

Difusión de cloruros en el hormigón armado: estimación del riesgo de corrosión de las armaduras

Apellidos, nombre	Lliso Ferrando, Josep Ramon ¹ (jollife2@arq.upv.es) Valcuende Payá, Manuel ¹ (mvalcuen@csa.upv.es)
Departamento	¹ Departamento de Construcciones Arquitectónicas
Centro	Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València

1 Resumen de las ideas clave

En este objeto de aprendizaje se aborda la **problemática de la difusión de cloruros en el hormigón y sus consecuencias**, siendo la principal de ellas la corrosión de las armaduras embebidas. Este fenómeno constituye una de las causas más frecuentes de deterioro y pérdida acelerada de durabilidad en las construcciones de hormigón armado, por lo que resulta fundamental profundizar en su comprensión.

Se trata, además, de un proceso especialmente crítico en entornos costeros, como la ciudad de Valencia, donde la proximidad al mar favorece la penetración de cloruros y, en consecuencia, la aparición prematura de daños por corrosión.

Junto con una breve introducción teórica, en este artículo se presenta el procedimiento para estimar el contenido de cloruros a distintas profundidades utilizando fórmulas experimentales recogidas en el Anejo 12 del Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021), complementadas con datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Esta lección se completa con dos aplicaciones prácticas desarrolladas a partir de casos reales, con el objetivo de reforzar y contextualizar los conceptos teóricos expuestos.

2 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento, será posible **estimar el contenido de cloruros a distintas profundidades de manera teórica, y a partir de la geometría de la pieza (recubrimiento de las armaduras) determinar el riesgo de corrosión de las armaduras embebidas**.

3 Introducción

El hormigón armado es el material de construcción más utilizado del mundo, entre otras razones, por sus buenas propiedades mecánicas, su adaptabilidad y posibilidades que ofrece, y por su durabilidad. Sin embargo, esta última propiedad puede verse seriamente comprometida por la presencia de agentes agresivos en el entorno donde se sitúa, entre los cuales se encuentran los cloruros. La presencia de este ion y su difusión hacia el interior del hormigón puede provocar la corrosión de las armaduras, produciendo una merma importante de la durabilidad, y afectando gravemente a la seguridad estructural de las construcciones de hormigón armado.

Tras el proceso de amasado de los componentes que conforman el hormigón se produce la hidratación del cemento. Esta reacción química genera la liberación de una importante cantidad de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, lo que confiere a la disolución de poro existente en la matriz cementante un elevado pH (valores por encima de 12,5) (Fernández Canovas, 2003; García Meseguer, et al., 2009).

De acuerdo con los estudios propuestos por Pourbaix (1974), y teniendo en cuenta estas condiciones y los potenciales de corrosión que habitualmente exhiben las armaduras embebidas en hormigón, el metal se sitúa en un estado de pasivación. Esto se corresponde a que, durante las primeras horas tras el hormigonado, y mientras la mezcla todavía se

encuentra en estado fresco, la presencia de oxígeno en la disolución genera la reacción del hierro y la formación de una capa de óxidos insolubles sobre la superficie de las armaduras, denominada capa pasiva.

En este caso, la capa pasiva actúa como **barrera electroquímica**, mientras que el recubrimiento de hormigón de las armaduras funciona como una **barrera física** que permite mantener la estabilidad de la capa pasiva. Sin embargo, la permeabilidad del hormigón no impide la penetración de agentes agresivos que pueden generar la alteración de la barrera electroquímica y propiciar la aparición de procesos de corrosión en las armaduras (Bertolini et al., 2013).

Uno de los agentes agresivos precursor de la destrucción puntual de la capa pasiva son los cloruros. Este ion puede difundir a través de la matriz porosa del hormigón hasta alcanzar las armaduras. Su presencia en el hormigón es frecuente en ambientes marinos, como las zonas costeras, pero también en entornos donde se utilizan sales de deshielo. También es posible que los cloruros se encuentren dentro del hormigón al ser introducidos durante el amasado, al utilizar productos contaminados (Fernández Canovas, 2003; García Meseguer, et al., 2009). Este ion puede alcanzar las armaduras, pero no homogéneamente, sino concentrándose en zonas concretas, destruyendo de manera localizada la capa pasiva y dando lugar a la denominada **“corrosión por picaduras”**.

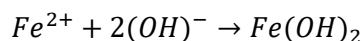
Al concentrarse el daño en zonas muy concretas, la velocidad de corrosión es muy elevada y el deterioro de la armadura es mucho más acelerado que en casos en los que se produce una corrosión generalizada, como podría ser a causa de la carbonatación del hormigón.

En la práctica, es fundamental conocer el riesgo de corrosión de las armaduras a causa de la presencia y difusión de cloruros en cualquier instante, ya que esto puede permitir conocer el estado interno de las armaduras y su estado en lo que a corrosión se refiere. Cabe recordar que la corrosión de las armaduras es un daño que se genera internamente y solo se hace visible en el exterior de las piezas una vez se encuentra muy avanzado, por lo que trabajar con modelos precisos puede permitir adelantarse a graves problemas estructurales y de durabilidad futuros.

4 Desarrollo

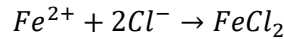
A diferencia de la corrosión originada por la carbonatación del hormigón, que se produce de manera uniforme, la despasivación a causa de los cloruros se produce de forma puntual, comúnmente denominada, corrosión por picaduras. Cuando en un punto de la superficie de las armaduras se supera un contenido crítico de cloruros (C_{th}), la capa pasiva se desestabiliza puntualmente, lo que genera pequeños ánodos donde se produce la corrosión, apoyados por una gran superficie catódica que se mantiene en estado pasivo (resto de la armadura que todavía mantiene su estado pasivo).

El proceso que desemboca en la corrosión por picaduras se divide en distintas fases. En primer lugar, se debe recordar la reacción básica que origina la capa de óxidos sobre la superficie de las armaduras (capa pasiva) (Ecuación 1):



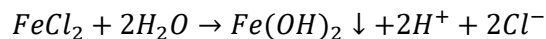
Ecuación 1. Generación de la capa pasiva sobre las armaduras.

Sin embargo, la llegada de cloruros a la profundidad de las armaduras origina que los hidroxilos se desplacen y promueve que se generen complejos solubles de cloruro de hierro (Ecuación 2):



Ecuación 2. Desestabilización de la capa pasiva por la llegada de cloruros.

Estos complejos solubles que se originan difunden hacia zonas con un pH más elevado, donde precipitan formando hidróxido de hierro ($Fe(OH)_2$) debido a su baja solubilidad:



Ecuación 3. Formación del hidróxido de hierro.

Esta última reacción libera de nuevo cloruros que quedan disponibles para seguir generando daño en el entorno de la picadura y reiniciando el proceso, lo que genera que se trate de una reacción catalizadora, es decir, precursora para favorecer que se produzca de nuevo (Imagen 1) (Lliso Ferrando, 2022).

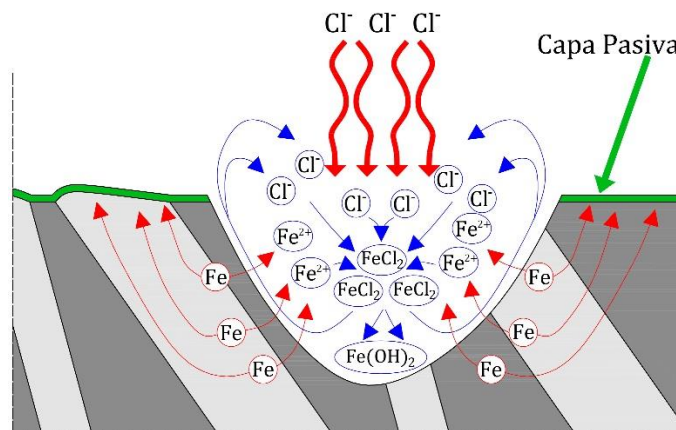


Imagen 1. Evolución del daño en una picadura (Adaptación Lliso-Ferrando, 2022).

Además, se debe tener en cuenta que en el interior de la picadura se genera una acumulación de óxido de hierro que favorece la atracción de cloruros hacia esa zona, lo que ayuda a que la corrosión se desarrolle con mayor intensidad con el paso del tiempo, dañando de manera irreparable la capacidad mecánica de la armadura.

Ahora bien, **¿cómo es posible determinar el riesgo de corrosión de las armaduras a causa de la presencia de los cloruros?** La manera más sencilla de proceder en estos casos es realizar catas o en el peor de los casos, descubrir las armaduras y realizar una inspección visual directa. Sin embargo, estos procedimientos implican graves inconvenientes, como la necesidad de desplazamiento de personal cualificado, paralización de uso de una construcción o el daño estético asociado a este tipo de trabajos. Por otro lado, emplear reveladores como el nitrato de plata puede servir para identificar la presencia o no de cloruros, sin embargo, este procedimiento no indica el porcentaje en el que están presentes. En este caso, lo más interesante sería determinar el contenido concreto de cloruros a la profundidad donde se encuentran las armaduras, ya que esto permitiría saber realmente el riesgo de corrosión de estas. El mayor problema de esta técnica es que estos ensayos requieren de análisis de valoración colorimétrica que solo se pueden hacer en laboratorios especializados.

Por tanto, ¿existe alguna alternativa a todas estas tareas que permita realizar cálculos más simplificados y rápidos? La normativa actual, el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021), en su Anejo 12 propone un modelo de difusión que puede ser empleado a falta de datos experimentales. Este modelo es solo útil para ambientes de exposición XS o XD, pero permite estimar el contenido de cloruros a una determinada profundidad y en un determinado instante de tiempo mediante la siguiente expresión (Ecuación 4):

$$C_{th} = C_b + (C_s - C_b) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C(t)} \cdot t}} \right) \right]$$

Ecuación 4. Estimación del contenido crítico de cloruros en el hormigón en función de la profundidad y el tiempo de exposición (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

A continuación, se detalla el valor de cada uno de estos parámetros.

4.1 Contenido límite del ion cloruro (C_{th})

Este parámetro hace referencia al contenido límite de iones cloruro en el hormigón que provoca el inicio de la corrosión de las armaduras, expresado en porcentaje del peso de cemento y definido a una profundidad x , expresada en mm, y a una edad t , expresada en años.

El Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021), en su Anejo 12, Artículo 3.2.1 indica, de manera orientativa, el valor del contenido límite de ion cloruro (C_{th}) que el proyectista podrá considerar en función de la clase de exposición y referido al contenido de cemento empleado en la dosificación (Tabla 1).

Clase de exposición	C_{th} (% sobre peso de cemento)
XS1	0,60
XS2	0,80
XS3	0,60
XD1	0,60
XD2	0,60
XD3	0,40

Tabla 1. Contenido límite del ion cloruro C_{th} (Tabla A12.3.2.1.a, Anejo 12, Código Estructural, 2021).

Los datos referenciados en la Tabla 1 se refieren a armaduras pasivas. En el caso de armaduras activas, el valor límite del contenido de cloruros a la altura de la armadura de pretensado será $C_{th} = 0,30$ en el caso general y 0,20 en el caso de la clase XD3, expresado en porcentaje del peso de cemento.

4.2 Contenido de cloruros introducidos durante el amasado (C_b)

El coeficiente C_b hace referencia al contenido de cloruros aportados por los materiales utilizados en la fabricación del hormigón, expresados en porcentaje respecto al peso de cemento, de acuerdo con:

$$C_b = \sum_{i=1}^n C_{b,i}$$

siendo $C_{b,i}$ los contenidos de iones cloruros de cada uno de los materiales componentes (cemento, áridos, adiciones, aditivos, etc.). No es habitual que se introduzcan cloruros durante el amasado de manera voluntaria, salvo al utilizar productos contaminados. Sin embargo, se debe prestar especial atención a la utilización de superplastificantes, ya que estos incluyen un porcentaje muy reducido, pero no despreciable de cloruros. Por otro lado, se debe recordar que el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021), en su Artículo 29 señala que es posible emplear agua de mar o aguas salinas análogas para el amasado o curado del hormigón, siempre y cuando no incorporen armaduras, y teniendo en cuenta que se debe considerar una pérdida de la resistencia a compresión del hormigón del 15%.

4.3 Contenido de cloruros en superficie (C_s)

El coeficiente C_s hace referencia al contenido de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en porcentaje del peso de cemento. Este parámetro puede obtenerse mediante ensayo in situ, pero a falta de información específica adicional, el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021) recoge de manera orientativa unos valores que pueden ser considerados como aproximados (Tabla 2).

Clase de exposición	Distancia L respecto a la costa (m)	C_s (% sobre peso de cemento)
XS1	Zona de salpicaduras	0,25
	Resto hasta L<5000	0,15
XS2	n/a	0,40
XS3	n/a	0,50
XD1, XD2, XD3	n/a	0,40

Tabla 2. Estimación del contenido de cloruros en superficie del hormigón, C_s (Tabla A12.3.2.a, Anejo 12, Código Estructural, 2021).

4.4 Coeficiente de difusión aparente ($D_{app,C(t)}$)

El coeficiente $D_{app,C(t)}$ hace referencia al coeficiente de difusión de cloruros aparente, expresado en $\text{mm}^2/\text{año}$, a la edad t , expresada en años, obtenido experimentalmente a partir de ensayos sobre testigos extraídos del elemento estructural, siendo la norma UNE-EN 12390-11:2019 la normativa española de referencia (AENOR 2019). Existen otras normativas complementarias que permiten obtener este valor de manera acelerada, pero

sus resultados no pueden ser comparados con procesos de difusión natural (NT Build 492, 1999).

Con todo ello, es posible estimar, de manera aproximada, el contenido de cloruros a una determinada profundidad en un instante cualquiera de la vida útil de la estructura con el objetivo de conocer si las armaduras se encuentran todavía en estado pasivo o si es probable que se haya iniciado la corrosión por picaduras. ¿Crees que serías capaz de llevar a cabo este tipo de estudios? Veámoslo.

5 Aplicación práctica

A continuación, se verá la aplicación práctica de los dos procedimientos de evaluación del contenido de cloruros en el hormigón en las construcciones de hormigón armado sobre un caso real.

5.1 Supuesto práctico

Se está realizando una inspección sobre una estructura portuaria situada en zona de carrera de mareas que cuenta con un periodo de servicio de 20 años (Imagen 2). Se pide determinar el riesgo de que exista corrosión en las armaduras embebidas (recubrimiento nominal de 60 mm). Solo se ha realizado un estudio para conocer el coeficiente de difusión aparente, obteniéndose un valor de $34,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. A falta de otros datos experimentales, se conoce que la estructura fue ejecutada con un hormigón fabricado con un CEM I. Adicionalmente, se sabe que el contenido de cloruros aportados por los materiales utilizados en la fabricación del hormigón fue de 0,08% respecto al peso de cemento.



Imagen 2. Fotografía de la obra analizada (Elaboración propia, 2025).

Solución

En el caso de elementos ubicados en clases de exposición XS, como el que abarca este ejercicio y que correspondería a un ambiente de exposición XS3, a los efectos de la determinación del avance de los iones cloruro en el interior del hormigón en función del

tiempo, el Código Estructural (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021) presenta la siguiente ecuación, descrita anteriormente (Ecuación 5):

$$C_{th} = C_b + (C_s - C_b) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C(t)} \cdot t}} \right) \right]$$

Ecuación 5. Estimación del contenido crítico de cloruros en el hormigón en función de la profundidad y el tiempo de exposición (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

donde:

- C_{th} hace referencia al contenido límite de iones cloruro en el hormigón que provoca el inicio de la corrosión en la armadura, expresado en porcentaje del peso de cemento y definido a una profundidad x , expresada en mm, y a una edad t , expresada en años;
- C_b corresponde al contenido de cloruros expresado en porcentaje del peso de cemento aportado por los materiales utilizados en la fabricación del hormigón y que, de acuerdo con los datos del enunciado, equivale a 0,08%;
- C_s indica el contenido de cloruros en la superficie del hormigón, expresado en porcentaje del peso de cemento, y cuyo valor, a falta de información específica adicional, puede considerarse igual a 0,50% de acuerdo con las tablas de valores orientativos recogidos en el Anejo 12 del Código Estructural.

Teniendo en cuenta que el $D_{app,C(t)}$ equivale a $34,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ y que este corresponde a $1.097,45 \text{ mm}^2/\text{año}$ haciendo el cambio de unidades, y que la edad a la que se realiza el estudio es a los 20 años, equivalente al periodo de tiempo que la estructura lleva en servicio, es posible estimar el contenido de cloruros a una profundidad de 60 mm, que coincide con el recubrimiento de las armaduras. Por tanto (Ecuación 6):

$$C_{th,60mm,20años} = 0,03 + (0,50 - 0,03) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{60}{2 \cdot \sqrt{1.097,45 \cdot 20}} \right) \right]$$

Ecuación 6. Sustitución en la ecuación del contenido crítico de cloruros en el hormigón en función de la profundidad y el tiempo de exposición aplicado al supuesto práctico.

Operando (Ecuación 7):

$$C_{th,60mm,20años} = 0,03 + (0,50 - 0,03) \cdot [1 - 0,2254] \rightarrow C_{th,60mm,20años} = 0,39 \%$$

Ecuación 7. Estimación del contenido crítico de cloruros en el hormigón en función de la profundidad y el tiempo de exposición aplicado al supuesto práctico.

Este valor corresponde al porcentaje de cloruros a la profundidad (60 mm) y edad (20 años) considerados, respecto al peso de cemento. Este valor se sitúa por encima del contenido límite de ion cloruro establecido en el Código Estructural para considerar que se produce la despasivación de las armaduras activas (Tabla 1) para un ambiente XS3 (0,30%).

Ahora bien, con la finalidad de ampliar información respecto a esta estructura ¿podrías indicar a qué edad aproximadamente se produjo la despasivación?

Una de las ventajas de esta fórmula es que conocido el contenido crítico que puede producir la despasivación de las armaduras (0,30%) y el recubrimiento al que estas se encuentran (60 mm), es posible trabajar con el tiempo como única incógnita. Por tanto, sustituyendo en la ecuación recogida en el Anejo 12 del Código Estructural (Ecuación 8):

$$0,30 = 0,03 + (0,50 - 0,03) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{60}{2 \cdot \sqrt{1.097,45 \cdot t}} \right) \right]$$

Ecuación 8. Sustitución en la ecuación del contenido crítico de cloruros en el hormigón en función de la profundidad y el tiempo de exposición aplicado al supuesto práctico.

Operando:

$$t = 5,25 \text{ años}$$

Ecuación 9. Estimación del tiempo al que se produjo la despasivación de las armaduras, aplicado al supuesto práctico.

Aproximadamente a los cinco años de exposición se produjo la despasivación de las armaduras, un periodo de tiempo considerablemente breve. Este hecho podría indicar la presencia de algún problema en el hormigón, ya sea debido a una baja calidad del material —lo que implicaría un alto coeficiente de difusión—, o a una ejecución deficiente que haya generado una porosidad superior a la prevista en el proyecto. Asimismo, estos resultados podrían estar evidenciando un recubrimiento insuficiente en relación con las condiciones de exposición contempladas. Estos datos hacen referencia a un cálculo estimativo. En caso de necesitar una mayor precisión en las estimaciones realizadas, deberían llevarse a cabo ensayos *in situ*.

6 Cierre

La presencia de cloruros a la profundidad de las armaduras, en concentraciones superiores al contenido crítico definido en la bibliografía, provoca la despasivación localizada del acero y la aparición de procesos de corrosión puntual. Esta situación puede comprometer significativamente la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

En este objeto de aprendizaje se ha demostrado que, a partir de las fórmulas recogidas en el Anejo 12 del Código Estructural, es posible desarrollar modelos de predicción aproximados que permiten estimar la probabilidad de presencia de procesos de corrosión activa en las armaduras embebidas en el hormigón.

7 Bibliografía

7.1 Libros:

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., Polder, R. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis and Repair. Editorial VCH. 2013.

Fernández Cánovas, M. Hormigón. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Escuelas. 6ª edición. Madrid. 2003.

García Meseguer, A., Morán Cabré, F., Arroyo Portero, JC., Jiménez Montoya. Hormigón Armado. 15ª edición. Ed. Gustavo Gili. Barcelona. 2009.

Lliso Ferrando, J.R. Monitorización de la durabilidad de estructuras existentes de hormigón armado mediante la inserción de una red de sensores. Universitat Politècnica de València, 2022.

Pourbaix, M. Atlas of chemical and electrochemical equilibria in aqueous solutions. Materials Science Forum, Houston, Texas, USA: National Association of Corrosion Engineers. 1974.

7.2 Normativa:

AENOR, Asociación Española de Normalización. UNE-EN 12390-11:2019. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 11. Determinación de la resistencia a los cloruros del hormigón, difusión unidireccional. 2019.

NORDTEST METHOD, NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Oslo, Norway, 1999.

Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España. Código Estructural. 2021.