puzolánico para su uso en hormigón.

Dentro de las mejoras que supone para los hormigones de altas prestaciones destacan su capacidad de hidratación del cemento, de reducir la retracción autógena [177], mejorar el curado interno [178] y reducir la penetración de cloruros [179].

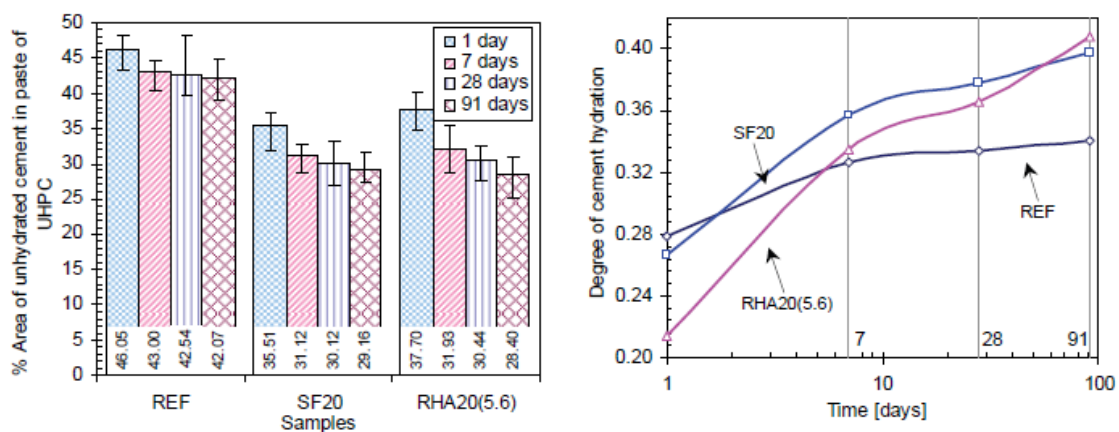


Figura 81. Gráficas comparando capacidad de hidratación del cemento entre hormigón de referencia y otros con humo de sílice (SF) y cenizas de cáscara de arroz (RHA) [180]

La tasa de reemplazo del cemento se sitúa entre el 5% y el 15%, mejorando incluso las características mecánicas para edades avanzadas [181].

#### 4.5. ASPECTOS MÁS RELEVANTES DE LOS HORMIGONES AUTOCURABLES

- El curado del hormigón consiste en mantenerlo húmedo durante un período de tiempo, generalmente de varios días, a partir del momento en que se vierte, con el fin de que el cemento reciba suficiente agua para endurecerse y alcanzar la resistencia prevista. Un curado adecuado reducirá en gran medida la contracción, aumentará la resistencia del hormigón y debería reducir el agrietamiento de la superficie, evitando mayor porosidad en la cara expuesta del hormigón.
- El curado superficial con aporte de agua es la solución mayormente adoptada. Se repone el agua que se pierde y se evita la desecación superficial, con su consiguiente aumento de porosidad, permeabilidad y fracturación. Se puede llevar a cabo con agua, vapor o con recubrimiento de material humedecido. En algunos casos, el aporte de agua se sustituye por elementos que eviten la evaporación del agua: filmógenos o sellado con membranas.
- El curado interno aporta reservas de agua en el interior del hormigón, lo que conlleva menor fisuración por retracción, mejor hidratación de la masa de cemento y mayor protección frente a los ataques químicos externos, dificultando la difusión de cloruros y la carbonatación. Ahora bien, hay que tratar de minimizar los perjuicios que el aporte del agente de curado interno (árido ligero, polímero superabsorbente, etc.) genera en porosidad, resistencia y/o trabajabilidad del hormigón.
- El mayor campo de aplicación de los hormigones con curado interno es el de hormigones de altas prestaciones, ya que una baja relación agua cemento y un alto contenido de cemento aumentan la retracción del hormigón durante el periodo de fraguado y endurecimiento inicial. Para minimizar esta retracción y los daños que conlleva, hay que asegurar la correcta hidratación, y una vía para hacerlo en toda la masa de hormigón es el curado interno.

#### CURADO INTERNO CON ÁRIDOS LIGEROS

- Los áridos ligeros presentan una densidad aparente entre 200 y los 1.900 kg/m<sup>3</sup>. Son un material menos resistente que los áridos comunes, lo cual repercute en su resistencia a compresión, resistencia al machaqueo y al desgaste por abrasión. Por contra, mejora el comportamiento frente al deterioro por heladas y actúa como reserva de agua, que se irá liberando en función de las necesidades de hidratación del cemento, ayudando al curado interno del material. Se ha observado que gran parte del agua se libera entre las 12 y las 75 hora tras la mezcla de los componentes y que la distancia recorrida en esta franja de tiempo no supera los 2 mm.
- Para la correcta dosificación de los áridos ligeros como reservas de agua, hay que conocer la absorción y desorción de este material (mediante método del centrifugado). Los resultados indican que es necesario superar el 20% de sustitución para tener efectos significativos. Ahora bien, por encima del 10% ya aparece bajada de resistencia a compresión. Es necesario el ajuste en ensayos previos de la dosificación (adiciones puzolánicas, baja a/c, % sustitución por árido ligero) para maximizar beneficios y minimizar los inconvenientes que estos áridos generan (peor trabajabilidad del hormigón fresco, bajada de resistencia y bajada del módulo de elasticidad).
- Para garantizar una buena durabilidad del hormigón con áridos ligeros, es necesario que éstos presenten buena calidad: capa exterior íntegra y sin fracturar.
- Además de para mejorar el curado del hormigón y minimizar la retracción, los áridos ligeros se utilizan en la construcción de puentes y obras marinas, aprovechando el menor peso del material, las mejoras que proporciona en durabilidad y el aumento de la flotabilidad que se alcanza en estructuras llevadas a cabo con este material.

## CURADO INTERNO CON POLÍMEROS SUPERABSORBENTES

- Los polímeros super absorbentes normalmente están formados por poliacrilato de sodio, un material muy estudiado por su capacidad de retención inicial de agua y posterior liberación durante el curado del hormigón. En el hormigón, la absorción se sitúa entre 12 y 40 gramos de agua por gramo de material seco, dependiendo del tamaño de partícula, aditivos utilizados, tipo y contenido de cemento, etc. La desorción del agua absorbida sucederá durante los dos primeros días de vida del hormigón.
- Al igual que con áridos ligeros, este aditivo disminuye la retracción autógena y mejora el comportamiento frente a ciclos de hielo-deshielo, frente a la carbonatación y a la difusión de cloruros. También reduce la retracción plástica, ya que el uso de polímeros superabsorbentes favorece la retención del agua, incluso en condiciones desfavorables de exposición al soleamiento y/o viento.
- Por contra, disminuye la trabajabilidad en fresco y la resistencia a compresión. También aumenta la porosidad del hormigón debido a que los polímeros hidratados, una vez ceden el agua a la pasta de cemento, dejan poros del mismo volumen que el polímero hidratado. Ahora bien, se afina la red porosa, ya que se produce un incremento en los poros de menor tamaño: poros de gel y pequeños poros capilares; a la vez que se reducen los poros capilares grandes y poros de aire.
- Para una adecuada dosificación de un polímero superabsorbente, es necesario conocer su capacidad de absorción y desorción de agua (método de la bolsa de té y método de filtración), su estabilidad química frente a la mezcla con cemento, áridos y otros aditivos, así como su tamaño de la partícula.
- Son imprescindibles ensayos previos para el ajuste de la dosificación con este aditivo. De forma orientativa, alrededor del 0,2% del peso del cemento permite reducir la retracción y mejorar las propiedades de durabilidad del hormigón; y por encima del 0,5% ya se ve afectada la resistencia a compresión. Una estimación de contenido de PSA para la eliminación total de la retracción autógena, suponiendo una absorción de 15 g/g en una dosificación con  $w/c=0,30$  y cemento portland sin adiciones estaría en 0,33% de PSA por masa de cemento.
- Hasta ahora son pocas las aplicaciones reales de estos productos que se pueden encontrar en la bibliografía. Además de algunas estructuras piloto para el estudio de estos aditivos (2020 y 2023), se han encontrado referencias al uso de PSA en China, para evitar la retracción plástica en la construcción de vías de ferrocarril expuesta a un ambiente muy árido y con mucho viento (2014); en la cubierta del Campo del Kaiserslautern (2006), para un hormigón de muy altas prestaciones, (a/c de 0,21 y humo de sílice) y en Alemania, para construir depósitos de agua en ambiente de hielo-deshielo (2011). Por tanto, son aplicaciones para prevenir la retracción plástica, la retracción autógena y para aprovechar la mejor resistencia al hielo deshielo del hormigón con este aditivo.

## 5. HORMIGÓN CON NANO ADICIONES

Las nano adiciones son componentes que, adicionados al hormigón, mejoran sensiblemente algunas de sus características, tanto físico-mecánicas como de durabilidad, tales como la resistencia a compresión, la resistencia a tracción o la permeabilidad [182].

La nano ingeniería o la nano modificación del cemento es un campo emergente. Las metodologías para la hibridación y los injertos de moléculas permiten la manipulación directa de la estructura fundamental de las fases cementicias. Estas técnicas pueden emplearse de forma efectiva para controlar las propiedades del hormigón, su fabricación y los procesos de mejora hacia un hormigón superior, proporcionando un material con nuevas funciones y propiedades inteligentes, no disponibles en el hormigón convencional. A modo de ejemplo, la síntesis de materiales en el rango de la escala nanométrica ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos aditivos para el hormigón, tales como nuevos superplastificantes o nano refuerzos/armados [183].

Ahora bien, aunque la nano ingeniería de materiales de base cementicia presenta un tremendo potencial. Existen varios retos a resolver para desarrollarla totalmente, como son [183]:

- la correcta dispersión de los aditivos a nano escala: un aspecto muy relevante de las nano partículas es su dispersión efectiva. Resulta especialmente significativo con cargas elevadas, pero incluso con cargas bajas, aparecen problemas de auto agregación, que reducen los beneficios de su pequeño tamaño y crea bolsas de material sin reaccionar, generando tensiones internas en el material.
- la extrapolación de los resultados de laboratorio para conseguir su implementación a gran escala.
- la reducción de la relación coste/beneficio.

La nanotecnología busca el empleo de materiales más sostenibles y con mejores prestaciones, a partir del uso de las nano partículas, con gran superficie reactiva. Las nanopartículas tienen una ratio área superficial-volumen alta, tal y como puede verse en la Figura 82, que muestra la relación entre el tamaño de partículas y el área de la superficie específica para los diferentes componentes del hormigón y para la nano sílice [183,184].

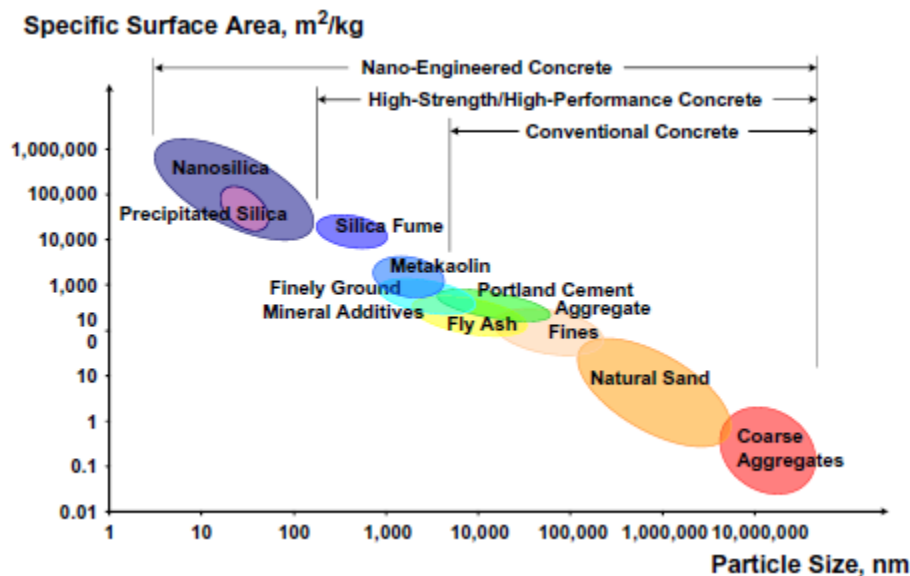


Figura 82. Tamaño de partícula y área de superficie específica referida a componentes de hormigón. [183]

El área de superficie específica de los nano materiales juega un papel principal para explicar los mecanismos que justifican los cambios fisicoquímicos inducidos por ellos en el hormigón. Primero, todos los nano materiales pueden trabajar como polvo de nano tamaño y conducir a una microestructura de la pasta de cemento más densa y menos permeable. Segundo, los nano materiales pueden actuar como núcleos para guiar la formación y el crecimiento de los productos de hidratación. Tercero, los nano materiales promueven la formación de estructuras C-S-H de mayor densidad y mayor empaquetamiento (parallel packing). Y, finalmente, en algunas adiciones concretas, como la nano sílice y las nano montmorillonitas, puede ocurrir una reacción puzolánica con los productos de hidratación de la pasta de cemento [185].

## 5.1. TIPOS DE NANO ADICIONES PARA EL HORMIGÓN

A continuación, se exponen los trabajos más significativos que se han realizado para explicar cómo afectan al mortero y/o hormigón la adición de nano sílice, nano alúmina, nano fibras y tubos de carbono, nano arcillas, nano hierro, nano óxido de titanio, e incluso partículas del propio cemento que alcanzan tamaño nanométrico. Se ordenan las diferentes nano adiciones en función del volumen de información existente sobre ellas.

### 5.1.1. NANO SÍLICE

De todas las nano adiciones al hormigón existentes, la nano sílice es la más estudiada. Se trata de un nano aditivo compuesto a base de partículas de sílice de tamaño nanométrico ( $\text{SiO}_2$ ) [182–184].

Las partículas esféricas y amorfas de nano sílice pueden obtenerse mediante una reacción de hidrólisis de tetraetoxilano en etanol empleando agua y amonio, mediante el método sol-gel. El tamaño de las partículas puede controlarse mediante el uso de surfactantes. El tamaño de partícula del polvo de nano sílice también depende del valor de pH de la reacción, aumentando con el aumento de dicho pH [186].

Las propiedades que esta nano adición aporta al hormigón son [182]:

- Incremento del desarrollo de alta resistencia final.
- Permeabilidad muy baja.
- No produce retrasos en el fraguado.
- Evita la segregación y la excesiva exudación.
- Mejora el acabado y la textura de la superficie del hormigón.
- Evita la formación de coqueas y nidos de grava.
- Evita las eflorescencias.

Sus características técnicas son:

- Necesita empleo de superplastificantes por su gran superficie específica.
- No contiene cloruros, por lo que no induce corrosión.
- Permite hormigones de mayores resistencias.
- Produce hormigones más impermeables.

Estas mejoras en las propiedades del hormigón se deben a tres efectos fundamentales de la nano sílice [187]:

- Un efecto sobre la cinética de hidratación, ya que la nano sílice genera un aumento de los puntos de nucleación, debido a su elevada superficie específica, que aceleran la reacción, reduciendo el tamaño de los productos hidratados resultantes y mejorando así las propiedades de la pasta de cemento hidratada y, por tanto, su durabilidad.
- Un efecto directo sobre las propiedades mecánicas, ya que la adición de nano sílice provoca una mayor reactividad puzolánica, que propicia la formación de más cantidad de gel C-S-H al reaccionar

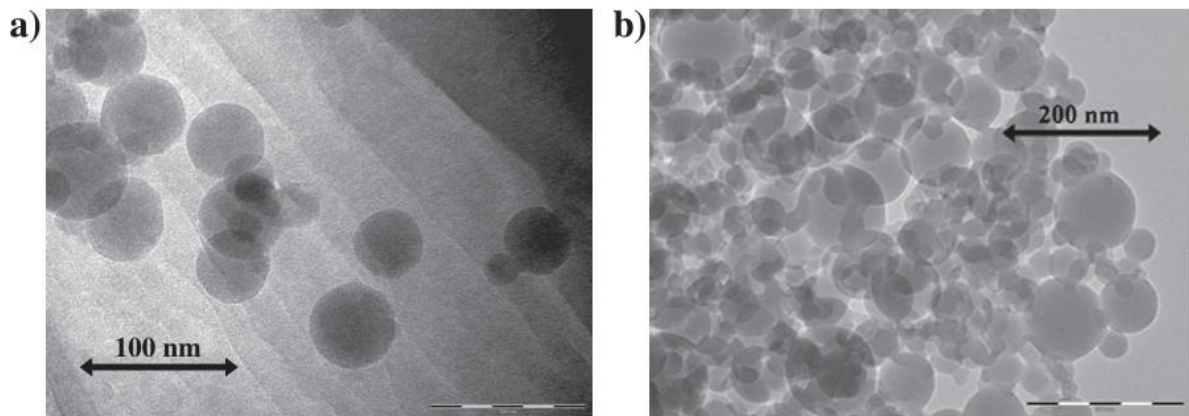
la nano sílice con el  $\text{Ca}^{2+}$  que queda libre. El aumento en la cantidad de gel C-S-H está directamente relacionado con el incremento de la resistencia a compresión.

- Un efecto relleno al modificar la estructura, composición y morfología de los productos hidratados. En dosificaciones adecuadas, se puede conseguir una mayor densidad de empaquetamiento con una menor demanda de agua, que se traduce en una mejora de la resistencia debido a esa reducción de los poros.

#### 5.1.1.1. Demanda de agua y dispersión de la nano sílice en el hormigón [188]

Es conocido como el empleo de nano sílice hace necesario utilizar superplastificantes, debido a que la gran superficie específica de este material aumenta la demanda de agua.

Para determinar cómo afecta el uso de nano sílice a las propiedades del hormigón fresco, se recoge en este apartado un trabajo de investigación llevado a cabo a partir de la caracterización morfológica de la nano sílice (microscopía electrónica de barrido, difracción láser, superficie específica por método de adsorción BET) y ensayos de escurrimiento (cono de Hägermann), para determinar cómo varía la demanda de agua y la trabajabilidad de la pasta de cemento. La Fotografía 39 muestra cómo se observa la nano sílice a través del microscopio electrónico de barrido.



Fotografía 40. Nano sílice en el microscopio electrónico de barrido. [188]

En este estudio, se evalúan diferentes correlaciones de las propiedades granulométricas y concentraciones de sílice con sus posteriores características en estado fresco. Se obtienen las siguientes conclusiones:

- A mayor área superficial de la nano sílice, mayor influencia tendrá el contenido de agua en la trabajabilidad del material fresco.
- Conocida la superficie específica de la nano sílice (método BET), existen herramientas para evaluar la demanda de agua que supondrá el uso de una nano sílice concreta.
- La aplicación de estas técnicas a nano sílice comercial requiere de mayor investigación, para obtener nuevas herramientas para evaluar con precisión la superficie específica de esta nano adición.

#### 5.1.1.2. Mejora de propiedades del hormigón por el efecto de la nano sílice

Al investigar sobre la mejora de ciertas propiedades del hormigón (porosidad, permeabilidad y resistencia) con el empleo de la nano sílice, se han localizado tres estudios principales:

- En primer lugar, se recoge un estudio que compara hormigones autocompactantes con un contenido de cemento de  $450 \text{ kg/m}^3$  y una relación agua-cemento de 0,36, en los que se emplean tres valores distintos de porcentaje de adición (0, 2,5% y 5%) de nano sílice. Este estudio recibirá el nombre de **HAC-1** [189].

- Un segundo estudio, también realizado con hormigón autocompactante, en el que se ensayan 9 dosificaciones distintas, todas con un contenido de cemento de 450 kg/m<sup>3</sup> y una relación agua-cemento de 0,38. En las 4 primeras dosificaciones, se emplean porcentajes de humo de sílice de 0, 3, 6 y 10% (control, SF3, SF6, SF10). Otras dos dosificaciones contienen 3 y 6% de nano sílice (nS3, nS6), y las 3 últimas, combinaciones de ambos tamaños de sílice (SF3/nS3, SF3-/nS-6, SF6/nS3). Este estudio será denominado **HAC-2** [184].
- Un tercer estudio presenta muestras de hormigón con 0, 3% y 6% de nano sílice considerando, además, cemento sin y con 30% de cenizas volantes. Su relación agua-cemento es de 0,4. Los valores obtenidos se analizan a los 28 días. Este estudio se nombrará en adelante **HCV** [190].

En los siguientes subapartados, se comparan los resultados recogidos por estos tres casos en la mejora de las propiedades del hormigón anteriormente citadas.

### Modificación de la porosidad y permeabilidad del hormigón

Está demostrada la reducción de permeabilidad que supone adicionar nano sílice al hormigón [185]. Ya en 2005, se evalúa [191] cómo la adición de un 3,8% de nanosílice puede disminuir la permeabilidad en un 45%, y añadir un 1% [192] implica una disminución entre un 20-30%. Más recientemente, en 2014 [193], se consigue alcanzar mejoras en la permeabilidad de entre un 30% y 45%, con concentraciones de adición inferiores al 1% (0,3% y 0,9%).

Analizando trabajos concretos, el estudio **HAC-1** cuyas características se han descrito en el punto 5.1.1.2, utiliza la porosimetría de mercurio para valorar diámetros de poro crítico y umbral, la porosidad total y la distribución porosa de cada hormigón. Los resultados de este estudio se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Diámetros de poro crítico, umbral y porosidad total. [189]

Parámetro		HAC	HAC[nSi]-2,5	HAC[nSi]-5
Diámetro crítico (µm)		0.024	0.017	0.012
Diámetro umbral (µm)		0.062	0.050	0.040
Porosidad total (%)		7.7	7.0	7.9
Valor relativo	Diámetro crítico (%)	100	70.8	50.0
	Diámetro umbral (%)	100	80.6	64.5

Los resultados muestran que la adición de nano sílice conlleva una disminución significativa de los tamaños de diámetro de poro crítico y poro umbral, lo que se traduce en un refinamiento de la estructura porosa de las muestras analizadas. Asimismo, a medida que crece la adición de nano sílice, se observa un aumento de la cantidad de poros capilares de gel y capilares medianos, unido a una disminución de la cantidad de poros capilares grandes y macroporos. Los hormigones estudiados tienen porosidades totales similares.

El siguiente análisis, **HAC-2** (descrito en punto 5.1.1.2), valoró también la red porosa del hormigón, en este caso utilizando el ensayo de penetración de agua bajo presión.

La Figura 83 muestra los resultados de profundidad de penetración de agua máxima obtenidos para las dosificaciones descritas anteriormente.

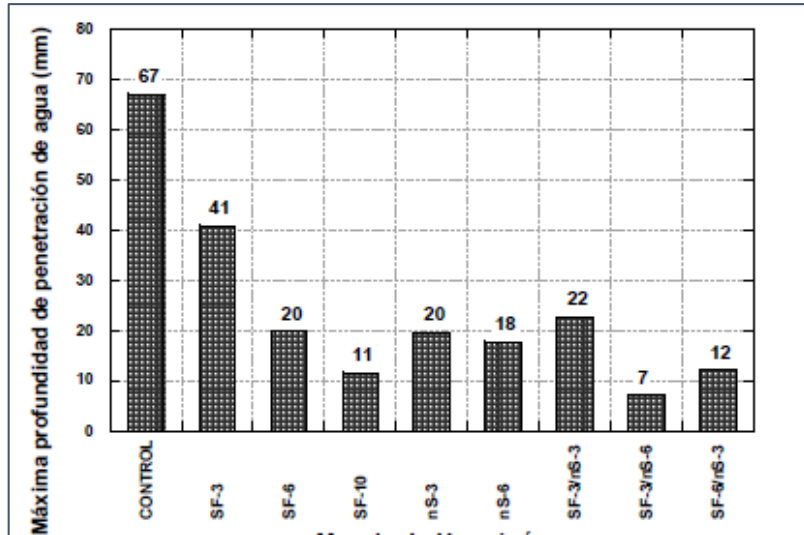


Figura 83. Profundidad de penetración de agua. [184]

Puede observarse cómo la incorporación de las adiciones, en general, reduce la permeabilidad del hormigón, obteniéndose menores valores de penetración de agua que en la muestra de control. La adición de un 3% y un 6% de nano sílice resulta más eficiente que la adición de porcentajes análogos de humo de sílice, con valores de penetración de 20 mm frente a 41mm para un porcentaje del 3% y de 18 mm frente a 20 mm para un porcentaje del 6%. Quedaría pendiente analizar un hormigón con 10% de nano sílice (porcentaje fuera de las concentraciones habituales de nano sílice), dado que el resultado de penetración más eficiente de todos los ensayos con una sola adición corresponde a una dosificación con 10% de humo de sílice. La eficacia del humo de sílice (10%) sólo se supera con la combinación de 3% de humo de sílice con 6% de nano sílice, proporción que ha alcanzado el mínimo valor de penetración de todos los resultados. Según este análisis, y de acuerdo con diversos autores, la reducción de la penetración de agua se debe a la mejora de la microestructura del hormigón por el empleo de nano sílice en su dosificación.

Por último, el estudio **HCV** (también indicado en 5.1.1.2) busca evaluar el efecto de las adiciones y nano adiciones sobre la red porosa del hormigón mediante el empleo de la porosimetría de mercurio, cuyos resultados se recogen en la Tabla 29. Se trata de valores analizados a los 28 días.

Tabla 29. Resultados de porosimetría de intrusión de mercurio en estudio. [190]

Dosificación	Porosidad aparente total (%)	Umbral de tamaño de poro (µm)	% poros Tamaño (< 0,1 µm)
CEM I a/c 0,4	10,13	0,10	69,31
CEM I a/c 0,4; 3% nano sílice	6,91	0,075	75,39
CEM I a/c 0,4; 6% nano sílice	6,44	0,060	72,16
30% cenizas; a/mc 0,4	12,56	0,144	73,41
30% cenizas; a/mc 0,4; 3% nano sílice	9,30	0,092	79,69
30% cenizas; a/mc 0,4; 6% nano sílice	8,21	0,075	77,34

A la vista de los resultados obtenidos, puede observarse que tanto la porosidad aparente como el umbral de tamaño de poro descienden con el uso de la nano sílice. Los mejores valores se obtienen en el caso de cementos sin adición de ceniza volante. Esto puede deberse a que éstos se hayan tomado a

28 días y quizá no se haya desarrollado completamente el efecto de la ceniza. Sin embargo, respecto al porcentaje de poros de tamaño inferior a 0,1  $\mu\text{m}$ , los resultados aumentan con la mayor adición de nano sílice y a su vez, con la mayor cantidad de ceniza volante, es decir, el efecto conjunto de ambos materiales contribuye a refinar la red de poros del hormigón.

### Mejora de la resistencia a compresión del hormigón

Para comprender cómo afecta la adición de nano sílice a la resistencia a compresión se recogen, en primer lugar, resultados de ensayos sobre probetas de mortero. Se muestra un estudio que compara el comportamiento del humo de sílice (FS) y de la nano sílice (PS). La Figura 84 muestra los resultados de resistencia a compresión obtenidos, a diferentes edades, para diferentes concentraciones de las dos adiciones [192].

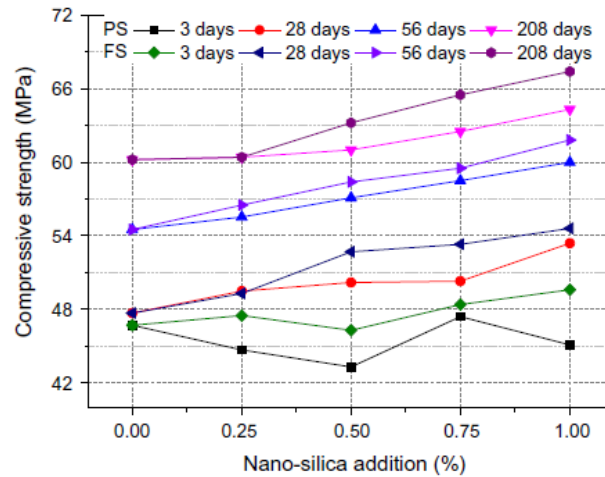
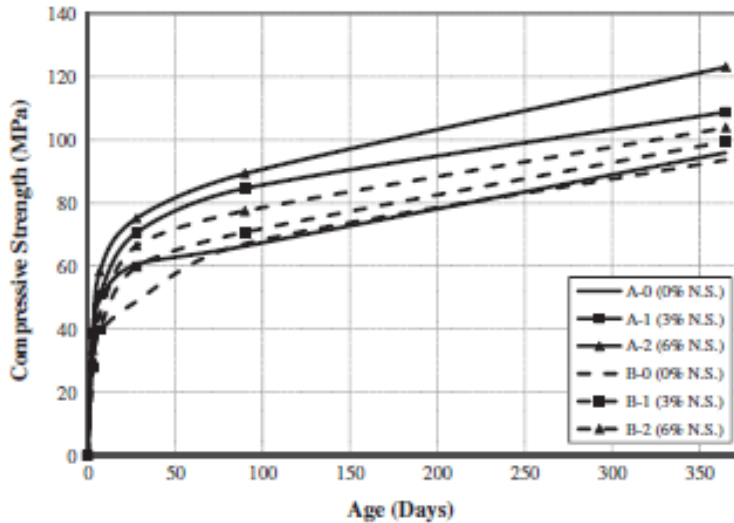


Figura 84. Efecto de la adición de nano sílice en la resistencia a compresión de la pasta de cemento. [192]

La resistencia mejoró significativamente al incorporar FS (humo de sílice), con resultados siempre superiores a los de la nano sílice (PS). La mejoría de la resistencia fue de un 6,8% para el mortero con 1% de nano sílice a los 208 días, en comparación con el mortero sin adición. En cambio, aumenta un 12% al incorporar el 1% de humo de sílice.

Para explicar el peor funcionamiento de la nano sílice, se observan muestras por microscopía electrónica, porosimetría de mercurio y nano indentación. Las nanopartículas que constituyen la adición se acumulan en el mortero formando gránulos. Este fenómeno tiende a crecer con el aumento de la cantidad de nano sílice. También se observan zonas más débiles en la interfaz entre la pasta y el árido grueso. Además, el humo de sílice proporciona mucho más polvo filler, lo que mejora aún más la microestructura y la resistencia.

Ya en el estudio **HCV** (ver punto 5.1.1.2) desarrollado sobre probetas de hormigón, la Figura 85 muestra aumento de la resistencia a compresión con el tiempo de curado para 6 dosificaciones (cuyas características aparecen en el cuadro adjunto), indicando si el cemento contiene o no adiciones (sin y con 30% de cenizas volantes CV), y con empleo de diferentes porcentajes de nano sílice NS (0, 3 y 6%).



A0	CEM I a/c 0,4
A1	CEM I a/c 0,4 3% NS
A2	CEM I a/c 0,4 6% NS
B0	30% CV; a/mc 0,4
B1	30% CV; a/mc 0,4; 3% NS
B2	30% CV; a/mc 0,4; 6% NS

Figura 85. Relación resistencia a compresión-edad, para diferentes contenidos de nano sílice. [190]

Las resistencias mayores se obtienen con la presencia de nano sílice, pero sin utilizar cenizas volantes. Estos ensayos se llevan a cabo tras 28 días de curado, por lo que podría resultar una edad reducida para valorar el efecto de un 30% de cenizas volantes en el hormigón, de ahí que los mejores resultados se observen con adición de nano sílice, pero sin empleo de cenizas.

En el caso del estudio realizado con hormigón autocompactante **HAC 1**, se analiza la resistencia a compresión de 3 dosificaciones estudiadas a 7 y 28 días. Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 30.

Tabla 30. Valores de resistencia a compresión de hormigones analizados. [189]

Ensayo		HAC	HAC[nSi]-2,5	HAC[nSi]-5
Resistencia a compresión (MPa)	7 días	53,36	67,40	66,53
	28 días	63,16	74,06	81,50
Valor relativo (%)	7 días	100	126,31	124,68
	28 días	100	117,30	129,00

La incorporación de nano sílice conlleva un aumento significativo de la resistencia a compresión de los hormigones autocompactantes. Ahora bien, no existe una proporcionalidad entre el incremento resistente y la cantidad de nano sílice añadida, lo que parece indicar la saturación de la cantidad de adición.

Finalmente, la Tabla 31 muestra, para el estudio **HAC-2** los resultados de resistencia a compresión, resistencia a tracción, así como el módulo de elasticidad en muestras de hormigón con humo de sílice, nano sílice y combinaciones de ambas, de forma que se compara el efecto de cada una de las adiciones en una misma dosificación del hormigón autocompactante.

Tabla 31. Propiedades mecánicas analizadas para hormigón endurecido. [184]

Cemento-Relación a/c	Nomenclatura de Dosificación según contenido adición									
450 kg/m <sup>3</sup> Cemento a/c 0,38	0%(control), 3% (SF3), 6% (SF6) y 10%(SF10) de humo de sílice 3 y 6% de nano sílice (nS3, nS6) Combinaciones SF-nF: (SF3/nS3), (SF6/nS6), (SF6/nS3).									
Propiedad	Edad	Designación de la mezcla								
		Control	SF-3	SF-6	SF-10	nS-3	nS-6	SF-3/ nS-3	SF-3/ nS-6	SF-6/ nS-3
Resistencia a compresión (MPa)	7d	50.6	55.6	60.6	48.4			55.0	60.4	57.4
	28d	54.1	65.1	69.9	67.1	58.7	62.2	64.8	66.8	67.4
	90d	54.3	66.8		71.1	61.4	66.3			
Resistencia a tracción (MPa)	28d	5.12	5.55	5.82	5.39	5.89	5.90	5.85	5.89	5.66
	90d	5.25	6.09							
Módulo de elasticidad (GPa)	28d	30.2	30.0	29.6	28.8	28.7	26.5	28.3	30.4	27.9

Con el fin de valorar estos resultados, la Tabla 32 muestra el % de mejora de las propiedades mecánicas analizadas para cada dosificación respecto a la de control, siempre para 28 días de edad.

Tabla 32. Propiedades mecánicas analizadas para hormigón endurecido referidas al hormigón de control. [184]

Propiedad	Edad	Designación de la mezcla								
		Control	SF-3	SF-6	SF-10	nS-3	nS-6	SF-3/ nS-3	SF-3/ nS-6	SF-6/ nS-3
Resistencia a compresión (MPa)	28d	100	120	129	124	109	115	120	123	125
Resistencia a tracción (MPa)	28d	100	108	113	105	115	115	114	115	111
Módulo de elasticidad (GPa)	28d	100	99	98	95	95	88	94	100	92

Los ensayos de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días, realizados de acuerdo con la norma UNE-EN-12930-3, muestran como la incorporación de las adiciones mejora la resistencia entre un 9 y un 29 % respecto al hormigón de control. El incremento es mayor en los hormigones con humo de sílice que con nano sílice.

Los ensayos de resistencia a tracción a 28 y 90 días, según norma UNE-EN-12930-6, muestran que la resistencia a tracción aumenta en menor medida que la resistencia a compresión, entre un 5 y un 15%. Los valores oscilan entre estos porcentajes sin una tendencia clara.

Finalmente, el módulo de elasticidad, según norma UNE-83316, disminuye ligeramente en los hormigones con adición. La causa de esta disminución puede estar en el incremento de volumen de pasta que produce utilizar las adiciones.

### Mejora de la durabilidad del hormigón

Un primer estudio para evaluar el efecto de la nano sílice en la durabilidad compara los resultados en probetas de mortero con humo de sílice (SF) y nano sílice (PS) [192].

Se miden las profundidades de penetración de cloruros a 28 y 180 días de edad (método colorimétrico de tinción con nitrato de plata), para diferentes concentraciones de adición que oscilan entre el 0 y 1%. La Figura 86 muestra los resultados obtenidos.

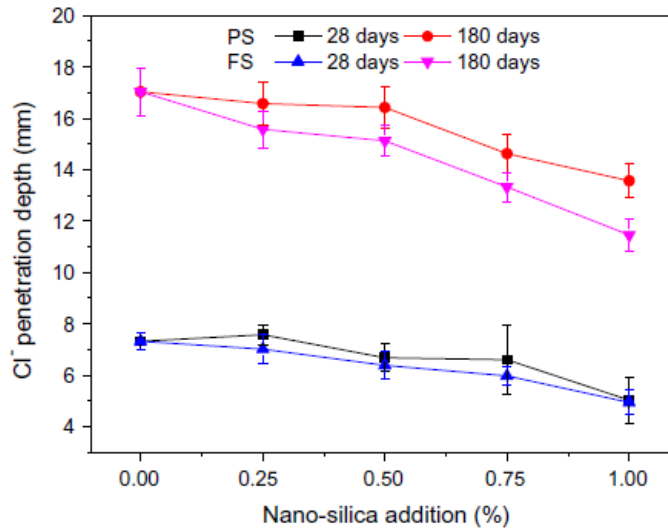


Figura 86. Efecto de la adición de nano sílice en la resistencia a la penetración de  $\text{Cl}^-$  de una solución de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . [192]

La profundidad de penetración de  $\text{Cl}^-$  se reduce un 31.3% y un 20.3% respectivamente, después de 28 y 180 días de inmersión en la solución de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  cuando la mezcla contiene un 1% de nano sílice, en comparación con la mezcla sin adición. Pero mejor aún es el resultado obtenido con humo de sílice. La profundidad de penetración de  $\text{Cl}^-$  en la pasta con 1% de humo de sílice donde se reduce un 32.5% y un 26.2% respectivamente, después de 28 y 180 días de ensayo.

En todos los casos, se produce un incremento en la resistencia a la penetración de cloruros como consecuencia de la mejora de la microestructura obtenida al afinarse la red porosa debido a la reacción puzolánica entre las adiciones y la portlandita. Ahora bien, aunque la mejora es similar en ambos casos, sin embargo, a 180 días resulta más favorable el efecto del humo de sílice, lo cual podría indicar que a edades tempranas el uso de nano sílice o humo de sílice es similar, mientras que a edades mayores es más efectivo el empleo del segundo. La misma conclusión se podría alcanzar cuando se compara resistencia a compresión en lugar de resistencia a la penetración de cloruros, tal como se observó anteriormente en la Figura 84.

Este mismo trabajo ensaya la velocidad de carbonatación de las mismas muestras, cuyos resultados se recogen en la Figura 87.

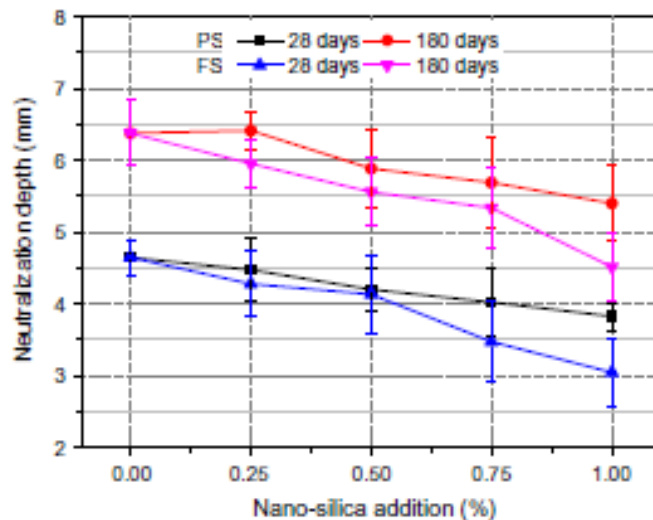


Figura 87. Efecto de la adición de nano sílice en la profundidad de neutralización de la pasta. [192]

En el caso de la carbonatación, y especialmente cuando se alcanza el 1% de humo y nano sílice, los resultados son mejores con humo de sílice.

En el estudio de la durabilidad en hormigones con nano sílice, los resultados más completos se han encontrado de nuevo para el caso del análisis **HAC-1**. Para valorar la durabilidad del hormigón, se realiza el ensayo del método de migración de cloruros, según NT BUILD 492, método de difusión natural de acuerdo con CEN/TS 12390-11:2009, y la determinación de la resistividad eléctrica del hormigón, mediante UNE 83988-1:2008.

La Figura 88 muestra los gráficos que relacionan los tres parámetros analizados.

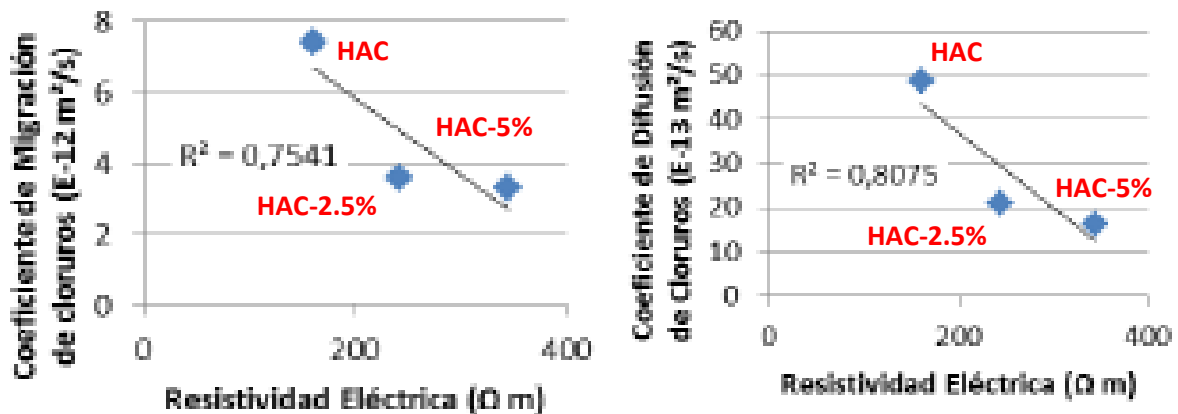


Figura 88. Correlación entre coef. de migración-resistividad eléctrica (izda.) y entre coef. de difusión-resistividad eléctrica. [189]

Los resultados se han ordenado correctamente en función del contenido en nano sílice, mostrando una disminución significativa del coeficiente de migración, del coeficiente de difusión de cloruros y de la resistividad eléctrica al adicionar nano sílice a la mezcla. Ahora bien, al igual que sucedió al ensayar la resistencia a compresión, la disminución no es proporcional al porcentaje de nano sílice adicionado. Resulta más efectivo el primer 2,5% adicionado, que el aumento progresivo de la adición hasta alcanzar el 5%.

Los ensayos de durabilidad se han completado con la medida de portlandita mediante termogravimetría y microscopía electrónica de barrido. Ambos ensayos demuestran que la adición de nano sílice conlleva una disminución de la cantidad de etringita y portlandita, así como una mayor formación de geles amorfos, lo que mejora la durabilidad del material. En este mismo sentido concluye [186], al observar cómo la adición de nano sílice al cemento reduce la lixiviación de la portlandita, al

reaccionar ésta desde el inicio de la hidratación del cemento con la nano sílice, para formar más geles C-S-H. Se ha estimado que el contenido de portlandita en la pasta de cemento con nano sílice se reduce un 21% tras un día y hasta un 40% respecto de la inicial, tras 28 días.

El estudio sobre hormigón autocompactante **HAC-2** evalúa muestras con nanosílice y humo de sílice, así como con combinaciones de ambas adiciones. Para valorar la durabilidad, se utilizan los ensayos de coeficiente de migración de cloruros y resistividad eléctrica.

En el caso del coeficiente de migración de cloruros, la Figura 89 muestra los resultados obtenidos:

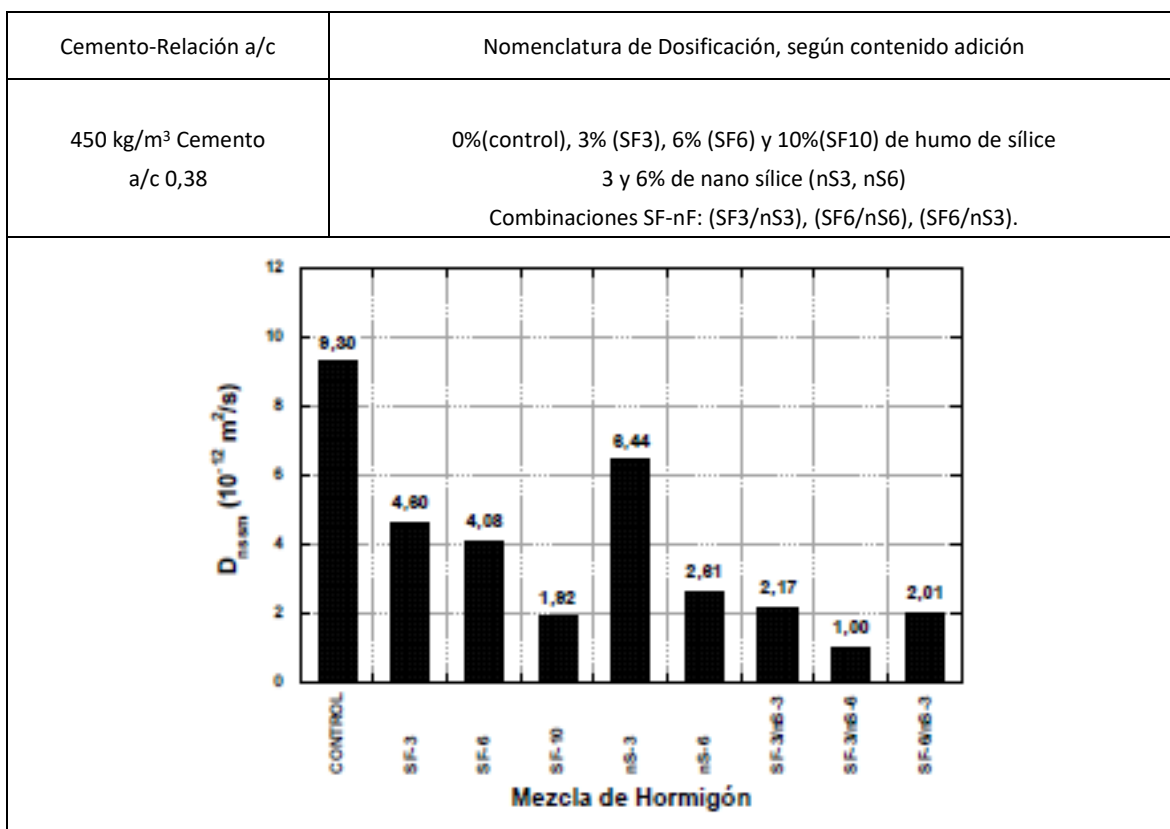


Figura 89. Coeficientes de migración de cloruros. [184]

El hormigón de control muestra una resistencia moderada a la penetración de cloruros. En general, la incorporación de adiciones en la dosificación hace que decrezca el coeficiente de migración, permitiendo alcanzar una buena resistencia a la penetración de cloruros. Comparando porcentajes análogos de adición, con valores bajos (3%SF o 3% nS) resulta más efectivo el uso de humo de sílice. Sin embargo, al aumentar el porcentaje (6%SF 6% nS), la nano sílice mejora más el coeficiente de migración. Los casos óptimos se consiguen con 10% de adición de humo de sílice (no puede compararse con la adición análoga en porcentaje de la nano adición) y con la combinación de 3% de humo de sílice y 6% de nano sílice, que son los mejores por separado, tal y como se ha comentado.

En el caso de la resistividad eléctrica del hormigón, la Figura 90 muestra los resultados obtenidos en las muestras de hormigón autocompactante ensayadas.

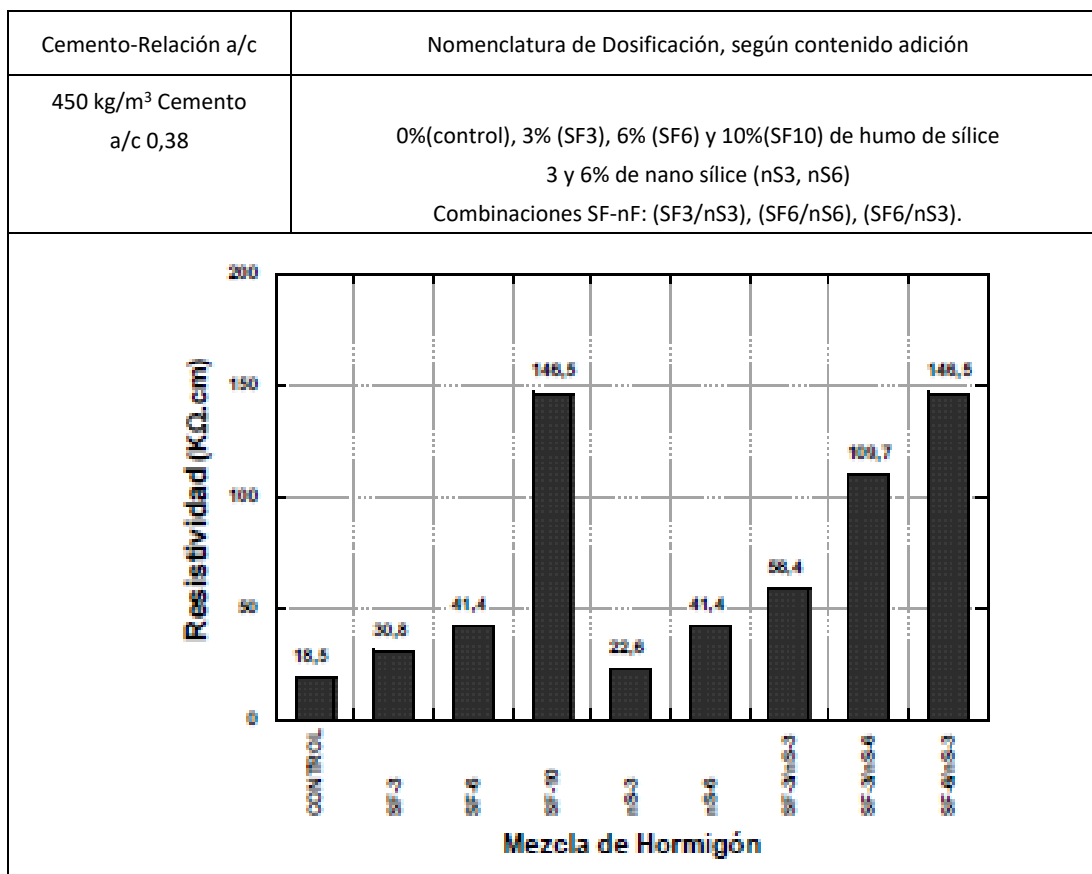


Figura 90. Resistividad eléctrica del hormigón. [184]

El hormigón de control presenta una resistividad eléctrica baja, propiedad que se ve aumentada con el empleo de la adición. Comparando porcentajes análogos, valores bajos (3%SF o 3% nS) resulta más efectivo el uso de humo de sílice, ya que produce un mayor aumento de la resistividad. Sin embargo, con valores más altos (6%SF o 6% nS), se producen resistividades muy similares. Los casos óptimos corresponden también al 10% de adición de humo de sílice (no se dispone del porcentaje análogo de nano adición) así como con la combinación de 3% de humo de sílice y 6% de nano sílice.

Finalmente, dentro del estudio **HCV**, se recogen los ensayos de difusión de cloruros (ASTM-1202) y método colorimétrico (tinción con nitrato de plata) para valorar cómo mejora la resistencia al paso de los cloruros con el uso de nano sílice, en 6 dosificaciones sin y con 30% de cenizas volantes CV, y con diferentes porcentajes de nano sílice NS (0, 3 y 6%). La Tabla 33 recoge los resultados obtenidos.

Tabla 33. Penetración de cloruros mediante ensayo acelerado ASTM 1202. [190]

Dosificación	ASTM 1202 Culombios C	Permeabilidad a los cloruros, ASTM 1202	Profundidad de cloruros media, mm
CEM I-a/c 0,4-0% NS	1837	Baja	10,2
CEM I-a/c 0,4-3% NS	939	Muy baja	3,1
CEM I-a/c 0,4- 6% NS	294	Muy baja	4,6
30% CV- a/mc 0,4-0% NS	958	Muy baja	8,1
30% CV- a/mc 0,4-3% NS	491	Muy baja	4,1
30% CV-a/mc 0,4-6% NS	357	Muy baja	3,3

Se observa que, incluso con pequeñas cantidades de nano sílice (3 y 6 %), se consiguen reducciones de hasta el 50% en la penetración de cloruros en el hormigón. Al contrario de lo observado en porosimetría y en resistencia a compresión, en el caso de la resistencia a la penetración de cloruros, el efecto de la adición de cenizas volantes se suma al de añadir nano sílice para mejorar dicha resistencia, aunque se ensayen los hormigones tras 28 días de curado.

#### 5.1.1.3. Nano sílice: Conclusiones

La nano sílice es una nano adición compuesta a base de partículas de sílice de tamaño nanométrico ( $\text{SiO}_2$ ). Tiene una adición equivalente a nivel micro: el humo de sílice.

Ambas adiciones comparten efectos sobre el hormigón: aumentan su resistencia a compresión y disminuyen su permeabilidad. En contra, ambas requieren el uso de superplastificantes, debido a la mayor demanda de agua que conlleva su mayor superficie específica. A partir de la superficie específica de la nano adición, ya existen herramientas para estimar la demanda de agua que implicará su uso.

Los distintos casos recogidos en este estado del arte sobre nano sílice han evaluado su impacto sobre las propiedades mecánicas (resistencias a compresión, a tracción y módulo), permeabilidad y durabilidad del hormigón, analizando contenidos de nano sílice hasta el 6%, frente a valores hasta el 10% de humo de sílice.

La nano sílice aumenta de forma clara la resistencia a compresión. La resistencia a tracción, aunque también se incrementa, lo hace en menor medida. En cambio, disminuye ligeramente el módulo de elasticidad. Ahora bien, no queda bien definido qué beneficios aporta la nano sílice frente al humo de sílice. Aunque con porcentajes similares de ambas, el resultado puede ser mejor utilizando nano sílice, ésta no consigue superar los resultados mecánicos alcanzados con 10% de humo de sílice. Además, los resultados obtenidos parecen indicar que un mayor contenido de nano sílice no va a mejorar de forma proporcional las propiedades del hormigón, ya que su correcta distribución en la pasta cementante es más difícil.

La nano sílice también mejora sustancialmente la durabilidad del hormigón, al hacerlo más impermeable por el refinamiento de su estructura porosa. Todos los ensayos empleados (colorimétrico con nitrato de plata, resistividad eléctrica, coeficiente de difusión de cloruros, carbonatación) lo demuestran. Sin embargo, al igual que en el caso de la resistencia a compresión, los porcentajes de nano sílice hasta el 6% no superan al 10% de humo de sílice.

Por último, se han analizado las combinaciones de nano sílice con cenizas volantes y con humo de sílice. Es difícil evaluar el efecto de la combinación con cenizas, al realizarse los ensayos tras 28 días de curado. Aun así, el efecto conjunto mejora la durabilidad del hormigón con respecto al uso único de la nano sílice. Lo mismo sucede con la combinación de 3% de humo y 6% de nano sílice, que resulta la más durable, aunque sin grandes diferencias respecto al uso de sólo una de ellas.

#### 5.1.2. **NANO ALÚMINA**

La nano alúmina es un compuesto nanométrico formado mayoritariamente por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; cuya adición provoca importantes cambios en la microestructura final de la pasta de cemento, haciéndola más densa, compacta y resistente, debido a las reacciones internas que se producen [182].

Las principales variaciones en la microestructura de la pasta de cemento son:

- Efecto filler
- Núcleo de cristalización del cemento hidratado
- Formación de cristales hidratados más pequeños, densos y resistentes
- Participación en las reacciones puzolánicas
- Aumento de la rigidización entre planos débiles de posible deslizamiento (interfase pasta/árido)

Se trata de un nuevo material, cuyas propiedades puzolánicas, al reaccionar con los componentes hidratados del cemento, mejoran las propiedades de éste. Se produce la reacción con la portlandita, formada durante la hidratación del cemento, formándose así compuestos de gel alúmino calco alcalinos hidratados (C-A-H). Además, debido al tamaño de este tipo de partículas, los poros existentes entre los componentes hidratados del cemento quedan rellenos.

Esta adición puede encontrarse tanto en forma seca como en dispersión acuosa. En este segundo caso, las nano partículas de aluminio vienen dispersas en el agua, con concentración de alúmina alrededor del 20%, según marcas comerciales.

Los hormigones con nano alúmina, al contrario que los convencionales, requieren una dosificación y diseño de mezcla más exhaustivo, por el pequeño tamaño de las partículas y su elevada superficie esférica, algo que es común a todas las nano adiciones. Esto implica una mayor demanda de agua para mantener la trabajabilidad y asegurar la correcta hidratación del cemento, o bien, la utilización de superplastificantes, para que un exceso de agua no perjudique a la durabilidad y resistencia del material.

Para conocer en profundidad el comportamiento de la nano alúmina, el estudio [194] realiza ensayos de módulo de elasticidad y resistencia a compresión sobre muestras de hormigón con 3%, 5% y 7% de nano alúmina. La Figura 91 y la Figura 92 recogen los resultados obtenidos.

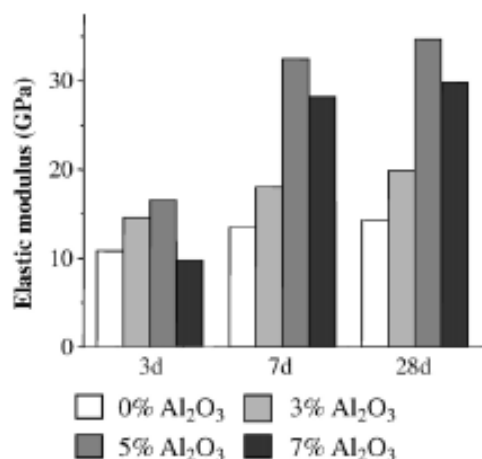


Figura 91. Módulo elástico de muestras con distintos porcentajes de nano alúmina. [194]

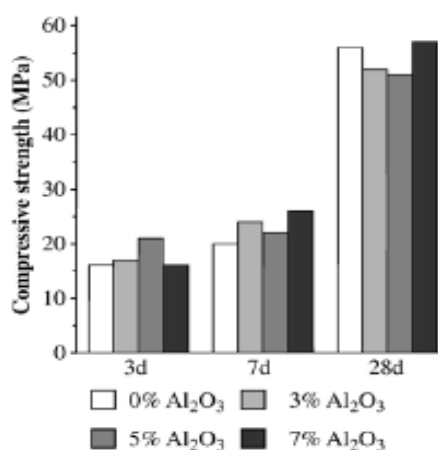


Figura 92. Resistencia a compresión de muestras con distintos porcentajes de nano alúmina. [194]

La nano alúmina tiene una influencia leve, pero positiva, sobre la resistencia a compresión, mientras que muy significativa sobre el módulo de elasticidad. Para entender este comportamiento, se lleva a cabo un análisis de las muestras anteriores mediante microscopía electrónica de barrido con sonda EDS. Se observa cómo la adición de nano alúmina actúa como un agregado muy fino que rellena principalmente la interfase pasta-árido y también rellena, aunque en menor medida, la capilaridad en la matriz cementicia. Como resultado, el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión de la pasta aumentan. De forma más concreta:

- La densidad de la interfase pasta-árido puede afectar significativamente al módulo de elasticidad. En cambio, rellenar con nano alúmina la red capilar de la matriz cementicia tendría influencia en el aumento de la resistencia a compresión.
- Incorporar nano alúmina en mezclas no afecta significativamente a sus valores de resistencia a compresión. La principal razón es que la porosidad de la matriz de cemento no puede disminuir significativamente, al menos con las condiciones de experimentación de este trabajo. Sería necesario mejorar la tecnología de preparación para aumentar el efecto de nano alúmina sobre la resistencia a compresión.

- En cambio, con un contenido de nano alúmina del 5 %, el módulo elástico aumenta en un 143% a los 28 días.

Además de la influencia sobre las propiedades mecánicas, se ha estudiado el aumento de resistencia al desgaste superficial que aporta la adición de nano alúmina al hormigón. En el estudio llevado a cabo sobre probetas de hormigón, se observa que el contenido óptimo de nano alúmina es del 1% y consigue aumentar la resistencia a la abrasión en un 77%. Este contenido de adición aumenta también la resistencia a compresión en un 36%.

Finalmente, el estudio [195] compara el comportamiento de dos tamaños diferentes de alúmina: una de las muestras entre 100 nm y 1 micra (alúmina seca aglomerada), y la otra con tamaño de 50 nm (alúmina coloidal). Las dos alúminas son productos comerciales, en adelante CA y ADA.

Se preparan muestras de mortero con arena de cuarzo normalizada, relación agua-cemento de 0,8 y adición de 0, 3% y 9% en peso de cemento de las dos diferentes adiciones. A 7 y 28 días, se miden la porosidad y la resistencia a compresión, además de estudiar la composición del cemento mediante rayos X.

Respecto a los valores de resistencias, la adición de los dos tipos de nano alúmina aumenta los valores a compresión tanto a 7 como a 28 días. Ahora bien, en el caso de CA es mucho más efectivo que en ADA, porque resistencias similares se obtienen con cinco veces menos alúmina. Esto es debido al hecho de que CA está compuesta realmente por nano partículas ( $\varnothing \approx 50\text{nm}$ ), lo que mejora su actividad.

En cuanto a la porosidad, se evalúa mediante porosimetría de mercurio. La Figura 93 muestra la influencia del porcentaje de nano adición en la distribución de poros a 7 días. En la Tabla 34 se recogen los valores de variación de resistencia a compresión a 7 y 28 días, así como los valores de porosidad total a 7 días.

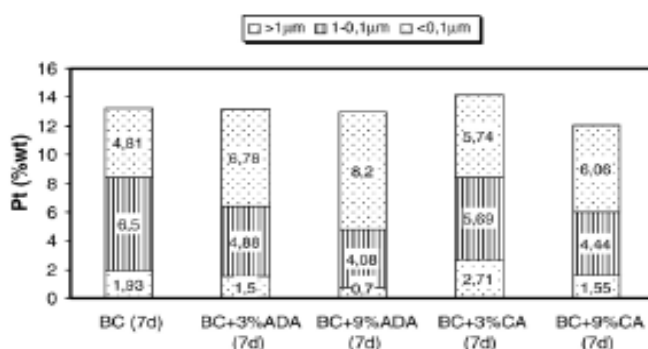


Figura 93. Influencia del porcentaje de nano alúmina en el porcentaje de poros a 7 días. [195]

Tabla 34. Variación de resistencia a compresión según adición y edad. Porosidad a 7 días. [195]

Adición (%)	7 días			28 días	
	R <sub>c</sub> (MPa)	Aumento (%)	P <sub>T</sub> (%)	R <sub>c</sub> (MPa)	Aumento (%)
0% ADA	4,0±0,3	---	13,24	8,5±0,3	---
3% ADA	7,9±0,4	96	13,16	15,7±0,2	85
9% ADA	9,7±0,1	142	12,98	18,5±0,7	119
0% CA	4,0±0,3	---	13,24	8,5±0,3	---
0,6% (3%) CA	6,3±0,2	56	14,14	16,0±0,9	89
1,8% (9%) CA	7,4±0,3	84	12,05	18,0±1	113

El principal cambio en la distribución del tamaño de poros es el refinamiento de éstos, cuyos diámetros han pasado de mayores de  $1\mu\text{m}$  a menores a  $0,1\mu\text{m}$ . Este efecto se ha producido durante los primeros días del estudio (7 días); después, estos valores se mantienen aproximadamente constantes. La porosidad total prácticamente no varía con la adición de nano alúmina, obteniendo valores alrededor de 13% en peso. Por lo tanto, en este caso, el aumento de resistencia no corresponde a un descenso de la porosidad total, sino al afinamiento de la red capilar en la masa cementicia.

### 5.1.3. NANO TUBOS Y NANO FIBRAS DE CARBONO.

Los nano tubos de carbono y las nano fibras (CNTs/CNFs) son materiales con gran potencial para su utilización como nano armados en materiales de base cementicia. Presentan una extraordinaria resistencia, con un módulo de elasticidad en el orden de TPa y resistencia a tracción en el orden de GPa, así como propiedades químicas y electrónicas únicas. Por ello, son prometedores para mejorar las propiedades mecánicas de materiales de base cementicia, la resistencia a la propagación de fisuras, así como proporcionar propiedades nuevas, como el apantallamiento de campos electromagnéticos y la autodetección (electromagnetic field shielding and selfsensing).

Las pantallas (simples o múltiples) de nano tubos y las nano fibras de carbono son materiales altamente estructurados a base de anillos de grafeno con relaciones de aspecto muy grandes (de 1000 o más) y superficies muy elevadas. Las pantallas simples son cilindros de grafeno y las múltiples son cilindros concéntricos de grafeno dispuestos coaxialmente alrededor de un núcleo hueco. A diferencia de los nano tubos, las nano fibras presentan numerosos planos de borde expuestos a lo largo de la superficie que pueden resultar ventajosos para interacciones químicas o físicas. Además, tienen un coste de producción más bajo (unas 100 veces inferior) y son adecuados para la producción masiva.

Aunque el uso de estos nano materiales se ha estudiado ampliamente en compuestos poliméricos, su empleo en cemento ha sido limitado hasta el momento. La mayoría de las investigaciones se han centrado en nano tubos en pastas de cemento y sólo unos pocos sobre su incorporación en morteros.

Algunos estudios basados en mediciones de dureza demuestran cómo los nano tubos pueden afectar a la hidratación temprana y que es posible una fuerte unión entre ellos y la pasta de cemento. Además, estos materiales presentan gran potencial para el puenteo de grietas y para facilitar la transferencia de tensiones.

En contra, la incorporación en compuestos de cemento ha demostrado ser bastante compleja, debido a su alta hidrofobicidad y autoatracción, y hasta la fecha se han obtenido resultados dispares. Se han investigado varios métodos para mejorar la dispersión y activar la superficie del grafito con el fin de optimizar la interacción interfacial mediante la funcionalización y el recubrimiento, la mezcla física óptima y/o el uso de tensioactivos y otros aditivos. Uno de los métodos ensayados es la premezcla de pantallas simples y múltiples de nano tubos con goma arábiga, permitiendo así aumentar el módulo de Young y la dureza de la pasta de cemento. Ahora bien, cuando no se utilizaba ningún agente dispersante, empeoraban las propiedades mecánicas, ya que la unión de la nano adición con la matriz de cemento era muy débil y, bajo tensión, se desprendía fácilmente de la matriz.

### 5.1.4. NANO ARCILLAS

La arcilla y sus propiedades al emplearse como adiciones al cemento pueden tener una versión también a nano escala. Las partículas de arcilla naturales e individuales son de tamaño micra y sub-micra, y la estructura base de la arcilla se compone de capas cristalinas de filosilicatos de aluminio, con espesores en el orden del nm. Por tanto, las capas individuales que conforman una arcilla son nano partículas reales [183].

Las nano partículas de arcilla tienen potencial para mejorar el rendimiento mecánico, la resistencia a la penetración de cloruros y las propiedades de autocompactación del hormigón, así como reducir la permeabilidad y la retracción. Además, son materiales de bajo coste, por lo que su aplicación al hormigón resulta prometedora [185].

El efecto de la arcilla en el cemento no es algo nuevo y la mayoría de sus aplicaciones emplean arcilla calcinada (metacaolín), con propiedades puzolánicas comprobadas. Sin embargo, aparecen nuevas líneas de trabajo enfocadas en las posibilidades de la nano ingeniería de las arcillas, aunque la mayoría de estas investigaciones buscan arcillas naturales no calcinadas.

Las dos propuestas principales que existen actualmente son la utilización de aglutinante químico de alcohol polivinílico para partículas de arcilla exfoliadas, con el fin de crear cadenas de partículas de arcilla unidas que, al incorporarse al cemento, mejoran las propiedades después de rotura del material, así como la utilización de nano partículas de arcillas de esmectita n-modificadas, ya que actúan como agentes de nucleación/unión para C-S-H, modificando la estructura de los compuestos C-S-H que forman el cemento endurecido.

Debido a que las partículas de arcilla son altamente hidrófilas, es importante el control del agua requerida en aglomerantes tipo arcilla-cemento. Puede conseguirse una reducción del agua requerida mediante modificación de intercambio de cationes orgánicos, donde éstos sustituyen el sodio o el calcio en la interfaz, reduciendo la hidrofiliidad.

Un estudio específico llevado a cabo para evaluar la durabilidad con adición de nano arcillas es el diseñado para examinar la permeabilidad del hormigón y la microestructura de la pasta de cemento portland con adición de nano montmorillonita hidrofílica e hidrofóbica al 1% de peso de cemento [185].

Se lleva a cabo el ensayo de electromigración mostrando que, para pastas de cemento de misma dosificación, la incorporación de nano sílice y nano arcillas mejoran sustancialmente la resistencia a penetración de cloruros de las pastas de cemento. Partiendo de un coeficiente de difusión ( $D_{Cl^-}$ ) de  $6.82 \cdot 10^{-11} m^2/s$ , el 1% de nano sílice, nano montmorillonita hidrofílica y nano montmorillonita hidrofóbica reducen en un 62%, 66% y 76% el valor de referencia sin nano adición. La clara mejora se explica con el uso de microscopía electrónica de barrido, que muestra cómo la adición de nano montmorillonitas, no sólo conduce a una pasta de cemento más densa, sino que cambia la morfología de los productos de hidratación del cemento. En todas las muestras de cemento modificadas con nano partículas, el gel de red tipo II C-S-H resulta dominante, mientras que los cristales de  $Ca(OH)_2$  y los cristales de etringita con forma de aguja son mucho menos identificables. Además, se ha observado que, una vez que las nano montmorillonitas se mezclan con cemento fresco, sus nano láminas pueden exfoliarse en la matriz del cemento y tienden a dispersarse en una dirección bajo agitación. Estas nano láminas forman matriz ordenada debido a su alta relación de aspecto y a su alta actividad superficial. Tales matrices tan ordenadas introducen regularidad microestructural en las pastas de cemento a través de un armazón de unión más estable (stable bonding framework).

### 5.1.5. OTRAS NANO ADICIONES

#### 5.1.5.1. Nano hierro

Se trata de nano partículas de hierro ( $Fe_2O_3$ ); su adición provoca cambios en la microestructura de la pasta de cemento, actúa sobre el cierre de poros y el contacto con agua de las nano partículas favorece la formación de cristales hidratados. No hay reacción con los compuestos hidratados de la masa cementicia, con lo que su acción sólo es física. Por tanto, no posee propiedades puzolánicas [182].

La forma de actuación es fundamentalmente mediante dos mecanismos principales:

- Rellenando los poros que dejan los cristales hidratados al formarse.
- Actuando como núcleos activadores, donde posteriormente se forman cristales hidratados.

Además de mejorar la resistencia a flexión y a compresión según muestra la Figura 94 [183], el nano hierro proporciona capacidad de autodetección al hormigón, ya que la resistencia eléctrica del volumen de mortero de cemento con nano hierro cambia con la carga aplicada, demostrando que el mortero con nano hierro podría “sentir” los esfuerzos a que está sometido.

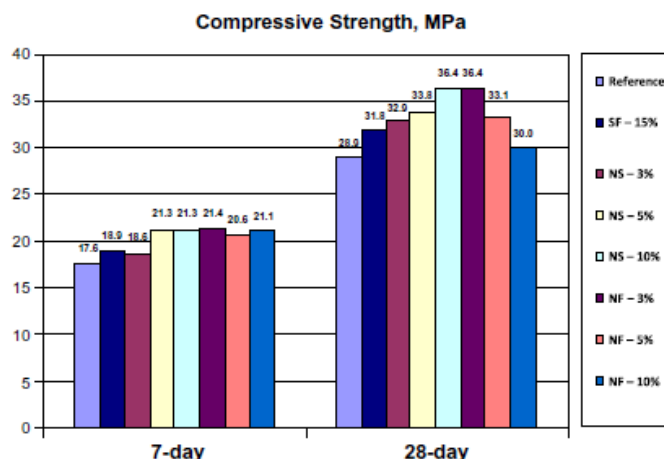


Figura 94. Resistencia a compresión de morteros de cemento con diferente dosis de nano sílice y nano hierro frente a morteros de cemento portland y con humo de sílice. [183]

#### 5.1.5.2. Nano óxido de titanio

El nano óxido de titanio resulta muy efectivo para la eliminación de contaminantes en la atmósfera. El hormigón con nano óxido de titanio actúa como fotocatalizador en la degradación de contaminantes, como el óxido de nitrógeno, monóxido de carbono, VOCs, clorofenoles y aldehídos, procedentes de emisiones industriales y de vehículos. Se han fabricado productos para su empleo en fachadas de edificios y en materiales para pavimentos de carreteras en Europa y Japón, con nano óxido de titanio que facilita la eliminación de estos compuestos contaminantes. Además de las propiedades que ayudan a eliminar contaminantes atmosféricos, algunos estudios han mostrado que el nano óxido de titanio acelera la hidratación del cemento Portland a edad temprana, mejorando su resistencia a compresión y flexión, así como su resistencia a la abrasión. Sin embargo, también se ha observado que la carbonatación del hormigón puede restar eficiencia catalítica a esta nano adición [183].

#### 5.1.5.3. Nano binders

Las nano partículas de cemento y los nano aglutinantes (nano binders) se proponen como una nueva manera de mejorar la fabricación del cemento mientras se reducen las emisiones de carbono. La creación de nano partículas de cemento se puede llevar a cabo por dos vías: molienda de Clinker de cemento portland a gran intensidad o síntesis química. Las pastas de cemento fabricadas con nano partículas demuestran tiempos de colocación más rápidos y un aumento en la resistencia a compresión a edad temprana, comparada con las pastas preparadas con cemento comercial común. Recientemente, se ha propuesto el concepto de nano aglutinante (nano binder). Implica activación mecánico-química que se obtiene mediante molienda interna del cemento con aditivos minerales secos en un molino de bolas. La modificación mecánico-química del cemento con grandes volúmenes de escorias de alto horno ha mostrado un aumento de resistencia a compresión de hasta un 62%.

### 5.2. NANO ADICIONES Y DURABILIDAD FRENTE A LA CORROSIÓN [185]

Todas las nano adiciones comparten la cualidad de mejorar la impermeabilidad de la pasta cementante, tal como se expone al inicio de este capítulo siendo, por tanto, positivas para la durabilidad del hormigón. Para comparar diferentes nano adiciones, la referencia [185] evalúa el coeficiente de difusión de cloruros obtenido con morteros, a los que se añade 1% de siete nano adiciones diferentes.

La Tabla 35 muestra las nano partículas empleadas, así como sus propiedades, y La Figura 95 muestra los coeficientes de difusión aparentes en los cementos portland ensayados, con el valor medio y la desviación estándar calculados a partir de dos o tres muestras.

Tabla 35. Propiedades de nano arcillas y nano partículas empleadas en el estudio densidad, tamaño máximo de partícula y área de superficie específica.

Nanomaterial	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Maximum Size (nm)	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)
Clay-ho: 1.44PS (polysiloxane-modified montmorillonite)	0.251	200–400 (aspect ratio)	–7,968 <sup>a</sup>
Clay-hi: PGW (98% montmorillonite)	0.678	200–400 (aspect ratio)	–2,950 <sup>a</sup>
SiO <sub>2</sub>	0.063	30	440
TiO <sub>2</sub> (anatase)	0.15–0.25	5	210
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (gamma)	0.16–0.4	10	180
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (gamma)	1.20	30	30

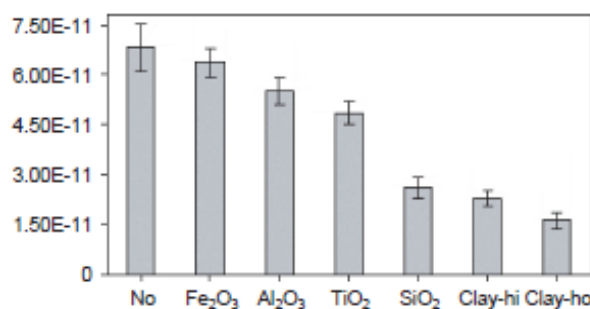


Figura 95. Coeficientes de difusión aparentes según el nano material empleado. [185]

Cuando la nano sílice, la nano montmorillonita hidrofílica y la nano montmorillonita hidrofóbica se mezclan en el mortero fresco al 1% de peso en cemento, el valor del coeficiente de difusión desciende en porcentajes de 61%, 66% y 76% desde el valor de control de  $6,82 \cdot 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$ . La reducción del coeficiente de difusión inducido por los nanomateriales va en el siguiente orden: arcilla hidrofóbica, arcilla hidrofílica, nano sílice, nano titanio, nano alúmina y nano hierro, lo que coincide con el orden del área de la superficie específica de estos nanomateriales. Por tanto, un 1% de nano arcillas y un 1% de nano sílice han sido las mejores opciones para mejorar significativamente la resistencia a penetración de cloruros de las muestras de cemento.

Los resultados recopilados en este capítulo del estado del arte permiten evaluar el alcance actual que tiene el uso de nano materiales para mejorar la durabilidad del hormigón. Teniendo en cuenta que la nano sílice es de las adiciones con mejores resultados de durabilidad y que adicionar hasta un 6% de nano sílice no ha dado mayores prestaciones que el humo de sílice (apartado 2.1.2.3), para sobrepasar las prestaciones del hormigón en términos de durabilidad que proporcionan las adiciones puzolánicas clásicas, como el humo de sílice, las principales líneas de investigación serían la utilización de nano arcillas (nano montmorillonita hidrofílica o hidrofóbica), o la combinación de humo de sílice con nano sílice.



## REFERENCIAS

- [1] M. Fernández Cánovas, Hormigón: adaptado a la Instrucción de Recepción de Cementos RC-08 y a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2013.
- [2] R. Snellings, G. Mertens, J. Elsen, Supplementary cementitious materials, *Rev Mineral Geochem* 74 (2012) 211–278. <https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>.
- [3] P.C. HEWLETT, ed., LEA'S Chemistry of Cement and Concrete, 2004th ed., Elsevier, London, 2004.
- [4] GEHO-CEB, Durabilidad de Estructuras de Hormigón. Guía de Diseño CEB. Boletín no 12., Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1993.
- [5] P.J.M. METHA, P.K., MONTERIRO, Concrete. Structure, properties and materials, Second Edi, New Jersey, 1993.
- [6] Wesche. K., RILEM Report 7. Fly Ash in Concrete, London, 1991.
- [7] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Código Estructural, Boletín Oficial Del Estado (2021) 97664–99452. <https://www.boe.es>.
- [8] ACI Committee 232, ACI PRC-232.2-18: Report on the Use of Fly Ash in Concrete, 2018.
- [9] J.C. Umaña Pela, Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón, Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- [10] CTN 83, UNE 83414. Adiciones al hormigón. Ceniza volante. Recomendaciones generales para la adición de cenizas volantes a los hormigones fabricados con cemento tipo I., (2025).
- [11] Ministerio de la Presidencia, Instrucción para la recepción de cementos (RC-16), BOE 153 (2016) 70. <http://www.minetur.gob.es/>.
- [12] ASTM, ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, (2019).
- [13] Canadian Standard Association, Concrete materials and methods of concrete construction / Methods of test and standard practices for concrete. A23.1-04/A23.2-04, (2004).
- [14] CEDEX, Catálogo de residuos utilizables en construcción, 2012 (n.d.). <http://www.cedexmateriales.es/2/catalogo-de-residuos/>.
- [15] T.C. Holland, Silica Fume User's Manual, Washington, 2005.
- [16] ACI Committee 234, ACI 234R-06 Guide for the Use of Silica Fume in Concrete, 2006.
- [17] L. Burns, Building bridges and Marine Structures with Structural Lightweight Aggregate Concrete, Expanded Shale, Clay and Slate Institute (2001).
- [18] ASTM, ASTM C1240. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, (2020).

- [19] AASHTO., AASHTO M 307, 2022 Edition, 2022 - Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, (2022).
- [20] ACI committee 233, ACI 233R-03 Slag cement in concrete and mortar, 2011.
- [21] ACI Committee 357, ACI 357.3R-14 Guide for design and Construction of waterfront and coastal concrete marine structures, 2014.
- [22] ACI Committee 357, ACI 357R-84 (Reapproved 1997) Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures, 1997.
- [23] ACI committee 357, ACI 357.2R-10 Report on floating and Float-in concrete structures, 2010.
- [24] M.D.A. Thomas, P.B. Bamforth, Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag, *Cem Concr Res* 29 (1999) 487–495. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00192-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00192-6).
- [25] M.D.A. Thomas, T. Bremner, A.C.N. Scott, Actual and Modeled Performance in a Tidal Zone, *Concrete International* (2011) 23–28.
- [26] Ash Development Association, Fly Ash Concrete in Marine Environments FROM CSIRO RESEARCH REPORT BRE NO. 062, 2000.
- [27] M.D.A. Thomas, Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete, Portland Cement Association (2007) 24.
- [28] I. Holand, J. Lindgard, S. Jacobsen, Concrete field exposure stations in Norway. An overview, n.d.
- [29] R. Lewis, The role of microsilica in sustainable concrete, *MATEC Web of Conferences* 120 (2017). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712002011>.
- [30] M. Alexander, J. Mackechnie, Concrete mixes for durable marine structures, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering* 45 (2003) 20–25.
- [31] V. Bouteiller, C. Cremona, V. Baroghel-Bouny, A. Maloula, Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time, *Cem Concr Res* 42 (2012) 1456–1467.
- [32] M.A. Ortega, J.M., Sánchez, J., Climent, Microstructure and durability of slag cement mortars hardened under different relative humidity conditions, in: *Advances in Modelling Concrete Service Life.*, Springer, MAadrid, 2010: pp. 21–32.
- [33] M. Thomas, B. Theodore, Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment, *Cem Concr Res* 42 (2012) 358–364.
- [34] R. Bertoloni, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley-VCH, 2003.
- [35] M. works Technical Committee CB/502, BS 6349. Maritime works – Part 1-4: General – Code of practice for materials, (2013).
- [36] Naval Facilities (NAVFAC), Marine concrete with service life modelling, UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS (2019). <http://www.ufrgs.br/actavet/31-1/artigo552.pdf>.

- [37] P. and B. (MLIT) Japan. Harbours, Technical Standards and Commentaries for port and harbour facilities in Japan, The Overseas Coastal Area Development institute of Japan, Tokio, 2009.
- [38] M.S. Committee CE-030, Australian Standard: Guidelines for the design of maritime structures, Standards Australia (2005).
- [39] C. for W.S. of the G. port T.A. and the G.G. Society, Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012, Ernst and Sohn, Hamburg, 2012.
- [40] M. Alexander, ed., Marine Concrete Structures. Design, Durability and Performance, Elsevier Ltd, 2016.
- [41] Z. Li, Z. Jin, T. Zhao, P. Wang, L. Zhao, C. Xiong, Y. Kang, Service life prediction of reinforced concrete in a sea-crossing railway bridge in Jiaozhou Bay: A case study, Applied Sciences (Switzerland) 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9173570>.
- [42] American Coal Ash Association, Fly Ash Facts for Highway Engineers, J Chem Inf Model 53 (2013) 1689–1699.
- [43] Multiconsult, Gullfaks Platforms, (n.d.). <https://www.multiconsultgroup.com/projects/gulfaks-platforms/>.
- [44] C.& S.I. (ESCSI) Expanded Shale, High Performance Lightweight Concrete, in: C.& S.I. (ESCSI) Expanded Shale (Ed.), Utah, 2007.
- [45] S. Dupray, J. Knights, G. Robertshaw, J. Simm, D. Wimpenny, B. Ballard, The use of concrete in maritime engineering - a guide to good practice (C674), CIRIA, London, 2010.
- [46] R.D. Amico, N.J. Burdette, MARC BASNIGHT BRIDGE - PRECAST SOLUTIONS FOR A CHALLENGING BRIDGE SITE, (n.d.).
- [47] M.D. Dhir, R.K., McCarthy, M.J., Neulands, Concrete for Extreme Conditions, in: Thomas Telford, Scotland. U.K., 2002.
- [48] Storebaelt Technical Publication, LOK and CAPO Tests The experience of pull-out test during The Great Belt Link (Storebaelt) project in Denmark, (1999) 1–16.
- [49] R.C.L. Faci, The Storebælt Link « The Legacy of Per Fidjestøl », (n.d.).
- [50] C.M. Hansson, L. Mammoliti, B.B. Hope, CORROSION INHIBITORS IN CONCRETE-PART I: THE PRINCIPLES, Cem Concr Res 28 (1998).
- [51] P. Alaejos, M.Á. Bermúdez, Corrosión de las armaduras en el hormigón situado en ambiente marino. Estado del arte, Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [52] T.A. Söylev, M.G. Richardson, Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report, Constr Build Mater 22 (2008) 609–622. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013>.
- [53] ACI Committee 229, ACI 229R. Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion, 2019. [www.concrete.org](http://www.concrete.org).

- [54] P. Saura, Inhibidores en el inicio y propagación del proceso de corrosión de las armaduras en el hormigón armado, Universidad de Alicante, 2011.
- [55] F. Bolzoni, A. Brenna, M. Ormellese, Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete, *Cem Concr Res* 154 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106719>.
- [56] K.Y. Ann, H.S. Jung, H.S. Kim, S.S. Kim, H.Y. Moon, Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete, *Cem Concr Res* 36 (2006) 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.003>.
- [57] I.N. Robertson, C. Newton, Improving concrete durability through use of corrosion inhibitors, *ACI Mater J* 116 (2019) 149–160. <https://doi.org/10.14359/51716836>.
- [58] L. Luo, G.D. Schutter, Influence of corrosion inhibitors on concrete transport properties, *Mater Struct* 41 (2008) 1571–1579.
- [59] G. De Schutter, L. Luo, Effect of corrosion inhibiting admixtures on concrete properties, *Constr Build Mater* 18 (2004) 483–489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.001>.
- [60] M.C. Brown, R.E. Weyers, M.M. Sprinkel, Effect of Corrosion-Inhibiting admixtures on Material Properties of Concrete, *ACI Mater J* 98 (2001) 240–250.
- [61] Ficha de datos de Seguridad: nitrito sódico, 2021. [www.carlroth.de](http://www.carlroth.de).
- [62] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, Corrosion of Steel in concrete, Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [63] S. Al-Bahar, J. Chakkamalayath, A. Joseph, A. Al-Arbeed, D. Dashti, Twofold Mechanism of Organic Amino-Based Corrosion Inhibitor, *ACI Mater J* 119 (2022) 15–28. <https://doi.org/10.14359/51733145>.
- [64] R. Vedalakshmi, K. RajaGopaland, N. Palaniswamy, Determination of migration efficiency of amino alcohol based migrating corrosion inhibitor through concrete, *Corrosion Engineering Science and Technology* 44 (2009) 20–31. <https://doi.org/10.1179/174327808X272405>.
- [65] ASTM, ASTM G180. Standard Test Method for Corrosion Inhibiting Admixtures for Steel in Concrete by Polarization Resistance in Cementitious Slurries, (2021). <https://doi.org/10.1520/G0180-21>.
- [66] ASTM, ASTM G109-07 (Reapproved 2013). Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments, (2013).
- [67] CTN-83, UNE 83992-2 EX. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado, (2012).
- [68] CTN 83, UNE-EN 934-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado, (2002).
- [69] ASTM, ASTM C1582-11 (Reapproved 2017). Standard Specification for Admixtures to Inhibit Chloride-Induced Corrosion of Reinforcing Steel in concrete, ASTM International (2017).

- [70] S.A.U. QUIMILOCK, MCI-2005, n.d. [www.biopreferred.gov](http://www.biopreferred.gov).
- [71] P. Faustino, A. Brás, T. Ripper, The effect of corrosion inhibitors on the modelling of design lifetime of RC structures, *Mater Struct* 48 (2015) 1303–1319.
- [72] Basf, MasterLife CI 200, 2023. [www.master-builders-solutions.com/es-es](http://www.master-builders-solutions.com/es-es).
- [73] Sika, Sika FerroGard 901, 2017.
- [74] Sika, 100 Años de Durabilidad, 2013.
- [75] Fosroc Soluciones Constructivas, Auramex BCI, 2018. [www.fosroc.com](http://www.fosroc.com).
- [76] Quimilock, MCI-2020. Inhibidor superficial, n.d.
- [77] Master Builders Solutions, MasterProtect 8000 CI, Barcelona, 2021.
- [78] Sika, Sika FerroGard-903 Plus, 2022.
- [79] Propansa, <https://www.propansa.es/obras/proteccionestructural/>, (2023).
- [80] Sika, Documento de Idoneidad Técnica 636R/21. Inhibidor de corrosión LANKO 761 STEEL., Madrid, 2021.
- [81] Sika, Procedimiento de ejecución: Aplicación del inhibidor de corrosión líquido Lanko 761 Steel., Madrid, 2021.
- [82] Sika, Documento de Idoneidad Técnica 619p/21. Inhibidor de corrosión Mater Builders Solutions España, S.L.U., Madrid, 2021. [www.master-builders-solutions.com/es-es](http://www.master-builders-solutions.com/es-es).
- [83] Tectónica, <https://tectonica.archi/articles/una-solucion-economica-para-la-corrosion-en-hormigon-armado-los-inhibidores-liquidos/>, (2023).
- [84] Basf, MasterProtect 8000 CI. Agente inhibidor de corrosión, 2013.
- [85] U.M. Angst, M. Büchler, J. Schlumpf, B. Marazzani, An organic corrosion inhibiting admixture for reinforced concrete: 18 years of field experience, *Mater Struct* 49 (2016) 2807–2818.
- [86] M. Schmidt, E. Fehling, Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe, American Concrete Institute, ACI Special Publication SP-228 (2005) 51–77.
- [87] A.A. Abadel, Physical, Mechanical and Microstructure Characteristics of UHPC containing Lightweight aggregates, *Structural Engineer* 88 (2010) 14–18. <https://doi.org/10.1520/stp46217s>.
- [88] B. Persson, D. Bentz, N. L-O, Self-Dessication and its importance in concrete technology, Lund Institute of Technology Division of Buildings Materials, Gaithersburg, Maryland, USA, 2005.
- [89] P.C. Taylor, Curing concrete, 2013. <https://doi.org/10.1201/b15519>.
- [90] K. Kovler, O.M. Jensen, Chapter 2 - General Concept and Terminology, RILEM TC 196-ICC: State-of-the-Art Report (2007) 5–13.

- [91] ACI Committee 308, ACI 308R-08 Guide to Concrete Curing, American Concrete Institute (2008) 9–11.
- [92] D.P. Bentz, W.J. Weiss, Internal Curing: A 2010 State-of-the- Art Review, *Civil Engineering* (2011).
- [93] ACI Committee 308, ACI (308-213) Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Lightweight Aggregate, 28 (2015) 0–15.
- [94] V.P. Chavan, Self-Curing Concrete: - with Poly-Ethylene Glycol, *International Journal of Engineering Research and Technology* 9 (2020) 195–197.
- [95] J.-P. Charron, Cédric Androuët, Shrinkage Mitigation of an Ultra-High Performance Concrete Submitted to Various Mixing and Curing Conditions, *Materials* (2021) 1–13.
- [96] W.J. Weiss, L. Montanari, *Guide Specification for Internally Curing Concrete*, 2017.
- [97] C.D.P. Bentz, CHAPTER 4 - MATERIALS SCIENCE-BASED MODELS. Internal Curing of Concrete RILEM TC 196-ICC: State-of-the-Art Report – June 2007, (2007) 29–43.
- [98] T.W. BREMNER JOHN RIES B, Stephen J. Hayde: Father of the Lightweight Concrete Industry, *Concrete International* 31 (2009) 35–38.
- [99] Y. Guo, X. HE, S. Peeta, W.J. Weiss, Internal curing for concrete bridges decks integration of a social cost analysis in evaluation of long-term benefit, *Transp Res Rec* (2016) 25–34. <https://doi.org/10.3141/2577-04>.
- [100] CTN-146, UNE-EN 13055-1:2003 Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado, (2003).
- [101] D.P. Bentz, K.A. Snyder, Protected paste volume in concrete. Extension to internal curing using saturates lightweight fine aggregate, *Cem Concr Res* 29 (1999) 1863–1867.
- [102] D.P. Bentz, P. Lura, J.W. Roberts, Mixture proportioning for internal curing, *Concrete International* 27 (2005) 35–40.
- [103] J. Weiss, *Internal Curing for Concrete Pavements*, FHWA Tech Brief (2016) 1–7.
- [104] P.E. Reid W. Castrodale, Ph.D., *Internal Curing with Lightweight Aggregate*, *Precast Magazine* (2016).
- [105] M.O. Kim, X. Qian, M.K. Lee, W.-S. Park, S.T. Jeong, N.S. Oh, Determination of Structural Lightweight Concrete Mix Proportion for Floating Concrete Structures, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* 29 (2017) 315–325. <https://doi.org/10.9765/kscoe.2017.29.6.315>.
- [106] M. Wyrzykowski, S.I. Igarashi, P. Lura, V. Mechtcherine, Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 51 (2018) 1–7. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1241-9>.
- [107] L. Bello, E. Garcia-Diaz, P. Rougeau, An original test method to assess water absorption/desorption of lightweight aggregates in presence of cement paste, *Constr Build Mater* 154 (2017) 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.236>.

- [108] ASTM, ASTM C1498. Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials, (2023).
- [109] CTN-92, UNE-EN ISO 15148:2003 Comportamiento higrotérmico de los materiales y productos de edificación. Determinación del coeficiente de absorción de agua por inmersión parcial. (ISO 15148:2002), (2003).
- [110] CTN-146, UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua, (2025).
- [111] T.A. Holm, J.P. Ries, Chapter 6 Physical Properties of Structural Lightweight Concrete, Reference Manual for the Properties and Applications of Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate 84117 (2007) 6–3 to 6–36.
- [112] ASTM, C1761 Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete, (2015) 1–4. <https://doi.org/10.1520/C1761>.
- [113] A.E. Miller, Using a centrifuge for quality control of pre-wetted lightweight aggregate in internally cured concrete, Open Access Theses, 2014.
- [114] A. Miller, R. Spragg, F.C. Antico, W. Ashraf, T. Barrett, A. Behnood, Y. Bu, Y. Chiu, B. Desta, Y. Farnam, H. Jeong, W. Jones, C. Lucero, D. Luo, C. Nickel, P. Panchmatia, K. Pin, S. Qiang, C. Qiao, H. Shagerdi, R. Tokpatayeva, C. Villani, A. Wiese, S. Woodard, W.J. Weiss, F. Macobatti, Q. Tian, Determining the moisture content of pre-wetted lightweight aggregate: Assessing the variability of the paper towel and centrifuge methods, Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, ICDCS 2014 (2014) 312–316. <https://doi.org/10.5703/1288284315475>.
- [115] J. Castro, L. Keiser, M. Golias, J. Weiss, Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures, Cem Concr Compos 33 (2011) 1001–1008. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.07.006>.
- [116] P. Shen, L. Lu, F. Wang, Y. He, S. Hu, J. Lu, H. Zheng, Water desorption characteristics of saturated lightweight fine aggregate in ultra-high performance concrete, Cem Concr Compos 106 (2020) 103456. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.103456>.
- [117] R. Henkensiefken, J. Castro, K. Raoufi, DEVELOPMENT OF INTERNALLY CURED CONCRETE FOR INCREASED SERVICE LIFE, 2010.
- [118] ASTM, ASTM C1698-19 Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar, (2019).
- [119] R. Henkensiefken, D. Bentz, T. Nantung, J. Weiss, Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions, Cem Concr Compos 31 (2009) 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.003>.
- [120] J.H. Ideker, T. Deboodt, T. Fu, Internal Curing of High- Performance Concrete for Bridge Decks, ODOT, (2013).
- [121] D.M. Al Saffar, A.J.K. Al Saad, B.A. Tayeh, Effect of internal curing on behavior of high performance concrete: An overview, Case Studies in Construction Materials 10 (2019) e00229. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00229>.

- [122] B.V.H. Villarreal, D.A. Crocker, Better Pavements through Internal, *Concrete International* 29 (2007) 32–36.
- [123] T.J. Barrett, A. Miller, W.J. Weiss, Documentation of the INDOT Experience and Construction of the Bridge Decks Containing Internal Curing in 2013, 2015. <https://doi.org/10.5703/1288284315532>.
- [124] S. Real, J.A. Bogas, Chloride ingress into structural lightweight aggregate concrete in real marine environment, *Marine Structures* 61 (2018) 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.05.008>.
- [125] C. Rao, M. Darter, *Evaluation of Internally Cured Concrete for Paving Applications*, 2013.
- [126] A. Jenkins, D.A. Meggers, N. Schmiedeke, K.D. of Transportation, *Evaluation of Lightweight Aggregate for Internal Curing on Concrete Pavement in Kansas*, (2022) 142p.
- [127] K. Kim, S. Chun, Evaluation of Internally Cured Concrete Pavement Using Environmental Responses and Critical Stress Analysis, *Int J Concr Struct Mater* 9 (2015) 463–473. <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0115-6>.
- [128] K. Li, J. Zeng, L. Tang, H.E. Sørensen, P. Castro Borges, M.R. Geiker, M.T. Pedersen, P. Zhang, S. Surana, R. Maddalena, J. Wang, C. Andrade, V. Baroghel-Bouny, F. Martirena-Hernández, G. Geng, K. Kovler, S. Wang, Long-term field exposure of structural concretes in marine environment: state-of-the-art review by RILEM TC 289-DCM, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 55 (2022). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02027-2>.
- [129] M. Thomas, T. Bremner, Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment, *Cem Concr Res* 42 (2012) 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.009>.
- [130] H.J. Chen, Y.C. Chen, C.W. Tang, X.F. Lin, The Corrosion Resistance of Reinforced Lightweight Aggregate Concrete in Strong Brine Environments, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15227943>.
- [131] Ideol, Proyecto de plataforma offshore para energía eólica, (n.d.). <https://www.bw-ideol.com/en/floatgen-demonstrator>.
- [132] A. Mathern, C. von der Haar, S. Marx, Concrete support structures for offshore wind turbines: Current status, challenges, and future trends, *Energies* (Basel) 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14071995>.
- [133] T. Choisnet, B. Geschier, G. Vetrano, Initial Comparison of Concrete and Steel Hulls in the Case of Ideol'S Square Ring Floating Substructure, *Proc. WWEC 2016* (2016).
- [134] J.F. Fernandes, T.N. Bittencourt, P. Helene, A review of the application of concrete to offshore structures, *American Concrete Institute, ACI Special Publication* (2008) 377–392. <https://doi.org/10.14359/20187>.
- [135] South Arne Platform. <https://jv.dk>, (n.d.). <https://jv.dk/syddjylland/endnu-en-nordsoe-kaempe-traekker-stikket>.
- [136] R. Pilkington, F. Bercha, *Arctic Offshore Development Concepts-History and Evolution*, (2014).

- [137] R.D. Sturm, N. McAskill, D.R. Morgan, R.G. Burg, Evaluation of lightweight concrete performance in 55 to 80 Year-Old Ships, American Concrete Institute, ACI Special Publication SP-189 (2000) 101–120. <https://doi.org/10.14359/5848>.
- [138] G. True, Durable concrete structures design guide, *Constr Build Mater* 7 (1993).
- [139] O.M. Jensen, Use of Superabsorbent Polymers in Concrete, *Concrete International* 35 (2013) 48–52.
- [140] O.M. Jensen, P.F. Hansen, Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations, *Cem Concr Res* 32 (2002) 973–978. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00737-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00737-8).
- [141] M. Tsuji, K. Shitama, D. Isobe, Basic studies on simplified curing technique, and prevention of initial cracking and leakage of water through cracks of concrete by applying superabsorbent polymers as new concrete admixture, *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan* 48 (1999) 1308–1315. <https://doi.org/10.2472/jsms.48.1308>.
- [142] D.P. Bentz, W.J. Weiss, Internal Curing: A 2010 State-of-the- Art Review, *Civil Engineering* (2011).
- [143] O.M. Jensen, P.F. Hansen, Water-entrained cement-based materials - I. Principles and theoretical background, *Cem Concr Res* 31 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00463-X).
- [144] V. Mechtcherine, M. Wyrzykowski, C. Schröfl, D. Snoeck, P. Lura, N. De Belie, A. Mignon, S. Van Vlierberghe, A.J. Klemm, F.C.R. Almeida, J.R. Tenório Filho, W.P. Boshoff, H.W. Reinhardt, S.I. Igarashi, Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction—update of RILEM state-of-the-art report, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 54 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01668-z>.
- [145] D. Snoeck, C. Schröfl, V. Mechtcherine, Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (SAP) prior to implementation in cement-based materials, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 51 (2018). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1242-8>.
- [146] V. Mechtcherine, C. Schröfl, M. Reichardt, A.J. Klemm, K.H. Khayat, Recommendations of RILEM TC 260-RSC for using superabsorbent polymers (SAP) for improving freeze–thaw resistance of cement-based materials, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 52 (2019). <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1375-4>.
- [147] S. Zhao, O.M. Jensen, M.T. Hasholt, Measuring absorption of superabsorbent polymers in cementitious environments, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 53 (2020). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1442-x>.
- [148] S. Zhao, O.M. Jensen, M.T. Hasholt, X. Guan, Absorption capacity of superabsorbent polymer in cement pastes: A robustness test, *Mater Struct* 54 (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01636-7>.
- [149] P. Esteves, On the absorption kinetics of superabsorbent polymers, *International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete* 15-18 August (2010) 77–84.
- [150] N. Nestle, A. Kühn, K. Friedemann, C. Horch, F. Stallmach, G. Herth, Water balance and pore structure development in cementitious materials in internal curing with modified superabsorbent

polymer studied by NMR, *Microporous and Mesoporous Materials* 125 (2009) 51–57. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2009.02.024>.

[151] S. Igarashi, A. Watanabe, Experimental study on prevention of autogenous deformation by internal curing using super-absorbent polymer particles, in: O.M. Jensen, P. Lura, K. Kovle (Eds.), *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, RILEM Publications SARL, 2006: pp. 76–86.

[152] P. Lura, M. Wyrzykowski, Internal-curing water distribution in concrete at early ages: experiments and modelling, in: *International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction*, RILEM Publications S.A.R.L, 2014: pp. 71–80.

[153] J. Dang, J. Zhao, Effect of Superabsorbent Polymer on the Properties of Concrete, *Polimers* (2017) 1–17. <https://doi.org/10.3390/polym9120672>.

[154] K. Venkateswarlu, S. V Deo, M. Murmu, Effect of Super Absorbent Polymer on Workability, Strength and Durability of Self Consolidating Concrete, 34 (2021) 1118–1123.

[155] Antony Joseph; Zainab Awadh; Dana Dashti; Jayasree Chakkamalayath, Effect of Superabsorbent Polymer on the hydration properties of High-Performance concrete, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* 12 (2023).

[156] B.J. Olawuyi, W.P. Boshoff, Influence of SAP content and curing age on air void distribution of high performance concrete using 3D volume, *Constr Build Mater* (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.128>.

[157] D. Shen, X. Wang, D. Cheng, J. Zhang, G. Jiang, Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age, *Constr Build Mater* 106 (2016) 512–522. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.12.115>.

[158] M.T. Hasholt, M.H.S. Jespersen, O.M. Jensen, M. Tange Hasholt, M.H. Seneka Jespersen, O. Mejlhede Jensen, Mechanical Properties of Concrete with SAP Part I: Development of Compressive Strength, *International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete* (2010) 1–10.

[159] D. Snoeck, Autogenous Healing in 10-Years Aged Cementitious Composites Using Microfibers and Superabsorbent Polymers, *Infrastructures* (Basel) 7 (2022). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7100129>.

[160] M.T. Hasholt, O.M. Jensen, Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers, *Cem Concr Compos* 55 (2015) 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.023>.

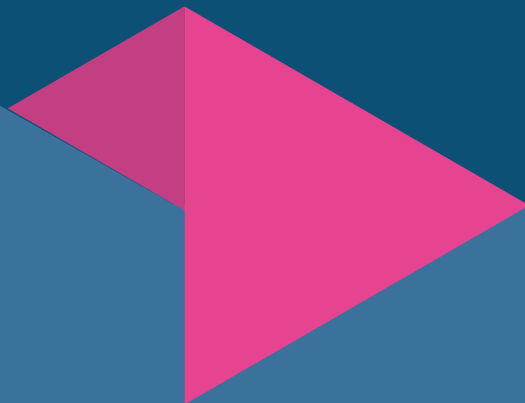
[161] O. Mejlhede Jensen, P. Freiesleben Hansen, A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste, *Mater Struct* 28 (1995) 406–409. <https://doi.org/10.1007/BF02473076>.

[162] P. Lura, K. Kovler, M&S highlight: Jensen and Hansen (1995), A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 55 (2022) 1–5. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01853-0>.

- [163] C. Schröfl, D. Snoeck, V. Mechtcherine, A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: report of the RILEM TC 260-RSC, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1060-4>.
- [164] V. Mechtcherine, D. Snoeck, C. Schröfl, N. De Belie, A.J. Klemm, K. Ichimiya, J. Moon, M. Wyrzykowski, P. Lura, N. Toropovs, A. Assmann, S. Ichi Igarashi, I. De La Varga, F.C.R. Almeida, K. Erk, A.B. Ribeiro, J. Custódio, H.W. Reinhardt, V. Falikman, Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 51 (2018). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1149-4>.
- [165] V. Mechtcherine, Guidelines for using superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction, *RILEM Technical Letters* 8 (2023) 59–65. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.182>.
- [166] J. Kheir, L. De Meyst, J.R.T. Filho, T.A. Hammer, A. Klausen, B. Hilloulin, A. Loukili, N. De Belie, Impact of Super Absorbent Polymers on Early Age Behavior of High Performance Concrete Wall, in: *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020)*, 2020: pp. 49–58.
- [167] C. Zhu, X. Li, Y. Xie, Influence of SAP on the performance of concrete and its application in Chinese railway construction, *International RILEM Conference on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction* (2014) 345–354.
- [168] V. Mechtcherine, Internal curing by super absorbent polymers (SAP) – effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete, in: *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, Lyngby, 2006: pp. 87–96. <https://doi.org/10.1617/2351580052.010>.
- [169] C.O. Coumoin, F. Wang, J. Yang, Z. Liu, Effect of SAP on properties of high performance concrete under marine wetting and drying cycles, *Journal of Wuhan University of Technology* 34 (2019) 1136–1142.
- [170] Chemfluid, Usos del polietilenglicol, (2022). <https://chemfluid.com.co/usos-del-polietilenglicol/>.
- [171] Material Properties, Polietilenglicol, (n.d.). <https://material-properties.org/es/polietilenglicol/>.
- [172] K.V.S. Gopala Krishna Sastry, P.M. Kumar, Self-curing concrete with different self-curing agents, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 330 (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012120>.
- [173] V.P. Chavan, Self-Curing Concrete : - with Poly-Ethylene Glycol, 9 (2020) 195–197.
- [174] L. Rachana, A. Venkateswararao, C.M. Chowdary, Effect of self curing agent on mechanical properties of concrete with GGBS replacement, *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 796 (2021). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012062>.
- [175] Vishnu T, Beena B R, An Experimental Investigation of Self-Curing Concrete Incorporated with Light Weight Fine Aggregate and Polyethylene Glycol, –*International Journal for Innovative Research in Science & Technology* 3 (2016) 116–122.
- [176] T. van Nguyen, G. Ye, The Use of Rice Husk Ash to produce Ultra High Performance Concrete for Sustainable Development, *International RILEM Conference: Advances in Construction Materials through Science and Engineering* (2011) 207–214.

- [177] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, Effect of rice husk ash on autogenous shrinkage of ultra high performance concrete, International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete (2010).
- [178] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, Internal curing of ultra high performance concrete by using rice husk ash, in: International RILEM Conference on Material Science, 2010: pp. 265–274.
- [179] M.P. Kulakowski, M.B. Fedumenti, C.S. Kazmierczak, Evaluation of Chloride ion Penetration Methods in Concrete With Recycled Concrete Aggregate and Rice Husk Ash, International Conference on Durability of Building Materials and Components - XIII DBMC (2015) 695–702.
- [180] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, Effect of rice husk ash on autogenous shrinkage of ultra high performance concrete, in: International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete , 2010. <https://www.researchgate.net/publication/273674606>.
- [181] S.M. Belay, A. Woldesenbet, Towards Sustainability: An Experimental and Analytical Investigation of an Agricultural Waste as a Pozzolanic Material in Concrete Mixtures, Advances in Civil Engineering 2022 (2022). <https://doi.org/10.1155/2022/8545018>.
- [182] E.C. Lozano Rodríguez, I. Lucéa Martínez, Trabajo fin de Master: HORMIGÓN CONVENCIONAL CON NANO-ADICIONES DE SÍLICE, ALÚMINA Y FIBRAS DE POLIOLEFINAS HORMIGÓN CONVENCIONAL CON NANO-ADICIONES DE SÍLICE, ALÚMINA Y FIBRAS DE POLIOLEFINAS, Madrid, 2014.
- [183] F. Sánchez, K. Sobolev, Nanotechnology in concrete - A review, Constr Build Mater 24 (2010) 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.
- [184] H.L. Romero, J.C. Gálvez, I. Lucea, A. Moragues, Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsilíce y nanosilíce, in: 3o Congreso Iberoamericano Sobre Hormigón Autocompactante, 2012: pp. 293–302.
- [185] X. He, X. Shi, Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials, Transp Res Rec (2008) 13–21. <https://doi.org/10.3141/2070-03>.
- [186] L.P. Singh, S.K. Agarwal, S.K. Bhattacharyya, U. Sharma, S. Ahalawat, Preparation of Silica Nanoparticles and Its Beneficial Role in Cementitious Materials, Nanomaterial and Nanotechnology 1 (2011) 44–51. [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).
- [187] Á. Moreno Bazán, Optimización en la incorporación de nanoadiciones al cemento para la mejora de sus prestaciones y durabilidad, Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [188] G. Quercia, G. Hüsken, H.J.H. Brouwers, Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste, Cem Concr Res 42 (2012) 344–357. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.008>.
- [189] N. León, J. Massana, R. Antón, E. Sánchez, A. Moragues, Influencia de la adición de nano sílice, en algunos aspectos de la durabilidad, en hormigones autocompactantes de alta resistencia, in: XII Congreso Latinoamericano de Patología de La Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad En La Construcción CONPAT-Colombia, 2013: pp. 367–376.
- [190] A.M. Said, M.S. Zeidan, M.T. Bassuoni, Y. Tian, Properties of concrete incorporating nano-silica, Constr Build Mater 36 (2012) 838–844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>.

- [191] T. Ji, Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>, *Cem Concr Res* 35 (2005) 1943–1947. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>.
- [192] D. Kong, X. Du, S. Wei, H. Zhang, Y. Yang, S.P. Shah, Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials, *Constr Build Mater* 37 (2012) 707–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.006>.
- [193] H. Du, S. Du, X. Liu, Durability performances of concrete with nano-silica, *Constr Build Mater* 73 (2014) 705–712. <https://doi.org/.j.conbuildmat...>
- [194] Z. Li, H. Wang, S. He, Y. Lu, M. Wang, Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite, *Mater Lett* 60 (2006) 356–359. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.08.061>.
- [195] I. Campillo, A. Guerrero, J.S. Dolado, A. Porro, J.A. Ibáñez, S. Goñi, Improvement of initial mechanical strength by nanoalumina in belite cements, *Mater Lett* 61 (2007) 1889–1892. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.07.150>.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE TRANSPORTES  
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX



# HORMIGÓN ARMADO DE ALTA DURABILIDAD FRENTE AL AMBIENTE MARINO

Volumen II.  
Armaduras alternativas  
a las convencionales de acero

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE TRANSPORTES  
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX

Puertos del Estado



**HORMIGÓN ARMADO DE ALTA DURABILIDAD FRENTE AL  
AMBIENTE MARINO**

**VOLUMEN II. ARMADURAS ALTERNATIVAS A LAS  
CONVENCIONALES DE ACERO**

LAURA JUÁREZ GONZÁLEZ

LAURA RODRÍGUEZ DURO

ASUNCIÓN MORALES HORTELANO

ANA LOPE CARVAJAL

MARÍA RODRÍGUEZ DE SEGOVIA SÁEZ

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

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

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

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

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

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

**Volumen II:** Armaduras alternativas a las convencionales de acero.

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

Año de la edición: 2026

**EDICIÓN DIGITAL:**

1ª edición electrónica: abril 2026

Formato: PDF

Tamaño: 11 MB

NIPO: 197-26-002-4

EDITA

Centro de Publicaciones

Secretaría General Técnica

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

© CEDEX: Servicio de Publicaciones

Todos los derechos reservados.

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

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

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

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

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

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

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

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

GUSTAVO SANTANA HERNÁNDEZ  
PRESIDENTE DE PUERTOS DEL ESTADO



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ

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



# ÍNDICE

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

## ÍNDICE DE TABLAS

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

## ÍNDICE DE FIGURAS

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

FIGURA 13: RODILLOS Y TREN DE CORRUGADO DE ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE (CORTESÍA DE LA FÁBRICA ROLDÁN EN PONFERRADA) .....	33
FIGURA 14: PUENTE PROGRESO EN YUCATÁN (MÉRIDA, MÉJICO): A LA IZQUIERDA VISTA DE PILAS Y VIGAS TRANSVERSALES DURANTE EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Y A LA DERECHA FOTOGRAFÍA AÉREA DEL ANTIGUO MUELLE Y LA AMPLIACIÓN CONSTRUIDA EN LOS AÑOS 80 © [26].....	35
FIGURA 15: BOTAOLAS SALINETAS EN FASE DE CONSTRUCCIÓN (GRAN CANARIA) © [27] .....	37
FIGURA 16: ARRIBA, DESPLAZAMIENTO DE LOS CAJONES; ABAJO, FABRICACIÓN DE LOS CAJONES Y DETALLE DE ARMADURA © [28].....	37
FIGURA 17: IZDA, RESISTENCIA A TRACCIÓN: COMPARATIVA ENTRE ACERO Y GFRP; DCHA, ROTURA POR TRACCIÓN EN LABORATORIO CEDEX .....	41
FIGURA 18: BARRA DE GFRP $\Phi$ 20 PREPARADA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	42
FIGURA 19: RESISTENCIA A CORTANTE. IZDA.: CORTANTE TRANSVERSAL; DCHA.: CORTANTE INTERLAMINAR ...	42
FIGURA 20: DISTINTAS SUPERFICIES DE ACABADO EN ARMADURAS GFRP.....	44
FIGURA 21: ENSAYO DE CREEP DE ARMADURA GFRP PARA DISTINTOS NIVELES DE CARGA .....	46
FIGURA 22: DEPÓSITO PARA ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO EN SOLUCIÓN ALCALINA.....	47
FIGURA 23: RED RIVER FLOODWAY BRIDGE ON TCH #1E, WINNIPEG, MANITOBA, CANADA .....	48
FIGURA 24: PUNTA LANGOSTEIRA. ARMADURA GFRP EN DISTINTAS FASES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS BLOQUES .....	49
FIGURA 25: ESPALDÓN DE ESCOMBRERAS. ARRIBA, ARMADURA GFRP DURANTE UNA DE LAS FASES DE HORMIGONADO; ABAJO, CROQUIS DE LA INTERVENCIÓN Y ARMADURA INTERIOR © [43] .....	50
FIGURA 26: ESPALDÓN EN EL PUERTO DE BARCELONA, EN DISTINTAS FASES DEL PROCESO DE EJECUCIÓN .....	50
FIGURA 27: EJEMPLO DE CURVA COMPARATIVA DE LOS COSTES ACTUALIZADOS DEL CICLO DE VIDA DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO CON 4 ALTERNATIVAS DE ARMADURAS, PARA UN PERIODO DE REFERENCIA DE 100 AÑOS .....	55
FIGURA 28: EJEMPLO DE GRÁFICOS COMPARATIVOS DE ANÁLISIS LCA PARA UNA DETERMINADA CATEGORÍA DE IMPACTO, DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN CON DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE ARMADURAS Y ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN .....	57



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

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

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

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

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

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

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

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

El contenido de esta monografía se basa en una **revisión bibliográfica** con los objetivos de:

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

## 2. ARMADURAS GALVANIZADAS DE ACERO AL CARBONO

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

### 2.1. LA GALVANIZACIÓN

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

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

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

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

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

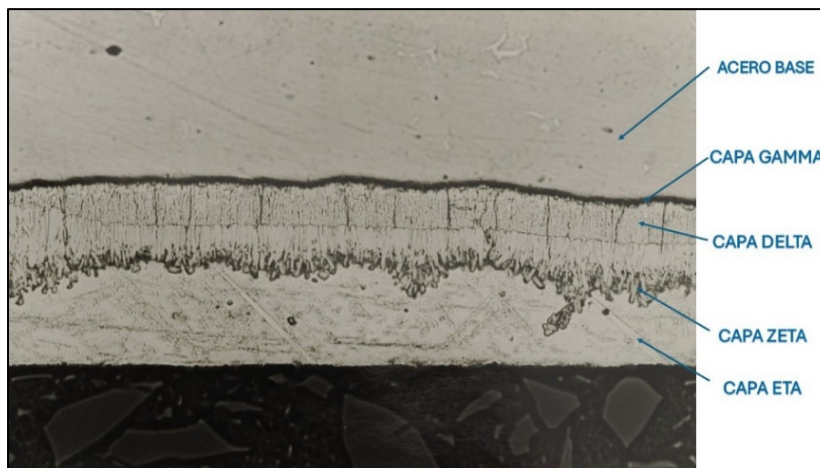


Figura 1: Corte transversal de un acero galvanizado [2]

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

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

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

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

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

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

Respecto al **acero base**, el aspecto más influyente es su **composición química** y en concreto los contenidos de silicio y fósforo y, en menor medida, de carbono, que son los que determinan la reactividad entre hierro y cinc y, por tanto, el espesor final de las capas de aleación obtenidas en el proceso de galvanización. Contenidos de silicio entre 0,03 y 0,14 %, o superiores a 0,25 %, producen revestimientos más gruesos (efecto Sandelin) que pueden llegar a desprenderse del sustrato de acero. El efecto es similar en aceros con alto contenido de fósforo y contenido de silicio inferior a 0,03 %; en este caso, la normativa específica de galvanización de productos de acero recomienda que, la suma de los contenidos de silicio y fósforo cumpla la siguiente relación:  $Si+2,5P \leq 0,09\%$  en productos laminados en caliente. Para aceros laminados en frío, la recomendación sería:  $Si+2,5P \leq 0,04\%$ . La composición química afecta, además de al espesor de las capas de revestimiento, al aspecto superficial, que, en los límites no recomendados, se vuelve oscuro y mate.

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

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

Categoría	Contenido de Si y P (%)
A <sup>1)</sup>	Si ≤ 0,03 y P < 0,02
B	0,14 ≤ Si ≤ 0,25
C	0,03 < Si < 0,14
D	Si > 0,25

<sup>1)</sup> También se consideran dentro de la categoría A:

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

Otros factores de influencia relativos al acero base son:

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

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

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

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

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

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

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

Espesor pieza	Espesor local del recubrimiento galvanizado (mínimo) [μm]	Masa local del recubrimiento galvanizado (mínimo) [g/m <sup>2</sup> ]	Espesor medio del recubrimiento galvanizado (mínimo) [μm]	Masa media del recubrimiento galvanizado (mínimo) [g/m <sup>2</sup> ]
> 3 mm y ≤ 6 mm	55	395	70	505
> 6 mm	70	505	85	610

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

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

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

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

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

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

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

## 2.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS DE ACERO GALVANIZADO

El **acero base** de las armaduras galvanizadas es normalmente el mismo tipo de acero que el de las armaduras tradicionales, normalmente fabricadas bajo la norma UNE-EN 10080 [7]. Dicho acero no sufre modificaciones sustanciales durante el proceso de galvanización, por lo que su **comportamiento físico-mecánico** y requisitos exigibles a las armaduras son también los mismos. Así, al coincidir prácticamente con las barras convencionales, las características mecánicas de las barras de acero galvanizado son muy conocidas, y su uso deja poco margen a la incertidumbre. Como característica adicional, únicamente debe controlarse la continuidad, el espesor y la composición de las capas de aleación. El Código Estructural [9] señala que las armaduras galvanizadas deben cumplir los mismos requisitos, tanto mecánicos como de adherencia, que los prescritos para las armaduras pasivas de acero al carbono. Una vez montadas las armaduras galvanizadas, también deben cumplir las mismas exigencias que las prescritas para las armaduras pasivas convencionales.

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

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

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

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

Si se usan barras galvanizadas, además de lo anterior, es especialmente importante el tiempo necesario para desarrollar la adherencia completa y la capacidad adherente última. Esto es debido a la posible pérdida de adherencia a edades tempranas del hormigón, cuando está aún fresco, ya que los álcalis del cemento pueden disolver el cinc debido a la reacción de éste con el agua alcalina de los poros. Durante el proceso de fraguado, puede existir una fase activa de corrosión del cinc, en la que combinado con el agua formaría hidróxido de cinc y se desprendería hidrógeno. Si esta fase es larga, lo cual es más fácil cuando se emplean cementos muy alcalinos, además de influir negativamente en la durabilidad (ver apartado 2.3), puede provocar la disminución de la adherencia con el hormigón y la resistencia a cortante.

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

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

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

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

Diámetro nominal [mm]	Diámetro mínimo de doblado
≤ 16	6d
> 16 y < 36	8d
≥ 36	10d

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

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

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

### 2.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS DE ACERO GALVANIZADO

La **durabilidad** de las barras con recubrimiento galvanizado es mayor que la correspondiente a las de acero convencional. Los revestimientos en base cinc protegen de la corrosión mediante el cubrimiento y revestimiento del acero, la protección catódica y el efecto de autosellado.

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

A pesar de esta triple protección, el mayor problema de durabilidad que pueden presentar las armaduras galvanizadas sería el ocasionado por la falta de **continuidad del revestimiento**, bien por defectos de ejecución o por daños debidos a su pérdida o deterioro posterior. La posibilidad de que ocurran estos tipos de daños es la que limita las operaciones de elaboración de la ferralla después del galvanizado. La superficie no cubierta de las barras no debe resultar en ningún caso inferior al 0,5 % de la superficie total de la barra en cada metro lineal [8]. La reparación de superficies puede realizarse como se ha indicado en el apartado 2.1. No se recomienda realizar el hormigonado si se detectan, en alguna ferralla elaborada o en alguna ferralla armada, defectos en el galvanizado, hasta que éstos sean reparados.

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

El dato más relevante de la capacidad de protección del galvanizado es el valor medio del espesor de revestimiento, que suele estar en el rango de 85 a 87  $\mu\text{m}$ , lo cual equivale a un intervalo entre 600 y 610  $\text{g}/\text{m}^2$  de masa de recubrimiento. En algunos países se limita además el espesor máximo en el orden de unas 200  $\mu\text{m}$ . En el Código Estructural [9], se indica exclusivamente que el espesor de galvanizado de las armaduras no podrá ser menor de 70  $\mu\text{m}$ , equivalente a 505  $\text{g}/\text{m}^2$ .

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

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

<b>Diámetro [mm]</b>	<b>Masa media mínima de recubrimiento [g/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Espesor medio mínimo de recubrimiento [μm]</b>
<b>&gt; 6</b>	<b>610</b>	<b>85</b>
<b>≤ 6</b>	<b>505</b>	<b>70</b>

Como se ha comentado anteriormente con relación a la adherencia de las barras galvanizadas con el hormigón (ver apartado 2.2), la durabilidad de estas armaduras podría ser cuestionable cuando se usan cementos de alta alcalinidad, ya que durante el proceso de fraguado existe una primera fase activa de corrosión del cinc, en la que combinado con el agua se forma hidróxido de cinc y se desprende hidrógeno. El hidróxido de cinc formado no tiene capacidad adecuada para proteger contra la corrosión y el resultado puede ser una pérdida uniforme de cinc de unas 5 a 10 μm. Con el aumento del pH, cuando los cementos son más alcalinos, aumenta el tiempo de disolución y corrosión antes del endurecimiento y el metal de cinc podría no resultar suficientemente pasivado durante un tiempo largo, con el consiguiente incremento de la pérdida de espesor de revestimiento.

En una segunda fase, el hidróxido de cinc se combinaría con hidróxido cálcico, resultando como segundo producto de corrosión una película protectora de hidroxincato cálcico. Estos productos sí pasivan el metal de cinc y detienen la pérdida del revestimiento y el desprendimiento del hidrógeno. Cuando se produce la pasivación, la superficie se cubre totalmente de productos de corrosión cristalizados.

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

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

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

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

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

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

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

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

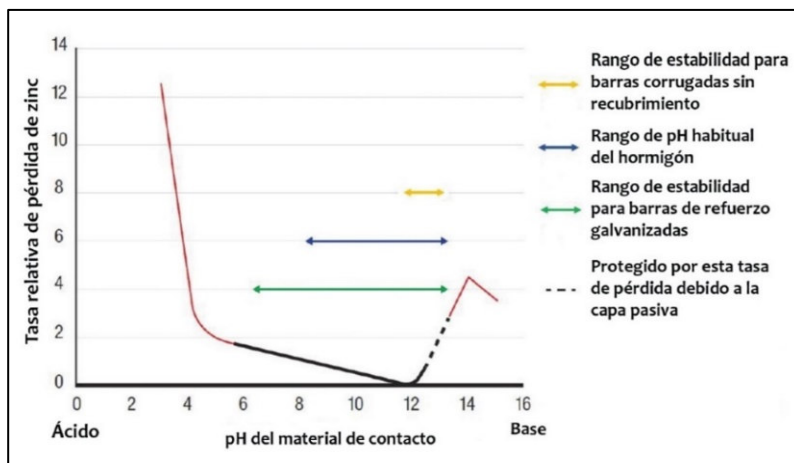


Figura 2: Rango de estabilidad del pH de la armadura en el hormigón © [13]

La **corrosión por cloruros** en un acero galvanizado es en forma de picaduras, su aparición es más lenta y menos dispersa que en un acero al carbono durante mucho más tiempo; por tanto, la formación de fisuras en el hormigón y su desconchado son también menores, por lo que se reduce considerablemente el deterioro de éste. Las capas de aleación cinc-hierro son ligeramente menos resistentes al ataque por cloruros que la capa de cinc puro, por lo que los revestimientos de cinc que no tuvieran esa capa externa se disociarían más rápidamente.

Entre los iones cloruro que pueden atacar el revestimiento de cinc hasta llegar a despasivarlo se pueden distinguir aquellos añadidos en la mezcla, que estarán presentes durante la formación de la capa pasivante, y los que penetran en el hormigón desde exterior. Los primeros son más perjudiciales, ya que pueden atacar el revestimiento antes y durante la formación de la citada capa protectora. En cambio, los segundos, penetrarán desde el exterior una vez formada esta capa, por lo que serán menos agresivos. El Código Estructural [9], para obras de hormigón armado expuestas a ambiente marino, limita la aportación del ion cloruro de todos los componentes del hormigón al 0,2 % del peso del cemento.

El contenido crítico de cloruros para el inicio de la corrosión es, en el caso de las barras corrugadas de acero galvanizado, mayor que en el caso de las barras de acero al carbono. En algunas publicaciones [13] se ha indicado como valor de referencia de 2 a 2,5 veces mayor; o incluso hasta 3 o 4 veces. En todo caso, tal y como se indica en el Código Estructural [9], para conocer el límite máximo de cloruros en cada caso particular, se deben llevar a cabo trabajos experimentales según UNE 83992-2 [14], realizados con los componentes del hormigón con los que se vayan a emplear cada tipo de armaduras. La mejora resultará especialmente significativa en hormigones carbonatados y no muy densos.

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

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

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

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

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

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

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

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

<sup>1)</sup> Para cualquiera de las tres clases de exposición XD

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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



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

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

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

- **Estación marítima de Denia.** La obra se realizó en el año 2011 y fue inaugurada en marzo de 2013. Se trata de una edificación con un total de 54.845 m<sup>2</sup> de los cuales 2.300 m<sup>2</sup> corresponden al propio edificio de tres alturas y el resto a tres muelles de atraque, campa, aparcamientos y superficies contiguas. Se utilizaron armaduras de acero al carbono en su mayor parte, y se destinaron las galvanizadas exclusivamente para las zonas de exposición más agresiva, principalmente en los pilares. Además, el hormigón (HA-50/F/20/IIIa) se dosificó con un inhibidor de la corrosión (CHRYSO CI dosificado: 6,4 l/m<sup>3</sup>) [17] y [18].
- **Lonja del puerto de Benicarló.** La obra se realizó en el año 2002 y fue inaugurada en 2005. Se utilizaron armaduras galvanizadas en pilares. El hormigón se ejecutó con cemento Pórtland CEM I 42.5 SRMR y el espesor de recubrimiento fue de 30 mm. Las armaduras se galvanizaron ya dobladas y ferralladas. Se usaron armaduras para los estribos de diámetros  $\Phi 12$  y  $\Phi 8$  mm; para las esperas se utilizó armadura de diámetro  $\Phi 16$  mm. Las uniones se hicieron con latiguillos de acero [17] y [18].
- **Zona pesquera e industrial del puerto de Vinarós.** La obra se realizó en el año 2008 y fue inaugurada en 2010. Se utilizaron armaduras galvanizadas en el interior de los bloques Bara, de diámetros  $\Phi 16$  mm para las barras longitudinales y de  $\Phi 12$  mm para el resto. Forma de paralelepípedo 1,5 m (altura) x 2,0 m (anchura) x 4,0 m (longitud) (Peso 13,7 t y Volumen 5,84 m<sup>3</sup>). Se ejecutaron con hormigón HA-30/B/20/IIIc+Qb [17] y [18].



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



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



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

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

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

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

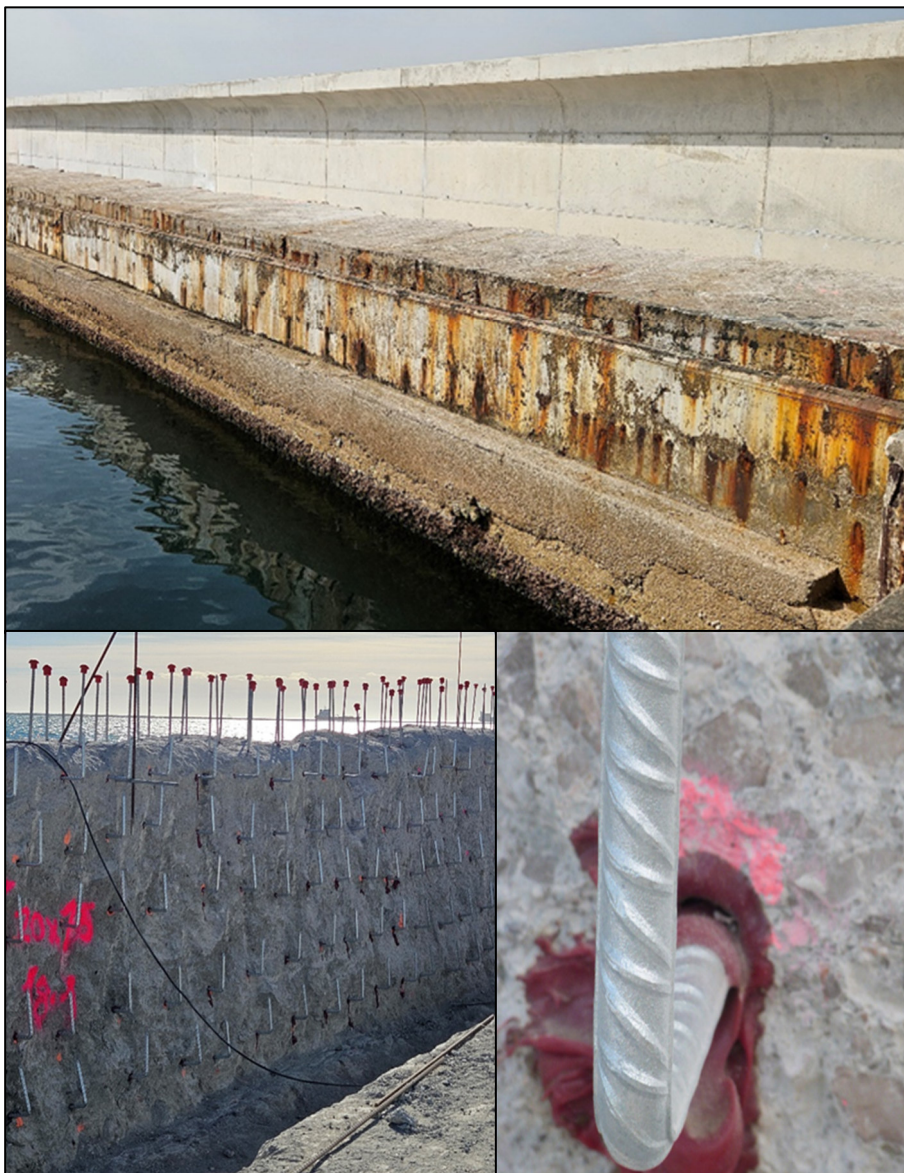


Figura 8: Arriba, vista exterior del espaldón reconstruido; abajo, conectores galvanizados anclados en el hormigón original

### 3. ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

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

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

#### 3.1. EL ACERO INOXIDABLE

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

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

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

En la Tabla 6, se incluye el porcentaje de los elementos principales de aleación de los aceros inoxidables según su microestructura, incluyendo exclusivamente los tipos que interesan para el armado del hormigón: ferríticos, austeníticos y austenoferríticos (dúplex).

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

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

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

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

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

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

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

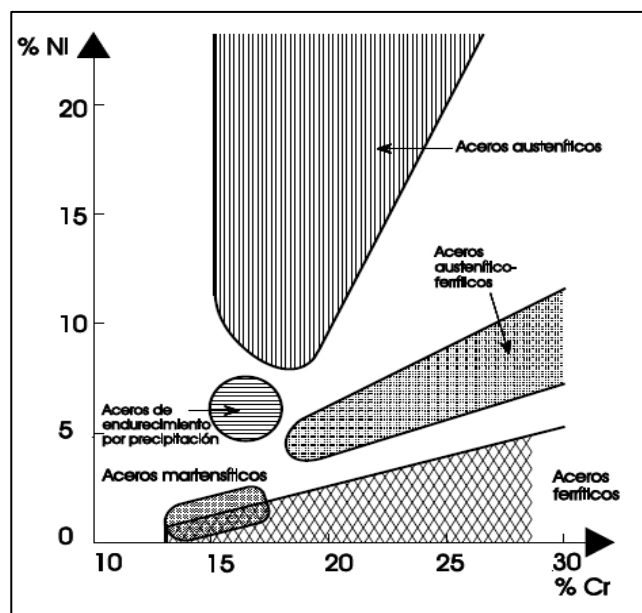


Figura 9: Tipos de acero inoxidable © [20]

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

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

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

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

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

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

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

Los aceros inoxidables para armaduras se fabrican como los tradicionales de acero al carbono; tanto mediante laminación en caliente, para los diámetros entre  $\Phi 6$  y  $\Phi 40$  mm, reduciendo el diámetro aprovechando la ductilidad del material a altas temperaturas; como mediante laminación en frío, para diámetros más pequeños entre  $\Phi 4$  y  $\Phi 16$  mm, reduciendo el diámetro a temperatura ambiente.



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

El Código Estructural [9] contempla el uso de aceros inoxidables soldables en las estructuras de hormigón armado, en forma de barras, rollos y alambres, todos ellos corrugados o grafilados como medida especial de durabilidad. Los tipos de acero contemplados son los ferríticos, austeníticos y dúplex. Sus propiedades en cuanto a **características mecánicas, resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad**, varían según el tipo y la composición química. Los productos de acero inoxidable deben cumplir los mismos requisitos que se especifican en la reglamentación para las barras, rollos y alambres de acero al carbono, salvo lo relativo a su composición química.

La **composición química** de los aceros inoxidables citados en el Código Estructural [9] se reproduce en la Tabla 7. El tipo EN 1.4003 es un acero inoxidable ferrítico muy común, que tiene una buena resistencia a la corrosión y a la tracción y también buena soldabilidad. El tipo EN 1.4301 es un acero inoxidable austenítico simple que posee buenas propiedades de resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad. El tipo EN 1.4482 es un acero inoxidable de baja aleación austenoferrítico (lean dúplex) con límite elástico dos veces superior al anterior y buena conformabilidad y resistencia a la corrosión. El acero inoxidable EN 1.4362 es también dúplex de baja aleación y se comporta como el anterior. El tipo EN 1.4462 es un acero inoxidable dúplex con una alta resistencia mecánica y excelente resistencia a la corrosión; es una solución muy apropiada donde la durabilidad sea crucial y el ambiente muy agresivo, ya que el molibdeno aumenta considerablemente la resistencia a la corrosión por picaduras.

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

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

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

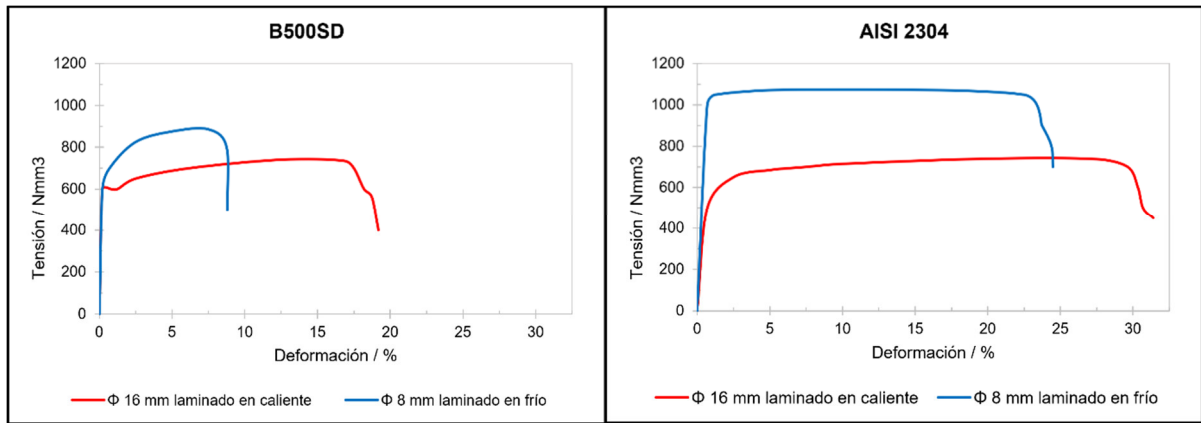


Figura 11: Diagrama tensión deformación de armaduras corrugadas en caliente y en frío. Izquierda, acero al carbono; derecha, acero inoxidable dúplex

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

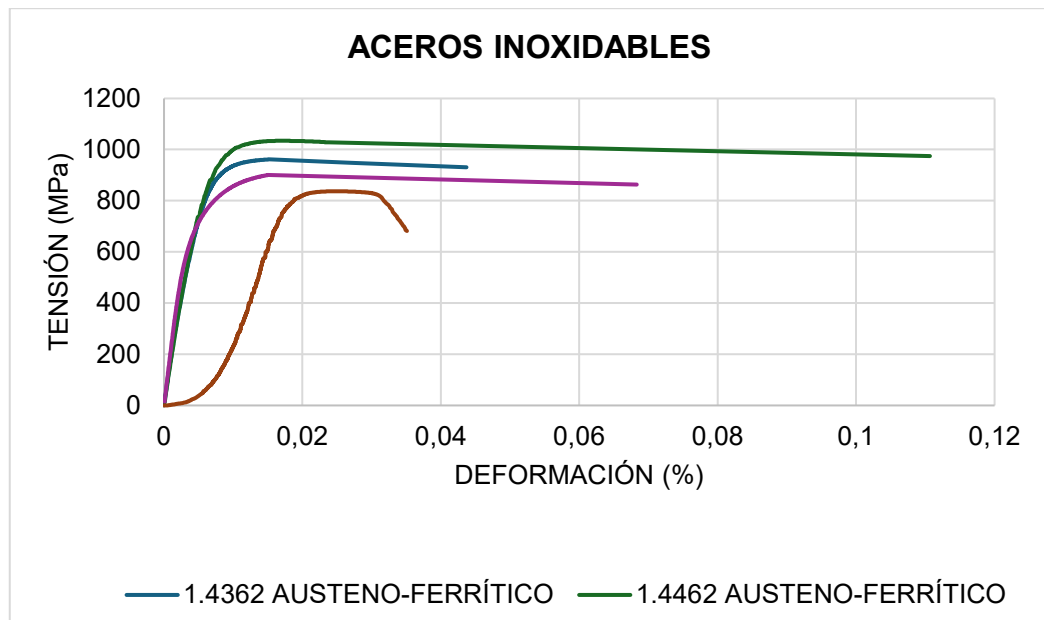


Figura 12: Curvas tensión-deformación para diferentes tipos de acero inoxidable corrugado

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

Respecto a la **manipulación y conformado**, las armaduras de acero inoxidable se cortan y doblan igual que las de acero al carbono. El atado en los procesos de colocación debe hacerse con alambre también de acero inoxidable, del mismo grado o de una aleación superior. Al manipular barras de acero inoxidable es recomendable evitar el contacto directo con las de acero al carbono, no apilándolas juntas. El acero limpio debe enderezarse, cortarse, doblarse y procesarse en equipos utilizados exclusivamente para el conformado de las armaduras de acero inoxidable, a fin de evitar la contaminación incrustada que podría romper la capa protectora de óxido de cromo.

Todos los **aceros inoxidables son soldables**, pero su soldabilidad no es ilimitada, por lo que, cuando sea necesario, el suministrador debe facilitar los procedimientos recomendados para realizar las soldaduras y asegurarse que éstas sean igualmente inoxidables y resistentes a la corrosión atmosférica. Es recomendable usar electrodos del mismo grado o de un grado más alto. En la zona afectada térmicamente se debe eliminar la capa de óxido que se forma por las altas temperaturas para reducir así la probabilidad de corrosión. Respecto a la soldabilidad de los aceros mencionados en la Tabla 7 [23]:

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

El Código Estructural [9] indica que el contacto entre acero convencional y armaduras de acero inoxidable está permitido, y que para soldar ambos aceros se recomienda usar un material de aportación sobre-alaeado, para que se pueda garantizar una buena resistencia a la corrosión de la unión y unas propiedades mecánicas apropiadas. Un ejemplo de material de aportación apropiado sería el tipo 23Cr12Ni [23].

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

### **3.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE**

Las armaduras de acero inoxidable tienen una gran **resistencia a la corrosión**; se oxidan formando en la superficie de las barras una fina capa de óxido de cromo muy densa que constituye una barrera contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de cubrición, se vuelve a formar inmediatamente, por combinación del cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente. El cromo es el elemento que le da a este tipo de acero la propiedad de inoxidable, que en muchos tipos se ve reforzada además por el níquel. Existen opciones de acero inoxidable totalmente resistentes a la corrosión, que garantizan la mayor durabilidad de las estructuras en ambientes muy agresivos. Durante su vida en servicio no se produce pérdida de sección, ni merma de su resistencia a la corrosión. Su deterioro es prácticamente inexistente. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable es intrínseca del material, y no depende de los acabados u otras condiciones superficiales

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.4. ESTRUCTURAS MÁS RELEVANTES EN EL ÁMBITO COSTERO ESPAÑOL CON ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

El acero inoxidable es una de las opciones más seguras y que más fuerza ha ganado en proyectos donde se exige una mayor durabilidad. Se usa tanto para estructuras nuevas como para rehabilitaciones, pero su empleo, aunque es abundante, no se ha generalizado, ni siquiera en ambientes muy agresivos. Sus aplicaciones son variadas: puentes, aparcamientos, túneles, pasos subterráneos, muros de contención, estructuras marinas y portuarias o, en general, estructuras costeras.

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

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

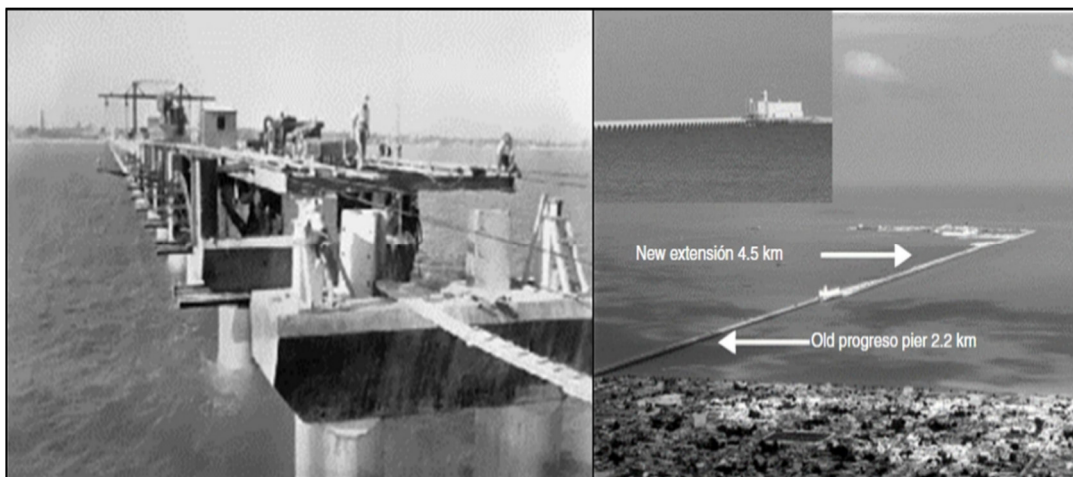


Figura 14: Puente Progreso en Yucatán (Mérida, Méjico): a la izquierda vista de pilas y vigas transversales durante el proceso de construcción y a la derecha fotografía aérea del antiguo muelle y la ampliación construida en los años 80 © [26]

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

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

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



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

También es importante citar como obra de referencia marítima la **extensión de Mónaco hacia el mar**, ejecutada mediante cajones portuarios construidos con acero inoxidable de fabricación española [28]. Se trata de una extensión artificial de 60.000 m<sup>2</sup> construida sobre un manto de rocas y con arena traída de Sicilia. La barrera de protección frente al mar de esta nueva extensión está formada por 18 cajones de 30 m de largo y 24 m de alto y un peso de 10.000 t. Son de tipo Jarlan de hormigón armado, con las barras de acero inoxidable colocadas en la zona exterior de los pilares y entre los muros de la parte hueca del cajón por donde circula el agua de mar. La cuantía de acero es de 4.000 t de corrugado inoxidable tipo dúplex EN 1.4362 con diámetros entre  $\Phi 12$  y  $\Phi 40$  mm, que garantizan una durabilidad para el proyecto de 100 años [28].

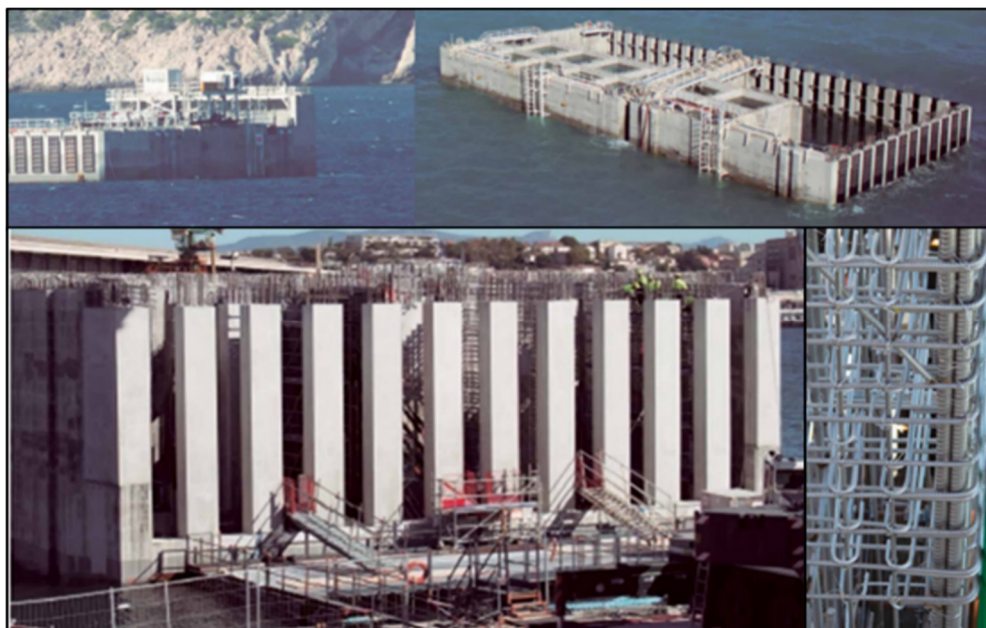


Figura 16: Arriba, desplazamiento de los cajones; abajo, fabricación de los cajones y detalle de armadura © [28]

## 4. ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (FRP)

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

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

### 4.1. POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)

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

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

Los polímeros reforzados con fibras están formados por **fibras continuas** impregnadas de **resina polimérica**. Las fibras tienen alta resistencia y rigidez y son la columna vertebral del material, mientras que la matriz polimérica ata y protege a las fibras, las mantiene separadas y transfiere las tensiones. La resina debe ser química y térmicamente compatible con las fibras, y juega un papel importante en el control del comportamiento tenso-deformacional y en la resistencia en ambientes corrosivos.

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

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

Para el hormigón armado en ambiente agresivo, las barras de polímero reforzado más usadas como armadura son las de fibra de vidrio (GFRP), y las resinas más habituales, por sus buenas prestaciones para el ambiente alcalino del hormigón, son las de viniléster, que se encuentran dentro del grupo de las resinas termoestables.

El **proceso de fabricación** más habitual de las barras de FRP es la **pultrusión**. Se trata de un proceso productivo por medio del cual se obtienen de forma continua materiales compuestos de sección constante. Durante el mismo, se somete a las materias primas a arrastre, para formar la barra, y parado, para realizar operaciones de impregnado, conformado, curado y corte.

Para **mejorar la adherencia** con el hormigón de las barras, hay varias técnicas, como la impresión de deformaciones en la superficie, la aplicación de un revestimiento de arena, la sobreposición de una nueva superficie o la combinación de varias. En caso de emplear arena con este objetivo es importante evitar el riesgo de reacción expansiva en el hormigón (reacción de sílice alcalina o carbonato alcalino).

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

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

Una de las primeras **publicaciones de referencia** [29], se debe a la FIB (Fédération internationale du béton); se trata de un informe técnico que repasa las principales propiedades de las barras de FRP haciendo especial énfasis en la durabilidad y mostrando también diferentes modelos y filosofías de diseño. Actualmente, este documento está en proceso de revisión, ya que el conocimiento del material y de las estructuras armadas con él ha aumentado notablemente en los últimos años. Son muchas las publicaciones más recientes que han ido incorporando esos avances. Del mismo corte, en cuanto al tipo de documento, es el publicado en 2021 en francés, y posteriormente actualizado en 2023 en inglés por la AFGC (Association Française de Génie Civil), que supone una guía completa o estado del arte acorde al conocimiento actual [30].

En cuanto a **códigos y normativa**, el conjunto más completo y actualizado se encuentra en el seno de la ACI (American Concrete Institute) y de la ASTM (American Society for Testing and Materials) norteamericanos. La ACI tiene numerosas publicaciones, entre las que se pueden destacar, por considerarlas suficientes para el diseño de una estructura armada con GFRP, la guía de diseño ACI 440.1R-15 [31] y el código ACI CODE-440.11-22 [32]; el primero, es más general y se podría aplicar en todo tipo de estructuras armadas con barras poliméricas, mientras que el segundo se centra en estructuras de edificación y armaduras de fibra de vidrio. La ASTM ha desarrollado un acervo completo de normativa de ensayo para determinar las propiedades específicas de estas armaduras y también dispone de una norma de producto, la D7957/D7957M-22 [33], que incluye las propiedades mínimas que deben cumplir las armaduras GFRP.

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

A **nivel europeo**, se está en proceso de redacción de una nueva generación de Eurocódigos Estructurales. En concreto, el proyecto de revisión de la norma UNE-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures [34], incluye, entre otras novedades, un anejo informativo dedicado a las reglas específicas de aplicación cuando se emplea la alternativa de armaduras FRP para el refuerzo interno de estructuras sometidas predominantemente a cargas estáticas. Además, aunque estas armaduras no están cubiertas por ninguna norma armonizada, recientemente se ha aprobado y publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea, al amparo del Reglamento de Productos de Construcción, el Documento de Evaluación Europea EAD 260023-00-0301 [36], que ya permite su libre comercialización en el mercado único con marcado CE y, por tanto, mejora la información concreta y específica de las características, propiedades y prestaciones de los productos de cada fabricante.

#### 4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ARMADURAS FRP

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

- Mayor resistencia a la tracción longitudinal que el acero.
- Peso considerablemente más ligero, lo que beneficia su transporte y colocación en obra. Su densidad oscila entre 1,25 y 2,1 g/cm<sup>3</sup>.
- Transparencia magnética (fibra de vidrio).
- Aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico (fibra de vidrio).
- Facilidad de demolición para estructuras temporales.

Las **características físico-mecánicas** de las armaduras poliméricas **difieren notablemente de las de acero** y, por tanto, así sucede también con las propiedades resistentes del hormigón armado resultante. Aunque las reglas de diseño del hormigón reforzado con barras de FRP son análogas a las del hormigón reforzado con barras de acero, no es posible sustituir directamente una tipología de armaduras por otra, debido a las numerosas **divergencias** que tienen sus características y propiedades y, por tanto, a causa del diferente comportamiento de los dos materiales:

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

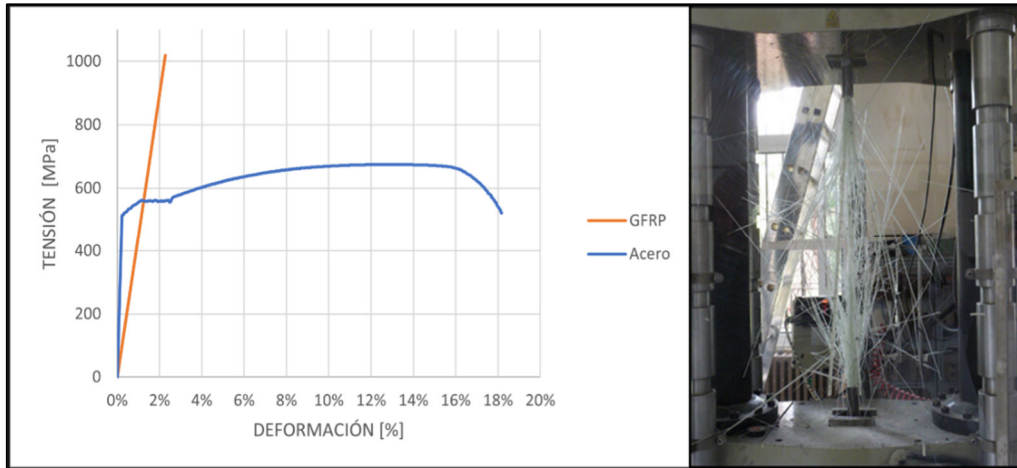


Figura 17: Izda, resistencia a tracción: comparativa entre acero y GFRP; dcha, rotura por tracción en laboratorio CEDEX

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

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

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

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

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

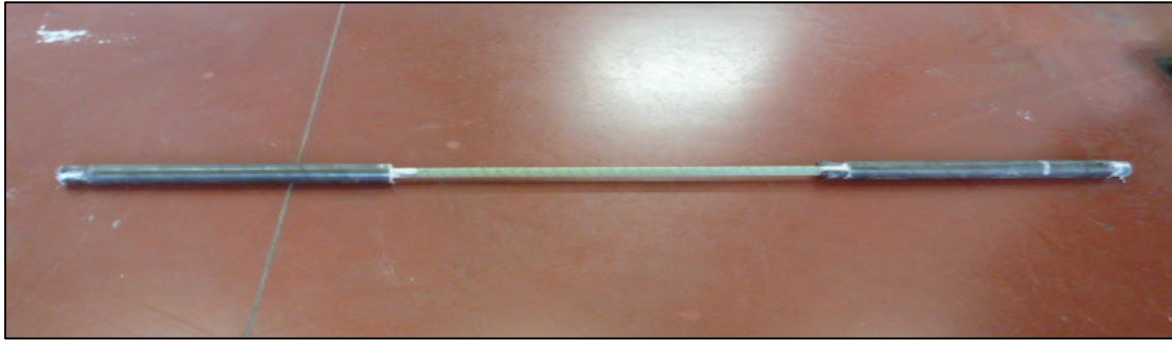


Figura 18: Barra de GFRP Ø20 preparada para la realización del ensayo de tracción

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

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

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

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

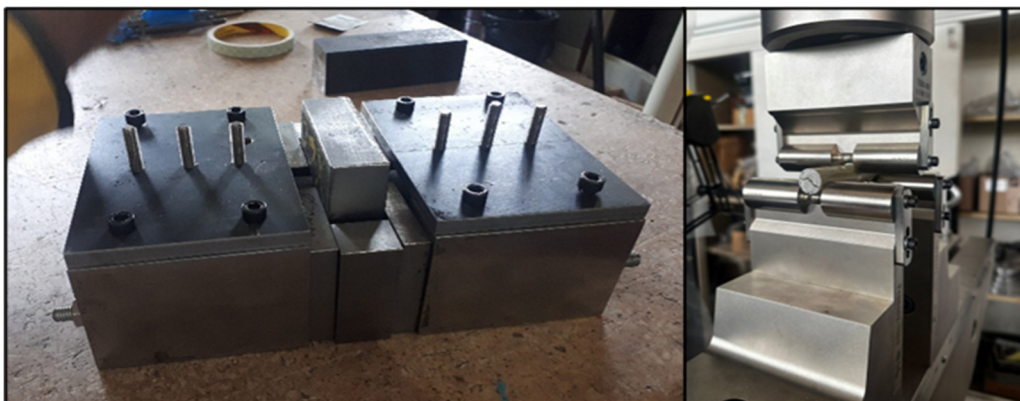


Figura 19: Resistencia a cortante. Izda.: cortante transversal; Dcha.: cortante interlaminar

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

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

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

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

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

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

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

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

La **adherencia con el hormigón** de las armaduras FRP depende de la composición resina-fibra, del proceso de fabricación, de las condiciones medioambientales y, sobre todo, del tipo de superficie de acabado de las armaduras. La interacción de la unión de las barras de FRP con el hormigón es diferente a la del acero en muchos aspectos. En el caso de las barras de acero corrugadas, la interacción surge principalmente de la acción mecánica de la corruga de la barra contra el hormigón. En el caso de las barras de FRP, con un módulo elástico más bajo y con ondulaciones superficiales menos prominentes que las corrugas de las barras de acero, la interacción en el contacto tiene un carácter más friccional. El fallo de la adherencia en las barras de acero se debe al aplastamiento del hormigón en la zona cercana a las corrugas, mientras que en el FRP se debe principalmente al fallo parcial en el hormigón y a posibles daños en el acabado superficial de la armadura [29].

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



Figura 20: Distintas superficies de acabado en armaduras GFRP

Existen algunas características de las armaduras GFRP que no son, a priori, ventajosas con relación a las de acero, o, al menos, necesitarían un **mayor trabajo de experimentación** para alcanzar un conocimiento más detallado [31]:

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

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

### 4.3. DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS FRP

Los factores que afectan a la **durabilidad de las armaduras poliméricas** embebidas en el hormigón y el modo en que lo hacen son muy diferentes a los del acero. La diferencia más significativa es que no se ven afectadas ni por la carbonatación del hormigón ni por la presencia de cloruros, y, en general, no se deterioran en presencia de un gran número de sustancias agresivas.

No obstante, las características de las barras de FRP pueden verse modificadas antes, durante y después de colocadas en obra, tanto disminuyendo como aumentando. Ambientes con agua, radiación ultravioleta, elevadas temperaturas y soluciones alcalinas, ácidas o salinas, pueden afectar a la resistencia y/o rigidez de este tipo de armaduras. La exposición simultánea a rayos ultravioleta y humedad, antes de la colocación en obra, puede ser especialmente perjudicial. En algunas guías de diseño la durabilidad de este tipo de armaduras se expresa en términos de absorción de agua. La ASTM prescribe absorción menor del 1% según ensayo normalizado [33].

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

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

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

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



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

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

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

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



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

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

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

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

- Utilizar espesores de hormigón de recubrimiento menores, que podrían reducirse hasta 50 mm en ambiente marino con cloruros [40] y [41].
- Prescindir de dosificaciones de hormigón especialmente diseñadas para prevenir la corrosión del acero; principalmente en lo relativo al tipo y cantidad de cemento y a la relación agua/cemento.
- Proyectar para una anchura de fisura mayor en ambientes agresivos.
- Poner en contacto y usar de modo combinado con cualquier tipo de armadura de acero.

#### 4.4. ESTRUCTURAS MÁS RELEVANTES EN EL ÁMBITO COSTERO ESPAÑOL CON ARMADURAS GFRP

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

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

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



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

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

- **Bloques del dique de punta Langosteira (A Coruña).** La obra se ejecutó en 2017. El refuerzo del manto principal del dique de abrigo de Punta Langosteira, en el Puerto de A Coruña consistió en la fabricación y colocación de 35 bloques cúbicos de 4 m de lado, de hormigón HM-30/20/I+Qb+E. 31 bloques de densidad 2,66 t/m<sup>3</sup> y los 4 restantes de densidad 2,82 t/m<sup>3</sup>, armados en ambos casos con 60 barras de GFRP de diámetro  $\Phi 32$  mm. Se colocaron

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

- **Espaldón del dique suroeste de Escombreras, Cartagena (Murcia).** A los 15 años de su puesta en obra, el hormigón presentaba problemas severos de corrosión. La reparación se ejecutó en 2015 y consistió en la demolición del espaldón de 400 m de longitud y recrecido con hormigón HA-35 desde la cota +8 a la +10. El recrecido se debió a que, además del daño por corrosión, se producían rebases en esa zona del dique. El armado se ejecutó con barras de acero al carbono en la cara interna, y de polímero reforzado con fibras de vidrio en la cara externa. Se colocaron 9 barras GFRP  $\Phi 32$  mm por metro lineal. Aplicando la normativa italiana, la armadura transversal debía ser del 20 % de la vertical; así se emplearon 5 barras  $\Phi 20$  mm por metro lineal [43]. Se colocaron en total 67.000 kg de armaduras GFRP (Información facilitada por la Autoridad Portuaria de Cartagena y la empresa RTHp. Ver Figura 25).
- **Espaldón del dique de la bocana norte del puerto de Barcelona.** A los 5 años de su construcción ya tenía problemas de corrosión de las armaduras de acero. Se hicieron algunas obras de reparación, y finalmente en el año 2022 se hizo necesaria una actuación para su rehabilitación completa. La solución propuesta y ejecutada, entre finales de 2023 y principios de 2024, consistió en el saneo de superficies de hormigón tanto del lado mar como del lado puerto en una profundidad estimada de 20 cm y la sustitución del armado del espaldón, empleando barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP). Finalmente se procedió a la demolición y reconstrucción de los 130 cm superiores del espaldón. La normativa y recomendaciones utilizadas para el desarrollo del proyecto de rehabilitación fueron el FIB bulletin 40 [29], el Código Estructural [9] y el anexo R del nuevo Eurocódigo 2 en redacción [38].

Como resultado de los cálculos se colocaron 5 barras de diámetro  $\Phi 25$  mm por metro lineal en el lado mar y 5 barras de diámetro  $\Phi 16$  mm por metro lineal en el lado tierra. Como armadura longitudinal se dispusieron 5 barras de diámetro  $\Phi 16$  mm por metro lineal. El recubrimiento de todas las armaduras de GFRP fue de 50 mm. No fue necesaria armadura de cortante. Las superficies se trataron con puentes de unión entre hormigones y conexiones ejecutadas con pernos de acero galvanizado de diámetro  $\Phi 16$  mm cada  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup> de superficie de espaldón. (Ver Figura 8 y Figura 26).



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

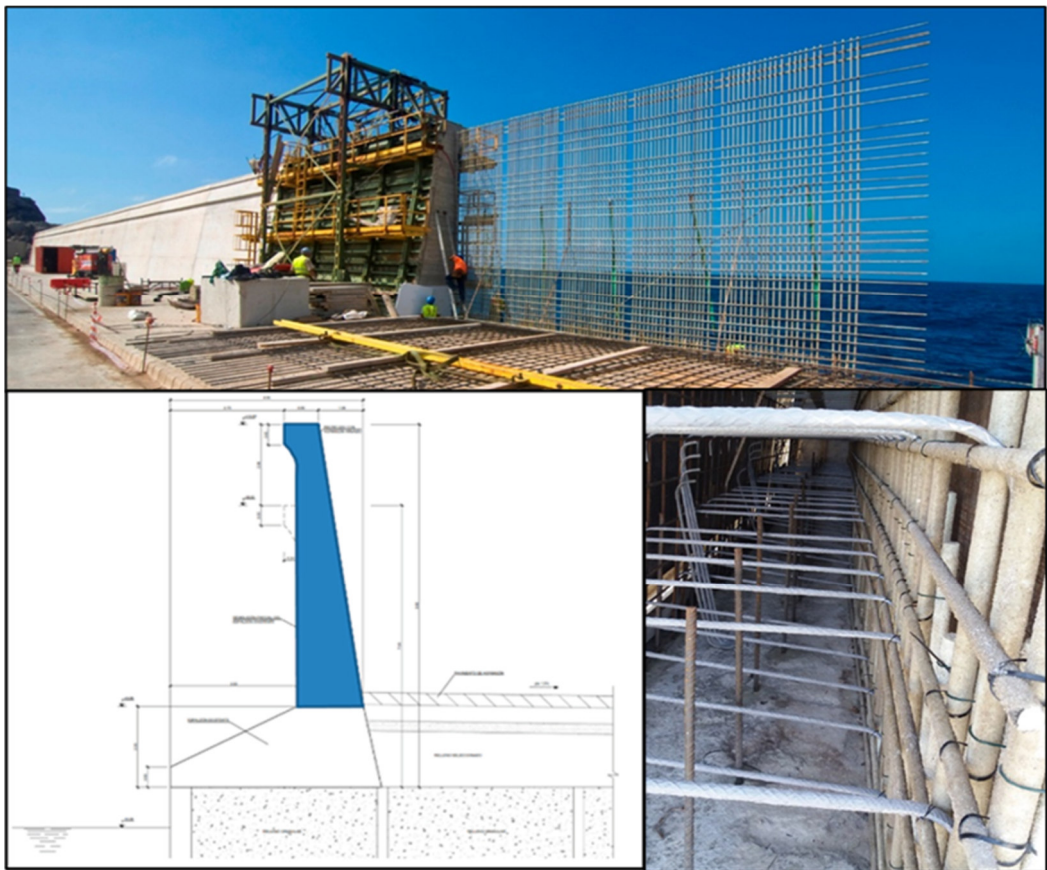


Figura 25: Espaldón de Escombreras. Arriba, armadura GFRP durante una de las fases de hormigonado; abajo, croquis de la intervención y armadura interior © [43]



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

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

Para impulsar el desarrollo de innovaciones tecnológicas en obras de construcción, hoy día es fundamental cuantificar las **implicaciones económicas y medioambientales** que conllevan, así como los impactos que producen. Está demostrado que el hormigón armado con barras alternativas a las de acero al carbono es una solución válida para evitar o retrasar la **corrosión** en ambiente marino y por tanto aumentar la **durabilidad del hormigón**. Ese aumento en la durabilidad repercute directamente en algunos aspectos relativos a la valoración económica y medioambiental, siempre y cuando se considere en dicha valoración el **ciclo de vida**<sup>1</sup> completo de las estructuras, y, por tanto, repercute directamente en la **sostenibilidad** de las mismas. Es importante entonces realizar estudios que cuantifiquen esta repercusión en estructuras marítimas y portuarias, como pueden ser cajones, diques, losas, vigas cantil, pantalanés, etc. y, en general, en cualquier estructura que se ubique en ambiente especialmente susceptible a la corrosión.

El estudio de cada alternativa, en cuanto al empleo de materiales y/o procesos constructivos, y de sus alcances económicos y medioambientales durante el ciclo de vida ayudará a la toma de decisiones teniendo en cuenta, no sólo el resultado de la evaluación en el momento de la construcción, sino también el resultado completo en todo el periodo de servicio hasta el fin de su vida útil. Estos enfoques forman parte de la perspectiva global de evaluación de la sostenibilidad y están dentro del marco de la Directiva Europea 2014/24/UE sobre contratación pública [44], [45].

Para el **análisis de los costes del ciclo de vida** (LCC - Life-Cycle Cost) existe normativa internacional que recoge metodología estandarizada. Se pueden citar como más significativas las normas ISO 15686-5 [46] y UNE-EN 17472 [47]. La esencia del procedimiento consiste en valorar, tanto los costes iniciales, como todos aquellos en los que se puede incurrir con cada alternativa durante un periodo de referencia dado (por ejemplo, 100 años). Un análisis de este tipo puede tener como objetivo elegir entre diferentes alternativas de diseño para el conjunto o para una parte de una obra en la etapa de proyecto y construcción de ésta, o en la etapa de uso (por ejemplo, ante la necesidad de una rehabilitación estructural).

Las operaciones y costes en los que se incurre con cada alternativa deben garantizar en todo momento el cumplimiento de los estándares mínimos de funcionamiento del activo bajo análisis, así como que las soluciones son equivalentes a nivel usuario y que la unidad funcional a que se referencian los costes es siempre la misma.

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

- **La etapa de producción de los materiales.** Todas las alternativas de armado consideradas en este trabajo resultan de mayor coste en la etapa de fabricación del material. Este encarecimiento inicial depende de la tipología: las galvanizadas son menos gravosas que las de acero inoxidable o GFRP. Respecto a estas últimas, habría que tener en cuenta que no se puede comparar directamente el precio del kg, debido a que las densidades son muy distintas (aproximadamente 1:4), pero además habría que considerar, si fuera el caso, la diferente cuantía necesaria de armadura GFRP en una misma sección resistente; por ejemplo, entre ser aproximadamente igual [40] [48] o estar en una relación de 1,5 veces superior a la del acero [41]. Así, el precio por kilo podría ser incluso más de 14 veces superior [48], pero, teniendo en cuenta la relación de densidades, ese aumento se reduciría a aproximadamente 3,6.

El encarecimiento inicial de los materiales, para cualquiera de estas alternativas, podría ser menor si, además de su diferencia de coste, se tuvieran en cuenta en el análisis los posibles

<sup>1</sup> Según la versión corregida de 2021 de la norma UNE-EN ISO 14040 [56], el ciclo de vida se define como las *etapas consecutivas e interrelacionadas, desde la adquisición o generación de materia prima a partir de recursos naturales hasta la disposición final*.

ahorros en otros componentes del hormigón, como podrían ser los debidos al empleo de una menor cantidad de cemento, adiciones, inhibidores de corrosión, etc. Otras diferencias para analizar, podrían ser la disminución del espesor de recubrimiento de hormigón, como se ha mencionado en los apartados anteriores, o las derivadas del empleo de áridos reciclados o incluso de agua de mar para el amasado del hormigón, en las soluciones no corrosibles (por ejemplo, descontando los costes de desalinización), que podrían llegar a ser muy significativos en países con escasos recursos hídricos [49] [48]; por el contrario, en este tipo de hormigones habría que considerar costes adicionales debidos al empleo de plastificantes u otros aditivos, o a la necesidad de un aumento del contenido de cemento para conseguir la resistencia mínima deseada. En todo caso, la diferencia de costes debida a la dosificación del hormigón parece que es despreciable frente a la influencia del cambio de armaduras [48].

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

Para el caso del acero inoxidable, se ha llegado a valorar que, aunque éste resulta entre 6 y 10 veces más caro que el convencional, el coste total de hormigón se incrementaría menos de un 20 %, al poder rebajar su calidad, recubrimiento, etc. [50]. También se han hecho valoraciones del incremento del coste total en función del porcentaje de sustitución de la armadura al carbono convencional por la de acero inoxidable (en este caso, en estructuras de puentes), llegándose a valores del 30 % del coste total, cuando el porcentaje de sustitución es del 100 % [1]. En otras referencias, en las que se han evaluado diferentes alternativas para el refuerzo del hormigón (en este caso para un tanque de cloración de agua), está valoración podría llegar a más del 80 %, teniendo en cuenta diferencias geográficas y coyunturales [40]. Aunque esta última valoración es muy alta, realmente el coste del acero inoxidable es muy fluctuante según las zonas geográficas y la situación económica; influye además el tipo de acero inoxidable que se requiera, siendo, en principio, el coste más variable y probablemente más elevado en los aceros inoxidables con mayor contenido de níquel y molibdeno [1].

Otra alternativa, para reducir los costes iniciales manteniendo una alta durabilidad, consistiría en el empleo de armaduras combinadas de distinta tipología en una misma sección de hormigón, reservando las armaduras no corrosibles a las zonas más expuestas al ataque por corrosión y dejando las convencionales de acero en el resto. Como se ha mencionado, esta fue la solución que se adoptó en el dique de Escombreras en Cartagena, donde el estudio de costes de ejecución material concluyó que la alternativa con barras GFRP resultaba un 26 % más costosa, mientras que la solución mixta con este mismo tipo de barras elevaba el coste tan sólo un 4 % con relación a las armaduras convencionales [43].

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

Como ejemplo, en el caso de las armaduras GFRP, este tipo de costes resultará, en general, menor en cuanto a transporte y montaje [48]; pero su empleo también puede implicar algunos sobrecostes de construcción, por ejemplo, debidos a que necesiten más atado ante la posibilidad de que, por su menor peso, puedan flotar en el hormigón [40].

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

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

Además, habría que considerar los costes de inspección y mantenimiento rutinario; y adicionalmente, para aquellas alternativas que tengan una vida útil inferior al periodo de referencia, también habría que incluir los costes de inspecciones detalladas y de reparaciones para recuperar los estándares mínimos exigidos. Existen programas y modelos probabilísticos para determinar si se producirán episodios de corrosión durante el periodo de referencia (y, por tanto, si se incurrirá en dichos costes), que tienen en cuenta, además de la tipología de armado, el tipo de hormigón, el recubrimiento y la estrategia de reparación que se emplee [40] [48] [50] [51] [52].

- La **etapa de demolición**. Al final de la vida útil habría que considerar los costes de demolición y vertido, y, si fuera el caso, descontar el beneficio obtenido del reciclado de los materiales. Todos los tipos de acero son reciclables y se puede estimar que hasta el 90 % del material es recuperable. La cuantía económica obtenida de la chatarra dependerá del tipo de acero y será mayor para el inoxidable. Según la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG), el cinc es considerado un material 100 % recuperable y casi un 30 % de su producción total se lleva a cabo con material reciclado. En el caso del material polimérico, aunque existen investigaciones que tratan de desarrollar metodologías de reciclado y reutilización, no están a un nivel como para que se pueda considerar algún beneficio por su aprovechamiento tras la demolición. Si al final del periodo de referencia, alguna alternativa tiene una vida remanente de servicio, ésta podría contabilizarse también como un beneficio [48] [51].

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

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

Siendo en el año  $n$ ésimo,  $N$  el periodo de referencia,  $C_n$  los costes en el año  $n$  y  $r$  la tasa de descuento. Respecto a esta última, además de ser difícil de prever, los resultados de estos estudios siempre son muy sensibles a ella, de modo que, cuanto mayor sea  $r$ , menor repercusión tendrá la elección de las alternativas más durables en la disminución relativa del valor NPC.

Esto es debido a que las alternativas que requieren menos mantenimiento apenas variarán su resultado al variar la tasa de descuento, mientras que las que sí requieren costes diferidos en el tiempo, éstos tendrán menos peso en el resultado final a medida que aumenta el valor de  $r$ .

Por ello, la mayoría de los análisis de este tipo incluyen una evaluación de la sensibilidad de los resultados a la tasa de descuento. Tasas superiores entre 1,3 y 5 % para acero inoxidable, y entre 4 y 10 % para armaduras FRP, pueden servir de referencia como límite de eficacia económica de estas alternativas [40], [41], [48], [49], [51].

En todo caso, cada estructura tiene que ser analizada independientemente y no es posible extrapolar resultados de una construcción a otra. En la decisión sobre la solución más ventajosa, principalmente cuando existe una incertidumbre alta sobre la futura fluctuación de la tasa de descuento real, habrá que tener en cuenta que una alternativa puede suponer una eficacia de coste menor que otra, para una determinada tasa de descuento, pero que dicha eficacia puede seguir siendo de signo positivo hasta tasas de descuento más altas. Igualmente será necesario realizar análisis de sensibilidad con relación a cualquier otro factor que aporte incertidumbre en el tiempo, como pueden ser la posibilidad de retardo o aceleración de los procesos de corrosión, la variación de los costes de los materiales y de la mano de obra, etc.

Simplemente como referencia, en la Tabla 10 se recogen algunos casos concretos de estudios de este tipo obtenidos de la bibliografía, para un periodo de referencia de 100 años, y que se han considerado representativos de la temática de este artículo. Se recoge el porcentaje de disminución del NPC de cada alternativa con relación a la opción de acero al carbono, indicando entre paréntesis el número de años necesario para que el NPC de las distintas alternativas sea inferior al que se obtendría empleando armaduras de acero al carbono y entre corchetes, la tasa de descuento a partir de la cual las soluciones no son económicamente ventajosas para el periodo de referencia de 100 años.

Tabla 10: Estudio bibliográfico % (años) [%] – GS: armaduras galvanizadas; ES: armaduras recubiertas de resina epoxi; SS: armaduras de acero inoxidable; GFRP armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio

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

\*Periodo de referencia 79 años.

En la Figura 27 se ilustra a modo de ejemplo los resultados que se podrían obtener para el valor NPC en función de la influencia de la tipología de las armaduras en la durabilidad de una estructura de hormigón armado.

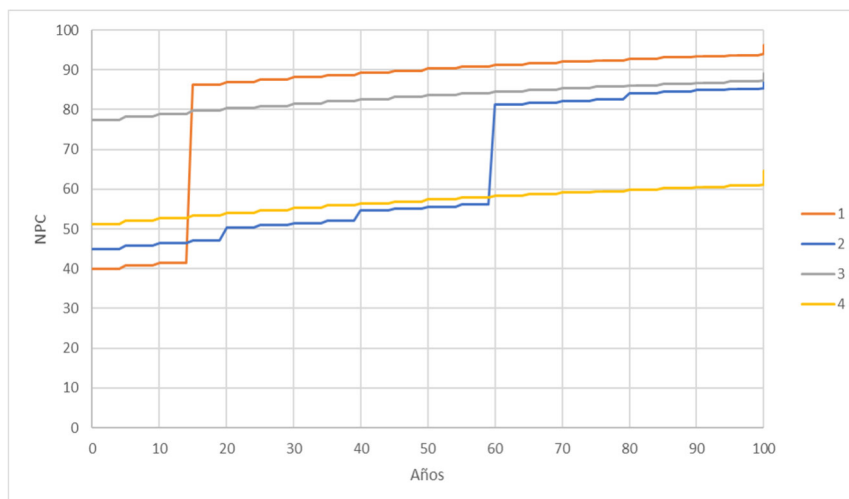


Figura 27: Ejemplo de curva comparativa de los costes actualizados del ciclo de vida de una estructura de hormigón armado con 4 alternativas de armaduras, para un periodo de referencia de 100 años

La curva 1 de la Figura 27 trata de representar la situación real de algunos diques en el ámbito costero español, construidos con armadura de acero al carbono tradicional y que han tenido que sufrir reconstrucciones importantes en un periodo de tiempo inferior a 20 años, la reconstrucción modelizada en la figura supone su ejecución con armaduras no corrosibles. La curva 2 representaría un hormigón armado, con acero protegido con algún tipo de revestimiento o protección capaz de retrasar el fenómeno de la corrosión, pero no de evitarla durante todo el periodo de referencia.

Las curvas 3 y 4 corresponderían a alternativas cuyo tiempo previsto de vida útil es superior al tiempo de referencia del estudio. En ambos casos, el valor actual de los costes se movería entre ambas curvas, siendo mayor o menor en función del precio de mercado de cada material, de la coyuntura económica general y de la ubicación geográfica. Como se puede apreciar, en estos casos el coste más significativo sería el inicial, y, a pesar de que ambas alternativas se corresponden con los costes más altos de este tipo, pueden llegar a ser muy ventajosas cuando se considera el coste completo del ciclo de vida.

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

Una vez valorados todos los costes asociados a cada alternativa, un paso más consistiría en el estudio de la **contribución de cada alternativa a la sostenibilidad y al desarrollo sostenible**. En este sentido, el análisis del coste del ciclo de vida es sólo una parte que valora los aspectos económicos, a los que habría que añadir los **medioambientales** e incluso **sociales**. En general, la evaluación medioambiental y de costes se estudia separadamente, aunque parece claro el interés que tendrá integrar ambos tipos de estudios para poder comparar todos los costes asociados a cada alternativa, incluyendo las llamadas *externalidades medioambientales* [45]. Dicha integración se podría realizar si se cuantificaran los aspectos medioambientales en términos monetarios [53], por ejemplo, si existe un pago o tasa real por la emisión de CO<sub>2</sub> o cuando existen costes asociados al cumplimiento de la legislación vigente en materia de construcción sostenible, como podrían ser los debidos al tratamiento de desechos al final de la vida útil de los productos de construcción.

En cuanto a los costes **sociales**, se podrían considerar, por ejemplo, los costes del usuario relacionados con la interrupción del servicio, total o parcialmente, durante las etapas de construcción y mantenimiento de la estructura. O incluso otros impactos de aún más difícil valoración objetiva, como podrían llegar a ser las consideraciones estéticas en obras de rehabilitación de construcciones singulares con valor patrimonial, en las que evitar la afluencia de manchas en la superficie del hormigón debidas a los productos de corrosión puede llegar a ser una de las causas determinantes en la elección de una alternativa [54].

Para la **valoración medioambiental del ciclo de vida** (LCA - Life-Cycle Assessment) también existe normativa que recoge metodología estandarizada y criterios para su valoración. Se pueden citar como más representativas las normas UNE-EN ISO 14040 [55], [56], UNE-EN ISO 14044 [57], [58], [59] y UNE-EN 15804 [60], [61]. En nuestro caso, el objetivo sería valorar, para posteriormente decidir, las distintas alternativas de armado del hormigón teniendo en cuenta sus repercusiones medioambientales durante el ciclo de vida, planteando cada alternativa con suposiciones y contexto equivalentes. Para el análisis es necesario definir la unidad funcional del sistema y el periodo de referencia; así como prever el programa de mantenimiento y rehabilitación que necesitará cada opción de armado en función de los materiales empleados y el avance previsto de la corrosión, garantizando siempre unos estándares mínimos de funcionamiento. La metodología propuesta por las normas referenciadas detalla las distintas fases (que podrían ser iterativas) para la realización de un estudio completo y que consistirían en:

- Definición del **objeto** y del **alcance**. Para la temática que se plantea, sería la comparación de alternativas de armado desde el punto de vista de sus implicaciones medioambientales, considerando las mismas fases del ciclo de vida que se han planteado en el análisis económico, y preferiblemente también la misma unidad funcional y periodo de análisis. Dadas las dificultades de realizar este análisis en el ciclo completo de vida, principalmente por la dificultad de encontrar datos fiables y por las muchas incertidumbres que se pueden plantear, muchos estudios se limitan a las fases de producción de los materiales, transporte y construcción (cradle-to-gate) y es más difícil encontrar otros que incluyan además las fases de mantenimiento y fin de vida de la estructura (cradle-to grave).
- Análisis del **inventario** del ciclo de vida, donde se trata de recopilar y validar los datos de entrada y salida del sistema. Dichos datos procederían de los flujos elementales e incluirían la utilización de recursos (consumo de materias primas: cemento, agua, etc. y consumo de energía: transporte, amasado del hormigón, etc.) y las emisiones al aire y los vertidos al agua y al suelo. Los flujos elementales se producirán durante todo el ciclo de vida y, una vez más, las alternativas que requieran mayores actuaciones de reparación tendrán que asumir flujos adicionales en determinados momentos del ciclo, debido a la demolición y reciclado de materiales dañados, a la producción y transporte de nuevos materiales y a la ejecución de las obras necesarias.
- Evaluación del **impacto** del ciclo de vida, indicando las categorías de impacto, sus indicadores y los modelos de caracterización. Se asignarían los resultados del inventario a cada categoría para calcular los resultados de cada indicador y poder conocer y evaluar los impactos potenciales, así como determinar cuáles son más significativos. Existen algunas referencias de estos estudios para comparar estructuras ejecutadas con distintos tipos de armaduras, que han recogido como categorías de impacto el calentamiento global, la formación de oxidantes fotoquímicos, la acidificación y la eutrofización; la reducción de la capa de ozono también se ha considerado en algún caso, pero, en general, resultando poco relevante en términos globales [41], [51].
- Interpretación del **análisis**, evaluando los resultados de las dos fases anteriores con relación al objetivo y alcance, para obtener conclusiones y poder emitir recomendaciones. Para establecer confianza en los resultados, la evaluación incluiría las verificaciones de los análisis de integridad, de coherencia y de sensibilidad. Normalmente, en el momento de la construcción,

los impactos resultan mayores para armaduras no corrosibles, pero puede ser de modo muy poco significativo, contrariamente a lo que ocurriría con los costes, ya que el mayor peso de esos impactos se debe al propio hormigón (hasta el 93 % de los impactos) y no a las armaduras [51]. El hormigón en sí, además podría ser medioambientalmente más sostenible, por ejemplo, cuando se emplea árido reciclado o incluso agua de mar junto a armaduras GFRP [48].

Teniendo en cuenta los beneficios de durabilidad y sostenibilidad que aportan las armaduras no corrosibles en las estructuras de hormigón, y los ahorros en operaciones de mantenimiento y rehabilitación que suponen, es previsible que para estas armaduras los impactos apenas aumenten desde el momento de la construcción, mientras que los aumentos sean muy notables en las armaduras que requieran mayor esfuerzo en estas operaciones; entre aproximadamente un 40 % [41] o más de un 70 % dependiendo de la categoría de impacto [51]. Este aumento de los impactos invierte el signo de la valoración del ciclo de vida para la mayoría de las categorías, previsiblemente en el momento en el que se produzcan las primeras operaciones importantes de rehabilitación, como ocurría también en el análisis económico.

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

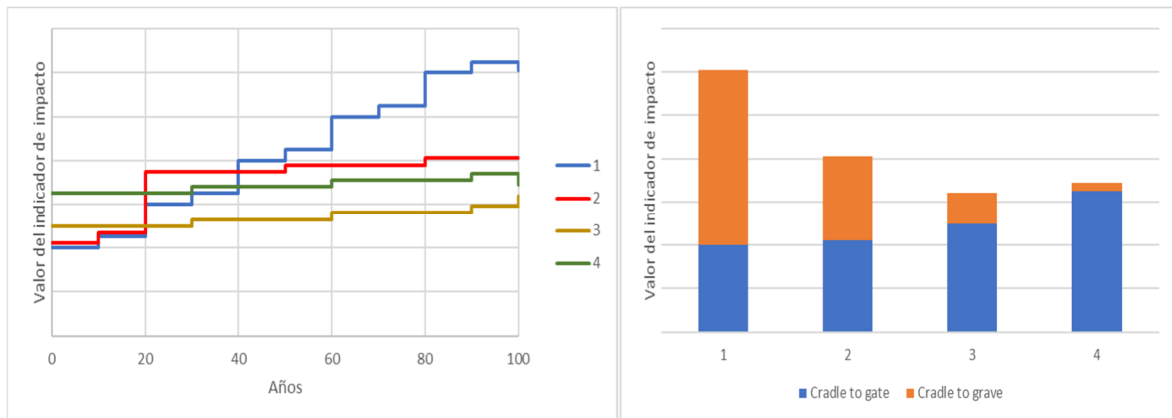


Figura 28: Ejemplo de gráficos comparativos de análisis LCA para una determinada categoría de impacto, de una estructura de hormigón con diferentes tipologías de armaduras y estrategias de mantenimiento y reparación

En la Figura 28, la curva 1 correspondería a una estructura ejecutada con armaduras corrosibles que necesitaran importantes labores de rehabilitación y además éstas se ejecutarán con el mismo tipo de armaduras, por lo que las intervenciones y reparaciones se sucederán a lo largo de todo el ciclo de vida. La curva 2 correspondería también a una estructura ejecutada con armaduras corrosibles, pero en este caso la primera reparación importante se ejecutaría con armaduras resistentes a la corrosión. Las curvas 3 y 4 representarían estructuras ejecutadas con armaduras no corrosibles, que podrían suponer impactos mayores hasta la etapa de construcción, pero que apenas serían significativos en las etapas de uso.

El resultado de este tipo de estudios no es extrapolable de una construcción a otra, por lo que debe hacerse para cada caso particular incluyendo un análisis de sensibilidad para estimar el efecto sobre el resultado de los métodos y datos elegidos. Por último, debe indicarse que no existe base científica para reducir el análisis del ciclo de vida a un único valor o puntuación global, ya que la ponderación entre las categorías de impacto requeriría de juicios de valor o consideraciones subjetivas [55].

## 6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

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

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

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

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

### ARMADURAS DE ACERO GALVANIZADO

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

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

<b>Propiedades</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El acero base es el mismo que el acero convencional, por lo que su comportamiento y requisitos exigibles son también los mismos. Los contenidos de silicio y fósforo del acero a recubrir son los responsables principales del espesor y distribución de las capas de aleación del revestimiento de cinc. La unión metalúrgica entre ambos metales garantiza la adherencia al sustrato de acero. Cualquier proceso térmico, por ejemplo, corte o soldeo, puede influir localmente en la composición del acero y, por tanto, en el resultado de su posterior galvanizado.</li> <li>• Las características mecánicas de las barras de acero galvanizado son muy conocidas, ya que prácticamente coinciden con las de las barras convencionales, por lo que su uso deja poco margen a la incertidumbre y únicamente deben controlarse la continuidad, el espesor y la composición de las capas de aleación, como características adicionales.</li> <li>• La adherencia con el hormigón es similar a la del acero sin recubrimiento, siempre que se evite durante el galvanizado la acumulación de cinc en la zona de contacto de la corruga con la superficie circular de la barra y se tomen ciertas precauciones cuando el hormigón está aún fresco, especialmente si se emplean cementos muy alcalinos.</li> <li>• El comportamiento frente a fatiga debe ser estudiado en cada caso, ya que el recubrimiento se puede fisurar debido a tensiones cíclicas y las irregularidades generadas pueden actuar como iniciadoras del fenómeno en el acero base. Por el contrario, el galvanizado también puede resultar beneficioso cuando actúa reviniendo el acero.</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La <b>durabilidad</b> de las barras con recubrimiento galvanizado es mayor que la correspondiente a las de acero convencional, tanto en hormigón carbonatado como en hormigón contaminado por cloruros. Los revestimientos en base cinc protegen de la corrosión mediante la cobertura, la protección catódica y el efecto de autosellado. La protección es directamente proporcional al espesor, siendo la velocidad de corrosión del cinc inferior a la del acero, entre 15 y 50 veces. Mientras hay cinc, el acero no se corroe. Los productos de corrosión del cinc son menos voluminosos y más solubles que los del acero al carbono, por lo que la exfoliación y el desconchado del hormigón son también menos acusados. El contenido de cloruros que marca el inicio de la corrosión es mayor, pero el límite máximo admisible debe ser estudiado en cada caso particular. La mejora es especialmente significativa en hormigones carbonatados y no muy densos.</li> <li>• Se puede reducir el <b>recubrimiento mínimo</b> necesario de hormigón en hasta 10 mm, en relación a lo prescrito para la armadura convencional.</li> </ul>

<b>Inconvenientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La mejora de durabilidad es muy sensible a los <b>defectos en el recubrimiento</b> de cinc. Cualquier causa que produzca su fisuración puede mermar, o incluso anular, su efecto beneficioso:</li> <li>• El <b>doblado</b> de las barras, sobre todo si se lleva a cabo después del galvanizado, puede producir fisuración, especialmente con recubrimientos de gran espesor. La zona entre el cuerpo central y las corrugas puede actuar como concentrador de tensiones cuando se doblan los productos y exfoliar el recubrimiento. Se plantea cierta disyuntiva entre galvanizar antes o después del doblado: antes, puede producir la posterior fisuración del recubrimiento; después, puede producir fragilización del acero en la zona que ha sido estirada en frío, debido al gradiente térmico durante la galvanización. En todo caso, no se recomienda doblar después de galvanizar.</li> <li>• La galvanización de los alambres estirados en frío puede provocar la variación de las resistencias, debido al proceso de fragilización mencionado en el párrafo anterior.</li> <li>• Los procesos de <b>soldadura</b> son más lentos y es necesario tomar precauciones especiales. Si son posteriores al galvanizado, puede ser necesario reparar el revestimiento de cinc.</li> <li>• Se debe evitar el <b>contacto</b> con armadura convencional de acero al carbono.</li> </ul>
-----------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

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

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

Propiedades	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las <b>características mecánicas</b> de las armaduras de acero inoxidable son superiores a las del acero convencional, desde el punto de vista de las tensiones: carga máxima y límite elástico, y también de la deformación bajo carga máxima; tanto para el inoxidable laminado en caliente como en frío. Aun así, en el caso de las armaduras laminadas en frío la deformación es menor que en las laminadas en caliente, por lo que el uso de las primeras estaría restringido a los casos en los que no existen exigencias específicas de ductilidad. En todo caso, la ductilidad depende, en gran medida, del tipo de acero inoxidable de que se trate en cada caso. Su uso no supone una diferencia importante con el acero convencional y tienen un módulo elástico muy similar, por lo que pueden ser usadas en el hormigón armado sin variar apenas su comportamiento resistente conjunto. Las armaduras de acero inoxidable deben cumplir los mismos requisitos que las de acero al carbono, salvo en lo relativo a su composición química.</li> <li>La <b>resistencia a fatiga</b> del acero inoxidable es superior a la del acero convencional.</li> </ul>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>La <b>durabilidad</b> de las barras y alambres de acero inoxidable es sustancialmente mayor que la correspondiente a las de acero al carbono, tanto en hormigones carbonatados como en aquellos contaminados por cloruros. La fina capa de óxido de que se cubren es una barrera muy eficaz que, si por algún motivo se pierde o rompe, se vuelve a formar sin merma de sección. Su deterioro es prácticamente inexistente. La resistencia a la corrosión es ligeramente inferior en las corrugas que en el resto de la barra.</li> <li>En el <b>diseño</b>, el valor límite admisible de la anchura de fisura en el hormigón puede ser superior al valor correspondiente con acero convencional; así como también mayor el contenido límite de cloruros para que se inicie la corrosión. El empleo de barras de acero inoxidable puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón hasta un valor de 30 mm.</li> <li>Se permite colocar en <b>contacto</b> las armaduras inoxidables con las de acero convencional, e incluso soldar ambos tipos si se toman ciertas precauciones.</li> </ul>
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>La <b>elección del tipo de acero inoxidable</b> debe ser acorde a las circunstancias de la estructura de hormigón y al tipo de exposición a la que vaya a estar sometida. Hay que tener en cuenta que existen muchos tipos de acero inoxidable y su resistencia a la corrosión es variable de unos a otros.</li> <li>En la <b>manipulación, conformado y almacenamiento</b> se debe evitar el contacto con armaduras de acero al carbono y los equipos que se utilicen para estos procesos deben ser exclusivos del inoxidable.</li> <li>Los procesos de <b>soldadura</b> son más delicados y es necesario tomar precauciones para que las soldaduras sean también inoxidables y resistentes a la corrosión.</li> </ul>

## ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

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

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

<b>Propiedades</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Respecto a las <b>características mecánicas</b>, estas armaduras tienen un comportamiento en tracción elástico hasta el fallo, frágil y no avisan antes de la rotura. Se caracterizan por un diagrama lineal entre tensión y deformación. Tienen mayor resistencia a la tracción longitudinal que el acero. Su módulo de elasticidad es bajo, lo que supone un cambio importante en las consideraciones de diseño. La resistencia a tracción disminuye conforme aumenta el diámetro.</li> <li>Se trata de un <b>material anisótropo</b> caracterizado por una alta resistencia a tracción en dirección de las fibras. Esta anisotropía afecta también a la resistencia a cortante, que generalmente es baja. Tiene un coeficiente de expansión térmica diferente en dirección longitudinal y transversal.</li> <li>En principio, se supone una buena <b>resistencia a fatiga</b>, pero si se eleva la temperatura o la humedad, o existe degradación medioambiental de la resina, la resistencia frente a cargas cíclicas puede verse afectada. Los códigos son muy conservadores en los criterios de diseño frente a este tipo de esfuerzos, por la gran cantidad de factores que afectan a su comportamiento y la escasez de investigación de su efecto en la adherencia con el hormigón.</li> <li>La <b>adherencia</b> de este tipo de armaduras depende de la composición resina-fibra, del proceso de fabricación, de las condiciones medioambientales y, sobre todo, del tipo de superficie de acabado.</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desde el punto de vista de la durabilidad, estas armaduras no se deterioran cuando se encuentran en presencia de un gran número de sustancias agresivas y son inertes a los cloruros. No se ven afectadas por la carbonatación del hormigón. El valor límite admisible de la anchura de fisura en el hormigón puede ser superior al valor correspondiente con acero convencional; así como también mayor el contenido límite de cloruros.</li> <li>Otras características que diferencian notablemente estas armaduras de las de acero y que son muy ventajosas para determinadas aplicaciones son su peso ligero, lo que beneficia su transporte y colocación en obra, la transparencia magnética y que son aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico.</li> <li>Finalmente, hay que resaltar su facilidad de demolición en estructuras temporales.</li> <li>En el diseño, el empleo de esta tipología de barras puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón de modo significativo. Se pueden proyectar con espesores de hormigón de recubrimiento menores y se puede prescindir de dosificaciones y mezclas especialmente diseñadas para prevenir la corrosión del acero.</li> <li>Se pueden poner en contacto y usar de modo combinado con cualquier tipo de armadura de acero.</li> </ul>

<b>Inconvenientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El hormigón reforzado con barras FRP tiene un comportamiento estructural distinto al del hormigón armado tradicional, por lo que se requieren métodos específicos de diseño.</li> <li>• Las barras de polímeros reforzados con fibras presentan el fenómeno denominado fatiga estática o rotura por fluencia; en consecuencia, las barras sometidas a carga constante pueden fallar de modo frágil después de un cierto periodo de tiempo.</li> <li>• Las fibras de vidrio son sensibles a la degradación en medio alcalino, en el que se puede deteriorar alguna de sus propiedades físico-mecánicas.</li> <li>• Es un material susceptible al fuego. A altas temperaturas presenta considerables pérdidas en su resistencia mecánica y adherencia.</li> <li>• Las barras no pueden doblarse y deben fabricarse con la geometría definitiva. Los elementos curvos de esta tipología de barras presentan una resistencia a la tracción inferior con respecto a la de los elementos rectos.</li> <li>• Se deben tomar precauciones en su almacenamiento, ya que es un material que se degrada con la radiación ultravioleta. Antes de su puesta en obra, su durabilidad se puede ver muy afectada por condiciones ambientales, tales como las altas temperaturas, alcalinidad, ciclos humedad-sequedad, y ciclos hielo-deshielo. Todos estos factores pueden afectar a su resistencia y rigidez a largo plazo.</li> <li>• No se recomienda su empleo en elementos comprimidos, ni en aquellos que vayan a resistir cargas sísmicas o que requieran distribución de momento.</li> <li>• En la actualidad, existe dificultad en los laboratorios de ensayo para realizar pruebas de control de calidad y control de producción, principalmente de tracción; igualmente sucede con otro tipo de ensayos específicos para esta tipología de armaduras.</li> </ul>
-----------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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

Las **estructuras marinas y costeras** están singularmente expuestas a desarrollar fenómenos de corrosión a edades muy tempranas, por lo que el empleo de armaduras no convencionales puede mostrarse singularmente eficiente, incluso a corto plazo, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Parece claro que la incidencia mayor en el resultado de los estudios pertinentes se da cuando es necesaria una operación extraordinaria de reparación o rehabilitación de la estructura. Prever con la mayor exactitud y realismo esta circunstancia, es la clave para que los resultados sean válidos en la toma de decisiones. Sería importante aprovechar datos históricos reales para parametrizar y ajustar los modelos de predicción de los daños por corrosión, ya que muchas estructuras se deterioran antes de lo previsto y no siempre los beneficios esperados en la protección del hormigón se cumplen en la realidad. Factores ajenos a los trabajos de investigación, relacionados con la elaboración, colocación y puesta en obra del hormigón, podrían estar detrás de estos fallos prematuros.

Se concluye que una **planificación estratégica** que garantice la sostenibilidad de las obras marítimas, y, en general, de todas aquellas estructuras de hormigón armado singularmente expuestas a la corrosión, requerirá análisis del ciclo de vida para evitar el traslado de las cargas económicas y medioambientales a etapas posteriores a la de ejecución de la obra. En este tipo de análisis es donde se puede mostrar claramente la ventaja del empleo de armaduras alternativas.

## AGRADECIMIENTOS

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

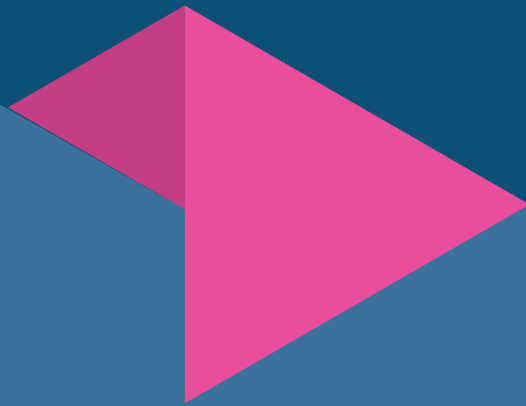
- A las autoridades portuarias de A Coruña, Barcelona y Cartagena y a las autoridades de los puertos de la Generalitat Valenciana.
- A la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG) y a la Asociación para la Investigación y Desarrollo del Acero Inoxidable (CEDINOX).
- Al fabricante de armaduras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

## REFERENCIAS

- [1] ACHE. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, Sistemas de reparación y protección de estructuras de hormigón con corrosión, vol. Monografía 26, Grupo de trabajo 4/1 Sistemas de reparación y protección para garantizar la durabilidad de las estructuras existentes, 2015.
- [2] S. López Ramos y Á. Martínez del Olmo, «El zinc, ese gran desconocido,» Ingeniería Civil, nº 148, pp. 71-82, 2007.
- [3] AENOR, «UNE-EN ISO 1461 Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo,» 2023.
- [4] AENOR, «UNE-EN ISO 14713-2 Recubrimientos de cinc. Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Parte 2: Galvanización en caliente,» 2020.
- [5] AENOR, «UNE-EN ISO 2178 Recubrimientos metálicos no magnéticos sobre metal base magnético. Medida del espesor del recubrimiento. Método magnético,» 2017.
- [6] AENOR, «UNE-EN ISO 1460 Recubrimientos metálicos. Recubrimientos de galvanización en caliente sobre materiales férricos. Determinación gravimétrica de la masa por unidad de área,» 2021.
- [7] AENOR, «UNE-EN 10080: Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades,» 2006.
- [8] CEN-CENELEC, “EN 10348 Steel for the reinforcement of concrete - Galvanized reinforcing steel products,” 2024.
- [9] MITMA, Código Estructural, 2021.
- [10] ATEG, «www.ateg.es,» [En línea]. Available: <https://www.ateg.es/media/1791/ateg-notas-informativas.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [11] AENOR, «UNE-EN ISO 15630-1 Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 1: Barras, alambres y alambón para hormigón armado,» 2019.
- [12] Fib: CEP-FIP, «Corrosion protection of reinforcing steels, Bulletin nº . 49,» 2009.
- [13] EGGA, «EGGA European General Galvanizers Association,» [En línea]. Available: <https://www.galvanizingeurope.org/wp-content/uploads/2021/07/Version-2.1-Feb-2022.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [14] AENOR, «UNE 83992-2 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado,» 2012.
- [15] J.-J. Bianchi, «El puente de Saint-Nazaire-Saint-Brévin-Francia,» Informes de la Construcción, vol. 29, nº 280, pp. 73-89, 1976.
- [16] El Diario Vasco, «Así se construyó La Perla,» El Diario Vasco, 4 octubre 2020.
- [17] I. Martínez y M. C. Alonso, «Estudio de la durabilidad de armaduras galvanizadas en estructuras portuarias de la Generalitat Valenciana,» IETcc, CSIC.
- [18] M. C. Alonso, I. Martínez, V. Ibarra y O. Molines, «Empleo de armadura galvanizada para proteger frente a la corrosión en estructuras marítimas,» de XI Jornada de Costas y Puertos, Gran Canaria, 5 y 6 de mayo, 2011.
- [19] AENOR, «UNE-EN 10088-1 Aceros inoxidables. Parte 1: Lista de aceros inoxidables,» 2024.
- [20] Instituto Técnico de la Estructura en Acero, [En línea]. Available: [https://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia\\_documentacion/itea/TOMO22.pdf](https://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/TOMO22.pdf). [Último acceso: octubre 2023].
- [21] AENOR, «UNE-EN 10088-5: Condiciones técnicas de suministro para barras, alambón, alambre, perfiles y productos brillantes de aceros resistentes a la corrosión para usos en construcción,» 2010.

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

- [44] Comisión Europea, «Directiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014 sobre contratación pública y por la que se deroga la Directiva 2004/18/CE,» UE, 2014.
- [45] M. Perelli y L. Parra Ruiz, «Aproximación del análisis del ciclo de vida (ACV) y del coste del ciclo de vida (CCV) al caso particular de los firmes de carretera,» Ingeniería Civil, nº 186, pp. 23-38, 2017.
- [46] ISO, «ISO 15686-5 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing,» 2017.
- [47] AENOR, «UNE-EN 17472 Sostenibilidad de las obras de construcción. Evaluación de la sostenibilidad de las obras de ingeniería civil. Métodos de cálculo,» 2022.
- [48] A. Younis, U. Ebead y S. Judd, «Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement,» Construction and Building Materials, vol. 175, pp. 152-160, 2018.
- [49] S. Hamid, K. Naji, A. Younis y U. Ebead, «Material performance and cost effectiveness of seawater-mixed rubberized concrete,» Case Studies in Construction Materials, vol. 15, pp. 1-11, 2021.
- [50] D. V. Val y M. G. Stewart, «Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments,» Structural safety, vol. 25, pp. 343-362, 2003.
- [51] M. Mistry, C. Koffler y S. Wong, «LCA and LCC of the world's longest pier: a case study on nickel-containing stainless steel rebar,» International Journal Life Cycle Assess, nº 21, pp. 1678-1644, 2016.
- [52] L. Abreu Araujo, I. Helices Arcila, N. Rebolledo Ramos, J. E. Torres Martín, S. Chinchón-Payá, J. Sánchez Montero, B. B. Raggiotti y V. Matres, «Corrosion Initiation Period for Stainless Steel Reinforcement in Concrete Structures,» de XVI International Conference on Durability of Building Materials and Components for Sustainability, China, 2023.
- [53] C. A. Dattilo, P. Negro y R. Landolfo, «An integrated approach for sustainability (IAS): life cycle assessment (LCA) as a supporting tool for life cycle costing (LCC) and social issues,» de Sustainable Building Affordable to All, Lisboa, 2010.
- [54] C. C. Steputat, J. O'Connor, M. Arrants, J. Beech y A. Nanni, «GFRP-RC seawalls as a means of coastal fortification and extended service life,» Concrete International, vol. 44, nº 11, pp. 36-42, November 2022.
- [55] AENOR, «UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia,» 2006.
- [56] AENOR, «UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1,» 2021.
- [57] AENOR, «UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices,» 2006.
- [58] AENOR, «UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1,» 2028.
- [59] AENOR, «UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 2,» 2021.
- [60] AENOR, «UNE-EN 15804:2012+A2 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción,» 2020.
- [61] AENOR, «UNE-EN 15804:2012+A2:2020/AC Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción,» 2021.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE TRANSPORTES  
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX

