

Hormigón en ambiente marino



1. Introducción

Los océanos son y van a seguir siendo un lugar muy importante para el desarrollo de la vida humana en nuestro planeta.

Es evidente que se va a tener un contacto muy importante con los océanos durante los próximos años. El hormigón se presenta como la respuesta más sostenible y eficiente para la construcción de todo tipo de estructuras marinas.

Después de muchos años compitiendo en el mercado de las estructuras marinas, el hormigón se puede considerar la solución con la mejor relación entre economía (precio) y sostenibilidad/durabilidad (valor) de todas las probadas hasta la fecha de hoy.

Existen muchos tipos de estructuras marinas que pueden estar sometidas a distintos tipos de exposición marina. Para tratar de ordenar el tipo de estructuras marinas, a continuación se va a utilizar la clasificación que Valery M. Buslov realiza.



2. Clasificación de estructuras marinas

La descripción de las estructuras marinas se puede basar en la función que va a realizar más que en el diseño estructural. Se va a utilizar la clasificación de tipos de estructuras marinas de Valery M. Buslov:

- Estructuras de gravedad (diversos tipos de muelles).
- Diques de escollera.
- Estructuras flotantes.
- plataformas pilotadas.
- Mamparas flexibles / Flexible Bulkheads (a ver si encuentras una traducción mejor).

Las estructuras de hormigón han demostrado ampliamente ser capaces de soportar las acciones/solicitaciones del medio marino durante los últimos cien años.

El hormigón está aceptado como el material de construcción por excelencia para las estructuras construidas en ambiente marino.

Cada uno de estos tipos de estructuras puede estar o está sometido a diferentes acciones medioambientales del medio marino.

Además de la clasificación de los tipos de estructuras marinas propuesta por Valery M. Buslov, otro tipo de estructuras como pueden ser puentes o túneles submarinos pueden estar sometidos al ambiente marino y todo tipo de estructuras sometidos al ambiente marino, incluso en zonas próximas a la costa.

Aunque de todos es conocido, hay que recordar que el efecto de la niebla y el vapor del agua de mar pueden llegar hasta varios kilómetros hacia el interior de la costa.

Los tipos de hormigón que pueden llevar todas las estructuras o elementos estructurales de hormigón en ambiente marino son el hormigón en masa, armado y pretensado.

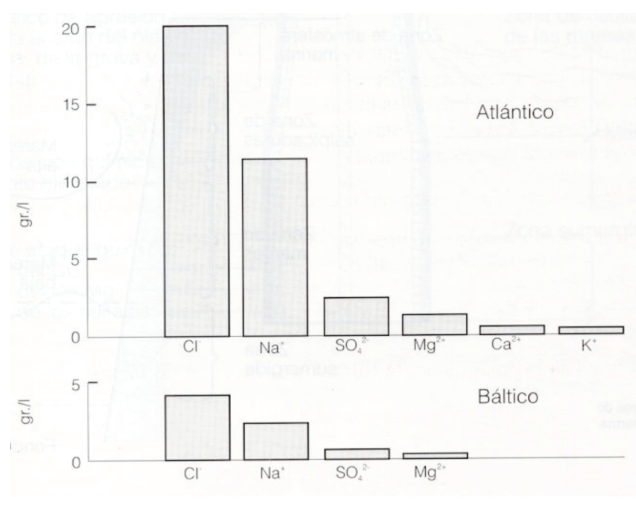
La Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 recoge estos tres tipos de hormigón y exige unas prescripciones en función del tipo de hormigón y el ambiente al que va a estar sometida la estructura y/o elemento estructural.

3. El ambiente marino

3.1 Composición del agua de mar

El agua de mar contiene muchas sales disueltas, algunas de las cuales afectan a la durabilidad del hormigón. Las sales presentes

Figura 1. Típica concentración de iones en dos aguas marinas



en cantidades suficientes, en la mayor parte de los mares, son: cloruro sódico (NaCl), cloruro magnésico (MgCl_2), sulfato magnésico (MgSO_4), sulfato cálcico (CaSO_4), cloruro potásico (KCl) y sulfato potásico (K_2SO_4). Las concentraciones varían de un mar a otro, aunque la cantidad total de sal es habitualmente de unos 35 g/l. Una excepción es el Báltico, que contiene sólo una quinta parte de esta cantidad de sales disueltas. La Figura 1 da las concentraciones iónicas típicas de los componentes de las sales más comunes en el Atlántico y en el Báltico.

Debe mencionarse que el agua de mar también contiene oxígeno y dióxido de carbono disueltos. La cantidad de estos gases puede variar mucho en función de las condiciones locales.

En función de la cantidad disuelta de dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S / ácido sulfhídrico en disolución acuosa) pueden causar disminuciones del pH del agua de mar de los valores normales 8,2-8,4 a 7 o menos.

Las aguas ácidas reducen la alcalinidad y resistencia del hormigón e incrementan la corrosión electroquímica del acero que contienen las estructuras de hormigón armado y/o pretensado.

3.2 Organismos marinos

Los organismos marinos que pueden interaccionar con las estructuras de hormigón pueden ser algas, moluscos, erizos de mar, percebes y bacterias.

Tanto las algas como los moluscos pueden ser un problema cuando la superficie del hormigón es porosa y pueden generar una pérdida importante de alcalinidad.

Los percebes, erizos de mar y los moluscos pueden generar ácidos orgánicos que pueden causar agujeros en la superficie del hormigón que pueden dar lugar al inicio de la corrosión por picaduras.

Excepcionalmente, es conocida la presencia de una bacteria anaeróbica ("Theobacillus Concretivorous") en sedimentos que contienen petróleo que atacan al hormigón permeable.

También excepcionalmente se producen ataques por bacterias aeróbicas que transforman el sulfuro de hidrógeno (H_2S) en ácido sulfúrico que es altamente corrosivo tanto para el hormigón como para el acero.

Asimismo, se debe tener en cuenta que el crecimiento de las algas marinas sobre la estructura puede aumentar la rugosidad superficial aumentando la carga hidrodinámica que a su vez, influye en la estabilidad estructural.

3.3 Temperatura

La temperatura de la superficie del mar varía desde los -2°C en las zonas muy frías hasta los 30°C en las zonas tropicales.

La temperatura del agua de mar varía con la profundidad y a profundidades entre 100 y 1.000 metros la temperatura suele estar comprendida entre los $2-5^\circ\text{C}$.

La temperatura del agua es un factor determinante de las reacciones químicas y electroquímicas en las estructuras de hormigón. En general, los climas cálidos o muy cálidos aceleran los procesos de inicio y progresión de los mecanismos de deterioro del hormigón.

También se debe tener muy en cuenta la temperatura del aire a la que va a estar sometida la estructura marina, ya que el gradiente térmico generador de tensiones térmicas de la temperatura del aire es mucho más grande que el de la temperatura del agua del mar.

Hay que tener en cuenta que en el Golfo Pérsico se pueden alcanzar los 50°C a la sombra y en el Ártico, los -50°C . Estas temperaturas extremadamente bajas pueden ayudar a roturas frágiles del acero por impacto.

En la zona de carrera de mareas, parte de la estructura marina se pueden dar de forma combinada ciclos de calentamiento y enfriamiento, congelación (hielo) y descongelación (deshielo) y humedad y sequedad. Los efectos sinérgicos de estos fenómenos cíclicos deben ser tenidos muy en cuenta a la hora de proyectar la estructura desde el punto de vista de la durabilidad.

Fookes, PG y otros autores proponen cuatro tipos de climas marinos para el dimensionamiento de la estructura desde el punto de vista de la durabilidad:

- Frío.
- Templado.
- Caluroso y seco.
- Caluroso y húmedo.

Estos autores indican que después de 10 años de seguimiento de estructuras marinas de hormigón armado, los ambientes más agresivos son los climas caluroso y seco y caluroso y húmedo.

Parece que la experiencia a nivel internacional con estructuras marinas de hormigón está de acuerdo con lo indicado por Fookes y otros.

3.4 Presión hidrostática

La presión hidrostática actúa como una fuerza que conduce al agua de mar a intentar entrar en cualquier estructura marina

que se encuentre sumergida. A mayor profundidad, mayor presión hidrostática y mayor fuerza va a tener el agua para intentar entrar en la estructura.

La acción de la presión hidrostática debe ser tenida muy en cuenta a la hora de proyectar y construir una estructura marina, no debiéndose aceptar estructuras con hormigones con porosidades medias o altas ni estructuras fisuradas o con agujeros.

3.5 Acción de las mareas

Las estructuras marinas están expuestas a la acción de las mareas astronómicas generadas por la interacción entre la Tierra y la Luna. Este fenómeno causa dos veces al día, una exposición a ciclos de humedad-sequedad, calor-frío y en climas fríos, a la acción del hielo-deshielo (congelación-descongelación).

La carrera de la marea puede variar de los 0,5 a los 15 metros. Como dato medio, en los océanos Atlántico y Pacífico, en zonas profundas, el rango de variación es menor de 1 metro y de 4-5 metros en la costa. El rango de la marea astronómica debe ser estudiado para cada caso.



3.6 Mareas meteorológicas y temporales de olas / Acción de los temporales

Además de la marea astronómica, las borrascas/bajas presiones pueden generar importantes aumentos del nivel del mar que en situaciones especiales pueden llegar a los 4-5 metros en Holanda (Europa) y de 4-7 metros con los huracanes y tifones.

Estas situaciones de profundas borrascas/bajas presiones suelen también asociarse a importantes temporales con



grandes series de olas generadas por la fricción del viento con el agua. La cantidad de energía que un gran temporal puede transmitir a una estructura marina es de una magnitud enorme.

Autores como Gerwick afirman que una gran ola puede llegar a aplicar 30 t/m² sobre la parte de la estructura que impacta directamente.

La parte de la estructura que está sometida a la intensa acción de las olas se denomina zona de salpicaduras y puede ser atacada por la erosión por cualquier sólido en suspensión que llevan las olas como arena, gravillas, hielo, maderas, etc.

3.7 Niebla y rocío

En verano o épocas calurosas, la niebla marina se forma cuando el aire caliente procedente de tierra pasa sobre la superficie fría del océano. En invierno o épocas frías, el aire frío de tierra cruza por el ambiente del agua de mar más cálido y húmedo, formando nieblas marinas y nubes bajas. Estas nieblas costeras generan una acción de rociado de pequeñas gotitas de agua de mar sobre las zonas donde se producen.

El viento, al actuar sobre las olas, genera rocío/pulverización. La acción de las olas contra la costa o contra las estructuras marinas también genera el efecto del rocío/pulverización. Fuertes temporales pueden generar transporte de pequeñas gotas de agua de mar varios kilómetros tierra adentro.

3.8 El efecto del hielo

En las zonas de frío extremo, próximas al Ártico y a la Antártida, se puede producir un doble fenómeno de impacto del hielo contra la estructura y de la abrasión que este produce en el hormigón.

En una investigación sobre faros, Huovinen informa que en 30 años se ha producido una abrasión de 300 mm en Helsinki. Para que un hormigón tenga una buena resistencia a las heladas persistentes, se recomienda una resistencia mínima a compresión de $RC28 = 70 \text{ N/mm}^2$.

3.9 Consideraciones finales

El ambiente marino es muy agresivo para los materiales de construcción que se usan habitualmente. El agua de mar contiene iones corrosivos, gases y numerosos organismos marinos que son perjudiciales para los materiales de construcción.

La presión hidrostática y las temperaturas extremas aceleran los procesos de deterioro en los materiales. Los grandes temporales de olas son capaces de destruir/romper fuertes estructuras. Por tanto, el ambiente agresivo y complejo de los océanos presenta un reto formidable y una gran oportunidad para los ingenieros especialistas en materiales.



4. Características del hormigón

El hormigón es una estructura uniformemente heterogénea. Esta heterogeneidad dificulta la elaboración de modelos que predigan su comportamiento.

En general, el hormigón para estructuras en ambiente marino está compuesto por cemento, agua, arena, áridos y reductores de agua. El tamaño máximo que se emplea puede variar desde los 10 mm a los 40 mm, en función del tipo de estructura marina a construir.

El hormigón se presenta en dos estados: fresco y endurecido. En estado fresco, las propiedades más características del hormigón son la consistencia, la docilidad y la homogeneidad. En estado endurecido, la característica más frecuentemente medida es la resistencia a compresión, que es una característica/medida indirecta de otras características cuyo conocimiento puede ser de mayor interés.

En general, la característica más importante para un hormigón en estado endurecido para una estructura marina es la permeabilidad del mismo. Hormigones con muy baja permeabilidad elevan de manera muy notable la probabilidad de que una estructura marina se comporte adecuadamente a lo largo de la vida del proyecto.

La impermeabilidad de un hormigón está directamente relacionada con la durabilidad y esta con el concepto de sostenibilidad.

4.1 Un modelo de estructura básica del hormigón

Se va a tomar un modelo sencillo de estructuras de hormigón, conociendo de antemano que es excesivamente simple pero para el fin de esta ficha técnica, puede ser suficiente.

A nivel microscópico, se pueden distinguir tres fases:

- Árido grueso.
- Matriz cementada (pasta de cemento hidratada).
- Zona de transición (muy próxima a las paredes de los áridos gruesos).

Cada una de estas fases comprende otras fases y además, tanto la Matriz cementada como la Zona de transición pueden cambiar con el tiempo, debido al efecto de la temperatura y la humedad que afectan a la estructura.

La impermeabilidad de un hormigón, y portanto, su durabilidad es directamente proporcional a la impermeabilidad de estas tres fases que, a su vez, vienen condicionadas por el tamaño y la continuidad que pueden existir entre los poros.

El objetivo es maximizar la impermeabilidad del hormigón con el menor coste posible para cada estructura de hormigón.

La permeabilidad de un hormigón no es fácil de medir y especificar. La permeabilidad de una estructura de hormigón no solo depende de una buena dosificación y fabricación, sino también de un buen vibrado, buen curado y una buena práctica de hormigonado.

5. Zonas de exposición marina

Antes de hablar de las causas del deterioro del hormigón en ambiente marino, vamos a señalar/indicar los diferentes tipos de exposición marina:

5.1 Zonas básicas de exposición

Existen diferentes tipos de exposición marina, cada uno con sus propias características e incidencias (Figura 2). Los mismos pueden clasificarse de la forma siguiente:

5.1.1 Zonas de atmósfera marina

En esta zona, el hormigón nunca está en contacto con el mar. Sin embargo, recibe sal procedente de la brisa marina y niebla salina. El nivel de cloruros decrecerá al aumentar la distancia al mar si bien, dependiendo de la naturaleza de la costa y de los vientos dominantes, la sal puede ser transportada muchos kilómetros hacia el interior.

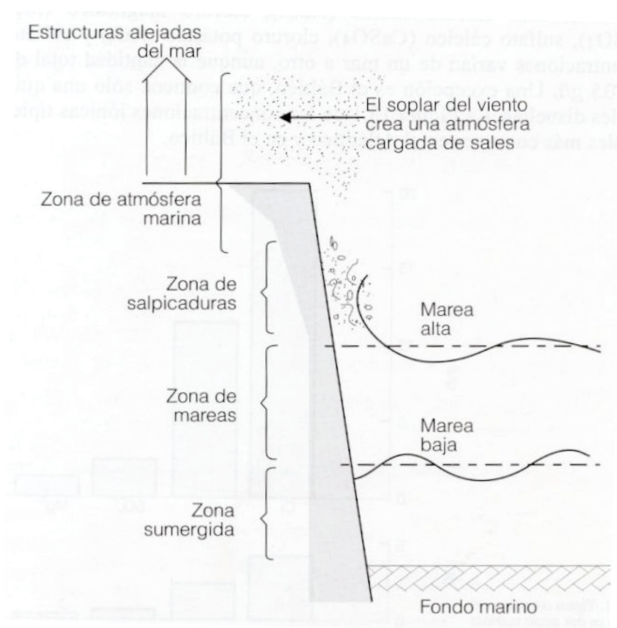
5.1.2 Zonas de salpicaduras

Esta zona está, por encima de la zona de marea alta, sujeta a la humectación directa con agua de mar procedente de las olas y la espuma.

5.1.3 Zonas de mareas

Esta zona está comprendida entre los niveles de marea alta y baja. El hormigón estará sumergido cíclicamente cada día.

Figura 2. Tipos de exposición marina



5.1.4 Zona sumergida

Es la zona por debajo del nivel de marea baja, en la cual el hormigón está permanentemente sumergido.

5.1.5 Zona enterrada

Esta zona corresponde al fondo marino.

Debe observarse que no existen unos límites definidos entre zonas y de hecho, cada zona se solapa con la siguiente.

6. Posibles causas de deterioro del hormigón en ambiente marino

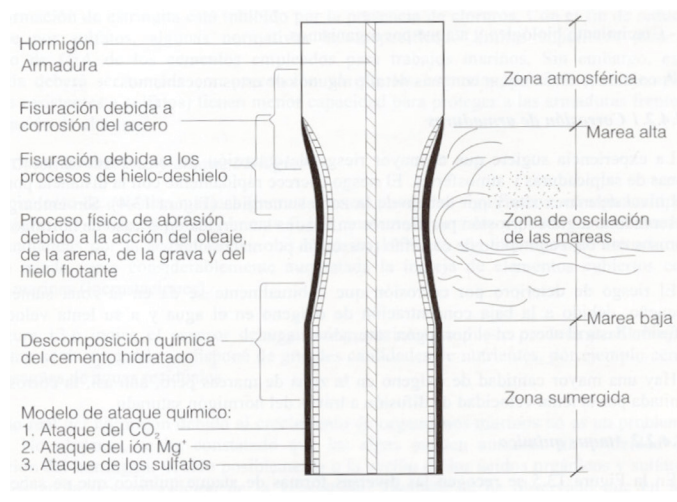
El ambiente marino es el generador de las causas del deterioro del hormigón. Estas causas pueden ser tanto físicas, como químicas.

A continuación se señalan las causas más importantes de deterioro (Figura 3) de cada una de las zonas.

6.1 Zona de atmósfera marina

- Corrosión de las armaduras activada por los cloruros.
- Daño por heladas.

Figura 3. Deterioro de estructuras de hormigón en agua de mar



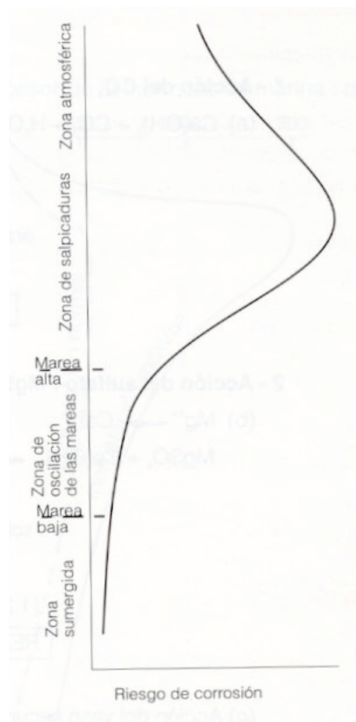
6.2 Zona de salpicaduras

- Corrosión de las armaduras activada por los cloruros.
- Abrasión debida a la acción del oleaje.
- Daño por heladas.

6.3 Zona de mareas

- Abrasión debida a la acción del oleaje, hielo flotante y otros objetos; colisión de barcos, etc.
- Corrosión de las armaduras activada por los cloruros.
- Daño por heladas.
- Crecimientos biológicos.
- Ataque químico al hormigón.

Figura 4. Variación del riesgo de corrosión según la zona de exposición marina



6.4 Zonas sumergida y enterrada

- Ataque químico del hormigón.
- Crecimiento biológico y ataque por organismos.

A continuación se tratan con más detalle algunos de estos mecanismos.

6.4.1 Corrosión de armaduras

La experiencia sugiere que el mayor riesgo de corrosión de las armaduras ocurre en las zonas de salpicaduras y atmosférica. El riesgo decrece rápidamente con la distancia por encima del nivel de marea alta y por debajo de la zona sumergida (Figura 4). Sin embargo, se ha observado una gran corrosión por cloruros en la zona sumergida en el caso de hormigones muy porosos con bajo contenido de cemento (corrosión por macropilas).

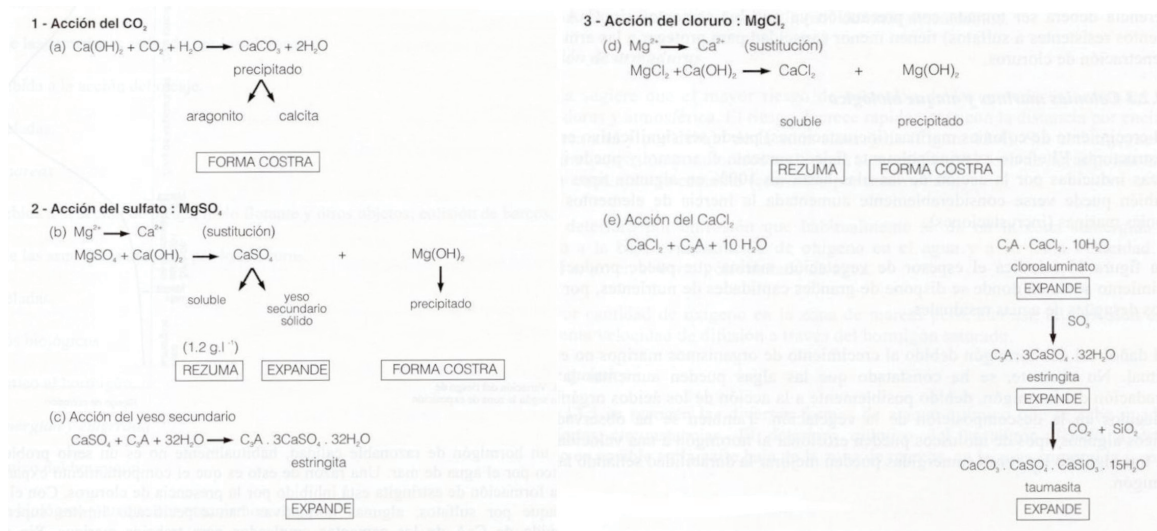
El riesgo de deterioro por corrosión que habitualmente se da en la zona sumergida es pequeño, debido a la baja concentración de oxígeno en el agua y a su lenta velocidad de difusión hasta el acero en el hormigón saturado de agua.

Hay una mayor cantidad de oxígeno en la zona de mareas pero, aún así, la corrosión está limitada por la lenta velocidad de difusión a través del hormigón saturado.

6.4.2 Ataque químico

En la Figura 5 se recogen las diversas formas de ataque químico que se sabe pueden ocurrir bajo ciertas circunstancias. El deterioro químico del hormigón debido a estos mecanismos solo es posible en la parte baja de la zona de mareas, en la zona sumergida y en la zona enterrada.

Figura 5. Procesos químicos involucrados en el deterioro del hormigón por agua de mar



En un hormigón de razonable calidad, habitualmente no es un serio problema el ataque químico por el agua de mar. Una razón de esto es que el comportamiento expansivo asociado con la formación de estrigita está inhibido por la presencia de cloruros. Con el fin de reducir el ataque por sulfatos, algunas normativas han especificado límites superiores para el contenido de C_3A de los cementos empleados para trabajos marinos. Sin embargo, esta sugerencia deberá ser tomada con precaución ya que los cementos sin C_3A (por ejemplo, cementos resistentes a sulfatos) tienen menor capacidad para proteger a las armaduras frente a la penetración de cloruros.

6.4.3 Colonias marinas y ataque biológico

El crecimiento de colonias marinas (incrustaciones) puede ser significativo en algunos tipos de estructuras. El efecto es principalmente físico: aumenta el arrastre y puede incrementar las fuerzas inducidas por la acción de las olas hasta un 100% en algunos tipos de estructuras. También puede verse considerablemente aumentada la inercia de elementos cubiertos con colonias marinas (incrustaciones).

La Figura 6 indica el espesor de vegetación marina que puede producirse. El mayor crecimiento se da en donde se dispone

de grandes cantidades de nutrientes, por ejemplo cerca de los desagües de aguas residuales.

El daño real del hormigón debido al crecimiento de organismos marinos no es un problema habitual. No obstante, se ha constatado que las algas pueden aumentar la velocidad de degradación del hormigón, debido posiblemente a la acción de los ácidos orgánicos y sulfatos producidos en la descomposición de la vegetación. También se ha observado que en los trópicos algunos tipos de moluscos pueden erosionar al hormigón a una velocidad de 1 cm por año. Las algas en las zonas sumergidas pueden mejorar la durabilidad sellando la superficie del hormigón.

6.4.4 Otras formas de degradación

El daño debido a heladas, abrasión, etc., no requiere nuevas consideraciones a las ya realizadas en páginas anteriores. Claramente, el riesgo de tal daño dependerá de la naturaleza y localización concreta de la estructura considerada.

7. Selección de materias primas y dosificación del hormigón

7.1 Selección de materias primas

Cemento

Los cementos más adecuados para la utilización en ambiente marino son los cementos con escoria de Alto Horno y de cenizas volantes y los cementos Portland con contenidos de aluminato tricálcico C_3A bajos o moderados.

La Instrucción para la Recepción de Cemento RC-08 exige las siguientes características para que un cemento sea resistente al agua de mar:

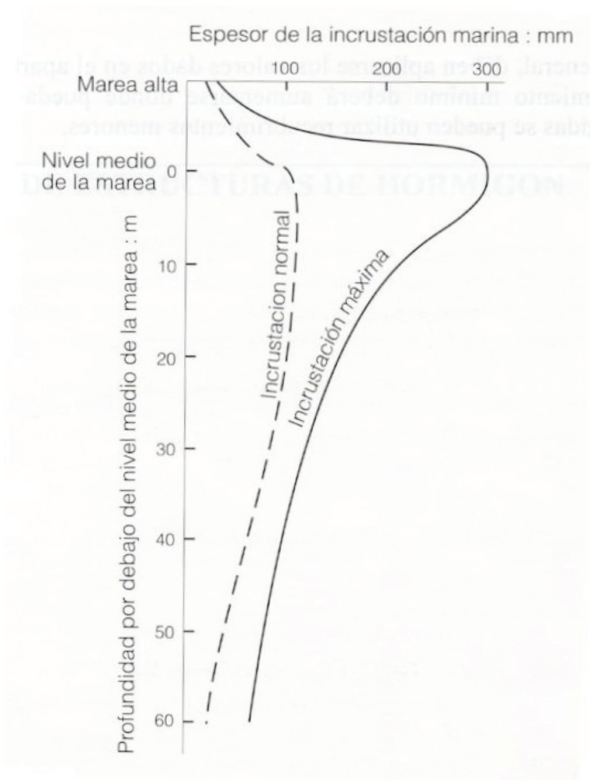
En la normativa española, todo cemento resistente a los sulfatos SR es resistente al agua de mar, pero no todo cemento resistente al agua de mar MR es resistente a los sulfatos.

Áridos y aditivos

Los áridos deberán cumplir las prescripciones que exige la Instrucción EHE-08 o la normativa UNE-CEN sobre áridos para la fabricación de hormigones.

Los aditivos reductores de agua deberán cumplir la normativa UNE-CEN sobre aditivos para la fabricación de hormigones.

Figura 6. Espesor de la incrustación marina en función de la profundidad



Tipos	Denominaciones		Designaciones	Especificaciones del clinker de los cementos resistentes a agua de mar (MR)	
				C ₃ A %	C ₃ A % + C ₄ AF %
I	Cementos portland resistentes a agua de mar		I	≤ 5,0	≤ 22,0
II	Cementos portland con adiciones, resistentes a agua de mar	Con escoria de horno alto (S)	II/A-S	≤ 8,0	≤ 25,0
II			II/B-S		
II		Con humo de sílice (D)	II/A-D		
II		Con puzolana natural (P)	II/A-P		
II			II/B-P		
II		Con ceniza volante (V)	II/A-V		
II			II/B-V		
III	Cementos con adiciones, resistentes a agua de mar	Con escoria de horno alto (S)	III/A	≤ 10,0	≤ 25,0
III			III/B	Ninguna	
III			III/C	Ninguna	
IV		Cementos puzolánicos (D+P+V)	IV/A	≤ 8,0	≤ 25,0
IV			IV/B	≤ 8,0	≤ 25,0
V		Cementos compuestos (S+P+V)	V/A		

Las prescripciones sobre C₃A y (C₃A+C₄AF) se refieren a porcentajes en masa de clinker. Los contenidos de C₃A y C₄AF se determinarán por cálculo según la norma UNE 80304 a partir de los ensayos realizados sobre el clinker según la norma UNE-EN 196-2.

7.2 Dosificación del hormigón

La dosificación del hormigón podría seguir las siguientes etapas:

- 1.- Selección de la relación agua/cemento.
- 2.- Selección de la cantidad de cemento.
- 3.- Selección del tipo de cemento.
- 4.- Tamaño máximo de árido a emplear.
- 5.- Selección de la consistencia del hormigón en obra.
- 6.- Selección de aditivos a emplear:
 - Reductores de agua de alta actividad.
 - Aireantes.
 - Etc.

En función de las zonas de exposición marina, la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08 prescribe, en las clases generales de exposición, la clase "Marina" y las subclases "Aérea" denominada IIIa, "Sumergida" denominada IIIb y en "Zona de carrera de mareas y/o zona de salpicaduras" denominada IIIc. Los elementos estructurales de todo tipo en contacto con el agua de mar se encuadran en las clases específicas de exposición: la clase "Química agresiva" y subclase "media". Se designa como Qb.

Utilizando la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 se realizan las siguientes recomendaciones:

- Hormigón en masa en ambiente marino pero sin contacto con agua de mar:
 - Relación agua/cemento ≤ 0,65.

- Mínimo contenido de cemento ≥ 200 kg/m³.

- Hormigón en masa en contacto con agua de mar incluso solo por salpicaduras:
 - Relación agua/cemento ≤ 0,50.
 - Mínimo contenido de cemento ≥ 300 kg/m³.
- Hormigón armado en ambiente marino sin contacto con agua de mar:
 - Relación agua/cemento ≤ 0,50.
 - Mínimo contenido de cemento ≥ 300 kg/m³.
- Hormigón armado en ambiente marino con contacto con agua de mar:
 - Relación agua/cemento ≤ 0,50.
 - Mínimo contenido de cemento ≥ 350 kg/m³.
- Hormigón pretensado en ambiente marino pero sin contacto con agua de mar:
 - Relación agua/cemento ≤ 0,45.
 - Mínimo contenido de cemento ≥ 300 kg/m³.
- Hormigón pretensado en ambiente marino pero con contacto con agua de mar:
 - Relación agua/cemento ≤ 0,45.
 - Mínimo contenido de cemento ≥ 350 kg/m³.

A continuación también se indican las recomendaciones del American Concrete Institute ACI sobre construcción de Plataformas Offshore:

Zona	Máxima relación A/C	Mínimo contenido de cemento (kg/m³)
Sumergida	0,45	356
Salpicaduras	0,40	356
Atmosférica	0,40	356

En zonas donde se pueda esperar una degradación superficial del hormigón, se recomienda una resistencia mínima a compresión $f_{ck} \geq 42 \text{ N/mm}^2$.

Se recomienda que para ambientes marinos muy agresivos se debe estudiar la dosificación del hormigón de forma muy detallada en la fase de Proyecto, ya que de forma orientativa, puede exigir relaciones agua/cemento $\leq 0,35$, cantidades de cemento $\geq 400 \text{ kg/m}^3$, reductores de agua de alta actividad especiales, una fabricación y puesta en obra muy cuidada, etc.

7.3 Recubrimientos

Para estructuras de hormigón armado y pretensado se seguirán los criterios de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

Para aumentar la seguridad que la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 ofrece, se recomienda que en las zonas sumergidas y las zonas de carrera de mareas y/o zonas de salpicaduras no se baje de 40 mm de recubrimiento en aquellos casos que la EHE-08 lo permita. Tener unos cuantos mm más de recubrimiento implica un coste muy pequeño y aumenta de manera importante la protección frente al ataque por cloruros.

8. Fabricación, transporte y puesta en obra del hormigón

Después de realizar una buena dosificación del hormigón para el ambiente marino al que va a estar sometida la estructura, es necesario realizar una buena Fabricación y Ejecución del hormigón proyectado. Se debe tener muy en cuenta que las primeras 24 horas desde que se fabrica el hormigón son muy importantes para el comportamiento futuro del hormigón en la estructura.

8.1 Fabricación y transporte

Los áridos se acopiarán sobre una base que garantice la no contaminación con materiales no aptos para la fabricación de hormigón. El sistema de acopios evitará la mezcla de diferentes fracciones de áridos mediante un espaciado suficiente entre las distintas fracciones o la construcción de unos muros que actúen como separadores.



La Planta de Hormigón deberá contar con silos perfectamente estancos para el almacenamiento del cemento y los aditivos. También deberá contar con silos y/o tolvas para almacenar las diferentes fracciones granulométricas de los áridos.

La planta de fabricación del hormigón deberá poder pesar todos los componentes de la dosificación del hormigón con unas tolerancias máximas similares a las exigidas por la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08. La Planta de Hormigón deberá contar con un sistema de seguridad que permita la parada automática de todo el proceso de fabricación si la dosificación que va a entrar o ha entrado en la amasadora no se ajusta a lo especificado. Las tolerancias recomendadas en el peso de los componentes del hormigón, según el estado actual de la tecnología de fabricación de las Plantas de Hormigón son:

- Cemento $\pm 2\%$
- Agua $\pm 2\%$
- Áridos $\pm 2\%$ para cada fracción
- Aditivos $\pm 3\%$

La utilización de una amasadora fija dentro de la Planta de Hormigón se considera imprescindible para conseguir un mínimo grado de homogeneidad del hormigón fabricado que deberá cumplir las exigencias de homogeneidad que se piden en el artículo 71.2.4 de la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08 y que a continuación se exponen:

ENSAYOS		Diferencia máxima tolerada entre los resultados de los ensayos de dos muestras tomadas de la descarga del hormigón (1/4 y 3/4 de la descarga)
Grupo A	1. Consistencia (UNE-EN 12350-2) Si el asiento medio es igual o inferior a 9 cm Si el asiento medio es superior a 9 cm	3 cm 4 cm
	2. Resistencia (*) En porcentajes respecto a la media	7,5%
Grupo B	3. Densidad del hormigón (UNE-EN 12350-6) En kg/m ³	16 kg/m ³
	4. Contenido de aire (UNE-EN 12350-7) En porcentaje respecto al volumen del hormigón	1 %
	5. Contenido de árido grueso (UNE 7295) En porcentaje respecto al peso de la muestra tomada	6%
	6. Módulo granulométrico del árido (UNE 7295)	0,5

(*) Por cada muestra se fabricarán y ensayarán a compresión, a la edad de 7 días, dos probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Estas probetas serán confeccionadas, conservadas y ensayadas según los procedimientos contemplados en el apartado 86.3. Se determinará la medida de cada una de las dos muestras como porcentaje de la media total.

Se recomienda que el tiempo de amasado del hormigón con todas las materias primas dentro de la amasadora sea como mínimo de 45 segundos.

Sin una buena fabricación del hormigón es imposible construir una estructura marina con una buena durabilidad, por tanto, es absolutamente imprescindible tener una buena Planta de Fabricación de hormigón.

El transporte del hormigón de la Planta a la Obra puede realizarse de forma continua o discontinua, dependiendo de la distancia entre la Planta y la Obra y también, dependiendo de las características de la obra.

El transporte continuo es el que se realiza por bombeo, tanto con bombas fijas como con bombas móviles. El hormigón, para poder ser bombeado, exige una serie de características adicionales en su dosificación, como es un mayor porcentaje de arena, un tamaño máximo de árido no superior a 40 mm y una consistencia superior a los 70 mm.

El transporte discontinuo de hormigón se puede hacer con camiones hormigoneras, dumpers, cinta transportadora, rampas, grúas, etc.

8.2 Puesta en obra del hormigón

En la puesta en obra del hormigón se deben conseguir los siguientes objetivos.



- Prevenir la segregación.
- Evitar las juntas frías horizontales y verticales.
- Realizar un buen vibrado.
- Realizar un buen curado que:
 - Evite la fisuración.
 - Evite la retracción.

El objetivo final de una buena dosificación, fabricación y puesta en obra del hormigón es conseguir una estructura impermeable.

8.2.1 Precauciones a tomar en la puesta en obra del hormigón

Para hormigones convencionales se debe evitar la caída libre del hormigón desde una altura superior a 2 metros. Se puede

llegar a permitir caídas libres de hasta 5 metros si se estudia una adecuada dosificación del hormigón que sea capaz de soportar estas alturas de vertido.

La colocación del hormigón se hace de una sola vez cuando los espesores de la pieza a hormigonar son reducidos o en varias capas o tongadas cuando el espesor es grande como ocurre en el caso del hormigonado de una cimentación, bloques o simplemente de un pilar.

Cuando el hormigón se coloca por tongadas éstas pueden tener una altura de 30 a 40 cm dependiendo de si el sistema de densificación que se emplee es capaz de compactar dichos espesores.

8.2.2 Vibrado del hormigón

El vibrado es el sistema más eficaz para conseguir densificar hormigones.

Mediante el vibrado se vencen las fuerzas cohesivas del hormigón transformándose este material en un fluido que se adapta perfectamente a las formas de los moldes; estas fuerzas cohesivas son tanto más elevadas cuanto más secos son los hormigones. El vibrado no sólo genera un reordenamiento general de los componentes del hormigón, sino que además reparte más uniformemente el agua humedeciendo mejor a los granos de cemento y favoreciendo su hidratación.

Mediante la vibración se obtienen hormigones más densos, resistentes e impermeables, con menor retracción, mayor protección de las armaduras y mayor adherencia a ellas. Sin su empleo no se pueden conseguir hormigones impermeables. Incluso los hormigones con consistencia líquida 160-250 mm, deben ser vibrados. Exclusivamente los hormigones autocompactables no se deben vibrar.

8.2.3 Hormigonado bajo el agua

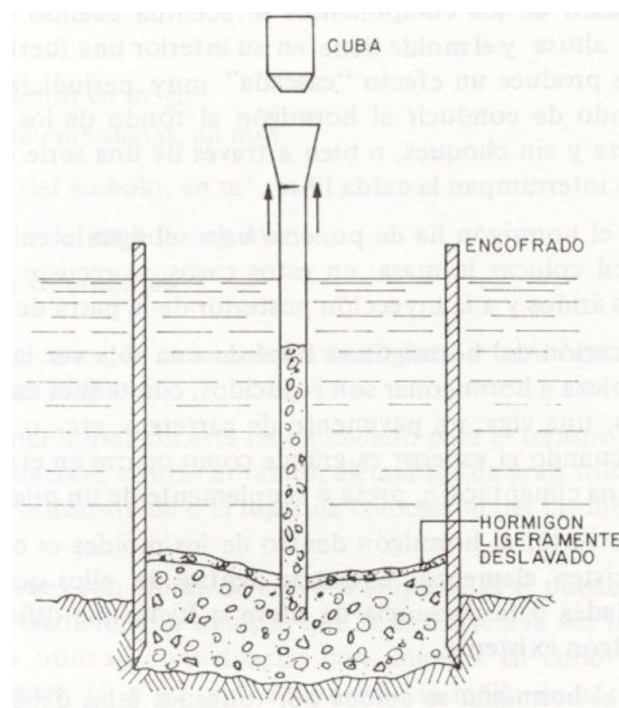
El hormigonado bajo el agua no presenta más problema que el de deslavado de la pasta de cemento o de mortero que puede ocasionar el agua en movimiento, si este problema no existe, se conseguirán buenos hormigones toda vez que el medio es muy adecuado para una hidratación y curado perfectos y además la propia presión del líquido ayuda a su compactación.

Para evitar el deslavado del hormigón por la acción del agua se utilizan diferentes sistemas que, en definitiva buscan el transporte directo del hormigón al fondo del encofrado a través de conductos, a fin de impedir que éste tenga contacto con la corriente de agua. El transporte puede realizarse en tubos que se elevan a medida que sube el nivel del hormigón pero, permaneciendo siempre introducidos en la masa del

mismo, al objeto de que no se produzca una caída libre que favorezca el deslavado (Figura 7). Esto no impide que la parte superior y superficial del hormigón no sufra algo este efecto transformándose, por tanto, en una capa débil que habrá que eliminar posteriormente si fuese preciso.

La masa del hormigón suele estar delimitada por un encofrado situado bajo el agua o por un tablestacado.

Figura 7. Hormigonado bajo el agua



Actualmente existen en el mercado aditivos que incrementan de una forma elevada la cohesión del hormigón impidiendo el lavado que pueda producir el agua.

8.2.4 Curado del hormigón

El curado clásico del hormigón es aquel en el que se hace que el hormigón experimente una evolución normal en la ganancia de sus resistencias, para lo cual, únicamente se protege al mismo a fin de que no le afecten las bajas temperaturas, especialmente a las cortas edades, o para que el efecto de las altas temperaturas, junto con el viento y la sequedad puedan provocar su desecación dando lugar a mermas en sus resistencias y a peligros en su integridad.

8.2.4.1 Curado con agua

Con el curado con agua se trata de compensar la pérdida de agua por evaporación mediante la aportación de agua externa

o bien en impedir dicha evaporación mediante la creación de barreras impermeables.

Los métodos de curado con agua varían mucho dependiendo de las condiciones del ambiente así como del tamaño y forma del elemento e incluso de su posición.

Si en los elementos predomina la superficie sobre el volumen, el mejor sistema de curado consiste en mantener las superficies de los mismos húmedas mediante riego continuo o inundación.

El curado con agua se debe realizar inmediatamente después de finalizar el vibrado. Cualquier retraso en la aplicación del agua puede generar fisuración en el hormigón.

En el curado con agua, el suministro de ésta debe ser continuo debido a que si se realiza de forma intermitente, el curado suele ser poco eficaz.

8.2.4.2 Curado con productos filmógenos

Cuando las disponibilidades de agua son escasas y los elementos tienen gran superficie y espesor reducido, como puede ocurrir en los pavimentos de hormigón, el peligro de evaporaciones rápidas y consiguiente fisuración es muy alto; en estas situaciones se recurre al empleo de productos filmógenos de curado que son emulsiones resinosas que se rompen instantáneamente cuando se aplican sobre el hormigón fresco debido a la presencia de la cal. Los productos de curado se aplican mediante pulverización y forman una película fina y continua, adherida al hormigón, de color claro y gran poder reflectante que impide que escape el agua del mismo, a la vez que frena el aumento de la temperatura del mismo por absorción de calor. Estos productos deben extenderse sobre la estructura inmediatamente después de colocado el hormigón y antes de que haya desaparecido la

posible exudación; cualquier retraso en su aplicación hará que el hormigón se fisure y el producto pierda su eficacia.

El curado con productos filmógenos exige que se cumplan los siguientes requisitos:

- Producto de gran calidad/calidad contrastada.
- Aplicarlo en la cantidad que indica el fabricante.
- Aplicarlo inmediatamente después de finalizar el vibrado. Los operarios que vibran y que extienden el producto filmógeno deben estar muy cerca unos de otros, casi tienen que molestarse.

9. Bibliografía

- Ministerio de Fomento y otros. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.
- Durabilidad de Estructuras de Hormigón. Guía de Diseño CEB.
- American Concrete Institute. Guide Durable Concrete. ACI 201.2R-01.
- American Concrete Institute. Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures. ACI 357R-84.
- 7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Montreal. 2006.
- Malhotra, V.M. and Bremner, T.W. Performance of Concrete at Treat Island, USA.
- Metha, P.K. Concrete in the marine environment.





INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO
Y SUS APLICACIONES

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

C/ José Abascal, 53 - 1º

28003 Madrid

T.: +34 91 442 93 11

tecnologia@ieca.es

www.ieca.es