

RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE ESPALDONES DE DIQUES DE HORMIGÓN ARMADO

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURASY 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



**RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE
ESPALDONES DE DIQUES DE HORMIGÓN ARMADO**

VÍCTOR D. LANZA FERNÁNDEZ
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: Recomendaciones para mejorar la durabilidad de espaldones de diques de hormigón armado

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

Año de la edición: 2023

EDICIÓN DIGITAL

1ª edición electrónica: 2024

Formato: PDF

Tamaño: 5,26 MB

EDITA

Centro de Publicaciones

Secretaría General Técnica

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

© CEDEX: Servicio de Publicaciones

NIPO: 797-23-025-0

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 resultado de un esfuerzo para que la ingeniería portuaria española continúe avanzando en aras de conseguir infraestructuras seguras y durables. Y, más en concreto, es fruto de los trabajos que Puertos del Estado ha encargado al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, de asistencia técnica, investigación aplicada y desarrollo tecnológico en materias de interés para el sistema portuario de interés general.

El espaldón es el elemento estructural emergido que recibe el impacto del oleaje en los diques de abrigo de los puertos. Se trata, por tanto, de una estructura que resulta ser clave para garantizar las condiciones operativas y de seguridad del puerto, al evitar que los efectos del oleaje sobrepasen la infraestructura del dique y afecten a las zonas protegidas por el mismo. De ahí la importancia de garantizar su funcionalidad en el tiempo para que, durante la vida útil de la infraestructura, el comportamiento del dique en su conjunto sea el previsto en su diseño.

Los espaldones se ejecutan habitualmente con hormigón, ya sea en masa o con armaduras de acero, en función de las particularidades de cada caso. La estructura se hormigona *in situ* con medios constructivos *ad hoc*. Siendo los espaldones elementos muy expuestos desde incluso su propia fabricación, a las adversas condiciones ambientales existentes en la zona, su durabilidad requiere especial atención, sobre todo cuando son ejecutados con hormigón armado. Además del deterioro que pueden sufrir las superficies de hormigón sometidas a la acción abrasiva del oleaje, la propia presencia del agua de mar, con cloruros disueltos, puede producir durante la vida útil del espaldón, la corrosión de las armaduras, lo que implicaría el posible fallo de la estructura.

Desde el año 2017, el CEDEX, por encargo de Puertos del Estado y contando con la colaboración de varias Autoridades Portuarias, ha estado estudiando y analizando espaldones de diques construidos con hormigón armado, que han presentado problemas de corrosión antes de la finalización de la vida útil para la que fueron proyectados. Se han evaluado las posibles causas de esta problemática, teniendo en cuenta la evolución cambiante de condicionantes tanto constructivos como normativos en relación con el año de ejecución de cada estructura.

Fruto de este exhaustivo trabajo, se presenta este documento técnico enfocado a conseguir para nuestros puertos, espaldones seguros y durables. Se recopilan así tanto prescripciones de obligado cumplimiento, según el nuevo Código Estructural, como recomendaciones de buena ejecución, basadas en la experiencia, que completan las exigencias normativas, cuya aplicación no solo alcanza el proyecto y ejecución de los espaldones, sino su mantenimiento preventivo durante toda su vida útil.

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.

La presente 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.

El origen de esta publicación se sitúa en el año 2017, cuando el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales comienza el estudio de diferentes espaldones de diques de hormigón armado que han mostrado problemas de corrosión antes de finalizar la vida útil de 50 años para la que fueron diseñadas estas estructuras, a instancias de Puertos del Estado y de las autoridades portuarias afectadas. El estudio realizado ha permitido introducir mejoras en la normativa técnica española, así como establecer recomendaciones para mejorar la durabilidad de los espaldones de diques de hormigón armado en obras futuras.

El alcance de esta publicación incluye aspectos fundamentales como identificar correctamente el ambiente de exposición de la estructura y su agresividad, diseñar la geometría del espaldón incluyendo criterios de durabilidad, la selección idónea de los materiales para fabricar el hormigón, el control de estos materiales durante la ejecución de la obra y la realización de una correcta puesta en obra. Todo ello para lograr una adecuada durabilidad de la estructura que permita completar su vida útil.

El contenido de este documento tiene un gran interés ya que resuelve un problema real planteado en Puertos españoles y permitirá, en el futuro, realizar obras portuarias más durables.

En 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 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 espaldones.

ÁUREA PERUCHO MARTÍNEZ

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

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	PROCESO DE CORROSIÓN EN AMBIENTE MARINO	8
1.2	ALCANCE DE ESTE DOCUMENTO	10
2	CLASES DE EXPOSICIÓN DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE.....	11
2.1	AMBIENTE DE EXPOSICIÓN EN EL ESPALDÓN DE UN DIQUE, SEGÚN EL CÓDIGO ESTRUCTURAL.....	11
2.2	IMPORTANCIA DE LA CORRECTA CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES EN EL ESPALDÓN DE UN DIQUE	12
2.3	CONSECUENCIAS DE LA CLASIFICACIÓN XA2 XS3 XM3 DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	13
3	ESPESOR DE RECUBRIMIENTO	14
3.1	ESPESOR DE RECUBRIMIENTO FIJADO POR EL CÓDIGO ESTRUCTURAL PARA EL ESPALDÓN DE UN DIQUE	14
3.1.1	<i>Espesor de recubrimiento mínimo</i>	14
3.1.2	<i>Recubrimiento nominal</i>	15
3.1.3	<i>Control del espesor de recubrimiento</i>	15
3.2	IMPORTANCIA DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO.....	16
3.3	RECOMENDACIONES SOBRE EL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO	18
4	GEOMETRÍA DE LOS ESPALDONES	19
4.1	EXIGENCIAS NORMATIVAS SOBRE LA GEOMETRÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN Y SU DURABILIDAD	19
4.2	ASPECTOS GEOMÉTRICOS RELEVANTES PARA LA DURABILIDAD DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	19
4.3	RECOMENDACIONES SOBRE LA GEOMETRÍA DE UN ESPALDÓN DE DIQUE	22
5	SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO	23
5.1	RECOMENDACIONES Y REQUISITOS NORMATIVOS SOBRE LA SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO	23
5.2	IMPORTANCIA DE LA CORRECTA SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO	24
5.3	RECOMENDACIONES SOBRE LA SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO	25
6	CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA.....	26
6.1	REQUISITOS NORMATIVOS SOBRE EL CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA.....	26
6.2	IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA	27
6.3	RECOMENDACIONES SOBRE EL CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA	30
7	PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN	31
7.1	REQUISITOS NORMATIVOS DE PERMEABILIDAD EN EL ESPALDÓN DE UN DIQUE	31
7.2	INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN EN LA DURABILIDAD DE UN ESPALDÓN	31
7.3	RECOMENDACIONES PARA EL CONTROL DE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN	34
8	CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN	35
8.1	REQUISITOS NORMATIVOS PARA LA CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN.....	35
8.2	IMPORTANCIA DE LA CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN EN LA DURABILIDAD DE UN ESPALDÓN.....	36
8.3	RECOMENDACIONES SOBRE LA CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN.....	39
9	CURADO DEL HORMIGÓN.....	41
9.1	REQUISITOS NORMATIVOS SOBRE CURADO DEL HORMIGÓN	41
9.2	IMPORTANCIA DEL CURADO DEL HORMIGÓN	42
9.3	RECOMENDACIONES PARA LA CORRECTA EJECUCIÓN DEL RECUBRIMIENTO	43
10	CONCLUSIONES	44
10.1	DURANTE EL PROYECTO DEL ESPALDÓN DEL DIQUE.....	44
10.2	ANTES DEL INICIO DE LA OBRA.....	46
10.3	DURANTE LA EJECUCIÓN DEL ESPALDÓN	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. EXIGENCIAS NORMATIVAS PARA EL HORMIGÓN DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	13
TABLA 1. EXIGENCIAS NORMATIVAS PARA EL HORMIGÓN DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	13
TABLA 2. RECUBRIMIENTO MÍNIMO (MM) PARA LAS CLASES DE EXPOSICIÓN RELACIONADAS CON LA CORROSIÓN POR CLORUROS. AMBIENTE XS3 (TABLA 44.2.1.1.B)	14
TABLA 3. RECUBRIMIENTO MÍNIMO (MM) PARA EL ESPALDÓN DE UN DIQUE: XA2 XS3 XM3. ARTÍCULO 44 DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL.....	15
TABLA 4. RECUBRIMIENTO PARA 50 AÑOS DE VIDA ÚTIL Y AMBIENTE XS3	23
TABLA 5. CONTENIDO MÁXIMO DE CLORUROS EN LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL).....	26
TABLA 6. DEFECTOS DE COMPACTACIÓN	36
TABLA 7. FALTA DE COMPACTACIÓN EN LOS ESPALDONES DE DIQUES	37
TABLA 8. REGUEROS EN SUPERFICIE EN LOS ESPALDONES DE DIQUES	37
TABLA 9. DÍAS DE CURADO	41
TABLA 10. DEFECTOS POR FALTA DE CURADO	42
TABLA 11. EXIGENCIAS NORMATIVAS PARA EL HORMIGÓN DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	44
TABLA 12. RECUBRIMIENTO MÍNIMO (MM) PARA EL ESPALDÓN DE UN DIQUE: XA2 XS3 XM3. ARTÍCULO 44 DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CORROSIÓN EN UNA BARRA DE ACERO DESPASIVADA.....	8
FIGURA 2. PERIODO DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN EN LA VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO EXPUESTA A LOS CLORUROS.....	9
FIGURA 3. CÓDIGO ESTRUCTURAL. AMBIENTES DE EXPOSICIÓN DE DIFERENTES ELEMENTOS DE HORMIGÓN EN UN MUELLE-DIQUE DE CIERRE DE UN PUERTO	11
FIGURA 4. MEDIDA DE RECUBRIMIENTO EN EL PARAMENTO EXTERIOR DEL ESPALDÓN DE 5 DIQUES	16
FIGURA 5. DURACIÓN DEL PERIODO DE INICIACIÓN EN FUNCIÓN DEL RECUBRIMIENTO, PARA UN HORMIGÓN QUE CUMPLA DE FORMA ESTRICTA EL CÓDIGO ESTRUCTURAL.....	18
FIGURA 6. PERIODO DE INICIACIÓN PARA EL ESPALDÓN DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL, CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO.....	24
FIGURA 7. CLORUROS INICIALES DEL HORMIGÓN.....	27
FIGURA 8. PÉRDIDA DE AÑOS DE VIDA ÚTIL EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CLORUROS INICIALES.....	28
FIGURA 9. PENETRACIÓN DE AGUA DEL HORMIGÓN.....	31
FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS DE PENETRACIÓN DE AGUA EN EL INTERIOR DE LOS TESTIGOS DE LOS 5 ESPALDONES.....	32
FIGURA 11. PERIODO DE INICIACIÓN PARA EL ESPALDÓN DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL, Y PARA UN ESPALDÓN EN EL QUE EL HORMIGÓN COLOCADO TIENE UNA PENETRACIÓN DE AGUA DE 50 MM	33
FIGURA 12. EVOLUCIÓN DE LA PENETRACIÓN DE AGUA EN EL ESPALDÓN C	33
FIGURA 13. EVOLUCIÓN DE LA PENETRACIÓN DE AGUA EN EL ESPALDÓN B	33
FIGURA 14. DIFERENCIA DE PERMEABILIDAD ENTRE EL RECUBRIMIENTO Y EL INTERIOR DEL MISMO TESTIGO	38
FIGURA 15. PÉRDIDA DE VIDA ÚTIL POR DISMINUCIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN EL RECUBRIMIENTO.....	39

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1. SALPICADURAS EN EL PARAMENTO EXTERIOR DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	12
FOTOGRAFÍA 2. SALPICADURAS EN EL PARAMENTO EXTERIOR DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE	12
FOTOGRAFÍA 3. CORROSIÓN AVANZADA EN EL ARMADO POR FALTA DE RECUBRIMIENTO	17
FOTOGRAFÍA 4. CORROSIÓN AVANZADA POR FALTA DE RECUBRIMIENTO EN LAS PATILLAS Y ALAMBRES DE ATADO	17
FOTOGRAFÍA 5. CORROSIÓN AVANZADA POR FALTA DE RECUBRIMIENTO EN LAS PATILLAS Y ALAMBRES DE ATADO	20
FOTOGRAFÍA 6. CORROSIÓN AVANZADA POR FALTA DE RECUBRIMIENTO EN LAS PATILLAS Y ALAMBRES DE ATADO	21
FOTOGRAFÍA 7. DIFICULTAD DE EJECUCIÓN EN ZONAS CURVAS DE ESPALDONES	21
FOTOGRAFÍA 8. CORROSIÓN POR FALTA DE RECUBRIMIENTO EN EL BOTAOLAS	22
FOTOGRAFÍA 9. CONTAMINACIÓN DE LAS ESPERAS POR EL AGUA DE MAR.....	28
FOTOGRAFÍA 10. ESPERAS CON CLORUROS EN SU SUPERFICIE CONFORMANDO EL ARMADO DEL ESPALDÓN.....	28
FOTOGRAFÍA 11. SOLAPE DE BARRAS CON MUY DIFERENTE ESTADO DE AVANCE DE LA CORROSIÓN: INCIPIENTE CERCA DE LAS CORRUGAS EN UNA Y CORROSIÓN GENERALIZADA EN LA OTRA. EJEMPLO 1.....	29
FOTOGRAFÍA 12. SOLAPE DE BARRAS CON MUY DIFERENTE ESTADO DE AVANCE DE LA CORROSIÓN: INCIPIENTE CERCA DE LAS CORRUGAS EN UNA Y CORROSIÓN GENERALIZADA EN LA OTRA. EJEMPLO 2.....	29
FOTOGRAFÍA 13. PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO POR CORROSIÓN EN LA ZONA DE SOLAPES VERTICALES DEL ESPALDÓN DE DOS DIQUES. ESPALDÓN A	29
FOTOGRAFÍA 14. PÉRDIDA DE RECUBRIMIENTO POR CORROSIÓN EN LA ZONA DE SOLAPES VERTICALES DEL ESPALDÓN DE DOS DIQUES. ESPALDÓN C	29
FOTOGRAFÍA 15. DIQUE A.....	36
FOTOGRAFÍA 16. DIQUE C.....	36
FOTOGRAFÍA 17. DIQUE E	36
FOTOGRAFÍA 18. DIQUE D.....	36
FOTOGRAFÍA 19. PARAMENTO EXTERIOR. ESPALDÓN D.....	37
FOTOGRAFÍA 20. PARAMENTO EXTERIOR. ESPALDÓN E	37
FOTOGRAFÍA 21. PARAMENTO EXTERIOR. ESPALDÓN D.....	37
FOTOGRAFÍA 22. PARAMENTO EXTERIOR. ESPALDÓN E	37
FOTOGRAFÍA 23. DIQUE A.....	42
FOTOGRAFÍA 24. DIQUE A.....	42
FOTOGRAFÍA 25. DIQUE A.....	42
FOTOGRAFÍA 26. DIQUE A.....	42

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PROCESO DE CORROSIÓN EN AMBIENTE MARINO

Se recogen, a continuación, algunos conceptos básicos sobre la corrosión del acero en el hormigón armado, ya que definir este proceso y los factores que lo controlan puede facilitar la comprensión de este documento.

El hormigón, debido a los compuestos formados durante la hidratación del cemento, presenta un pH muy elevado, alrededor de 13¹. 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 pasivado².

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 hormigón².

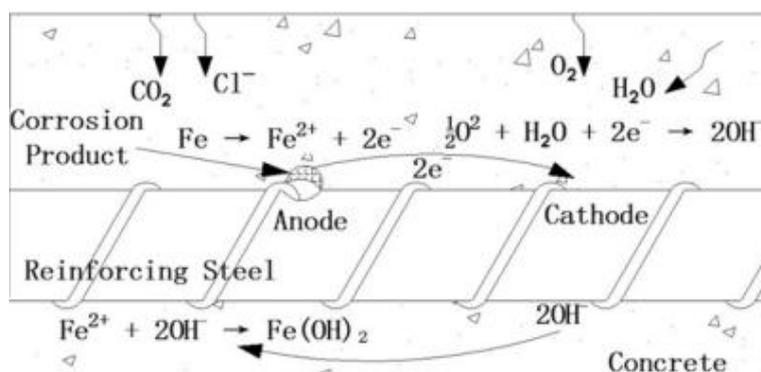


Figura 1. Corrosión en una barra de acero despasivada³

Existen modelos matemáticos que reproducen la vida útil por corrosión del hormigón armado. No es objeto de este documento profundizar en estos modelos y su aplicación, pero definir claramente algunos conceptos facilitará la comprensión de este texto.

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.

¹ Cánovas, M. (2006) Hormigón. 7ª Edición. Madrid: Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

² Alaejos, P., Bermúdez, M.A. (2008) Corrosión de las armaduras en el hormigón situado en ambiente marino. Estado del arte. Madrid: Centro de Publicaciones, Secretaría General técnica, Ministerio de Fomento. CEDEX.

³ ZHAO. X. Et. Al. (2011) Brillouin Corrosion Expansion Sensors for Steel Reinforced Concrete Structures Using a Fiber Optic Coil Winding Method. *Sensors*. ISSN 1424-8220. (www.mdpi.com/journal/sensors)

La Figura 2 representa ambos periodos.

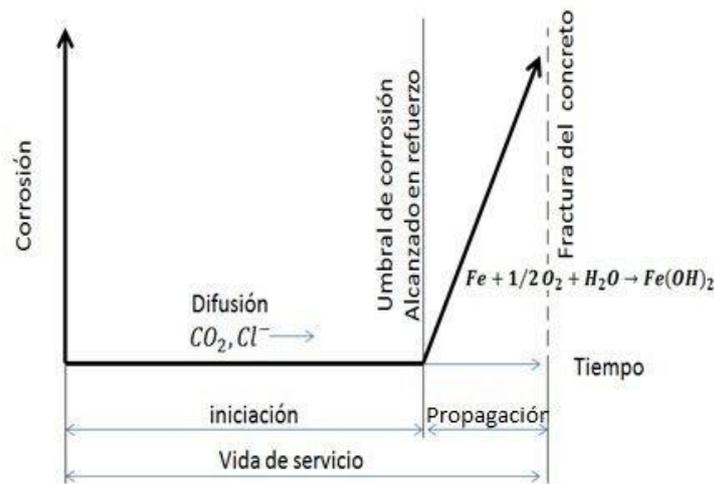


Figura 2. Periodo de iniciación y propagación en la vida útil de una estructura de hormigón armado expuesta a los cloruros

Durante el periodo de iniciación, los cloruros penetrarán en el hormigón hasta alcanzar las armaduras. Este periodo se puede modelizar si se conocen los parámetros que definen el proceso, que son:

- **Cloruros en superficie (Cs):** corresponde a la concentración de cloruros en la superficie del hormigón, y es una medida de la agresividad ambiental. La tabla A12.3.2.a del Código Estructural ofrece una estimación de los cloruros en superficie para cada ambiente.
- **Cloruros iniciales del hormigón (Cb):** son los cloruros que aportan los materiales utilizados en la fabricación del hormigón. Es, por tanto, el contenido de cloruros que tiene el hormigón en el momento de su puesta en obra. Está limitado por la normativa (Artículo 33 del Código Estructural).
- **Umbral de cloruros para que se inicie la corrosión (Cth):** contenido límite de iones cloruro en el hormigón que hace que las armaduras se despasiven y el periodo de propagación se inicie. La tabla A12.3.2.1.a del Código Estructural muestra valores, a título orientativo.

Por tanto, al poner el hormigón en obra, contendrá un contenido de cloruros Cb sobre el armado. La superficie exterior del hormigón tendrá una concentración de cloruros de Cs. Los cloruros exteriores penetrarán en el hormigón, y cuando el hormigón alrededor del armado alcance la concentración Cth, el acero se despasivará y comenzará la corrosión. En este momento finaliza el periodo de iniciación y comienza el de propagación.

Queda por definir la resistencia que el hormigón pone al paso de los cloruros. Para ello, se utiliza el parámetro:

- **Coficiente de difusión aparente del hormigón:** este coeficiente engloba a los diferentes mecanismos de transporte por los que los cloruros pueden acceder al hormigón: por gradiente de presión de agua (penetración de agua, absorción, succión capilar), así como por gradiente de concentración (difusión propiamente dicha). Esta es la causa por la que se introduce el "aparente" en este término y, aunque muchas veces desaparece en los textos (también en los del Cedex), es importante recordar que es un término que engloba diferentes mecanismos de transporte.

El coeficiente de difusión aparente del hormigón presenta dos particularidades importantes:

- **Varía con el tiempo.** A mayor edad del hormigón, menor es el valor de coeficiente de difusión. Por tanto, cuando se quiere indicar qué resistencia a los cloruros tiene un hormigón, es importante indicar además del coeficiente de difusión, a qué edad está referido ese valor. En los textos del CEDEX siempre se refieren a 1 año de edad. Otras fuentes trabajan con valores a 28 días.
- **Varía en función del ambiente.** Puesto que el coeficiente de difusión aparente engloba diferentes mecanismos de transporte, en función del que predomine en la ubicación de mi hormigón, el coeficiente será mayor o menor, aunque el hormigón sea exactamente el mismo. O, dicho de otra forma, un mismo hormigón ordenará sus coeficientes de difusión, de mayor a menor, en ambiente XS2 – XS3 – XS1 (sumergido – Carrera de mareas – aéreo).

Por consiguiente, para describir la resistencia que un hormigón pone al paso de los cloruros, se indicará con su coeficiente de difusión aparente, referido a una edad concreta, y para un ambiente de exposición determinado.

1.2 ALCANCE DE ESTE DOCUMENTO

El concepto de durabilidad del hormigón armado se fundamenta en evitar alcanzar el periodo de propagación durante la vida de servicio de las estructuras, es decir, conseguir que los cloruros no lleguen a despasivar al armado. Y para ello, se actúa simultáneamente de 3 formas:

- Limitar el contenido inicial de cloruros del hormigón, y garantizar que este límite se cumple durante la ejecución de la obra.
- Fijar un espesor mínimo de recubrimiento, y garantizar que se cumple durante la ejecución de la obra.
- Conseguir la mejor calidad posible del recubrimiento, y para ello es importante la dosificación, la selección del conglomerante y la consistencia, así como optimizar la puesta en obra.

A continuación, de cada uno de estos campos de actuación se detallará: qué exigencias define el Código Estructural, cuáles son las consecuencias de incumplir y, finalmente, que recomendaciones se aportan en este manual para completar a las exigencias normativas y evitar que se produzcan acortamientos de vida útil por problemas de corrosión en el espaldón del dique.

Queda fuera del alcance de este trabajo la valoración de otras medidas adicionales de protección de las armaduras frente a la corrosión, también válidas y muchas de ellas recogidas en la normativa, como pueden ser: armaduras alternativas (acero inoxidable, galvanizadas o de polímero reforzado con fibras), inhibidores de corrosión, protección catódica, protección superficial del hormigón, etc.

2 CLASES DE EXPOSICIÓN DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE

Al definir los ambientes de exposición del espaldón de un dique se definen todas las exigencias normativas de durabilidad de la estructura: recubrimiento, relación agua/cemento, contenido de cemento y permeabilidad. Por tanto, es fundamental realizar la correcta clasificación de la obra.

2.1 AMBIENTE DE EXPOSICIÓN EN EL ESPALDÓN DE UN DIQUE, SEGÚN EL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Según el **Artículo 27** del Código Estructural, se incluye en la clase de exposición XS3 (corrosión inducida por cloruros de origen marino) a aquellos elementos estructurales de hormigón armado o pretensado situados en zona de carrera de mareas, afectados por el oleaje o salpicaduras.

La propia norma pone ejemplos de estructuras en ambiente XS3, y entre ellos indica que las zonas aéreas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral, y las instalaciones portuarias, en general, están en ambiente XS3.

Ya fuera del cuerpo de la norma, los comentarios del Código Estructural indican que es un error habitual considerar que las instalaciones que se encuentran dentro de una zona portuaria se encuentran sometidas al ambiente XS1 (expuestas a aerosoles marinos, sin entrar en contacto con agua de mar). El nivel de exposición es mucho mayor y deberían ser clasificadas como XS3.

Pero no es el único ambiente de exposición del espaldón de un dique. El **Artículo 43** indica que cualquier hormigón en contacto con agua de mar está sometido a una clase de exposición XA2 (agresividad química intermedia).

Por último, la normativa indica que aquellos elementos de diques, pantalanes y obras de defensa del litoral sometidas a fuertes oleajes se clasificarán como XM3: elementos sometidos a erosión/ abrasión extremos.

La Figura 3, incluida como comentarios del Código Estructural, resume lo expuesto, mostrando las diferentes clasificaciones presentes en un muelle-dique de cierre de un puerto.

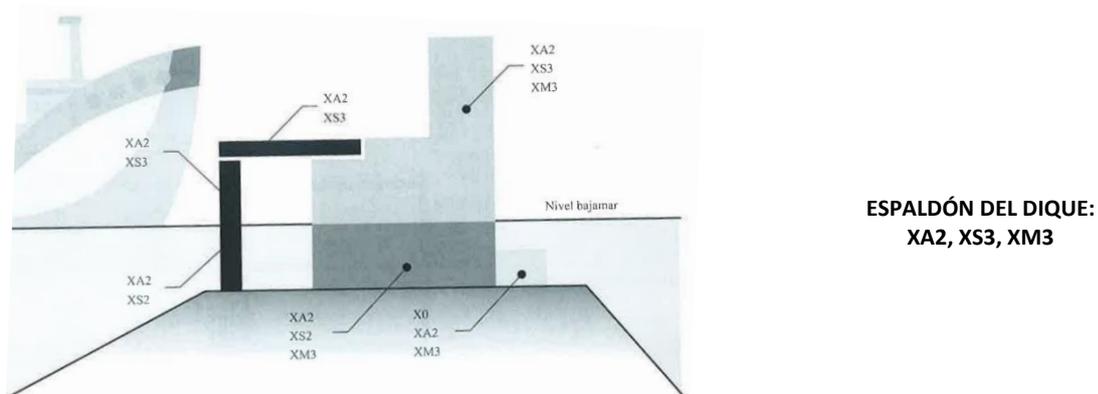


Figura 3. Código Estructural. Ambientes de exposición de diferentes elementos de hormigón en un muelle-dique de cierre de un puerto

2.2 IMPORTANCIA DE LA CORRECTA CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES EN EL ESPALDÓN DE UN DIQUE

La clasificación del ambiente a que está expuesto un espaldón de dique ha cambiado en las diferentes normativas, siendo en algunos momentos algo ambiguas las definiciones, lo que podía generar dudas en este tipo de estructuras.

La primera clasificación de ambientes se lleva a cabo en la EH-91, aunque sólo se define un ambiente marino genérico. Se fijan las primeras exigencias de dosificación al hormigón que va a estar expuesto a los cloruros.

En la Instrucción EHE (año 1998) ya se introducen subdivisiones dentro del ambiente marino, diferenciando zona sumergida (IIIb), aérea (IIIa) y carrera de mareas (IIIc). En esta Instrucción los espaldones de diques y, en general, cualquier zona aérea de diques, pantalanes y otras obras de defensa del litoral, se clasifican como IIIa.

Diez años después, la Instrucción EHE-08 corrige esta clasificación, ya que incluye en la definición del ambiente IIIc la zona de salpicaduras. Aunque es un término sin una definición clara, parece evidente que cualquier espaldón de dique, aunque quede por encima de la pleamar, está en contacto frecuente con el agua de mar (Fotografía 1, Fotografía 2), siendo incluso estructuras rebasables.



Fotografía 1. Salpicaduras en el paramento exterior del espaldón de un dique



Fotografía 2. Salpicaduras en el paramento exterior del espaldón de un dique

La normativa actual, con sus ejemplos y comentarios elimina cualquier posible ambigüedad, dejando claro que cualquier estructura portuaria de hormigón armado que no esté sumergida en agua de mar se debería clasificar como estructura en ambiente XS3 (zona de carrera de mareas afectada por el oleaje o las salpicaduras).

Es fundamental que el proyecto defina correctamente los ambientes a que se expone el espaldón de un dique, ya que de la definición de ambientes se derivan todas las exigencias que debe cumplir el hormigón para garantizar su vida útil.

2.3 CONSECUENCIAS DE LA CLASIFICACIÓN XA2 XS3 XM3 DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE

EN PROYECTO se debe definir el ambiente de exposición del espaldón del dique y que exigencias debe cumplir el hormigón.

El ambiente de exposición del espaldón de un dique será XA2; XS3; XM3.

El hormigón colocado en el espaldón debe cumplir:

Tabla 1. Exigencias normativas para el hormigón del espaldón de un dique

Hormigón del espaldón de un dique. XA2 XS3 XM3. (Artículo 43 del Código Estructural)		
Apertura de fisura	Armado:0,1 mm Pretensado: descompresión	
Resistencia mínima de proyecto f_{ck}	25 MPa	
Resistencia característica mínima esperada para el hormigón	35 MPa	
Máxima relación agua cemento	0,45	
Contenido mínimo de cemento	350 kg/m ³	
Contenido máximo de cemento	Tamaño máximo de árido, mm	Contenido máximo de cemento (kg/m ³)
	10	400
	20	375
	40	350
Tipo de cemento	MR, SR o SRC, según la Instrucción RC-16	
Permeabilidad del hormigón (penetración de agua)	Máxima ≤30 mm Media ≤20 mm	
Árido fino	Cuarzo o mayoritariamente de naturaleza cuarcítica, pudiendo emplearse otros áridos que tengan un comportamiento equivalente respecto a su desgaste	
Árido grueso	Coeficiente de Los Ángeles inferior a 30	

3 ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

El hormigón que separa a las armaduras del ambiente exterior es la barrera que protege al armado de corroerse. Además de la calidad del recubrimiento, su espesor es fundamental para evitar patologías de corrosión en el espaldón de un dique.

3.1 ESPESOR DE RECUBRIMIENTO FIJADO POR EL CÓDIGO ESTRUCTURAL PARA EL ESPALDÓN DE UN DIQUE

3.1.1 Espesor de recubrimiento mínimo

El recubrimiento de hormigón es la distancia entre la superficie exterior de la armadura (incluyendo cercos y estribos) y la superficie de hormigón más cercana. El recubrimiento mínimo es aquel que debe cumplirse en cualquier punto del elemento estructural, y constituye una referencia a comprobar durante el control de ejecución.

El ambiente de exposición del espaldón de un dique es **XA2 XS3 XM3**. El **Artículo 44** del Código Estructural determina, para esta clasificación de ambientes, el recubrimiento mínimo.

La Tabla 2 muestra los recubrimientos mínimos exigidos por ser XS3 (zona de carrera de mareas afectada por el oleaje o las salpicaduras).

Tabla 2. Recubrimiento mínimo (mm) para las clases de exposición relacionadas con la corrosión por cloruros. Ambiente XS3 (Tabla 44.2.1.1.b)

Tipo de elemento	Cemento	Años de vida útil	XS3
Hormigón armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsilíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	45
		100	50
	CEM II/B-S, B-P	50	65
		100	70
	Resto de cementos utilizables	50	*
		100	*
Hormigón pretensado	CEM II/A-D o bien CEM I con adición de humo de sílice superior al 6%	50	50
		100	65
	Resto de cementos utilizables	50	*
		100	*
* Estas situaciones obligan a 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			

El ataque químico al hormigón (XA2), no aumenta el espesor de recubrimiento. El Código Estructural indica que el autor del proyecto deberá fijar los valores de recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales, al objeto de que se garantice adecuadamente la protección del hormigón y de las armaduras frente a la agresión química concreta de que se trate. En el caso del espaldón de un dique, el uso de un cemento MR, SR o SRC ya debe ser protección suficiente frente al ataque químico del hormigón.

Finalmente, el hormigón se clasifica también como XM3 (erosión/abrasión extrema). El Código Estructural modifica aquí de forma importante las anteriores Instrucciones. Se indica que el recubrimiento mínimo será el obtenido de la aplicación del resto de criterios, más un sobre espesor de 15 mm, por el hecho de estar en ambiente XM3.

Por tanto, la Tabla 3 recoge los recubrimientos mínimos del espaldón de un dique fabricado con hormigón armado.

Tabla 3. Recubrimiento mínimo (mm) para el espaldón de un dique: XA2 XS3 XM3. Artículo 44 del Código Estructural

Tipo de elemento	Cemento	Años de vida útil	XA2 XS3 XM3
Hormigón armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	60
		100	65
	CEM II/B-S, B-P	50	80
		100	85
	Resto de cementos utilizables	50	*
		100	*

3.1.2 Recubrimiento nominal

El **Artículo 43** del Código Estructural indica que, para garantizar el recubrimiento mínimo, los planos de proyecto reflejaran el recubrimiento nominal de las armaduras, obtenido de acuerdo con la siguiente expresión:

$$c_{non} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

- c_{non} : recubrimiento nominal, mm.
- c_{min} : recubrimiento mínimo, mm.
- Δc_{dev} : margen de recubrimiento, en función del nivel de control de ejecución:
 - Δc_{dev} : 0 mm, en elementos prefabricados con nivel intenso de control en la instalación de prefabricación (en obra o ajena a la obra)
 - Δc_{dev} : 5 mm, en elementos ejecutados in situ con nivel intenso de control de ejecución
 - Δc_{dev} : 10 mm, en otros casos.

El recubrimiento nominal determina el tamaño de los separadores a disponer en la armadura pasiva durante la fase de ejecución.

3.1.3 Control del espesor de recubrimiento

El **Artículo 66** del Código Estructural indica que, para verificar la conformidad del montaje del armado, el control del constructor efectuará al menos las comprobaciones siguientes, de las cuales dejará constancia documental:

- Separadores (material, tamaño, cantidad y distribución)
- Recubrimientos (mínimos y máximos)
- Tolerancias de acuerdo con lo establecido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto o el Anejo 14.

- Estado de oxidación de la armadura pasiva, con el límite establecido en el apartado 49.8.1
- Estado de limpieza y eliminación de suciedades.

Cualquier elemento auxiliar de acero que se emplee para facilitar el armado de la ferralla, deberá presentar también un recubrimiento no inferior al mínimo.

3.2 IMPORTANCIA DEL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

Como norma general, el espesor de recubrimiento es un parámetro que se ha cuidado en la ejecución de los diques. En todas las estructuras estudiadas en el Cedex se han medido en obra valores medios muy por encima de lo mínimo que le exigía la normativa (Figura 4).

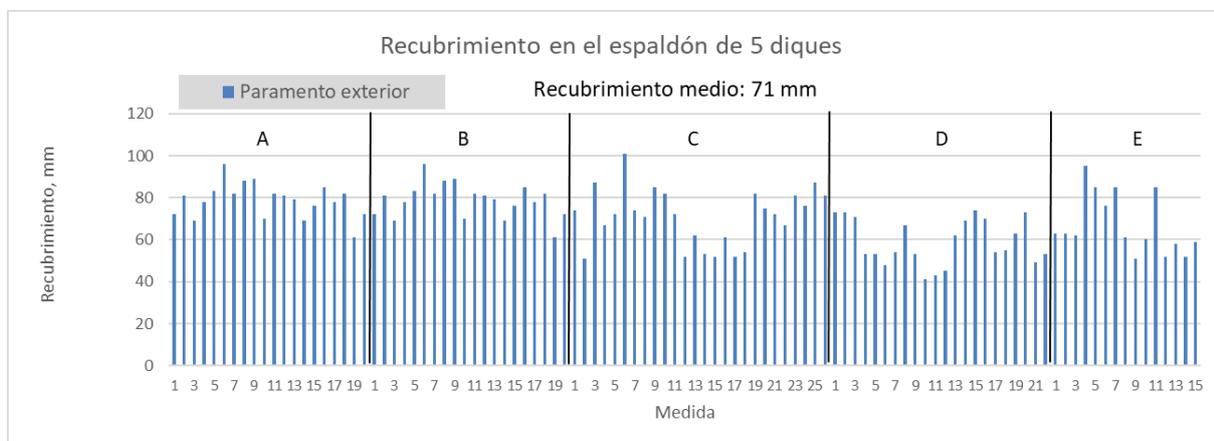


Figura 4. Medida de recubrimiento en el paramento exterior del espaldón de 5 diques

Ahora bien, en aquellas zonas puntuales de los espaldones en que se ha observado **falta de recubrimiento**, se ha desarrollado **corrosión en un corto plazo de tiempo** (Fotografía 3).



Fotografía 3. Corrosión avanzada en el armado por falta de recubrimiento

Y la corrosión intensa sucede tanto en el armado como en los elementos auxiliares metálicos para el armado (alambres de atado, patilla del armado, etc.), tal como se observa en la Fotografía 4.



Fotografía 4. Corrosión avanzada por falta de recubrimiento en las patillas y alambres de atado

Por tanto, el recubrimiento es un parámetro importante de cuidar en toda la ejecución de la obra.

Se puede cuantificar cómo afecta, en una obra que cumpla de manera estricta con lo que exige el Código Estructural, el incumplimiento del recubrimiento mínimo exigido.

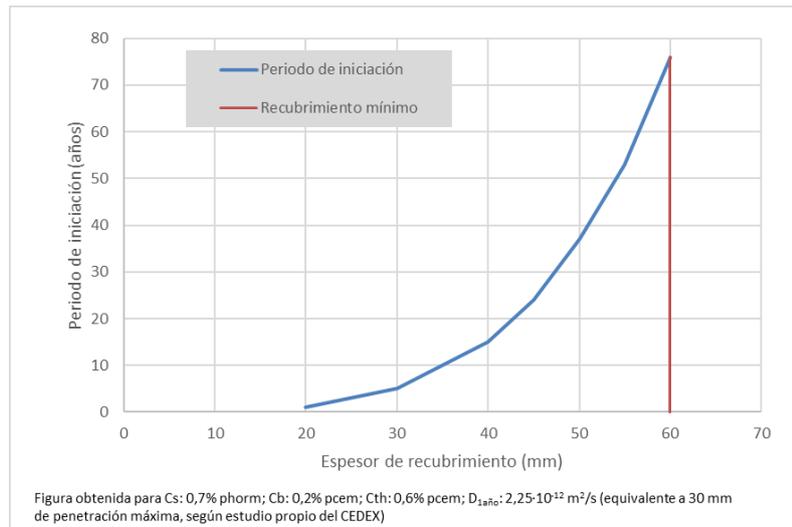


Figura 5. Duración del periodo de iniciación en función del recubrimiento, para un hormigón que cumpla de forma estricta el Código Estructural

La Figura 5 explica de forma gráfica lo representado en la Fotografía 3, que en aquellos puntos en que no se mantiene el recubrimiento, el periodo de iniciación se acorta de forma importante, iniciándose la corrosión en un corto periodo de tiempo.

3.3 RECOMENDACIONES SOBRE EL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

Para evitar perder vida útil en el espaldón de un dique debido a la falta de recubrimiento, se proponen las siguientes recomendaciones:

DURANTE LA EJECUCIÓN DEL ESPALDÓN DEL DIQUE

- Existen ciertas zonas del espaldón de un dique donde puede resultar más difícil garantizar el espesor de recubrimiento: botaolas, solapes, vértices y aristas, etc. Cuando haya dudas sobre si se está alcanzado el recubrimiento mínimo en estas zonas, o en cualquier otra del espaldón, se recomienda **validar el proceso de colocación de la ferralla (tipo y número de separadores utilizado, etc.)**. Para ello, se puede comprobar el recubrimiento alcanzado con una **sonda magnética**.

4 GEOMETRÍA DE LOS ESPALDONES

4.1 EXIGENCIAS NORMATIVAS SOBRE LA GEOMETRÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN Y SU DURABILIDAD

El **Artículo 43** del Código Estructural fija la estrategia de durabilidad para los elementos de hormigón, y como parte de esta estrategia se dan indicaciones sobre la selección de la forma estructural, señalando que los esquemas estructurales, las formas geométricas y los detalles que, siendo compatibles con su comportamiento mecánico, también lo tienen que ser con la consecución de una durabilidad adecuada de la estructura. Para ello:

- Se evitará el empleo de diseños estructurales que sean especialmente sensibles frente a la acción del agua y, en la medida de lo posible, se reducirá al mínimo el contacto directo entre ésta y el hormigón. Además, **se diseñarán los detalles de proyecto necesarios para facilitar la rápida evacuación del agua**, previendo los sistemas adecuados para su conducción y drenaje (imbornales, conducciones, etc.). Se deberán evitar cambios de planos de las superficies no horizontales que ralenticen la evacuación de agua.
- Se evitará, en la medida de lo posible, la existencia de elementos de hormigón en contacto con aguas de escorrentía. Se dispondrán **goterones para evitar que el agua discorra por las superficies verticales**. En especial, se procurará evitar el paso de agua sobre las zonas de juntas y sellados.
- Se deberán prever los sistemas adecuados para **evitar** la existencia de superficies sometidas a **salpicaduras o encharcamiento** de agua.
- Salvo en obras de pequeña importancia, **se deberá prever el acceso a todos los elementos de la estructura**, estudiando la conveniencia de disponer sistemas específicos que faciliten la inspección y el mantenimiento durante la fase de servicio, de acuerdo con lo indicado en el Capítulo 15 de este Código. En particular, se preverá los sistemas para la sustitución de aparatos de juntas y apoyos, en su caso.

4.2 ASPECTOS GEOMÉTRICOS RELEVANTES PARA LA DURABILIDAD DEL ESPALDÓN DE UN DIQUE

Hay aspectos del diseño de los espaldones que condicionan de forma importante la durabilidad.

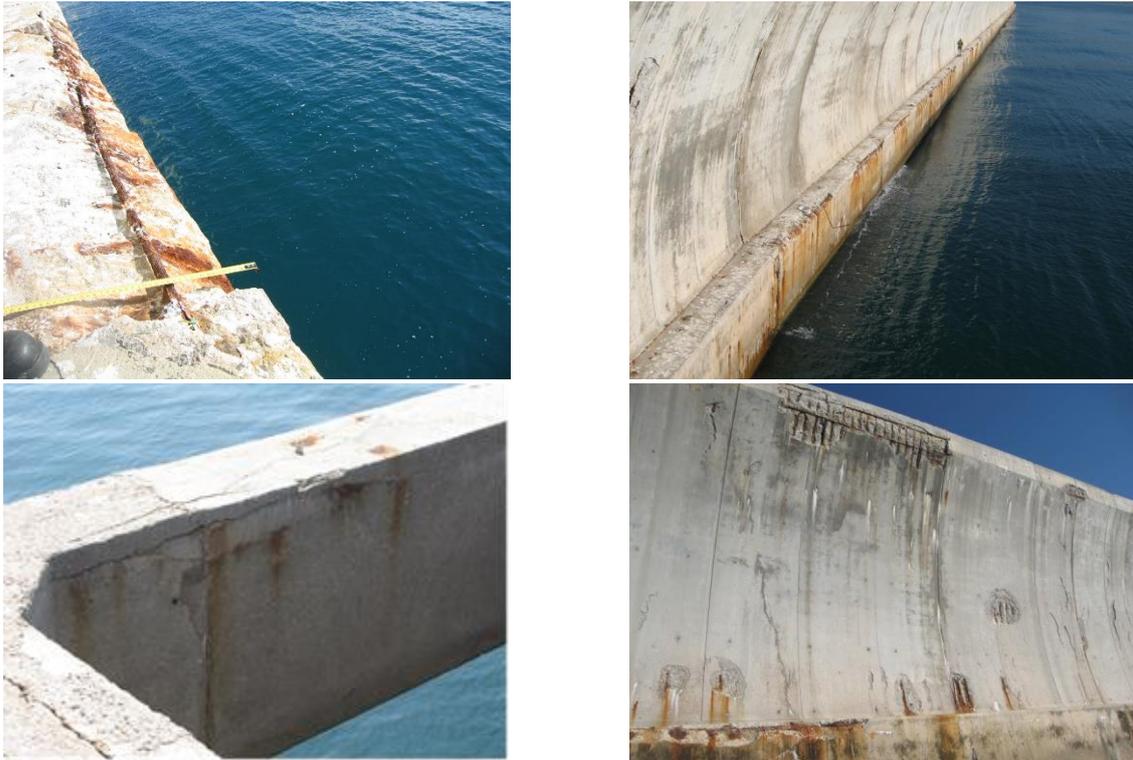
En primer lugar, **las bermas de tránsito** que, aunque son un elemento útil para la inspección de las estructuras, han sido un punto de debilidad del paramento exterior de los espaldones. Así, cuando existe esta solera exterior se observa cómo la corrosión ha hecho que se pierda el recubrimiento en zonas inferiores de los paramentos exteriores. La mayor evolución de la corrosión en estos puntos puede deberse a la suma de dos efectos: el primero es la mayor concentración de cloruros del hormigón en esta zona **porque la solera, a veces incluso horizontal y prácticamente sin bombeo, se encharca y permite el ascenso capilar del agua de mar** al paramento.

A esto se suma **la existencia siempre de solapes de barras verticales en esta zona**, aumentando la sección oxidada y facilitando la pérdida del recubrimiento.



Fotografía 5. Corrosión avanzada por falta de recubrimiento en las patillas y alambres de atado

Un segundo elemento geométrico que ha mostrado clara debilidad frente a los procesos de corrosión son las esquinas. Tanto el canto superior de la viga cantil como el canto superior de los espaldones son zonas donde la corrosión, primero genera una fisura sobre la barra corroída y, a continuación, progresa hasta la pérdida total del recubrimiento. **La disposición en esquina** facilita la entrada de cloruros por dos caras y la corrosión de una amplia superficie de la barra favorece la expulsión del recubrimiento. Además, cuando una de las caras es horizontal, permite retener humedad y acelerar el proceso.



Fotografía 6. Corrosión avanzada por falta de recubrimiento en las patillas y alambres de atado

Por último, cuanto **más compleja es la geometría de un espaldón y más zonas curvas** incluye, más difícil es garantizar el espesor de recubrimiento. Si, además, la geometría adoptada obliga a vibrar el hormigón sólo desde ventanas dispuestas para ello en puntos concretos, se dificulta que el hormigón cierre bien en todo el recubrimiento del espaldón.



Fotografía 7. Dificultad de ejecución en zonas curvas de espaldones

El **botaolas** es una zona curva que muestra debilidad frente a la corrosión. En este elemento, si no se consigue mantener el recubrimiento, aparece fisuración por corrosión.



Fotografía 8. Corrosión por falta de recubrimiento en el botaolas

4.3 RECOMENDACIONES SOBRE LA GEOMETRÍA DE UN ESPALDÓN DE DIQUE

Para evitar perder vida útil en el espaldón por la geometría adoptada, se propone la siguiente recomendación:

EN PROYECTO:

- Las **geometrías deben ser lo más sencillas posibles**, utilizando superficies planas sencillas y evitando curvaturas innecesarias. Valorar la necesidad de colocar una berma de tránsito exterior en el espaldón y, si se hace, realizarla con una marcada pendiente de bombeo.

DURANTE LA EJECUCIÓN:

- **Cuidar la colocación del hormigón y el espesor de recubrimiento** siempre, pero especialmente en las geometrías más sensibles: esquinas, botaolas, solapes y bermas de tránsito.

5 SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO

Parte de la resistencia que el hormigón mostrará a la penetración de los cloruros viene determinada por el tipo de cemento utilizado.

5.1 RECOMENDACIONES Y REQUISITOS NORMATIVOS SOBRE LA SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO

En el Código Estructural, el **Artículo 28** impide la utilización de los siguientes cementos en hormigón armado: cementos portland con puzolana calcinada (CEM II/A-Q, CEM II/B-Q), cementos portland con ceniza volante calcárea (CEM II/A-W, CEM II/B-W), cementos portland con esquistos calcinados (CEM II/A-T, CEM II/B-T), cementos con más de un 80% de escorias de alto horno (CEM III/C) y cementos compuestos con menos del 38% de Clinker (CEM V/B).

Además, el **Anejo 6** del Código Estructural incluye recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales. Y en este anejo, la tabla A6.5 indica que cementos son adecuados para el ambiente XS:

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

Por último, el **Artículo 44** del Código Estructural fija el recubrimiento mínimo para el ambiente XS3, y estos valores están condicionados al tipo de cemento utilizado y a los años de vida útil que se quieran alcanzar. Se muestra, a continuación, esta tabla para 50 años de vida útil.

Tabla 4. Recubrimiento para 50 años de vida útil y ambiente XS3

Tipo de elemento	Cemento	Años de vida útil	Recubrimiento en XS3, mm.
Hormigón armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	45
	CEM II/B-S, B-P		65
	Resto de cementos utilizables		*

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

Esta tabla, de forma implícita, dificulta el uso de cementos que no menciona, ya que obligan a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento.

Por tanto, para no tener recubrimientos excesivos, para la fabricación del espaldón de un dique es necesario utilizar (Artículo 44 del Código Estructural), en primer lugar:

- Cementos con entre un 36 y 80% de escoria de alto horno (CEM III/A, CEM III/B)
- Cemento con más de un 20% de cenizas volantes (CEM II/B-V), más de un 6% de microsílíce (CEM II/A-D), u hormigones que añadan al hormigón estos porcentajes de adición puzolánica
- Cementos puzolánicos (CEM IV)

Y aumentando el recubrimiento en 20 mm:

- Cemento con entre un 21 y 35% de escorias de alto horno (CEM II/B-S)
- Cemento con entre un 21 y 35% de puzolana natural (CEM II/B-P)

Finalmente, tal como se expuso en el apartado 2.3, el cemento en un espaldón debe ser siempre resistente al agua de mar (MR, SR o SRC).

5.2 IMPORTANCIA DE LA CORRECTA SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO

La primera conclusión que se obtiene del apartado anterior es que el Código Estructural **desaconseja utilizar en ambiente XS3 cementos sin adiciones.**

Se puede calcular qué influencia tendrá en la vida útil de un espaldón que cumpla con todas las exigencias normativas, incluida la permeabilidad, pero que se lleve a cabo con un cemento portland en lugar de con un cemento con adiciones.

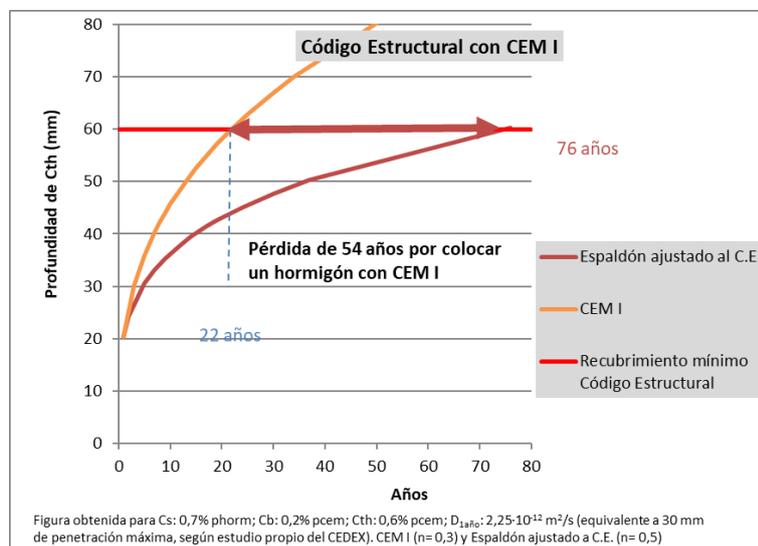


Figura 6. Periodo de iniciación para el espaldón del Código Estructural, con diferentes tipos de cemento

La figura muestra cómo, utilizar un CEM I, aunque el hormigón cumpla con la dosificación y permeabilidad exigida, tiene un coste en vida útil de 54 años. De ahí que la normativa desaconseje su utilización, aunque el hormigón cumpla con los requisitos de permeabilidad.

Pero también **se desaconseja**, ya de forma indirecta a través de los recubrimientos, utilizar bajos contenidos de adición puzolánica: **menos del 20% de ceniza volante y menos del 6% de humo de sílice.**

Además, si la adición es de **puzolana natural**, es necesario **aumentar el recubrimiento**, y lo mismo sucede si la escoria baja de un mínimo del 36%, a un mínimo del 20%.

Hasta aquí las recomendaciones son claras, pero la Tabla 4 incluye, entre el grupo de los mejores cementos para su uso en ambiente XS3, el CEM IV, sin mayor especificación. Este cemento puede incluir una o más adiciones puzolánicas, en un contenido que varía desde el 11% hasta el 55%. Aunque existen dos subtipos, A (11-35% de adición) y B (36-55% de adición), la tabla de recubrimientos para ambiente XS3 no entra en más detalles, y tan solo menciona el CEM IV. Por tanto, **si se quiere utilizar el CEM IV para ambiente XS3, es necesario aplicarle las mismas limitaciones que se hacen al resto de cementos: superar el 20% de adición puzolánica, y aumentar el recubrimiento si esta adición contiene puzolanas naturales.** De no hacerlo así, el CEM IV se convierte en una vía para la utilización de cementos que no son idóneos para el ambiente XS3.

5.3 RECOMENDACIONES SOBRE LA SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO

Para evitar perder vida útil en el espaldón por el cemento utilizado, se proponen las siguientes recomendaciones:

DURANTE EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL ESPALDÓN DEL DIQUE

- **Es importante que el cemento sea puzolánico o de escorias.** Por tanto, se seleccionará uno de los cementos recomendados por el Código Estructural (Tabla 43.2.1.1.b): CEM III/A, CEM III/B, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%.
- Si se utiliza **puzolana natural o menos del 36% de escoria** (CEM II/B-P, CEM II/B-S,), es necesario **aumentar el recubrimiento 20 mm**, tal como indica la normativa.
- **Al CEM IV se le deben añadir limitaciones adicionales** para asegurar la puzolanidad:
 - **Contenido de adición puzolánica sea superior al 20%**, limitación que sí se impone al CEM II y a los hormigones con cenizas.
 - **Si parte de su adición son puzolanas (P)**, se debería colocar el recubrimiento exigido a los cementos CEM II/B-P.
 - **No puede contener puzolana calcinada (Q) o ceniza volante calcárea (W)**, ya que el Código Estructural impide utilizar cementos portland con este tipo de puzolana en hormigón armado.
- El espesor de recubrimiento y el tipo de cemento adoptados para la construcción de un espaldón son parámetros relacionados entre sí. Por tanto, **en el proyecto se debe explicitar qué cementos se pueden utilizar para llevar a cabo el espaldón**, en función del espesor de recubrimiento adoptado.

6 CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA

Los cloruros son los responsables de despasivar las armaduras y que se inicien procesos de corrosión. Cuanto mayor sea el contenido de cloruros del hormigón puesto en obra (cloruros iniciales del hormigón), más próximas a su despasivación estarán las armaduras, y menor será la vida útil por corrosión de la estructura.

6.1 REQUISITOS NORMATIVOS SOBRE EL CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA

El **Artículo 33** del Código Estructural indica que en el caso de hormigones expuestos a los cloruros (ambientes XD o XS), el ion cloruro total aportado por todos los componentes no excederá el 0,2% del peso del cemento, en hormigón armado, y el 0,1% del peso de cemento en hormigón pretensado.

Además de estos límites al contenido total de cloruros del hormigón, los **Artículos 29 a 32** del Código Estructural y la Instrucción para Recepción de Cementos **RC-16** limitan el contenido en cloruros de cada uno de sus componentes. La Tabla 5 recoge el contenido máximo de cloruros de cada componente del hormigón.

Tabla 5. Contenido máximo de cloruros en los componentes del hormigón (Código Estructural)

Componente del hormigón	Contenido máximo de cloruros		Norma de ensayo
	Hormigón armado	Hormigón pretensado	
Árido grueso y fino	0,05%	0,03%	UNE EN 1744-1
Cemento	0,1%		UNE EN 196-2
Cenizas volantes	0,1 %		UNE-EN 196-2
Humo de sílice	0,3 %		UNE-EN 196-2
Agua de amasado	2 g/l	1 g/l	UNE 83958
Aditivos	Exento de componentes que favorezcan la corrosión (cloruros, sulfitos, sulfuros, etc.)		

Es importante indicar que **el cumplimiento del contenido máximo de cloruros de cada componente del hormigón (Tabla 5) no garantiza que el hormigón cumpla** con su contenido máximo de cloruros admitido en ambiente marino.

Finalmente, el Código Estructural indica sobre el armado, en el **Artículo 49**, que la ferralla se montará en obra exenta de pintura, grasa o cualquier otra sustancia nociva que pueda afectar negativamente al acero, al hormigón o a la adherencia entre ambos.

6.2 IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA

El CEDEX ha evaluado el contenido en cloruros iniciales del hormigón en 5 espaldones de diques. La Figura 7 muestra los resultados obtenidos. En estas obras se aplicaba el límite de cloruros anterior al Código Estructural: 0,4% del peso de cemento.

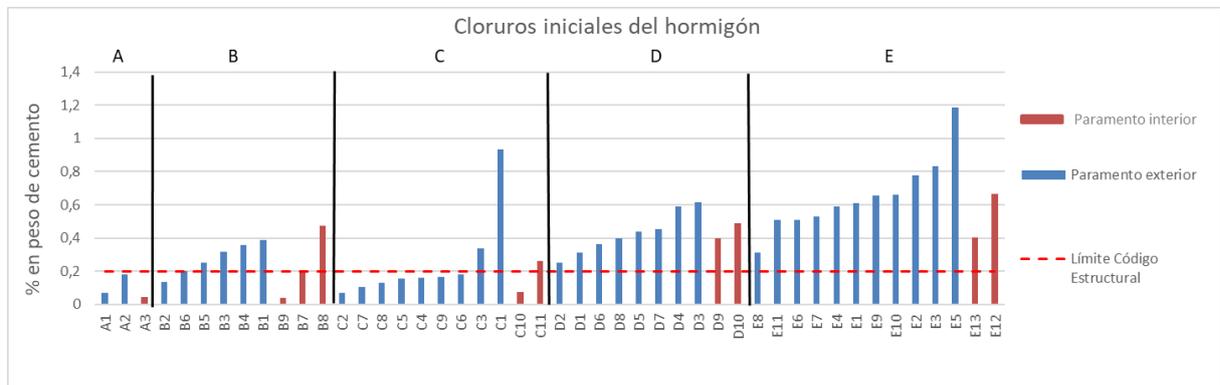


Figura 7. Cloruros iniciales del hormigón

Los resultados en los distintos espaldones son muy variables. Se demuestra con ellos que es posible colocar un hormigón con los cloruros iniciales que exige actualmente el Código Estructural, pero también se han fabricado espaldones que sobrepasan claramente, tanto el límite actual (0,2%pccm), como el que se le aplicó en su momento (0,4%pccm).

Además, los resultados muestran **variaciones significativas en el contenido de cloruros iniciales del hormigón dentro de una misma obra**, independientemente de que en esta estructura el valor medio obtenido cumpla o no con el límite normativo.

Sobrepasar el límite de cloruros que puede tener el hormigón tiene un efecto directo en la posterior vida útil que tendrá la estructura. Para cuantificarlo, la Figura 8 recoge la pérdida de años de vida útil que tiene un espaldón que cumple de forma estricta con todas las exigencias del Código Estructural, pero que incumple el contenido de cloruros iniciales.

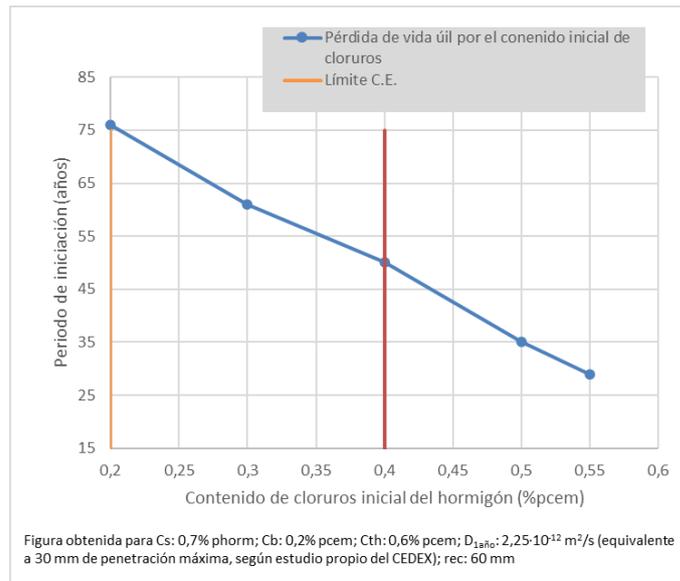


Figura 8. Pérdida de años de vida útil en función del contenido de cloruros iniciales

Desde el límite normativo de 0,2% en peso de cemento, **cada aumento de 0,1% en el contenido de cloruros supone perder, aproximadamente, de 10 a 15 años de vida útil**, aunque el resto de propiedades del hormigón cumplan de forma estricta con lo exigido por el Código Estructural.

Pero, además, la inspección visual realizada a diferentes espaldones con problemas de corrosión ha mostrado que, a la contaminación general del hormigón por cloruros, se suma un efecto adicional: **la contaminación de las esperas de hormigón** (Fotografía 9 y Fotografía 10).



Fotografía 9. Contaminación de las esperas por el agua de mar



Fotografía 10. Esperas con cloruros en su superficie conformando el armado del espaldón

Esta contaminación ha mostrado, posteriormente, ser un punto débil de las estructuras, siendo el proceso de corrosión más rápido en la espera que en la otra barra vertical del solape *Fotografía 11* y *Fotografía 12*), aunque a priori las condiciones de ambas barras deberían ser iguales.



Fotografía 11. Solape de barras con muy diferente estado de avance de la corrosión: incipiente cerca de las corrugas en una y corrosión generalizada en la otra. Ejemplo 1



Fotografía 12. Solape de barras con muy diferente estado de avance de la corrosión: incipiente cerca de las corrugas en una y corrosión generalizada en la otra. Ejemplo 2

Los solapes que unen el espaldón a la viga cantil son siempre una zona muy sensible a la corrosión, ya que es más difícil mantener el espesor de recubrimiento, hay mayor dificultad para compactar el recubrimiento debido a la elevada densidad de armado y las bermas de tránsito sin pendiente de bombeo acumulan agua de mar que asciende por capilaridad. Si a estas dificultades se añade que la concentración de cloruros sobre las esperas es muy alta en el momento del hormigonado, la aparición de corrosión en la zona inferior de los espaldones (Fotografía 13 y Fotografía 14) es altamente probable.



Fotografía 13. Pérdida de recubrimiento por corrosión en la zona de solapes verticales del espaldón de dos diques. Espaldón A



Fotografía 14. Pérdida de recubrimiento por corrosión en la zona de solapes verticales del espaldón de dos diques. Espaldón C

6.3 RECOMENDACIONES SOBRE EL CONTENIDO DE CLORUROS DEL HORMIGÓN PUESTO EN OBRA

Se proponen las siguientes recomendaciones **DURANTE LA EJECUCIÓN DEL ESPALDÓN DEL DIQUE** para evitar perder vida útil en el espaldón debido a la contaminación del hormigón por cloruros:

- **Controlar de forma frecuente el contenido en cloruros iniciales del hormigón puesto en obra durante la ejecución del espaldón.** Las variaciones que este parámetro ha mostrado dentro de una misma estructura no permiten conformarse con la validación inicial del contenido en cloruros del hormigón.
- **Proteger los acopios de áridos de posibles contaminaciones por cloruros. Igualmente, evitar cualquier contaminación del hormigón por cloruros durante su colocación.** No se conoce el origen del exceso de cloruros que tiene el hormigón puesto en obra en algunas estructuras estudiadas, pero los áridos son el componente mayoritario del hormigón y, además, el único que se acopia al aire libre, por lo que es importante evitar que los áridos pueda ser fuente de contaminación de cloruros en el hormigón.
- **Evitar la contaminación de los acopios de ferralla** en obra, cubriéndolos o protegiéndolos de la intemperie
- **Lavar las esperas de acero con agua dulce antes de colocar el armado del espaldón.** Colocar las esperas con cloruros en superficie hará que el proceso de corrosión se acelere en estas barras.

7 PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

Mayor impermeabilidad del hormigón conlleva mayor resistencia frente a los agresivos externos, incluidos los cloruros. Por tanto, es necesario que el recubrimiento presente baja permeabilidad para que el espaldón de un dique sea durable.

7.1 REQUISITOS NORMATIVOS DE PERMEABILIDAD EN EL ESPALDÓN DE UN DIQUE

El **Artículo 43** del Código Estructural indica que, en el caso de elementos estructurales ubicados en ambientes muy agresivos, el hormigón deberá presentar un comportamiento suficientemente impermeable.

En ambiente XS3, se pide que el ensayo de penetración de agua bajo presión (UNE-NE 12390-8) presente una penetración máxima igual o inferior a 30 mm, y una penetración media igual o inferior a 20 mm.

El control de esta propiedad durante la ejecución de la obra se realizará (**Artículo 57** del Código Estructural) sólo en los hormigones que no posean distintivo de calidad oficialmente reconocido. Para ello, se realizará el ensayo de penetración de agua al inicio y posteriormente una vez cada 6 meses a lo largo del suministro para cada tipo de dosificación.

7.2 INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN EN LA DURABILIDAD DE UN ESPALDÓN

El CEDEX ha evaluado la penetración de agua del hormigón en 5 espaldones de diques. Para ello, se ha llevado a cabo el ensayo en la zona interior de los testigos, tras el armado. Estos resultados muestran la permeabilidad del hormigón puesto en obra.

La Figura 9 recoge los resultados de penetración máxima obtenidos.

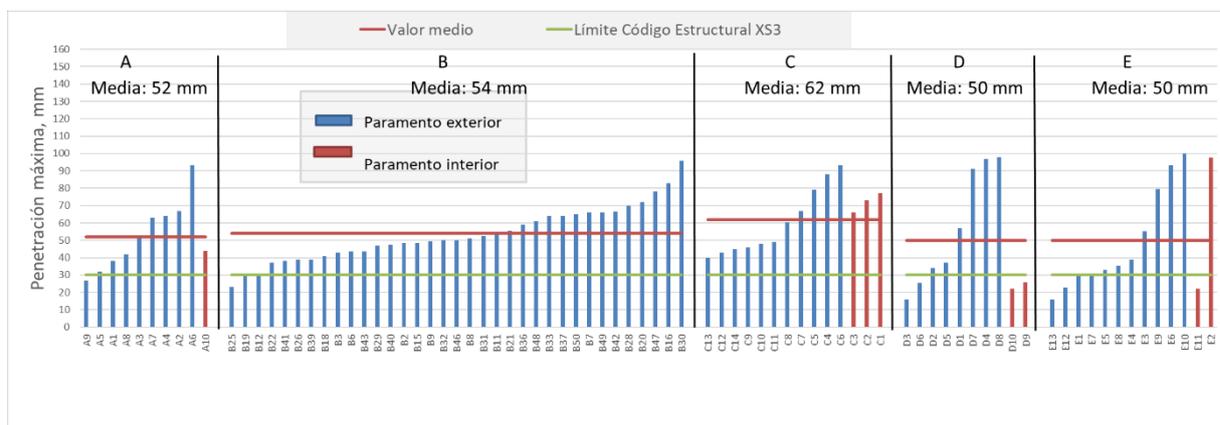


Figura 9. Penetración de agua del hormigón

A los espaldones de dique A, B, D y E se les exigía una penetración de agua máxima de 50 mm, ya que se construyen con la Instrucción EHE del año 1998. El espaldón C se lleva a cabo según la EH-91. La penetración de agua en esta Instrucción era tan sólo un ensayo recomendado para controlar la permeabilidad del hormigón.

La primera conclusión que se desprende de los resultados obtenidos es que los valores medios de los cuatro diques realizados con la Instrucción EHE del año 1998 cumplirían o se aproximarían, de manera muy ajustada, a la penetración exigida por la normativa de aplicación en el momento de la construcción. Por tanto, no parece una dificultad ajustar un hormigón puesto en obra a la permeabilidad que exige la normativa.

La dosificación del hormigón del espaldón C **no cumpliría**, si bien es cierto que en la EH-91 la penetración de agua era sólo una recomendación en comentarios.

La Figura 10 muestra la distribución de resultados de penetración de agua en el interior de los testigos.

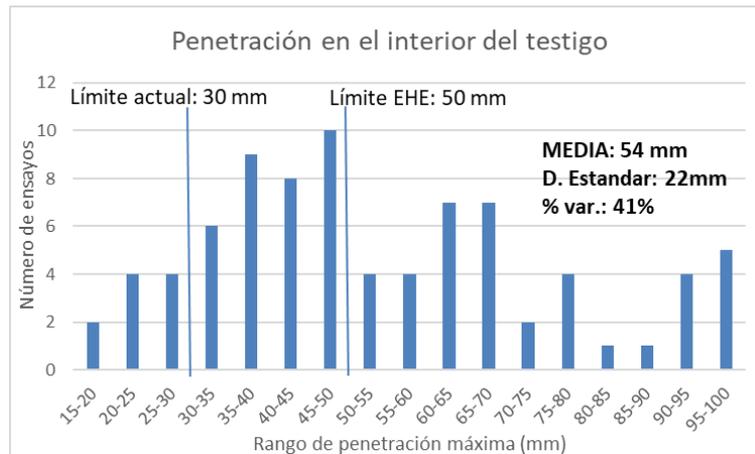


Figura 10. Distribución de resultados de penetración de agua en el interior de los testigos de los 5 espaldones

Los resultados de penetración de agua obtenidos en el interior de todos los testigos han dado un valor medio de 54 mm, muy próximo al límite normativo, pero con una distribución de resultados que hace que la mitad del hormigón ensayado no cumpla, y con un número de valores considerables que se alejan sensiblemente del valor medio. Por ejemplo, el 29% de las medidas supera los 65 mm de penetración máxima, o el 21% los 70 mm.

Esta dispersión significativa que, alrededor de un valor medio que se ajusta de forma estricta al límite normativo, la mitad del espaldón queda por encima de lo exigido, y con valores que se alejan claramente de la media, lo que implica una disminución de la durabilidad del hormigón.

Esa disminución de la vida útil por alejarse del límite normativo de penetración de agua se puede cuantificar. La Figura 11 muestra la pérdida de vida útil que tiene el hormigón de un espaldón que cumple de forma estricta con el Código Estructural, salvo que su penetración de agua máxima pasa, de los 30 mm que le exige la normativa, a 50 mm.

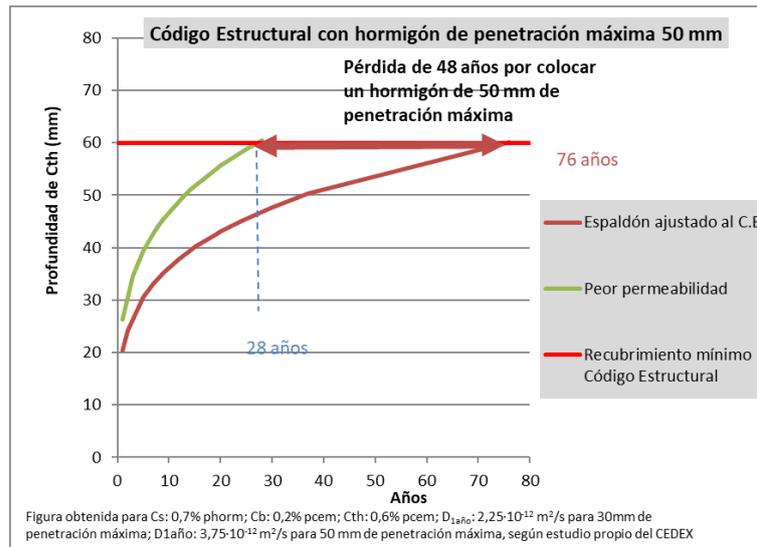


Figura 11. Periodo de iniciación para el espaldón del Código Estructural, y para un espaldón en el que el hormigón colocado tiene una penetración de agua de 50 mm

Por el hecho de sobrepasar en un punto concreto del espaldón de un dique, en 20 mm, la penetración máxima permitida, se pierden 48 años de vida útil, aunque el resto de exigencias del Código Estructural se cumplan de forma estricta.

Pero, además, no siempre las variaciones en la permeabilidad que se han identificado a lo largo de un espaldón han sido aleatorias. La Figura 12 muestra la evolución a lo largo del dique de la penetración de agua del espaldón C, y la Figura 13 la misma evolución en el espaldón B.

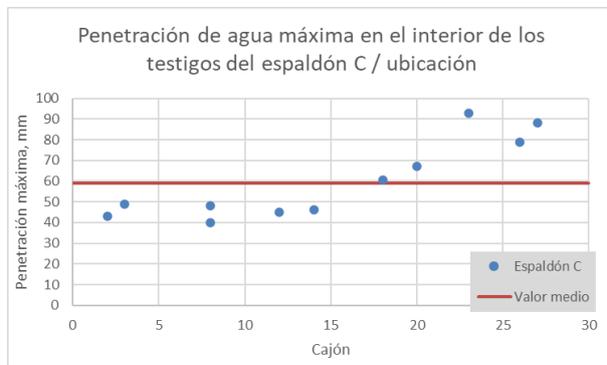


Figura 12. Evolución de la penetración de agua en el espaldón C

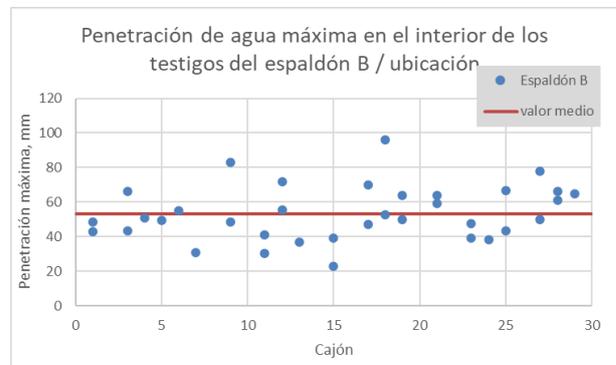


Figura 13. Evolución de la penetración de agua en el espaldón B

En el espaldón B, la penetración máxima del hormigón colocado (medida en el interior de los testigos) oscila alrededor de su valor medio a lo largo de toda la estructura, pero en el caso del espaldón C, la variación no es aleatoria, y se observa claramente como, a partir del cajón 15, la permeabilidad del hormigón empeora según se va avanzando en la construcción del espaldón.

Por tanto, sobrepasar puntualmente el valor de penetración máxima del hormigón tiene influencia en la durabilidad del espaldón, y esas variaciones unas veces son aleatorias, pero otras tienen una causa que produce un empeoramiento paulatino de la permeabilidad durante la construcción, muy posiblemente debido a un inadecuado ajuste de la dosificación en planta.

Para minimizar las variaciones de penetración que presenta el hormigón puesto en obra, e identificar cuándo empeora la permeabilidad del hormigón colocado y por qué, se propone **eleva** durante la ejecución el control sobre la permeabilidad del hormigón puesto en obra.

7.3 RECOMENDACIONES PARA EL CONTROL DE LA PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

Para evitar que el hormigón puesto en obra tenga mayor permeabilidad que el límite normativo, se propone la siguiente recomendación:

DURANTE LA EJECUCIÓN DEL ESPALDÓN DEL DIQUE

- **Controlar de forma frecuente la permeabilidad del hormigón puesto en obra durante la ejecución del espaldón.** Las variaciones que este parámetro ha mostrado dentro de una misma estructura no permiten conformarse con la validación inicial y cada 6 meses del ensayo de penetración de agua, y tampoco sería suficiente con confiar en un distintivo de calidad oficialmente reconocido.

8 CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN

La permeabilidad del hormigón colocado en obra es un factor fundamental para obtener un espaldón durable, pero no se conseguirá este objetivo si no se alcanza la impermeabilidad requerida donde es necesario: en el recubrimiento. Seleccionar la consistencia adecuada para el hormigón del espaldón de un dique facilita su puesta en obra y este hecho, junto a una correcta compactación, optimizará la calidad del recubrimiento y, por tanto, la durabilidad del espaldón frente a los procesos de corrosión.

8.1 REQUISITOS NORMATIVOS PARA LA CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN

El **Artículo 33** del Código Estructural indica que la docilidad del hormigón será la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan coqueras.

La docilidad se valora determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento (cono de Abrams).

Salvo justificación específica en aplicaciones que así lo requieran, **no se empleará la consistencia seca y plástica** (asentamientos inferiores a 4 cm).

En obras de edificación, para pilares, forjados y vigas se utilizará un hormigón de consistencia fluida (10 a 15 cm de asentamiento), salvo justificación en contra. Esta prescripción se podría también aplicar a elementos de ingeniería civil, en especial a los que pudieran estar densamente armados, como por ejemplo tableros de puentes o estribos.

El **Artículo 52** del Código Estructural define cómo debe ser la puesta en obra y curado del hormigón. Respecto a la compactación se indica que:

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

Ya en comentarios, se especifica que el proceso de compactación debe prolongarse junto a los fondos y paramentos de los encofrados, y especialmente en los vértices y aristas, sin que el dispositivo de compactación llegue a entrar en contacto con ellos, hasta eliminar todas las posibles coqueras.

8.2 IMPORTANCIA DE LA CONSISTENCIA Y COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN EN LA DURABILIDAD DE UN ESPALDÓN

Hay dos defectos relacionados con la mala compactación del hormigón en el recubrimiento: la falta de compacidad y los regueros en superficie.

En el caso de la falta de compacidad, puede variar desde una leve falta de lechada superficial hasta severa con importantes nidos de grava, muchas veces en la zona inferior de las puestas. Además, los regueros son defectos de puesta en obra que coinciden con el armado vertical, así que, aunque es un defecto que puede pasar más desapercibido por ser puntual, disminuye sensiblemente la durabilidad del espaldón, al focalizar el fallo de ejecución en la zona en que la calidad del recubrimiento debe ser óptima: sobre el armado.

Tabla 6. Defectos de compactación

<p>FALTA DE COMPACIDAD DEL HORMIGÓN, desde leve con falta de lechada superficial hasta severa con importantes nidos de grava</p>	
 <p>Fotografía 15. Dique A</p>	 <p>Fotografía 16. Dique C</p>
<p>REGUEROS EN SUPERFICIE, es decir, líneas verticales en las que no existe la pasta en superficie, quedando vista la arena e incluso partículas de grava, debido a que no ha cerrado del todo el recubrimiento sobre las barras</p>	
 <p>Fotografía 17. Dique E</p>	 <p>Fotografía 18. Dique D</p>

Aunque estos defectos siempre tienen su origen en no haber realizado una correcta compactación del hormigón, está claro que la consistencia del hormigón colocado tiene gran influencia en el resultado final obtenido. Para mostrarlo, las siguientes tablas muestran la consistencia del hormigón colocado y la frecuencia con que estos defectos de compactación se presentan en cada espaldón.

Tabla 7. Falta de compactación en los espaldones de diques

FALTA DE COMPACIDAD DEL HORMIGÓN		
Espaldón	Consistencia	Grado de afectación
A	Blanda-fluida	Zonas puntuales con mal vibrado superficial
B	Blanda	Aunque no es un defecto generalizado, sí se han observado algunos puntos del paramento exterior de hormigón con mala compactación.
C	Fluida	Tan sólo un nido de grava puntual por falta de vibrado en el recubrimiento
D	Blanda	Hay una gran superficie del espaldón que presenta una superficie defectuosa, con falta de lechada superficial y árido fino visto en superficie (Fotografía 19).
E	Plástica	Defecto más significativo del paramento exterior. Aunque se encuentran áreas donde el hormigón se presenta bien cerrado, hay zonas que presentan una superficie con falta de lechada superficial y árido fino visto en superficie (Fotografía 20).



Fotografía 19. Paramento exterior. Espaldón D



Fotografía 20. Paramento exterior. Espaldón E

Tabla 8. Regueros en superficie en los espaldones de diques

REGUEROS EN SUPERFICIE		
Espaldón	Consistencia	Grado de afectación
A	Blanda-fluida	Defecto presente sólo en zonas puntuales de la estructura
B	Blanda	La existencia de regueros en el hormigón es muy puntual.
C	Fluida	Se aprecia de forma localizada
D	Blanda	Se observa con frecuencia la existencia de regueros verticales sobre las armaduras en los que falta la pasta de cemento y queda la arena del mortero vista
E	Plástica	Se observa falta la pasta de cemento y queda la arena del mortero vista. Debido al obstáculo que supone la propia barra para la aguja vibrante, no se ha conseguido cerrar perfectamente el hormigón que la recubre marcando así la posición de las barras.



Fotografía 21. Paramento exterior. Espaldón D



Fotografía 22. Paramento exterior. Espaldón E

La **calidad del vibrado** del hormigón es un primer factor que influye en este tipo de defectos. Pero también **la consistencia** del hormigón tiene importancia. Se observa en las tablas anteriores que, cuanto menos fluida es la consistencia, más intensos son los problemas de compactación.

El estudio en el laboratorio de los testigos extraídos de los diferentes espaldones ha profundizado en la evaluación de la pérdida de calidad que presenta el recubrimiento. Una vez conocida la penetración de agua en el interior de los testigos (apartado 7), este mismo ensayo realizado en el recubrimiento nos indicará el aumento de permeabilidad que ha tenido el hormigón debido principalmente a su puesta en obra: la compactación de la zona externa no es tan buena en esta zona por el obstáculo que supone la presencia de las armaduras, vértices, aristas, etc.

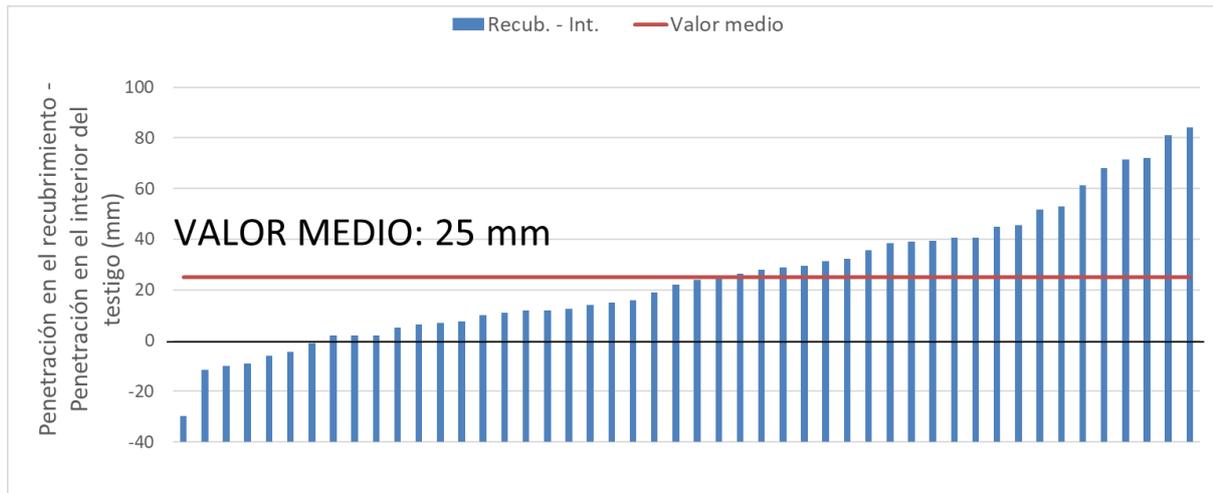


Figura 14. Diferencia de permeabilidad entre el recubrimiento y el interior del mismo testigo

La diferencia media entre la permeabilidad del recubrimiento y del interior de los mismos testigos es de 25 mm. La penetración media en el interior de todos los testigos ensayados ha sido de 54 mm, y en términos de milímetros de penetración de agua, **ha habido una pérdida media de calidad en el recubrimiento del 46%**.

Y esta pérdida de calidad del recubrimiento tiene una influencia directa en la vida útil de las estructuras. Se puede cuantificar en años (Figura 15) lo que supone que la calidad del recubrimiento empeore un 46% respecto a un interior de los testigos, aunque se cumplan de forma estricta el resto de las exigencias normativas que fija actualmente el Código Estructural.

DURANTE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

- **Utilizar hormigones de consistencia lo más fluida** posible (próxima a los 15 cm de cono, siempre respetando la relación a/c y mediante el uso de superplastificante), próximos al límite superior del asentamiento del cono, puede ayudar a mejorar las terminaciones en **zonas de difícil acceso para los vibradores**.
- Mostrar un **especial cuidado** en la compactación de **las zonas más sensibles** y de difícil acceso del recubrimiento, como son: acabados en vértice o arista, tras los solapes de armado, tras las zonas de conducciones, en las zonas curvas (botaolas), etc.
- **Inspeccionar los paramentos tras el desencofrado**. Se recomienda realizar un registro fotográfico como parte del control de calidad de la ejecución de la estructura.

9 CURADO DEL HORMIGÓN

La pérdida de agua superficial en el hormigón durante sus primeros días de endurecimiento disminuye sus prestaciones donde es más importante para evitar la corrosión: en el recubrimiento. Por ello, es importante asegurar la humedad del hormigón durante los primeros días mediante el curado.

9.1 REQUISITOS NORMATIVOS SOBRE CURADO DEL HORMIGÓN

Respecto al curado del hormigón, el **artículo 52** del Código Estructural indica que:

- Durante el fraguado y primer periodo de endurecimiento del hormigón, deberá asegurarse el mantenimiento de la humedad del mismo mediante un adecuado curado. Éste se prolongará durante el plazo necesario en función del tipo y clase de cemento, de la temperatura y grado de humedad del ambiente.
- El curado por aportación de humedad podrá sustituirse por la protección de las superficies mediante recubrimientos plásticos, agentes filmógenos u otros tratamientos adecuados.

Cómo calcular el número de días de curado para un hormigón queda fuera del cuerpo normativo, aunque se especifica en los comentarios del Código Estructural. Se puede evaluar el número mínimo de días que se debería curar un hormigón que cumpla todas las exigencias de dosificación del ambiente XS3 y se realice con los cementos recomendados en el apartado 5.1. Ahora bien, el hormigón del espaldón también se encuentra en ambiente XM3 (elemento sometido a abrasión/erosión extrema). Por ello, el **artículo 43** del Código Estructural indica que la duración del curado deberá ser un 50% superior a la que se aplicará, a igualdad del resto de condiciones, a un hormigón no sometido a erosión.

La Tabla 9 muestra los días de curado que corresponden al espaldón de un dique (XA2 XS3 XM3) en función del tipo de cemento utilizado.

Tabla 9. Días de curado

ESPALDÓN DE UN DIQUE (XA2 XS3 XM3)	
Tipo de cemento	Días de curado
CEM II/B-V CEM II/A-D CEM II/B-S, CEM II/B-P	7
CEM III/A	10
CEM III/B	12
CEM IV	9

Se evalúan los días de curado para las siguientes condiciones:

- Desarrolla la resistencia de forma rápida (cemento 42,5 o 32,5 R y $a/c < 0,5$)
- Expuesto al sol con intensidad media, velocidad de viento media y humedad entre el 50 y 80%
- La temperatura media será superior a 12°C

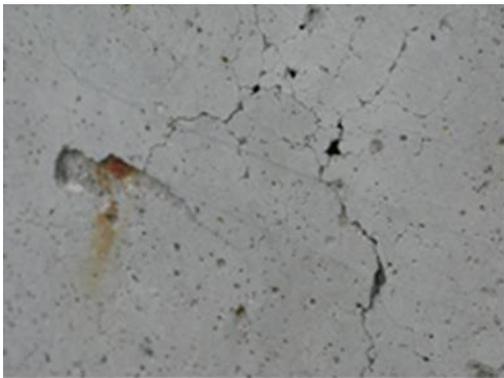
Si el cemento es 52,5 o 42,5R se podría disminuir en 2 días el tiempo de curado. Ahora bien, si el cemento es 32,5N habría que sumar 2 días más. Lo mismo sucede si las condiciones ambientales son más desfavorables. Y si confluyen ambos factores negativos, habría que sumar 6 días a la tabla anterior.

9.2 IMPORTANCIA DEL CURADO DEL HORMIGÓN

Cuando el curado del hormigón es insuficiente (o si simplemente no se aplica) siempre se va a producir una peor calidad del recubrimiento. Ahora bien, en casos en que las condiciones han sido muy desfavorables y/o el curado inexistente, pueden producir también defectos observables en la inspección de las estructuras. La Inspección visual de los 5 espaldones de diques estudiados en el CEDEX ya muestra defectos propios del recubrimiento que están relacionados con la falta de curado.

Tabla 10. Defectos por falta de curado

FISURACIÓN DE AFOGARADO: fisuras muy finas dispuestas en mapa o piel de cocodrilo que producen pequeños decapados. El defecto está posiblemente relacionado con una rápida desecación de la piel del hormigón por un curado inexistente o deficiente, debido a la exposición al soleamiento y al viento del paramento recién desencofrado



Fotografía 23. Dique A



Fotografía 24. Dique A

DECAPADO SUPERFICIAL: En muchas ocasiones esto es debido directamente al proceso de ahucamiento del recubrimiento por la corrosión de las barras que fisura y salta la capa superficial de pasta de cemento, si bien en otros casos se trata de descascarillados superficiales asociados a afogarados u otros defectos superficiales que pueden atribuirse a un curado deficiente.



Fotografía 25. Dique A



Fotografía 26. Dique A

Actualmente, los espaldones se deben realizar siempre con cementos con elevado contenido de adición puzolánica, tal como quedó expuesto en el apartado 5. Estos cementos necesitan de periodos de curado mayor, como se observa en la Tabla 9. Por tanto, **la ausencia de curado en un espaldón realizado según el Código Estructural tendrá mucha repercusión en la calidad final del recubrimiento, debido al tipo de cemento seleccionado.**

9.3 RECOMENDACIONES PARA LA CORRECTA EJECUCIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Para evitar una disminución de la durabilidad del recubrimiento debido a un curado insuficiente, se proponen las siguientes recomendaciones:

ANTES DEL INICIO DE LA OBRA

- **Prever, de forma detallada**, el proceso de **curado** a seguir, y como se va a llevar a cabo en la cara interior, exterior y zona superior (coronación) del espaldón del dique. Diseñar los sistemas necesarios para realizar esta operación.
- **Prever, de forma detallada, el acceso a los paramentos** interior, exterior y zona superior (coronación) del espaldón para su **inspección**.

DURANTE LA EJECUCIÓN DEL ESPALDÓN DEL DIQUE

- **Aplicar los días de curado resultantes de la formulación del Código Estructural, en general, no menos de 7 días.**
- **Inspeccionar los paramentos tras el curado.** Se recomienda realizar un registro fotográfico como parte del control de calidad de la ejecución de la estructura.

10 CONCLUSIONES

A continuación, se recogen todas las indicaciones realizadas a lo largo de este documento para poder obtener un espaldón de dique durable.

Aquellas indicaciones marcadas en azul son fruto de las conclusiones alcanzadas en el trabajo llevado a cabo por el CEDEX de estudio de espaldones con patología de corrosión. En cambio, el resto de las indicaciones son normativa que el Código Estructural recoge y que, por tanto, deben ser siempre de obligado cumplimiento para la ejecución del espaldón de un dique.

10.1 DURANTE EL PROYECTO DEL ESPALDÓN DEL DIQUE

- El **ambiente de exposición** del espaldón de un dique será **XA2; XS3; XM3**.
- Las **geometrías deben ser lo más sencillas posibles**, utilizando superficies planas sencillas y evitando curvaturas innecesarias. Valorar la necesidad de colocar una berma de tránsito exterior en el espaldón y, si se hace, realizarla con una marcada pendiente de bombeo.
- El **hormigón** colocado en el espaldón **debe cumplir**:

Tabla 11. Exigencias normativas para el hormigón del espaldón de un dique

Hormigón del espaldón de un dique. XA2 XS3 XM3. (Artículo 43 del Código Estructural)		
Apertura de fisura	Armado:0,1 mm Pretensado: descompresión	
Resistencia mínima de proyecto f_{ck}	25 MPa	
Resistencia característica mínima esperada para el hormigón	35 MPa	
Máxima relación agua cemento	0,45	
Contenido mínimo de cemento	350 kg/m ³	
Contenido máximo de cemento	Tamaño máximo de árido, mm	Contenido máximo de cemento (kg/m ³)
	10	400
	20	375
	40	350
Tipo de cemento	MR, SR o SRC, según la Instrucción RC-16	
Permeabilidad del hormigón (penetración de agua)	Máxima ≤30 mm Media ≤20 mm	
Árido fino	Cuarzo o mayoritariamente de naturaleza cuarcítica, pudiendo emplearse otros áridos que tengan un comportamiento equivalente respecto a su desgaste	
Árido grueso	Coeficiente de Los Ángeles inferior a 30	

- **Prescribir hormigón de consistencia fluida**
- El **recubrimiento mínimo** será:

Tabla 12. Recubrimiento mínimo (mm) para el espaldón de un dique: XA2 XS3 XM3. Artículo 44 del Código Estructural

Tipo de elemento	Cemento	Años de vida útil	XA2 XS3 XM3
Hormigón armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	60
		100	65
	CEM II/B-S, B-P	50	80
		100	85
	Resto de cementos utilizables	50	*
		100	*

- El **recubrimiento nominal** es el reflejado en los planos, y define los separadores a utilizar. Para evaluarlo:

$$C_{non} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

- C_{non} : recubrimiento nominal, mm.
 - C_{min} : recubrimiento mínimo, mm.
 - ΔC_{dev} : margen de recubrimiento, en función del nivel de control de ejecución:
 - ΔC_{dev} : 0 mm, en elementos prefabricados con nivel intenso de control en la instalación de prefabricación (en obra o ajena a la obra)
 - ΔC_{dev} : 5 mm, en elementos ejecutados in situ con nivel intenso de control de ejecución
 - ΔC_{dev} : 10 mm, en otros casos.
- Para **seleccionar el cemento de la obra**:
 - **Es importante que el cemento sea puzolánico o de escorias.** Por tanto, se seleccionará uno de los cementos recomendados por el Código Estructural (Tabla 43.2.1.1.b): CEM III/A, CEM III/B, CEM II/B-V, CEM II/A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%.
 - Si se utiliza **puzolana natural o menos del 36% de escoria** (CEM II/B-P, CEM II/B-S), es necesario **aumentar el recubrimiento 20 mm**, tal como indica la normativa.
 - **Al CEM IV se le deben añadir limitaciones adicionales** para asegurar la puzolanidad:
 - **Contenido de adición puzolánica superior al 20%**, limitación que sí se impone al CEM II y a los hormigones con cenizas.
 - **Si parte de su adición son puzolanas (P)**, se debería colocar el recubrimiento exigido a los cementos CEM II/B-P.
 - **No puede contener puzolana calcinada (Q) o ceniza volante calcárea (W)**, ya que el Código Estructural impide utilizar cementos portland con este tipo de puzolana.
 - Ya que el espesor de recubrimiento del espaldón está vinculado a la utilización de unos cementos determinados, **en el proyecto debe quedar explicitado qué cementos se pueden utilizar para realizar el espaldón, en función del espesor de recubrimiento adoptado.**

10.2 ANTES DEL INICIO DE LA OBRA

- **Prever, de forma detallada, el acceso a los paramentos** interior, exterior y zona superior (coronación) del espaldón para **su evaluación**.
- **Prever, de forma detallada, el proceso de vibrado a seguir. Se recomienda apoyar al vibrado convencional con vibradores externos.** Se debe prever el sistema para poder colocar vibradores externos en el paramento interior y exterior del espaldón, así como las zonas de acceso para realizar el vibrado suficiente con vibradores tradicionales.
- **Prever, de forma detallada, el proceso de curado a seguir**, y como se va a llevar a cabo en la cara interior, exterior y zona superior (coronación) del espaldón del dique. Diseñar los sistemas necesarios para realizar esta operación.

10.3 DURANTE LA EJECUCIÓN DEL ESPALDÓN

- Para el **control del recubrimiento**, efectuar las siguientes **comprobaciones previas al hormigonado**:
 - Separadores (material, tamaño, cantidad y distribución)
 - Recubrimientos (mínimos y máximos)
 - Tolerancias de acuerdo con lo establecido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto o el Anejo 14 del C.E.
 - Estado de oxidación de la armadura pasiva, con el límite establecido en el apartado 49.8.1 del C.E.
 - Estado de limpieza y eliminación de suciedades.

Y tras la ejecución de cada puesta de hormigón:

- Existen ciertas zonas del espaldón de un dique donde puede resultar más difícil garantizar el espesor de recubrimiento: botaolas, solapes, vértices y aristas, etc. **Cuando haya dudas sobre si se está alcanzado el recubrimiento mínimo** en estas zonas, o en cualquier otra del espaldón, **se recomienda validar el proceso de colocación de la ferralla** (tipo y número de separadores utilizado, etc.). Para ello, se puede comprobar el recubrimiento alcanzado con una **sonda magnética**.
- **Para garantizar el contenido en cloruros del hormigón puesto en obra**
 - **Controlar de forma frecuente el contenido en cloruros iniciales** del hormigón durante la ejecución del espaldón.
 - **Proteger los acopios de áridos para hormigón y acero** de posibles contaminaciones por cloruros. Igualmente, **evitar cualquier contaminación del hormigón por cloruros durante su colocación**.
 - **Lavar las esperas de acero con agua dulce antes de colocar el armado del espaldón**.

- **Para garantizar la permeabilidad del hormigón colocado en obra:**
 - **Controlar de forma frecuente la permeabilidad del hormigón** puesto en obra durante la ejecución del espaldón.

- Durante el control de la ejecución hay que tener en cuenta que **para que se produzca una correcta compactación del hormigón hay que prestar especial atención al proceso de vibrado:**
 - No se colocarán en obra capas o tongadas de hormigón cuyo espesor sea superior al que permita una compactación completa de la masa.
 - El proceso de compactación deberá prolongarse hasta que refluya la pasta hasta la superficie y deje de salir aire.
 - Mostrar un especial cuidado en la compactación de las zonas más sensibles y de difícil acceso del recubrimiento, como son: acabados en vértice o arista, tras los solapes de armado, tras las zonas de conducciones, en las zonas curvas (botaolas), etc. Para ello, el proceso de compactación debe prolongarse junto a los fondos y paramentos de los encofrados, y especialmente en los vértices y aristas, sin que el dispositivo de compactación llegue a entrar en contacto con ellos, hasta eliminar todas las posibles coqueras.
 - **Utilizar hormigones de consistencia más fluida** mediante el uso de superplastificante, próximos al límite superior del asentamiento del cono, puede ayudar a mejorar las terminaciones en **zonas de difícil acceso para los vibradores**.

- Respecto al **curado del hormigón:**
 - **Aplicar los días de curado resultantes de la formulación del Código Estructural**, en general, no menos de 7 días.

Finalmente, se recomienda inspeccionar los paramentos tras el desencofrado y tras el curado del hormigón, así como realizar un registro fotográfico como parte del control de calidad de la ejecución de la estructura.

