

INFLUENCIA DEL AGUA DE MAR EN EL CURADO DEL HORMIGÓN

Aplicación al caso de
los cajones flotantes

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
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

Puertos del Estado



**INFLUENCIA DEL AGUA DE MAR EN EL CURADO DEL HORMIGÓN
APLICACIÓN AL CASO DE LOS CAJONES FLOTANTES**

VÍCTOR D. LANZA FERNÁNDEZ
GONZALO PAZÓ COYOLA
PILAR ALAEJOS GUTIÉRREZ
ANA LOPE CARVAJAL

Catálogo de Publicaciones Oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es/>

Tienda virtual de Publicaciones del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible: <https://cvp.mitma.gob.es/CVP/>

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

Título: Influencia del agua de mar en el curado del hormigón. Aplicación al caso de los cajones flotantes

Autores: Víctor D. Lanza Fernández, Gonzalo Pazó Coyola, Pilar Alaejos Fernández y Ana Lope Carvajal

Año de la edición: 2023

EDICIÓN DIGITAL

1ª edición electrónica: 2024

Formato: PDF

Tamaño: 3 MB

EDITA

Centro de Publicaciones

Secretaría General Técnica

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

© CEDEX: Servicio de Publicaciones

NIPO: 797-23-021-9

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.

Publicación incluida en el Programa editorial del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de 2023 y editada por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible de acuerdo con la reestructuración ministerial establecida por Real Decreto 829/2023, de 20 de noviembre.

Puertos del Estado ostenta 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 es parte de ese esfuerzo para que la ingeniería portuaria española 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, Movilidad y Agenda Urbana, 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 interés general.

Los cajones de hormigón armado se utilizan para ejecución de obras marítimas, tanto diques como muelles, fundamentalmente. En España se fabrican normalmente mediante la técnica de hormigón deslizado en un dique flotante, para posteriormente ser transportados, generalmente a flote, desde el lugar de fabricación a su ubicación definitiva, donde se fondean y rellenan. Durante la fabricación del cajón en el dique flotante o cajonero, la estructura de hormigón armado que se va ejecutando, se sumerge progresivamente en el agua de mar, mientras mediante el deslizado del encofrado, se va hormigonando la parte superior del cajón. Este sistema tiene claras ventajas constructivas y económicas, pero conlleva que el hormigón del cajón, que quedará sumergido en situación definitiva, entre en contacto con agua de mar a edades muy tempranas, lo que podría llevar a cuestionar la durabilidad de la estructura.

A pesar de la amplia experiencia que la ingeniería española acumula desde hace décadas, en la utilización de este procedimiento de ejecución, con resultados claramente positivos en cuanto a calidad de las obras llevadas a cabo, la normativa de aplicación a estas estructuras, tanto española como internacional, no ha venido recogiendo durante años referencias explícitas a esta tipología constructiva, particularmente en lo que se refiere a la posibilidad de curar con agua de mar el hormigón con armaduras.

Por encargo de Puertos del Estado, el CEDEX ha estado trabajando los últimos años en estudios relacionados con dicho proceso de ejecución con encofrados deslizantes sobre plataforma en el mar, que obliga a poner en contacto el hormigón con agua de mar sin un curado previo con agua dulce, obteniéndose como resultados preliminares que no se considera que esta técnica tenga influencia negativa en el riesgo de corrosión de las armaduras, siempre que se ejecute de manera correcta.

Como resultado de estos trabajos preliminares realizados por el CEDEX se incluyó en el Código Estructural, de reciente publicación, la posibilidad, suficientemente justificada, de curar con agua de mar en elementos de hormigón armado que vayan a estar situados permanentemente en clase de exposición XS2 (zonas sumergidas de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral).

La presente publicación sintetiza los trabajos llevados a cabo con hormigones, tanto de campo con cajones construidos y en servicio, como de laboratorio, de los que se desprende que no existe un riesgo significativo mayor de corrosión del armado debido al proceso constructivo de los cajones en plataforma flotante.

La principal conclusión de estos trabajos, recogida en este Manual, se considera de gran importancia para asegurar la calidad de nuestras infraestructuras, y podrá servir también para exportar la tecnología española de fabricación de cajones en el ámbito internacional, garantizando técnicamente sus características, reafirmando el compromiso de Puertos del Estado con la investigación y los avances en materia de ingeniería portuaria para seguir mejorando en el desarrollo y la competitividad de nuestros puertos.

ÁLVARO RODRÍGUEZ DAPENA
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, el medio ambiente y el cambio climático, contribuyendo al avance del conocimiento aplicado y a la introducción y difusión de la innovación.

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 los organismos públicos de los que el CEDEX es medio propio.

Esta publicación es fruto de la Asistencia Técnica, Investigación Aplicada y Desarrollo Tecnológico que el CEDEX, a través del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, presta a Puertos del estado para dar respuestas a materias que son de interés para el Sistema Portuario de Titularidad Estatal.

La tecnología de cajones flotantes está ampliamente extendida en España para la construcción de diques y muelles. Este sistema presenta ventajas económicas y constructivas, pero conlleva que el hormigón del cajón, que quedará permanentemente sumergido en su vida de servicio, haya entrado en contacto prematuro con el agua de mar durante su ejecución, lo cual puede llevar a cuestionar la futura durabilidad del cajón, debido a un mayor riesgo de corrosión del armado.

El origen de esta publicación se sitúa en el año 2009, cuando el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX finaliza, a petición de Puertos del Estado, un primer estudio sobre la influencia que tiene para la durabilidad de hormigones sumergidos el hecho de entrar en contacto prematuro con los cloruros tras su ejecución. En 2018, Puertos del Estado encarga al CEDEX completar esta investigación con un segundo trabajo, de mayor alcance, realizando una amplia batería de ensayos en laboratorio de hasta 4 años y medio de duración, así como una evaluación sobre cajones flotantes ya colocados en los puertos. Esta publicación recoge los resultados más significativos y las conclusiones alcanzadas en el CEDEX tras todos los estudios llevados a cabo.

El estudio realizado, riguroso y muy completo, ha permitido concluir que no existe un riesgo significativo mayor de corrosión del armado debido al proceso constructivo de los cajones en plataforma flotante. Los resultados alcanzados tienen un interés máximo ya que resuelven un problema real planteado y avalan la durabilidad de los cajones ejecutados con esta tecnología. Por ello, este documento se convierte en una herramienta técnica valiosa para los puertos españoles, ya que asegura la durabilidad de sus estructuras portuarias, y también para las empresas constructoras españolas, que son referente internacional en esta tecnología, y encontrarán en esta publicación un aval técnico para poder aplicarla en otros países.

Finalmente, estos trabajos han permitido asimismo mejorar la normativa técnica nacional, quedando recogida la validez de esta técnica desde el punto de vista de la durabilidad, tanto en el Código Estructural como en Manual para el diseño y la ejecución de cajones flotantes de hormigón armado para obras portuarias.

Desde el CEDEX agradecemos a Puertos del Estado su interés por querer 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 el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX para llevar a cabo esta tarea.

Finalmente, también agradecemos a las diferentes Autoridades Portuarias que han colaborado en el desarrollo de este trabajo su confianza en el CEDEX y su apoyo para poder realizar con éxito el estudio de sus estructuras de cajones.

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

ÍNDICE

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 7 |
| 2 | ESTUDIO DE LABORATORIO: ALCANCE DE CURAR CON AGUA DE MAR HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO SUMERGIDO (XS2)..... | 8 |
| 2.1 | RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD | 9 |
| 2.2 | RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE CLORUROS..... | 10 |
| 2.3 | OTRAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN: POROSIDAD Y SUCCIÓN CAPILAR..... | 15 |
| 3 | ESTUDIO DE CAMPO: INFLUENCIA DE CURAR CON AGUA DE MAR EN CAJONES REALES..... | 18 |
| 3.1 | RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD | 19 |
| 3.2 | RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA PENETRACIÓN DE CLORUROS | 20 |
| 3.3 | ESTUDIOS DE CAMPO PREVIOS SOBRE LA DURABILIDAD EN CAJONES FLOTANTES | 22 |
| 4 | CONCLUSIONES..... | 25 |
| 5 | PUBLICACIONES PREVIAS..... | 27 |
| 6 | BIBLIOGRAFÍA | 27 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| FIGURA 1. | DISTINTOS TIPOS DE CURADO EMPLEADOS EN EL ESTUDIO DE LABORATORIO..... | 8 |
| FIGURA 2. | RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN HORMIGÓN DULCE Y HORMIGÓN MAR. ESTUDIO DE 2009 Y ESTUDIO DE 2022..... | 9 |
| FIGURA 3. | PENETRACIÓN DE AGUA MÁXIMA EN HORMIGÓN DULCE Y HORMIGÓN MAR. ESTUDIO DE 2009 Y ESTUDIO DE 2022..... | 10 |
| FIGURA 4. | PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN HORMIGÓN CEM I. 2023 | 11 |
| FIGURA 5. | PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN HORMIGÓN CEM II. 2023 | 11 |
| FIGURA 6. | PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORUROS HORMIGÓN CEM III. 2023..... | 11 |
| FIGURA 7. | PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN HORMIGÓN CEM I (2023) FRENTE A LA RAÍZ CUADRADA DEL TIEMPO..... | 12 |
| FIGURA 8. | PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN HORMIGÓN CEM II (2023) FRENTE A LA RAÍZ CUADRADA DEL TIEMPO..... | 12 |
| FIGURA 9. | PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE CLORUROS HORMIGÓN CEM III (2023) FRENTE A LA RAÍZ CUADRADA DEL TIEMPO..... | 12 |
| FIGURA 10. | PENETRACIÓN DE CLORUROS EN HORMIGÓN DULCE Y HORMIGÓN MAR CON EL MÉTODO COLORIMÉTRICO (2022 Y 2009)..... | 13 |
| FIGURA 11. | PERFIL DE PENETRACIÓN DE CLORUROS A 1 AÑO. CEM I. 2022 | 14 |
| FIGURA 12. | PERFIL DE PENETRACIÓN DE CLORUROS A 1 AÑO. CEM II. 2022 | 14 |
| FIGURA 13. | PERFIL DE PENETRACIÓN DE CLORUROS. CEM III. 2022..... | 14 |
| FIGURA 14. | RESULTADOS DE POROSIDAD COMPARANDO LOS TIPOS DE CURADO. SE DIFERENCIAN LOS DIFERENTES ESTUDIOS REALIZADOS Y LA EDAD DEL ENSAYO..... | 15 |
| FIGURA 15. | SUCCIÓN CAPILAR HASTA SATURACIÓN, DESORCIÓN 17H A 40°C Y SUCCIÓN DE 6 HORAS EN EL CEM I..... | 16 |
| FIGURA 16. | SUCCIÓN CAPILAR HASTA SATURACIÓN, DESORCIÓN 17H A 40°C Y SUCCIÓN DE 6 HORAS EN EL CEM II | 16 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 17. SUCCIÓN CAPILAR HASTA SATURACIÓN, DESORCIÓN 17H A 40°C Y SUCCIÓN DE 6 HORAS EN EL CEM III | 16 |
| FIGURA 18. REPLANTEO DE UNO DE LOS SONDEOS..... | 18 |
| FIGURA 19. DEFINICIÓN DE ZONAS DE TRABAJO EN EL SONDEO..... | 19 |
| FIGURA 20. RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LOS CAJONES. COMPARACIÓN HORMIGÓN SUPERIOR Y HORMIGÓN INFERIOR..... | 19 |
| FIGURA 21. PENETRACIÓN DE AGUA MÁXIMA EN LOS CAJONES. COMPARACIÓN HORMIGÓN SUPERIOR Y HORMIGÓN INFERIOR..... | 20 |
| FIGURA 22. PERFILES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS. CAJONES DEL PUERTO DE BARCELONA. COMPARACIÓN HORMIGÓN SUPERIOR Y HORMIGÓN INFERIOR..... | 21 |
| FIGURA 23. PERFILES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS. CAJONES DEL PUERTO DE TENERIFE. COMPARACIÓN HORMIGÓN SUPERIOR Y HORMIGÓN INFERIOR..... | 21 |
| FIGURA 24. PORCENTAJE DE CLORUROS EN PESO DE CEMENTO EN ARMADURAS SUMERGIDAS SIN INDICIOS DE CORROSIÓN. ESTUDIOS CEDEX 2009 Y 2022..... | 23 |
| FIGURA 25. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN A 1 AÑO PARA DIFERENTES CAJONES ESTUDIADOS | 24 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. DOSIFICACIONES ESTUDIADAS EN EL CEDEX (2009 Y 2022) | 9 |
| TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CAJONES ESTUDIADOS | 18 |

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

| | |
|---|----|
| FOTOGRAFÍA 1. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE UN CAJÓN, YA PARCIALMENTE SUMERGIDO | 7 |
| FOTOGRAFÍA 2. CAJÓN EN SU UBICACIÓN DEFINITIVA COMO PARTE DE UN DIQUE | 7 |
| FOTOGRAFÍA 3. FRENTE DE PENETRACIÓN DE CLORUROS TRAS EL TEÑIDO CON NITRATO DE PLATA | 11 |
| FOTOGRAFÍA 4. MARCADA EN ROJO LA ZONA DE EXTRACCIÓN DE MUESTRA PARA LA REALIZACIÓN DEL PERFIL DE CLORUROS | 14 |
| FOTOGRAFÍA 5. MUESTRA PARA REALIZACIÓN DEL PERFIL DE CLORUROS. CADA FRANJA SE CORTA Y ANALIZA PARA EVALUAR SU CONTENIDO DE CLORUROS..... | 14 |
| FOTOGRAFÍA 6. ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR DEL HORMIGÓN | 16 |
| FOTOGRAFÍA 7. DETALLE DEL ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR..... | 16 |
| FOTOGRAFÍA 8. MUESTRA DEL AVANCE DEL CURADO QUE SE EJECUTA RECORRIENDO EL PERÍMETRO DEL CAJÓN MIENTRAS SE ENCUENTRA EN LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN [17] | 17 |
| FOTOGRAFÍA 9. REPLANTEO DE UNO DE LOS SONDEOS IN-SITU..... | 18 |
| FOTOGRAFÍA 10. EXTRACCIÓN DE SONDEO EN EL PUERTO DE BARCELONA | 19 |
| FOTOGRAFÍA 11. PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA LA OBTENCIÓN DE PERFILES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS | 20 |
| FOTOGRAFÍA 12. BARRA VERTICAL SIN CORROSIÓN. CAJÓN D. PUERTO DE BARCELONA..... | 21 |
| FOTOGRAFÍA 13. MUELLE DE CAJONES FLOTANTES EN AMBIENTE XS3, CON BUEN ASPECTO GENERAL, TRAS 2 AÑOS DE SERVICIO. DETALLE DE ARMADURA DESCUBIERTA EN EL CAJÓN, SIN INDICIOS DE CORROSIÓN. CEMENTO IIIB/32,5-SR | 22 |
| FOTOGRAFÍA 14. MUELLE CON BUEN ASPECTO GENERAL EN AMBIENTE XS3, TRAS 2 AÑOS DE SERVICIO. DETALLE DE ARMADURAS DESCUBIERTAS EN EL CAJÓN, SIN INDICIOS DE CORROSIÓN. CEMENTO IV/A 32,5 SR/MR | 22 |
| FOTOGRAFÍA 15. MUELLE DE CAJONES EN AMBIENTE XS3, CON BUEN ASPECTO GENERAL DEL HORMIGÓN, SIN SÍNTOMAS VISIBLES DE CORROSIÓN, SIN FISURACIÓN Y SIN COQUERAS, TRAS 31 AÑOS DE SERVICIO. CEMENTO PUZOLÁNICO | 22 |
| FOTOGRAFÍA 16. EXTRACCIÓN DESDE LA CARA SUPERIOR DE LA VIGA CANTIL DE UN SONDEO VERTICAL HASTA ALCANZAR EL HORMIGÓN SUMERGIDO EN UN CAJÓN DEL PUERTO DE VALENCIA | 23 |
| FOTOGRAFÍA 17. EXTRACCIÓN DESDE LA CARA SUPERIOR DE LA VIGA CANTIL DE UN SONDEO VERTICAL HASTA ALCANZAR EL HORMIGÓN SUMERGIDO EN UN CAJÓN DEL PUERTO DE BARCELONA | 23 |

1 INTRODUCCIÓN

El sistema de cajones flotantes es un procedimiento constructivo ampliamente extendido en España para la construcción de diques y muelles. Consiste en la ejecución de grandes cajones de hormigón armado sobre plataformas flotantes. Para su construcción, los cajoneros disponen de un encofrado deslizante que asciende gradualmente para la ejecución del fuste del cajón. Tras el deslizado del encofrado, la franja del cajón, ya hormigonada, se va sumergiendo progresivamente en el mar, pocas horas después de su ejecución. Una vez fabricado un cajón, se mantienen a flote hasta su posterior inmersión en el emplazamiento definitivo.



Fotografía 1. Proceso de construcción de un cajón, ya parcialmente sumergido



Fotografía 2. Cajón en su ubicación definitiva como parte de un dique

Este sistema (Fotografía 1 y Fotografía 2) presenta ventajas económicas y constructivas, pero fabricar el cajón conlleva que el hormigón entre en contacto prematuro con el agua de mar, lo cual puede llevar a cuestionar la futura durabilidad del cajón, debido a un mayor riesgo de corrosión del armado.

Sin embargo, existe muy poca investigación sobre el efecto del curado con agua de mar sobre las propiedades de un hormigón ([1],[2],[3]) que posteriormente permanecerá sumergido (ambiente XS2). La bibliografía consultada coincide en mostrar que las diferencias encontradas en la profundidad alcanzada por los cloruros en hormigones, aplicando un curado previo con agua dulce (28 días, 7 días), no son significativas [1]. Así, las diferencias de profundidades de cloruros se encuentran para todos los hormigones estudiados (con y sin adiciones) por debajo de 10 mm, en comparación con probetas puestas directamente en contacto con el agua del mar tras su desmoldeo. Además, algún estudio [3] identifica como más perjudicial la ausencia de curado húmedo (dejar secar el hormigón antes de ponerlo en contacto con el agua del mar) que el propio contacto con el agua de mar en sí.

Aunque los pocos estudios existentes arrojan resultados positivos, la normativa internacional ([4],[5]) es de forma generalizada muy conservadora al respecto, y desaconseja que el hormigón armado o pretensado entre en contacto con el agua del mar hasta que haya alcanzado al menos el 90% de su resistencia característica.

Por ello, el CEDEX ha llevado a cabo estudios, tanto en laboratorio como en infraestructuras portuarias existentes, para conocer qué alcance tiene para la corrosión del armado del hormigón en ambiente XS2, el hecho de entrar en contacto con agua de mar tras las primeras horas de curado.

2 ESTUDIO DE LABORATORIO: ALCANCE DE CURAR CON AGUA DE MAR HORMIGÓN ARMADO EN AMBIENTE MARINO SUMERGIDO (XS2)

La normativa española (Código Estructural, [6]) exige el curado del hormigón. En el caso de estructuras marinas en condiciones ambientales desfavorables, la normativa recomienda curados de hasta 7 u 11 días, para CEM I y CEM III/B, respectivamente.

Por ello, el estudio de laboratorio del CEDEX trata de comparar el comportamiento del hormigón curado durante 11 días en agua dulce antes de entrar en contacto con agua de mar (Hormigón DULCE), frente al hormigón que ha entrado en contacto con agua de mar tras ser desmoldado, a las 24 horas de fabricarse (Hormigón MAR).

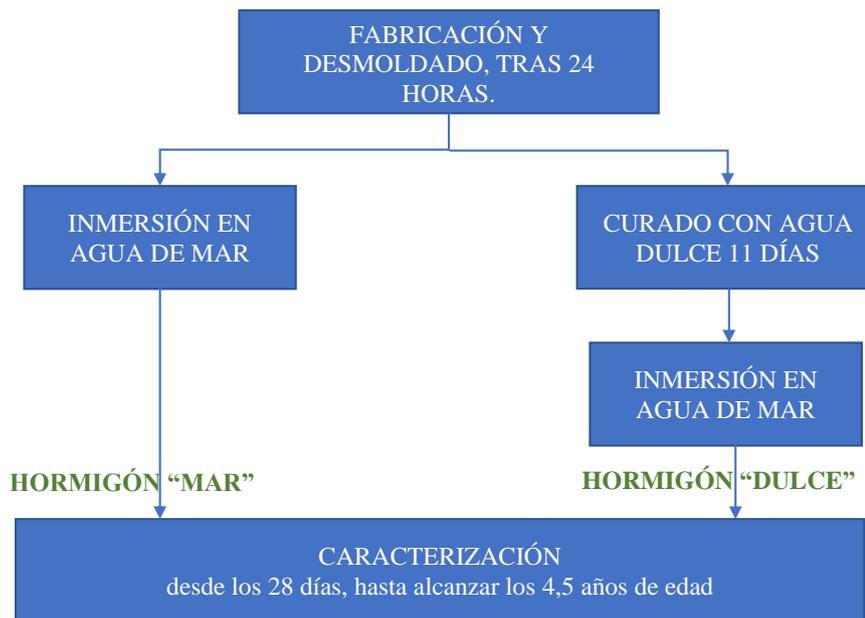


Figura 1. Distintos tipos de curado empleados en el estudio de laboratorio

Se han fabricado 3 hormigones, utilizando tres cementos diferentes: un cemento portland sin adiciones (CEM I), un cemento (CEM II/B-V), con contenido de cenizas volantes entre el 21% y 35%, y un cemento de horno alto (CEM III/B), con contenido de escorias comprendido entre el 66% y el 80%. Las 3 dosificaciones cumplen con las exigencias de dosificación más restrictivas para hormigón en ambiente marino (XS3), según la normativa española de aplicación. La *Tabla 1* recoge las características de estos hormigones. Además, siempre que ha sido posible, se han completado los resultados experimentales con los obtenidos en el estudio previo del CEDEX, llevado a cabo en 2009 [7], y cuyas características también han quedado recogidas en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Dosificaciones estudiadas en el CEDEX (2009 y 2022)

| Hormigón ensayado | CEDEX Estudio 2022 | | | CEDEX Estudio 2009 | | | |
|--|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| | CEM I (OCP) | CEM II (FA) | CEM III (BFS) | H-obra (OCP) | H-0,45 (OCP) | H-0,40 (OCP) | H-0,40HS (OCP+SF) |
| Relación a/c | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,40 | 0,40 |
| Tipo de Conglomerante | CEM I 42,5 R | CEM II /B-V 32,5 R | CEM III/B 32,5 N-SR | CEM I 42,5 N/SR | CEM I 42,5 R/SR | CEM I 42,5 R/SR | CEM I 42,5 R/SR + Humo de sílice |
| Peso cemento por m ³ hormigón | 350 kg | 350 kg | 350 kg | 395 kg | 400 kg | 400 kg | 396 kg cemento + 44 kg Humo |
| Tiempo de curado del Hormigón "dulce" | 11 días | 11 días | 11 días | 7 días | 28 días | 28 días | 28 días |

2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD

La *Figura 2* recoge los resultados de resistencia a compresión [8] obtenidos en los dos estudios llevados a cabo en el CEDEX (2009 y 2022). Se muestra la resistencia obtenida para cada tipo de hormigón cuando se cura con agua de mar (Hormigón MAR), frente al resultado obtenido en el mismo hormigón, pero curado con agua dulce (Hormigón DULCE).

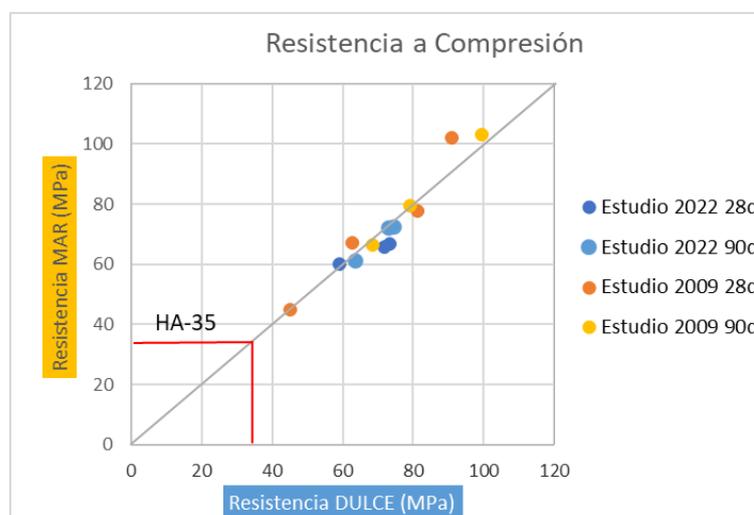


Figura 2. Resistencia a compresión en hormigón DULCE y hormigón MAR. Estudio de 2009 y Estudio de 2022

Los hormigones se han dosificado para cumplir las exigencias del ambiente marino más agresivo (XS3). En este ambiente, el Código Estructural pide al hormigón una resistencia características mínima de 35 MPa. Todas las resistencias obtenidas quedan muy por encima del mínimo exigido.

Además, se han obtenido resultados similares de resistencia a compresión en las probetas curadas con agua dulce (abscisas) y con agua de mar (ordenadas), indicando **que no tiene ninguna influencia sobre la resistencia el contacto prematuro del hormigón con el agua de mar.**

De igual manera, la *Figura 3* muestra la permeabilidad del hormigón, evaluada con el ensayo de penetración de agua [9]. Para cada hormigón ensayado, la figura muestra la profundidad de

penetración de agua máxima obtenida cuando el hormigón se cura con agua de mar (Hormigón MAR), frente al mismo resultado experimental en hormigón curado con agua dulce (Hormigón DULCE).

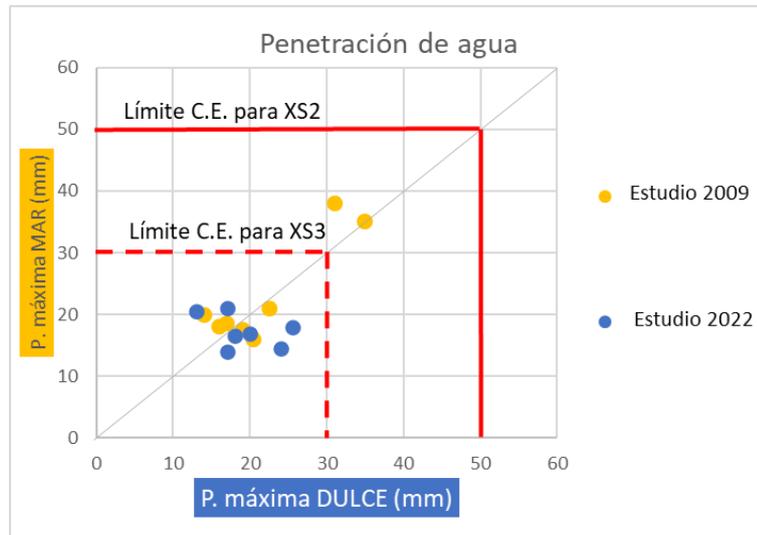


Figura 3. Penetración de agua máxima en hormigón DULCE y hormigón MAR. Estudio de 2009 y Estudio de 2022

Se han obtenido resultados similares de penetración de agua en las probetas curadas con agua dulce y con agua de mar. Todos los hormigones ensayados cumplen los requisitos más exigentes que fija el Código Estructural para ambiente XS3 (≤ 30 mm), salvo las probetas directamente tomadas de un hormigón de obra (estudio CEDEX 2009). A diferencia de los resultados de resistencia a compresión que reflejan calidades muy diferentes de hormigón, los de penetración de agua aparecen, a excepción del hormigón de obra, agrupados en una nube de puntos alrededor de la línea de igualdad curado con agua dulce-agua de mar, con un rango de penetraciones máximas de 15 a 25 mm.

2.2 RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE CLORUROS

Las probetas de hormigón, tras su curado en agua de mar o dulce se han mantenido sumergidas en agua de mar, durante 3 años en el caso del CEM I, y durante 4,5 años en el caso de los dos cementos con adiciones: CEM II y CEM III. El avance de los cloruros durante este periodo de tiempo se ha medido siguiendo el método colorimétrico de Collepari, et. Al. [10] (*Fotografía 3*): se tiñe con AgNO_3 la superficie de fractura de las probetas cúbicas de 20 cm obtenidas para cada edad ensayada, y se mide la profundidad de penetración de cloruros que marca el viraje del AgNO_3 .



Fotografía 3. Frente de penetración de cloruros tras el teñido con nitrato de plata

De la *Figura 4* a la *Figura 6* se muestran los resultados del ensayo para cada tipo de cemento y curado. Y la primera conclusión que se desprende de los resultados alcanzados en 2023 (4,5 años de exposición a los cloruros) es clara: es más importante la selección adecuada del conglomerante que el tipo de curado llevado a cabo. Así, la penetración de cloruros es muy superior en el cemento portland sin adiciones que en los cementos con alto contenido de adición puzolánica (CEM II/B-V y CEM III/B), aunque el hormigón con cemento portland se cure 11 días en agua dulce y el resto no.

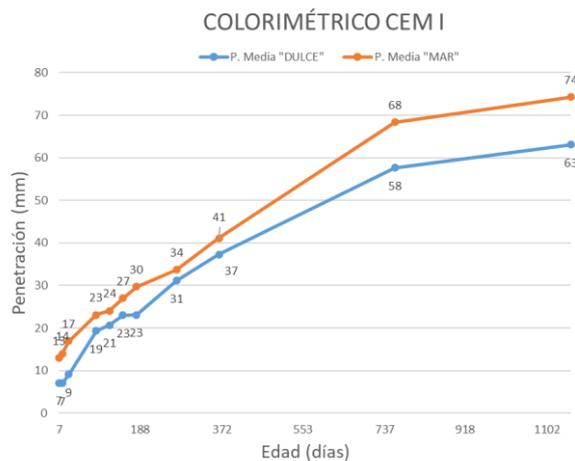


Figura 4. Profundidad de penetración de cloruros en hormigón **CEM I**. 2023

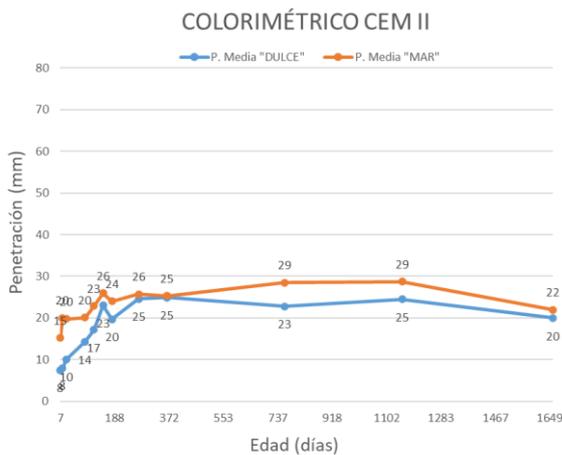


Figura 5. Profundidad de penetración de cloruros en hormigón **CEM II**. 2023

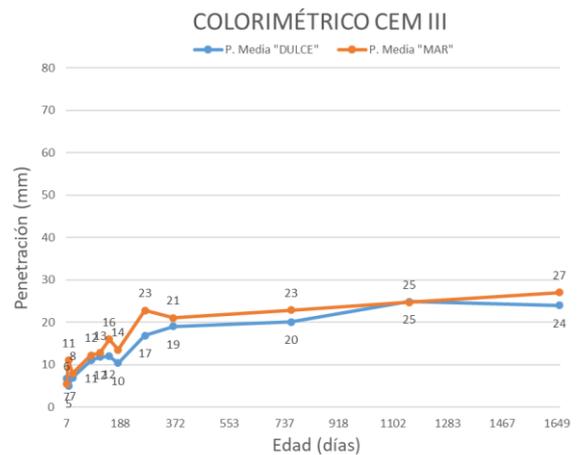


Figura 6. Profundidad de penetración de cloruros en hormigón **CEM III**. 2023

Para valorar el comportamiento frente a los cloruros en función del tipo de curado, se representan también las profundidades alcanzadas frente a la raíz cuadrada del tiempo (*Figura 7 a Figura 9*). Teniendo en cuenta que los cloruros avanzan en el hormigón con la raíz cuadrada del tiempo (buen ajuste lineal), es de prever que el impacto del tipo de curado inicial, evaluado durante los 4 primeros años, no debería variar sensiblemente con el paso del tiempo.

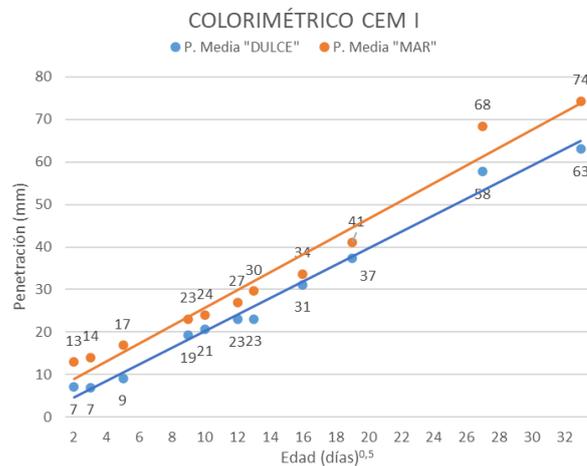


Figura 7. Profundidad de penetración de cloruros en hormigón CEM I (2023) frente a la raíz cuadrada del tiempo

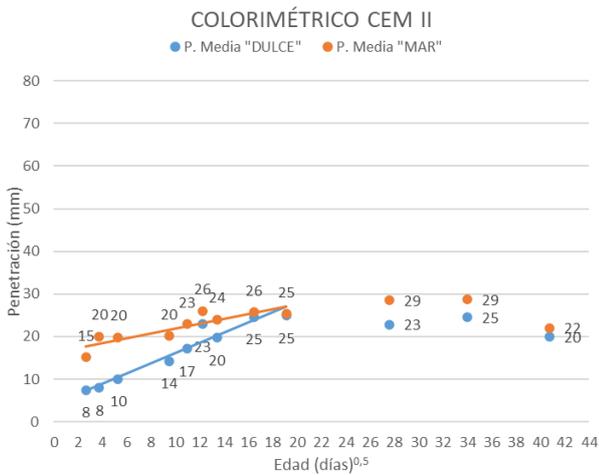


Figura 8. Profundidad de penetración de cloruros en hormigón CEM II (2023) frente a la raíz cuadrada del tiempo

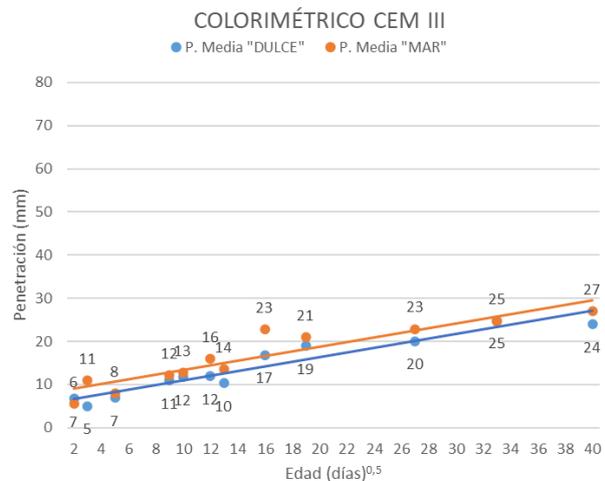


Figura 9. Profundidad de penetración de cloruros hormigón CEM III (2023) frente a la raíz cuadrada del tiempo

Cuando se comparan comportamientos en función del tipo de curado, la menor diferencia se encuentra en el hormigón realizado con CEM III (*Figura 9*). La alta capacidad de las escorias para combinar cloruros, ya descrita en otros trabajos sobre curado con agua de mar [11], permite explicar este buen comportamiento frente a la difusión de cloruros desde edades tempranas, independientemente de que se cure con agua dulce o con agua de mar.

En los hormigones con cemento Portland y con cenizas volantes la diferencia entre curar con agua de mar y agua dulce alcanza hasta los 8-12 mm en los primeros 28 días. Pero, en el caso del hormigón con cenizas esa diferencia va disminuyendo con el tiempo, y al año ambos hormigones presentan ya comportamientos similares. En cambio, en el caso del hormigón sin adiciones la diferencia entre

curados se mantiene en el tiempo, aunque sin superar los 11 mm de diferencia durante los 3 primeros años de exposición a los cloruros.

Analizados los resultados obtenidos en 2023, se completa la valoración con los resultados obtenidos en 2009. Para ello, la *Figura 10* recoge de forma conjunta ambos estudios, mostrando la penetración de cloruros en el hormigón curado con agua de mar frente a la penetración de cloruros en el mismo hormigón, pero curado inicialmente con agua dulce.

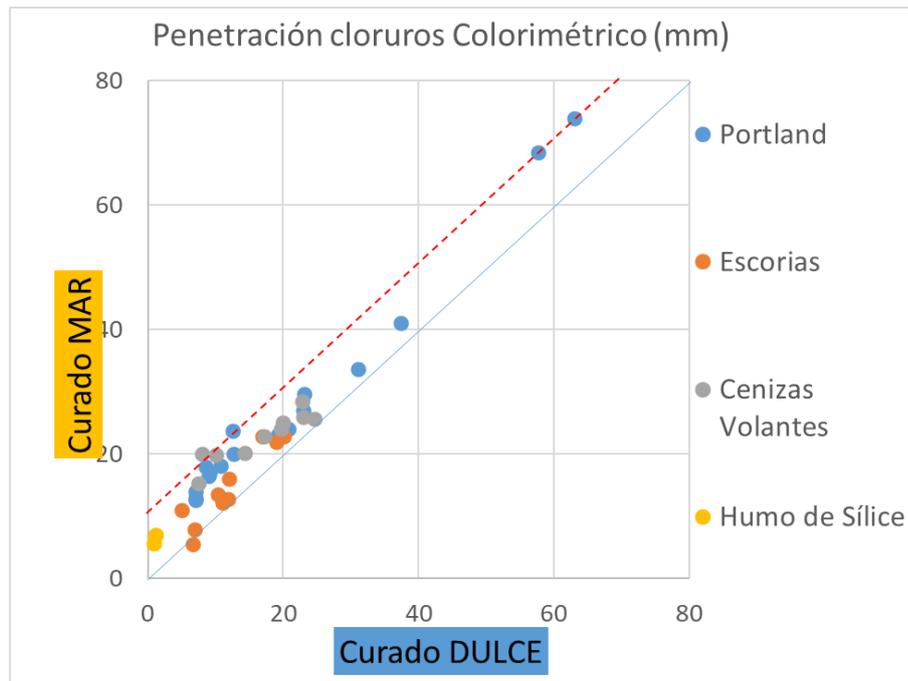


Figura 10. Penetración de cloruros en hormigón DULCE y hormigón MAR con el método colorimétrico (2022 y 2009)

Las dos campañas de ensayos presentan resultados muy similares. Los hormigones con humo de sílice muestran penetración muy baja de cloruros, propia de su baja permeabilidad. Los hormigones con escorias se alejan muy poco de la línea de igualdad entre tipos de curado, independientemente de la edad del hormigón. En el caso de las cenizas, según aumenta la edad, correspondiendo con mayor profundidad alcanzada por los cloruros, los comportamientos del hormigón curado en agua dulce y agua salada se aproximan. Y, finalmente, en el caso de los hormigones con cemento Portland hay una tendencia clara a mantener una diferencia, en función del curado realizado, alrededor de los 10 mm, incluso con penetraciones de cloruros superiores a los 5 cm de profundidad.

Por tanto, a la vista los resultados experimentales alcanzados en este estudio (*Figura 10*), cumplir las exigencias de dosificación y permeabilidad del Código Estructural para ambiente XS3 y utilizar como conglomerante CEM II/B-V, CEM II/A-D o CEM III/B, sería suficiente para garantizar que la durabilidad por corrosión de los cajones flotantes no se vea disminuida por el hecho de sumergir de forma temprana el hormigón que quedará definitivamente bajo el agua de mar.

Además, el Código Estructural en su artículo 43 considera que el CEM III/A, los hormigones con más del 6% de humo de sílice o 20% de cenizas volantes, así como los CEM IV que den al hormigón este mismo contenido de adición puzolánica, son igual de eficaces en la protección de las armaduras frente a la corrosión por cloruros que los tres cementos con adiciones estudiados en este documento. Por tanto, se puede hacer extensivo a estos cementos las conclusiones expuestas anteriormente.

Finalmente, en caso de no ser posible utilizar los cementos anteriormente descritos, aumentar en 10 mm el recubrimiento servirá para garantizar que el hormigón de los cajones flotantes presentará un comportamiento frente a los cloruros, como mínimo, equivalente al que tendría el mismo hormigón curado previamente con agua dulce, siempre y cuando se mantengan las condiciones de permeabilidad y dosificación del Código Estructural para ambiente XS3. En el caso de utilizar otras dosificaciones menos exigentes, se requerirá un estudio experimental específico, tal como exige actualmente la normativa española¹.

Además de evaluar el comportamiento del hormigón frente a los cloruros utilizando el ensayo colorimétrico, se han realizado perfiles completos de concentración de cloruros en el hormigón (Fotografía 4 y Fotografía 5), tras 1 año sumergidos en agua de mar [12].



Fotografía 4. Marcada en rojo la zona de extracción de muestra para la realización del perfil de cloruros



Fotografía 5. Muestra para realización del perfil de cloruros. Cada franja se corta y analiza para evaluar su contenido de cloruros

Entre la Figura 11 y la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos.

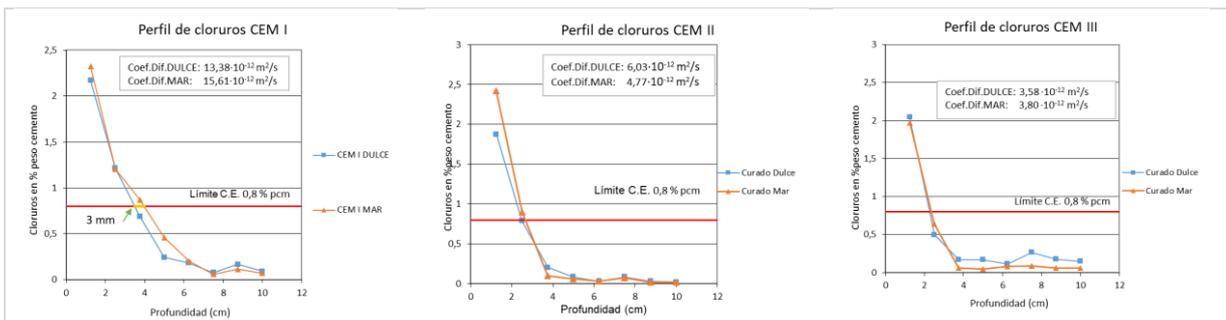


Figura 11. Perfil de penetración de cloruros a 1 año. CEM I. 2022

Figura 12. Perfil de penetración de cloruros a 1 año. CEM II. 2022

Figura 13. Perfil de penetración de cloruros. CEM III. 2022

¹ Artículo 29 del Código Estructural: Siempre que lo justifique expresamente el proyecto, mediante un estudio documental y de las decisiones adoptadas relativas a durabilidad (tipo de cemento, recubrimientos, etc.), o bien mediante un estudio experimental de durabilidad, podrá aplicarse un curado por inmersión en agua de mar en elementos de hormigón armado que vayan a estar situados permanentemente en clase de exposición XS2, evitando en todo el proceso que se produzcan ciclos de secado del hormigón.

Comentarios al artículo 29 de la Comisión Permanente del Hormigón: El curado con agua de mar se restringe en el articulado a procesos de inmersión del hormigón tras el desencofrado sin permitir que llegue a secar en ningún momento. Tal es el caso, por ejemplo, de la construcción de cajones de muelles en plataforma flotante, técnica en la que se utiliza un encofrado deslizante y en la franja del cajón ya hormigonada se sumerge en el agua tras el deslizado.

De nuevo, se observa que es mucho mayor la diferencia que se obtiene por utilizar un cemento sin adiciones que por curar con agua de mar. También se representa el umbral de cloruros para que se inicie la corrosión en ambiente XS2 (0,8% en peso de cemento, según el anejo 12 del Código Estructural). A 1 año, la mayor diferencia en la profundidad que ha alcanzado el umbral de cloruros se encuentra en el CEM I (3 mm). En los hormigones con adiciones, la profundidad del umbral de cloruros es prácticamente coincidente, independientemente de que se cure con agua de mar o con agua dulce.

A los dos años se evalúan de nuevo los perfiles de cloruros en los hormigones con adiciones, obteniéndose perfiles de penetración de cloruros muy similares y una profundidad del umbral de cloruros que no varía en más de 5 mm por usar un tipo de curado diferente.

Finalmente, realizar los perfiles de cloruros también ha permitido evaluar con qué contenido de cloruros en el hormigón vira el ensayo de nitrato de plata en los hormigones ensayados. Se ha obtenido un valor medio de viraje del nitrato de plata de 0,98% de cloruros en peso de cemento, resultado muy similar al obtenido en otros estudios [13].

2.3 OTRAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN: POROSIDAD Y SUCCIÓN CAPILAR

Se han realizado ensayos de porosidad abierta [14] y succión capilar [15] en las 3 dosificaciones estudiadas, tanto en las muestras curadas con agua de mar como con agua dulce.

En primer lugar, se ha evaluado la porosidad abierta del hormigón, comparando las muestras curadas con agua dulce y con agua de mar (Figura 14).

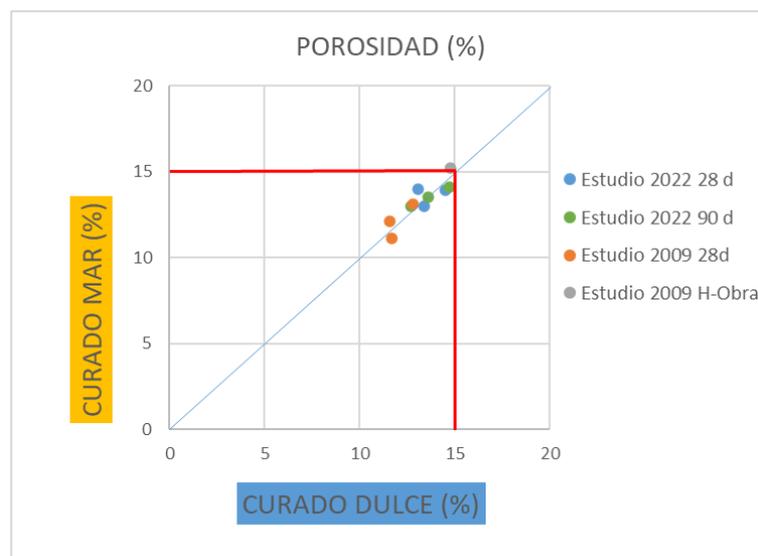


Figura 14. Resultados de porosidad comparando los tipos de curado. Se diferencian los diferentes estudios realizados y la edad del ensayo

Los resultados obtenidos de porosidad abierta en todos los hormigones ensayados no se ven influenciados por el curado con agua de mar. Los resultados se mueven entre el 11% y el 15%, todos ellos por debajo del límite que marca el CEB-FIB Bulletin 243 [16] para hormigones de baja porosidad.

El proceso constructivo de los cajones hace que pase un tiempo, entre 1 y 3 días, desde que se retira el encofrado del hormigón de los hastiales hasta que éste se sumerge en agua de mar. Durante este tiempo se debe evitar que el hormigón se seque. Se ha utilizado el ensayo de succión capilar para entender que sucedería en el hormigón si éste perdiera agua antes de sumergirse definitivamente en el mar.



Fotografía 6. Ensayo de succión capilar del hormigón



Fotografía 7. Detalle del ensayo de succión capilar

Para ello, se ha saturado por succión capilar una cara de las probetas, quedando el hormigón de esta cara con sus poros capilares saturados de agua, en una situación muy similar a la de un hormigón en el momento de desmoldarse. A continuación, se ha sometido a un proceso de secado suave, de 17h a 40°C, creando en laboratorio de forma acelerada un proceso similar a no curar el hormigón durante el periodo de 1-3 días previo a que se sumerja en agua de mar. La pérdida de humedad obtenida se representa en las líneas descendentes de las *Figura 15 a Figura 17*, en las que el hormigón pierde parte del agua que tiene en los capilares. Pasado el periodo de secado, el hormigón se pone en contacto con agua de mar (*Fotografía 6 y Fotografía 7*), reabsorbiendo en tan solo 6 horas todo el agua que había perdido durante el secado (zona creciente de las *Figura 15 a Figura 17*).

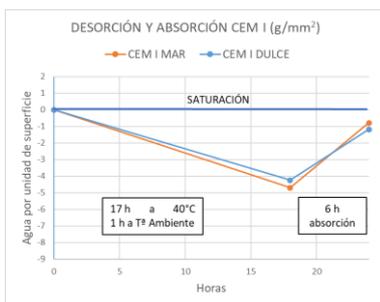


Figura 15. Succión capilar hasta saturación, desorción 17h a 40°C y succión de 6 horas en el CEM I

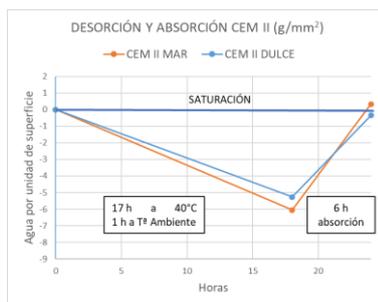


Figura 16. Succión capilar hasta saturación, desorción 17h a 40°C y succión de 6 horas en el CEM II

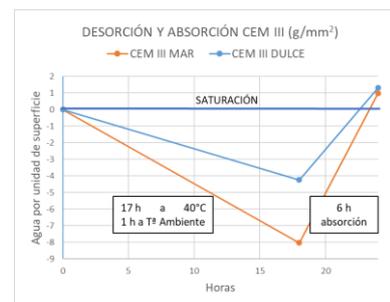


Figura 17. Succión capilar hasta saturación, desorción 17h a 40°C y succión de 6 horas en el CEM III

Por tanto, las figuras muestran cómo, si el hormigón de los cajones se deja al aire antes de sumergirse en agua de mar, perderá parte del agua capilar. Pero posteriormente, cuando el hormigón se sumerja y entre en contacto con el agua de mar, el hormigón recuperará rápidamente toda el agua perdida, aunque ahora lo hará recuperando agua de mar rica en cloruros. Por consiguiente, se alcanzarán concentraciones de cloruros muy superiores en los centímetros exteriores a las que se alcanzarían si el hormigón se introdujera en el agua de mar saturado de agua dulce, ya que en este último caso los cloruros solo accederían por difusión. **De ahí la importancia de evitar que se produzca el secado del hormigón antes de quedar éste sumergido en el agua de mar. Esta exigencia, además, está recogida en la normativa española (nota al pie 1, Pág. 14).**

La *Fotografía 8* es un ejemplo de curado de la franja emergida de un cajón durante su fabricación, para evitar así que se seque antes de sumergirse definitivamente.



Fotografía 8. Muestra del avance del curado que se ejecuta recorriendo el perímetro del cajón mientras se encuentra en la plataforma de construcción [17]

3 ESTUDIO DE CAMPO: INFLUENCIA DE CURAR CON AGUA DE MAR EN CAJONES REALES

Con la finalidad de conocer en obras reales la influencia que pueda tener curar con agua de mar hormigón que estará en ambiente XS2, se ha ensayado el hormigón de 5 cajones: 3 pertenecientes al Puerto de Barcelona, y 2 al Puerto de Granadilla, en la Isla de Tenerife (*Tabla 2*).

Tabla 2. Características de los cajones estudiados

| Localización del cajón | Barcelona (Muelle Best. El Prat) | | | Tenerife (Puerto de Granadilla) | |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------|-------------|---------------------------------|----------|
| | Cajón 19 | Cajón 22 | Cajón D | Cajón 17 | Cajón 18 |
| Fecha de fabricación | 2006 | 2006 | 2008 | 2016 | 2016 |
| Hormigón | HA-35/P/20/IIIb+Qb+E | | | HA-35/F/20/IIIc+Qb+E | |
| Tiempo hasta el fondeo definitivo | >15 días | >15 días | 9 -10 meses | >30 días | >30 días |
| Espesor de recubrimiento | 5 cm | 5 cm | 5 cm | 6 cm | 6 cm |

Para obtener el hormigón de los cajones, se han extraído sondeos desde la cara superior de la viga cantil, de forma que los sondeos se sitúen tras el armado del paramento exterior de los cajones (Figura 18 y Fotografía 9).

Una vez extraídas las muestras (Fotografía 10), se ha comparado la zona superior e inferior de cada uno de los sondeos. La zona de ensayo superior no entró en contacto con el agua de mar hasta que el cajón fue fondeado, al menos, 15 días después de su fabricación (*Tabla 2*). Ahora bien, una vez fondeado el cajón, esta zona de ensayo debe estar a una profundidad suficiente para conseguir que el hormigón quede sumergido (hormigón en ambiente XS2). La parte inferior de ensayo en cada sondeo quedó sumergida bajo el agua de mar durante el proceso de construcción del cajón. (Figura 19).

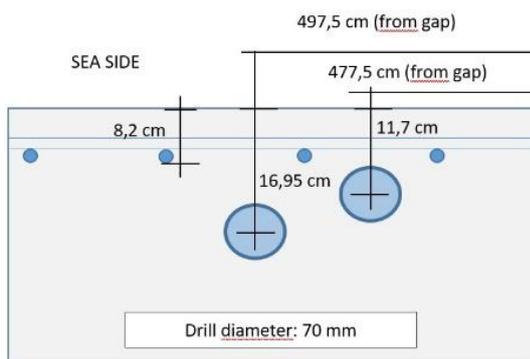


Figura 18. Replanteo de uno de los sondeos



Fotografía 9. Replanteo de uno de los sondeos in-situ



Fotografía 10. Extracción de sondeo en el Puerto de Barcelona

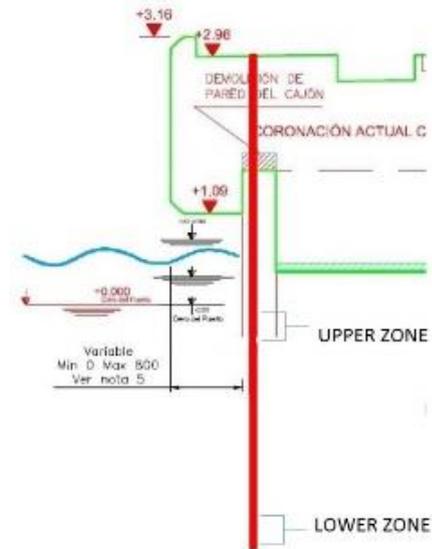


Figura 19. Definición de zonas de trabajo en el sondeo

Por tanto, en el estudio en campo se comparará el hormigón SUPERIOR, que tarda al menos 15 días en contactar con el agua de mar, con el hormigón INFERIOR, sumergido en el agua de mar durante el proceso de construcción del cajón. Ambas zonas están sumergidas en agua (ambiente XS2) tras el fondeo definitivo del cajón.

3.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y PERMEABILIDAD

La *Figura 20* recoge los resultados de resistencia a compresión enfrentando los valores de hormigón SUPERIOR y hormigón INFERIOR de cada uno de los sondeos.

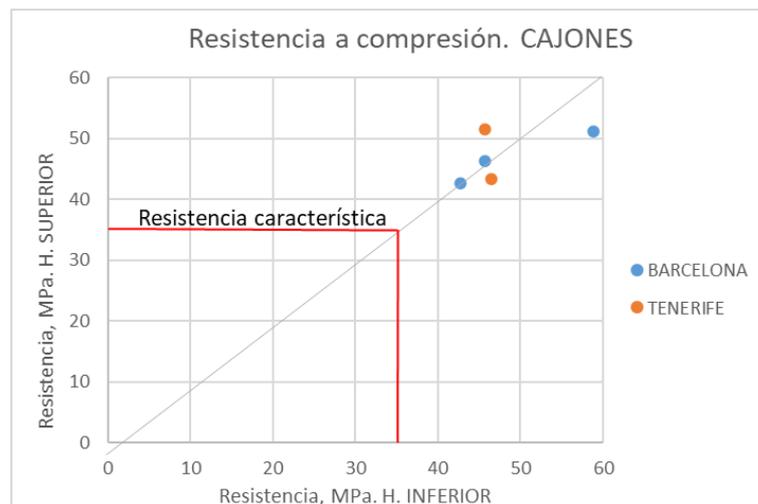


Figura 20. Resistencia a compresión en los cajones. Comparación hormigón SUPERIOR y hormigón INFERIOR

Todas las resistencias a compresión obtenidas son claramente superiores a la resistencia característica de proyecto. Además, se han obtenido resultados similares de resistencia a compresión en las probetas de las zonas superior e inferior de los sondeos, independientemente de lo que tardaran en entrar en contacto con el agua de mar, indicando **que no tiene influencia sobre la resistencia el contacto prematuro del hormigón con el agua de mar.**

Igualmente, la *Figura 21* muestra la permeabilidad del hormigón obtenida en el ensayo de penetración de agua (milímetros de penetración máxima).

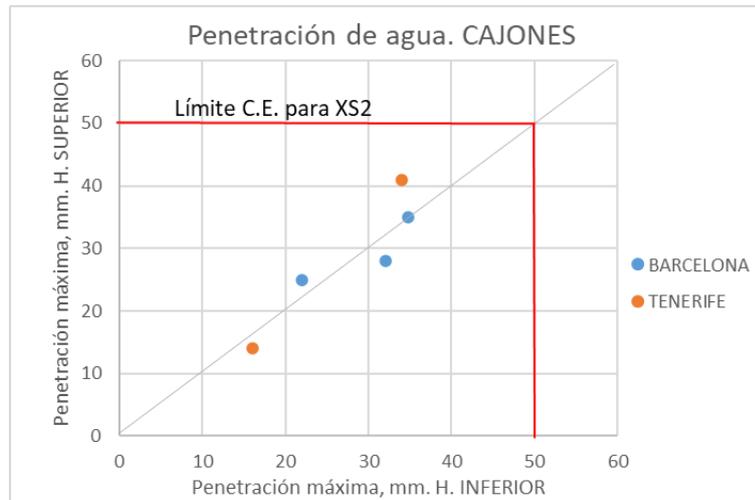


Figura 21. Penetración de agua máxima en los cajones. Comparación hormigón SUPERIOR y hormigón INFERIOR

Todos los resultados cumplen con los 50 mm de penetración máxima que se exige al ambiente XS2. En el caso de Tenerife, en el que el hormigón se clasifica como IIIc (equivalente a XS3), la penetración máxima debería ser de 30 mm, resultado que uno de los dos cajones no alcanza. Ahora bien, cuando se comparan los resultados de la zona superior e inferior de un mismo cajón, se observan siempre resultados muy similares de penetración de agua, mostrando que **la permeabilidad del hormigón no depende del tiempo que haya tardado en contactar con el agua de mar.**

3.2 RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LA PENETRACIÓN DE CLORUROS

Para conocer la resistencia al paso de los cloruros que ha mostrado la parte superior e inferior de cada sondeo se han realizado perfiles de penetración de cloruros, midiendo su concentración [12] en rodajas de hormigón paralelas a la cara exterior del cajón, expuesta al mar (*Fotografía 11*).



Fotografía 11. Preparación de muestras para la obtención de perfiles de penetración de cloruros

El hormigón extraído se ubica tras el armado del cajón, por lo que los perfiles comenzarán aproximadamente a 7-10 cm del paramento exterior, dependiendo del cajón ensayado (Figura 18). La Figura 22 muestra los resultados obtenidos en Barcelona, y la Figura 23 los resultados de Tenerife.

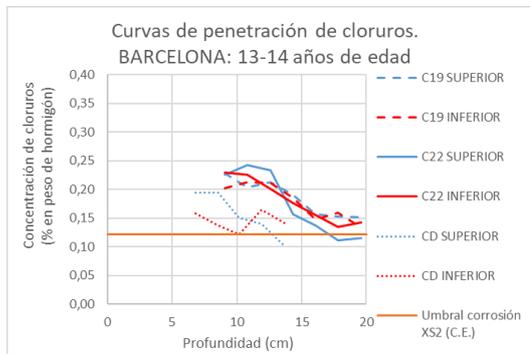


Figura 22. Perfiles de penetración de cloruros. Cajones del puerto de Barcelona. Comparación hormigón SUPERIOR y hormigón INFERIOR

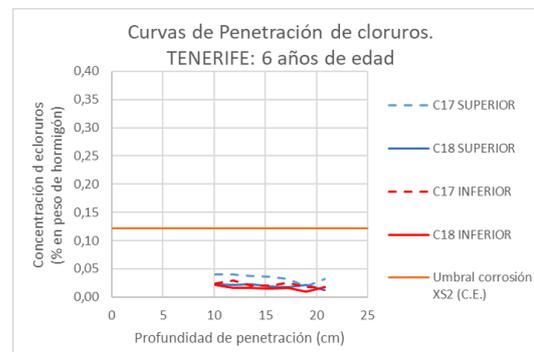


Figura 23. Perfiles de penetración de cloruros. Cajones del Puerto de TENERIFE. Comparación hormigón SUPERIOR y hormigón INFERIOR

Los 3 cajones ensayados en el puerto de Barcelona (Figura 22) no han mostrado diferencias significativas en los perfiles de cloruros medidos en la zona superior e inferior de cada sondeo. Por lo tanto, los resultados indican que **el hecho de entrar en contacto con el agua de mar tras la fabricación (zona inferior) no ha supuesto un comportamiento diferente frente a los cloruros a largo plazo.**

Además, la Figura 22 también muestra cómo, tras 13 años de servicio, los contenidos de cloruros alcanzados tras el armado en Barcelona han superado el umbral de cloruros que propone el Código Estructural para que se inicie la corrosión en ambiente marino sumergido (0,8% de cloruros en peso de cemento). Sin embargo, se han extraído barras de armado en el sondeo procedente del cajón D (Barcelona), y éstas no presentan procesos de corrosión activos, tal como se aprecia en la *Fotografía 12*.



Fotografía 12. Barra vertical sin corrosión. Cajón D. Puerto de Barcelona

El hormigón alrededor de la barra vertical sin corrosión de la *Fotografía 12* ha presentado una concentración de cloruros, expresada en peso de cemento, de 1,25% en la zona superior y de 1,04 % en la inferior. Aunque estas concentraciones de cloruros son claramente superiores al umbral de 0,8% en peso de cemento que fija el Código Estructural, no se observa todavía corrosión en el armado. Por tanto, **la concentración de cloruros para que se inicie la corrosión en el hormigón sumergido (SX2) debe ser superior al 1,25% de cloruros en peso de cemento**, y la vida útil teórica de cualquier hormigón sumergido en agua de mar debe ser superior a la que proporciona la normativa española,

que propone un umbral de cloruros para el inicio de la corrosión conservador, de 0,8% en peso de cemento.

En los dos cajones de Tenerife, tras 6 años expuesto al agua de mar, los cloruros no han alcanzado las profundidades ensayadas, ni en la zona superior del cajón, ni en la inferior. Por tanto, la comparación entre alturas del cajón sólo permite afirmar que la concentración de cloruros iniciales es de 0,14% en peso de cemento, por debajo del límite que actualmente fija el Código Estructural al hormigón armado (0,2% en peso de cemento).

3.3 ESTUDIOS DE CAMPO PREVIOS SOBRE LA DURABILIDAD EN CAJONES FLOTANTES

Entre los años 2004 y 2009 el CEDEX lleva a cabo un estudio sobre durabilidad de muelles realizados con cajones flotantes ([7], [18], [19]).

El estudio de 7 muelles realizados con cajones flotantes mostró estructuras en buen estado, sin indicios significativos de patologías por corrosión, especialmente en aquellas estructuras realizadas con cementos puzolánicos (*Fotografía 13, Fotografía 14 y Fotografía 15*).



Fotografía 13. Muelle de cajones flotantes en ambiente XS3, con buen aspecto general, tras 2 años de servicio. Detalle de armadura descubierta en el cajón, sin indicios de corrosión. Cemento IIIB/32,5-SR



Fotografía 14. Muelle con buen aspecto general en ambiente XS3, tras 2 años de servicio. Detalle de armaduras descubiertas en el cajón, sin indicios de corrosión. Cemento IV/A 32,5 SR/MR



Fotografía 15. Muelle de cajones en ambiente XS3, con buen aspecto general del hormigón, sin síntomas visibles de corrosión, sin fisuración y sin coqueas, tras 31 años de servicio. Cemento puzolánico

Se estudiaron dos muelles cuyos cajones se encuentran en ambiente sumergido, pertenecientes a los puertos de Barcelona y Valencia. Fueron cajones llevados a cabo con hormigón H25, relación agua

cemento 0,5, y evaluados tras 4,5 y 6,5 años de exposición a los cloruros. Al igual que en estudio actual (2022) sobre cajones flotantes y su curado, entonces se estudiaron testigos extraídos desde la cara superior de la viga cantil hasta alcanzar el hormigón de los cajones, ubicado en ambiente marino sumergido.

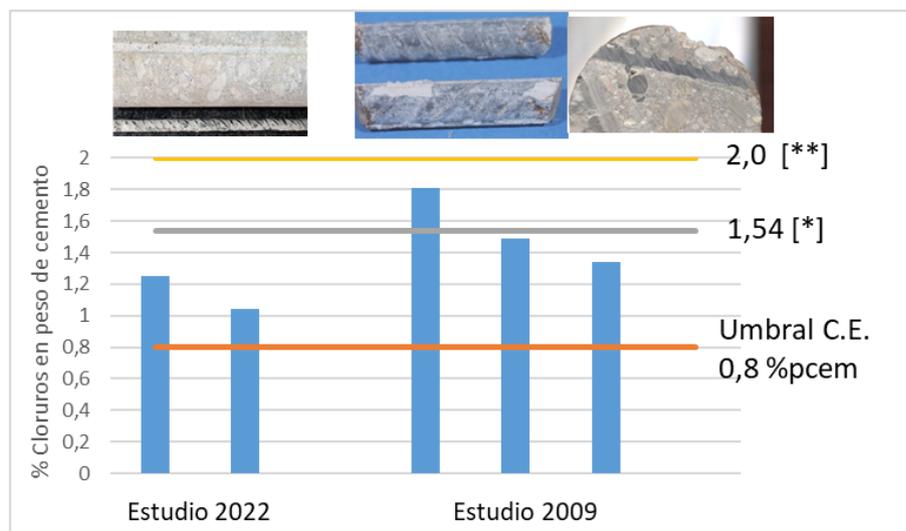


Fotografía 16. Extracción desde la cara superior de la viga cantil de un sondeo vertical hasta alcanzar el hormigón sumergido en un cajón del Puerto de Valencia



Fotografía 17. Extracción desde la cara superior de la viga cantil de un sondeo vertical hasta alcanzar el hormigón sumergido en un cajón del Puerto de Barcelona

El estudio de los cajones en estos dos puertos permitió observar cómo, al igual que ha sucedido en el presente estudio, hay barras con contenido de cloruros por encima del umbral de 0,8% en peso de cemento que no presentan corrosión. La *Figura 24* recoge la concentración de cloruros de todas las barras sin corrosión extraídas de la zona sumergida de diferentes cajones flotantes analizados en el CEDEX.



[*] Límite para hormigón sumergido: Izquierdo [20]
 [%**] Límite para hormigón sumergido y cemento Portland: [21]

Figura 24. Porcentaje de cloruros en peso de cemento en armaduras sumergidas sin indicios de corrosión. Estudios CEDEX 2009 y 2022

Los resultados obtenidos en el CEDEX son acordes a otros umbrales mayores que recoge la bibliografía para el inicio de la corrosión en hormigón sumergido, y que se muestran también en la figura. Por tanto, **se puede concluir que el umbral de cloruros para el inicio de la corrosión propuesto en la normativa española para hormigón sumergido (0,8% en peso de cemento) es conservador**, y las valoraciones llevadas a cabo con este parámetro quedarán siempre del lado de la seguridad, con estimación de vida útil en hormigón sumergido inferiores a las reales.

Pero además, que el umbral de cloruros para que se inicie la corrosión en el hormigón sumergido sea superior al 1,50% en peso de cemento hace que disminuya, aún más, la importancia que tiene curar con agua de mar para la vida útil del hormigón en ambiente XS2: cuanto mayor es la cantidad de cloruros necesaria en el armado para que se inicie la corrosión, menos relevante será para la durabilidad de los cajones flotantes el hecho de que el frente de cloruros haya avanzado unos milímetros más por haber curado el hormigón en agua de mar durante los primeros días de vida de la estructura.

Además de los dos muelles anteriores en hormigón sumergido, los estudios previos del CEDEX evaluaron la zona de carrera de mareas de 5 muelles realizados con cajones flotantes. Dos de las conclusiones alcanzadas en este trabajo de 2009 son relevantes para el estudio sobre el curado del hormigón de los cajones flotantes:

- **La selección del tipo de cemento:** en 2009 se constató que la utilización de cementos con altos contenidos de adiciones puzolánicas (cenizas y escorias) permitieron obtener en los cajones flotantes estudiados penetraciones de cloruros muy bajas, incluso con normativas más laxas que la actual, tal como queda recogido en la Figura 25.

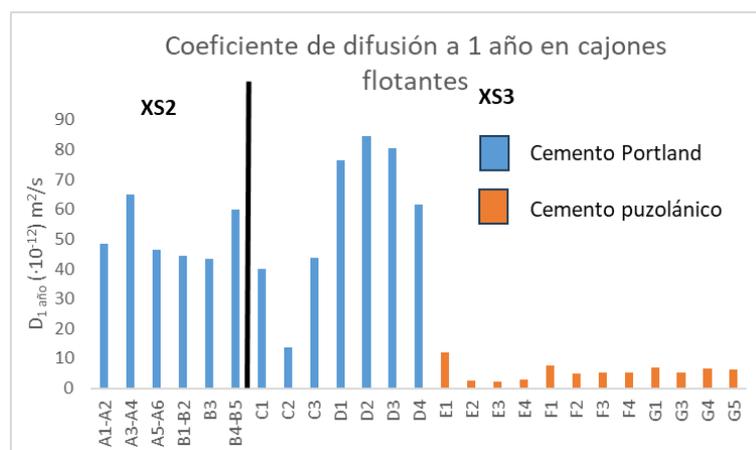


Figura 25. Coeficientes de difusión a 1 año para diferentes cajones estudiados

Esta afirmación está en concordancia con lo expuesto anteriormente en el Estudio de Laboratorio para evaluar el alcance de curar con agua de mar hormigón armado en ambiente marino sumergido: **es más importante la selección adecuada del conglomerante que el tipo de curado llevado a cabo.**

- **Correcta ejecución y curado de la zona de carrera de mareas:** Este estudio permitió constatar que la zona del cajón donde las exigencias de durabilidad son mayores es la zona de carrera de mareas y salpicaduras (XS3), ya que el umbral para que se inicie la corrosión disminuye debido a que la disponibilidad de oxígeno para que las armaduras se corroan es mayor.

Es importante resaltar que esta zona del cajón no entra en contacto prematuro con el agua de mar por quedar emergida hasta el momento del fondeo. Aun así, **sería muy conveniente tras el desencofrado final del cajón proseguir con el curado con agua dulce de la zona emergida para optimizar su calidad final**, ya que se corresponde con la zona del cajón que en servicio estará sometida al ambiente marino más agresivo (carrera de mareas y salpicaduras, XS3).

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los estudios de campo y laboratorio permiten concluir que no existe un riesgo significativo de mayor corrosión del armado debido al proceso constructivo de los cajones en plataforma flotante, de acuerdo con las conclusiones que se resumen a continuación:

- Los resultados en campo y laboratorio muestran que el contacto prematuro con el agua de mar no tiene influencia en la resistencia a compresión, permeabilidad o porosidad del hormigón
- El estudio en laboratorio ha demostrado que **es más relevante la correcta selección del cemento que el curar con agua de mar o dulce**. Así, la penetración de cloruros es mucho mayor en el hormigón fabricado con cemento portland sin adiciones que en hormigón cuyo conglomerante contiene más del 21% de cenizas o más de un 66% de escorias, independientemente de que se cure con agua dulce o salada. Asimismo, los trabajos de campo sobre cajones flotantes realizados con adiciones puzolánicas ratifican su importancia en la vida útil de estas estructuras.
- Los resultados en laboratorio también muestran que el comportamiento frente a los cloruros del hormigón de cemento con escorias es muy bueno desde su fabricación, independientemente de que el hormigón haya entrado en contacto con agua de mar de forma prematura. En los hormigones con cenizas volantes, los resultados comienzan con un peor comportamiento frente a los cloruros cuando se cura con agua de mar, pero según el tiempo avanza, los resultados convergen y a partir del año, la profundidad que alcanzan los cloruros es muy similar en el hormigón curado con agua de mar y en el curado con agua dulce. Finalmente, **el hormigón fabricado con cemento portland mantiene en el tiempo el peor comportamiento del hormigón curado con agua de mar, con una diferencia en la profundidad de cloruros alrededor de los 10 mm.**
- El estudio sobre cajones reales ha mostrado que el hecho de que el hormigón entre en contacto prematuro con el agua de mar durante el proceso de construcción no ha conllevado que ese hormigón presente a largo plazo un peor comportamiento frente a los cloruros. Además, se ha observado que mantener el hormigón sumergido constantemente en agua de mar (ambiente XS2) eleva el umbral de cloruros para que se inicie la corrosión hasta el 1,5%, expresado en peso de cemento, lo que resta importancia al ligero avance que el frente de cloruros pueda sufrir en el hormigón por el hecho de haber sido curado con agua de mar.

Teniendo en cuenta los resultados que se han obtenido en el presente estudio, **cumplir las exigencias de dosificación y permeabilidad del Código Estructural para ambiente XS3 sería suficiente** para garantizar que la durabilidad por corrosión de los cajones flotantes no se vea disminuida por el hecho de sumergir de forma temprana el hormigón que quedará definitivamente bajo el agua de mar, **siempre y cuando se utilice como conglomerante: CEM II/B-V, CEM II/A-D, CEM III/A, CEM IIIB, hormigones con más del 6% de humo de sílice o 20% de cenizas volantes, así como los CEM IV que den al hormigón este mismo contenido de adición puzolánica.**

En caso de no ser posible utilizar los cementos anteriormente descritos, aumentar en 10 mm el recubrimiento servirá para garantizar que el hormigón de los cajones flotantes presentará un comportamiento frente a los cloruros, como mínimo, equivalente al que tendría el mismo hormigón curado previamente con agua dulce, siempre y cuando se mantengan las condiciones de permeabilidad y dosificación del Código Estructural para ambiente XS3. Para utilizar otras dosificaciones menos exigentes se necesitará un estudio experimental específico.

Finalmente, es importante recordar la importancia de **evitar que se produzca el secado en la franja de hormigón que queda liberada por el encofrado** deslizante hasta el momento de su inmersión en el mar. El proceso de inmersión del hormigón tras el desencofrado se debe realizar sin permitir que llegue

a secar el hormigón en ningún momento, para evitar así la mayor penetración de los cloruros por absorción del agua salada.

Asimismo, la parte alta del cajón quedará emergida sin contacto con el agua del mar hasta el momento del fondeo, por lo que sería muy conveniente tras el desencofrado final proseguir con el curado con agua dulce de esta zona para optimizar su calidad final, ya que se corresponde con la que en servicio estará sometida al ambiente marino más agresivo (XS3), y por tanto es la zona más crítica del cajón desde el punto de vista de la durabilidad.

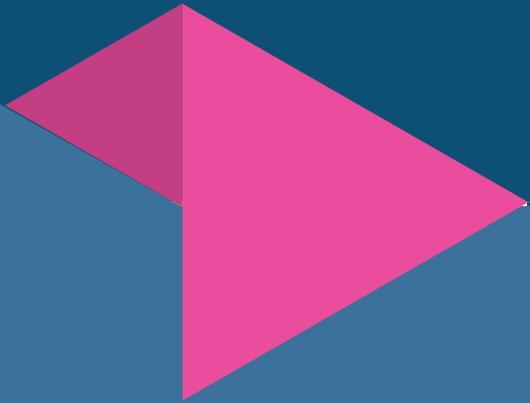
5 PUBLICACIONES PREVIAS

Parte de los trabajos recogidos en este documento han sido publicados previamente en la comunicación "Influence of seawater curing on reinforced concrete located in XS2 environment" recogida en la publicación "Proceedings of the fib Symposium 2023. Building for the Future: Durable Sustainable, resilient", Ed. Springer". La publicación actual amplía sustancialmente la información ya publicada, con mayor descripción de los materiales ensayados, nuevos resultados tras 4,5 años de exposición, ensayos de capilaridad y porosidad, evaluación del umbral de cloruros para el inicio de corrosión en ambiente XS2 y estudios de durabilidad en cajones portuarios de 7 puertos españoles.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Vera-Agullo et al., Durability of Concrete Caissons made in floating docks / 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week. Sydney: Concrete Institute of Australia. 2015.
- [2] B. T. Nishida, N. Otsuki, and H. Hamada, "Steel Corrosion in Concrete Mixed with Seawater," vol. 56, no. 12, p. 201812, 2018.
- [3] P. S. Mangat and M. C. Limbachiya, "Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 9, pp. 1475–1485, Sep. 1999.
- [4] (ACI Committee 357), ACI PRC-357-84: Guide for the design and construction of fixed Offshore Concrete Structures. 2002.
- [5] Fédération Internationale de la Précontrainte (FIB), "Design and Construction of Concrete Sea Structures". FIB Report. T. Telford, 1985.
- [6] R. Decreto 470/2021: Código Estructural. [Online]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-13681
- [7] M. Á. Bermúdez and P. Alaejos, Estudio experimental de la durabilidad del hormigón armado en ambiente marino / Anejo: Estudio de la influencia del curado con agua de mar, 2009th ed. Madrid: Centro de Publicaciones / Secretaría General Técnica / Ministerio de Fomento, 2009.
- [8] AENOR, "UNE-EN 12390-3:2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas." 2009.
- [9] AENOR, "UNE-EN 12390-8 Parte 8 : Profundidad de penetración de agua bajo presión." 2020.
- [10] M. Collepardi, A. Marcialis, and R. Turriziani, "La cinetica di penetrazione degle ioni cloruro nel calcestruzzo.pdf," *Cem.*, vol. 4, pp. 157–164, 1970.
- [11] N. Otsuki, T. Nishida, C. Yi, T. Nagata, and H. Ohara, "Effect of blast furnace slag powder and fly ash on durability of concrete mixed with seawater," *Proc. 4th Int. Conf. Durab. Concr. Struct. ICDCS 2014*, no. July, pp. 229–241, 2014.
- [12] ASTM, "ASTM C1152/C1152M-04 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete," 2017.
- [13] C. Andrade, M. Castellote, C. Alonso, and C. González, "Relation between colorimetric chloride penetration depth and charge passed in migration tests of the type of standard ASTM C1202-91," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 417–421, 1999.
- [14] RILEM, "CPC 11.3 Absorption of water by immersion in vacuum," *Mater. Struct.*, vol. 17, no. 101, pp. 391–394, 1984.
- [15] RILEM, "CPC 11.2 Absorption of water by concrete by capillarity," in *RILEM Recommendations for the testing and use of construction materials*, RILEM, Ed. E & FN SPON, 1994, pp. 34–35.

- [16] CEB-FIP, Strategies for testing and assesment of concrete structures affected by reinforcement corrosion, vol. 243. 1998.
- [17] Acciona, Tecnología de cajones para obras marítimas. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=OBMRaZW-Epg>.
- [18] M. Á. Bermúdez Odriozola, “Tesis Doctoral: Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida,” 2007.
- [19] Pilar Alaejos Gutiérrez and Miguel Ángel Bermúdez Odriozola, Corrosión de las armaduras en el hormigón situado en ambiente marino. Estado del arte. Madrid: CEDEX, 2008.
- [20] D. Izquierdo, C. Alonso, C. Andrade, and M. Castellote, “Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation: Experimental and statistical study,” *Electrochim. Acta*, vol. 49, no. 17–18, pp. 2731–2739, Jul. 2004.
- [21] F. Papworth, “Workshop Critical Chloride Content for corrosion initiation,” 2023. [Online]. Availab



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS