



Carbonatación en estructuras de hormigón armado.

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 documento se define qué es la carbonatación, se explica por qué se produce en el hormigón y se analiza su impacto sobre el estado de las armaduras embebidas y, por tanto, en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

La relevancia de este proceso radica en que actúa como desencadenante de la corrosión de las armaduras, un fenómeno electroquímico que representa una de las principales causas de deterioro y pérdida de durabilidad en las estructuras de hormigón armado. Por ello, el conocimiento y análisis de la carbonatación resultan fundamentales para evaluar el estado de las construcciones y garantizar su vida útil.

Además de una descripción teórica, este trabajo incluye el procedimiento para estimar la profundidad de penetración del frente de carbonatación, tanto a partir de ensayos *in situ* como mediante cálculos teóricos. Asimismo, se presentan criterios para realizar estimaciones de su evolución a distintas edades.

El estudio se completa con una parte práctica basada en varios casos reales de estructuras de hormigón armado, lo que permite ilustrar los conceptos expuestos y su aplicación técnica.

1.1 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento, será posible determinar la profundidad de carbonatación en construcciones de hormigón armado a distintas edades a partir de ensayos previos, y determinar el estado de las armaduras embebidas. Al mismo tiempo, se podrán realizar estimaciones de vida útil de las construcciones analizadas.

2 Introducción

Tras el proceso de amasado de los componentes que conforman el hormigón, tiene lugar la hidratación del cemento. Esta reacción química libera una cantidad significativa de hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$, lo que eleva notablemente el pH de la disolución de poro en la matriz cementante, alcanzando valores superiores a 12,5.

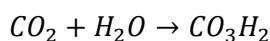
Según los diagramas de estabilidad propuestos por Pourbaix, y considerando tanto estas condiciones alcalinas como los potenciales electroquímicos típicos de las armaduras embebidas, el acero se encuentra en un estado de pasivación. Este fenómeno se genera durante las primeras horas tras el vertido del hormigón, mientras la mezcla aún permanece en estado fresco. La presencia de oxígeno en la disolución de poro favorece la reacción del hierro, que da lugar a la formación de una capa superficial de óxidos insolubles conocida como **capa pasiva**.

Dicha capa pasiva actúa como una **barrera electroquímica** que protege al acero frente a la corrosión. Por su parte, el **recubrimiento de hormigón** que rodea a las armaduras constituye una **barrera física**, cuya función es preservar la estabilidad de esta capa protectora. No obstante, debido a la inherente permeabilidad del hormigón, agentes agresivos del entorno pueden penetrar a través del material, alterar el equilibrio químico de la disolución de poro

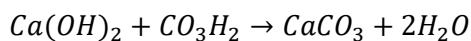
y comprometer la integridad de la capa pasiva, favoreciendo así el inicio de procesos de corrosión en las armaduras.

3 Desarrollo

Uno de los procesos que desencadenan la disolución de la capa pasiva y actúan como precursores de la corrosión de las armaduras es la **carbonatación del hormigón**. Este fenómeno se define como la penetración del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico a través de la red capilar del hormigón, proceso que solo tiene lugar en presencia de cierta humedad relativa. El CO_2 presente en el aire reacciona con el agua contenida en los poros del hormigón, dando lugar a la formación de ácido carbónico:



El ácido carbónico generado reacciona con los compuestos alcalinos de la pasta cementante, siendo el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ uno de los más relevantes. Esta reacción produce carbonato cálcico (CaCO_3), según la siguiente ecuación:



Desde el punto de vista físico, este proceso no produce un deterioro inmediato del hormigón. De hecho, el carbonato cálcico precipitado puede generar un refinamiento de la red de poro, disminuyendo la porosidad del material al obturar los capilares, lo cual podría interpretarse como un efecto beneficioso a nivel microestructural.

Sin embargo, desde el punto de vista químico, la carbonatación conlleva la consunción del hidróxido de calcio, lo que provoca una disminución progresiva del pH en la disolución de poro. Cuando el pH desciende por debajo de aproximadamente 9 (habitualmente en torno a 8,3), se rompe el equilibrio de pasivación del acero. Según el diagrama de Pourbaix, en estas condiciones ya no es estable la capa de óxidos protectora, lo que da lugar al inicio de los procesos de corrosión en las armaduras embebidas.

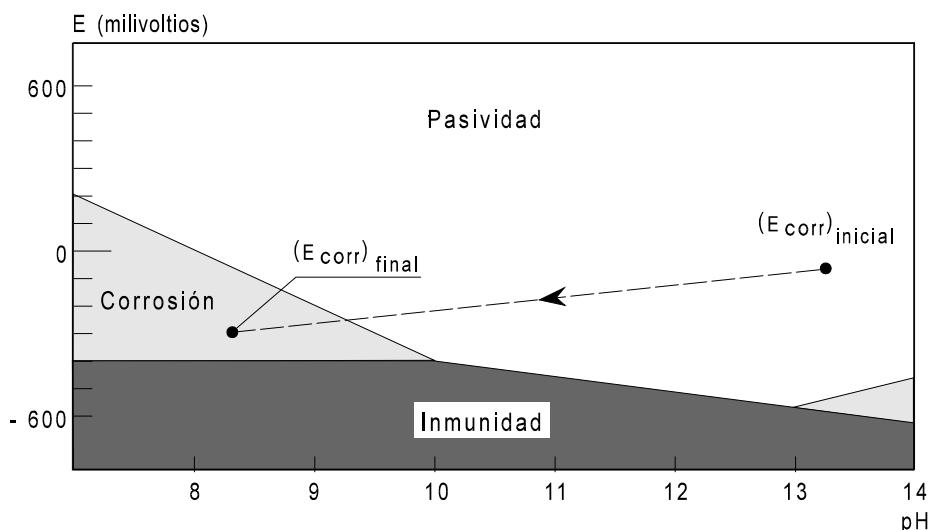


Imagen 1. Diagrama de Pourbaix para el hierro. Adaptación [Pourbaix].

La problemática asociada a la corrosión en las estructuras de hormigón armado hace necesario determinar, mediante inspección, la posición del **frente de carbonatación**. Es

dejar, conocer hasta qué profundidad ha penetrado el dióxido de carbono (CO_2) y si dicho frente ha alcanzado las armaduras, propiciando así el inicio de su corrosión.

Como se ha mencionado anteriormente, la carbonatación del hormigón conlleva un refinamiento de la red porosa, lo que provoca una disminución progresiva de la velocidad de avance del frente de carbonatación con el tiempo. Esta velocidad de penetración puede definirse según:

$$d = K_{ap,carb} \cdot \sqrt{t}$$

donde “ d ” corresponde a la profundidad de carbonatación (en mm) y “ t ” es el tiempo en años. El coeficiente de carbonatación aparente “ K ” sirve como referencia de la velocidad de penetración de la carbonatación para un hormigón y unas condiciones ambientales determinadas. Sus unidades son mm/año $^{1/2}$.

Desde un punto de vista práctico, la determinación de la profundidad de carbonatación en el hormigón se lleva a cabo aplicando un reactivo sobre la superficie interna del material: la **fenolftaleína**. Este indicador de pH permite identificar el estado químico del hormigón de forma visual. Si al aplicar la fenolftaleína, la superficie permanece incolora, se interpreta que el pH del medio es inferior a 9, lo cual indica que el hormigón está carbonatado. En cambio, en zonas donde el pH es más elevado (alcalino), el reactivo adquiere una tonalidad rosácea, señalando la presencia de condiciones que aún mantienen la pasividad del acero.

Ahora bien, surge una cuestión fundamental. ¿Es posible predecir, a partir de ensayos e inspecciones in situ, el riesgo de corrosión de las armaduras asociado al avance del frente de carbonatación? Y, más aún: ¿Cómo deben abordarse estos estudios y qué conclusiones pueden extraerse de ellos?

Mediante ensayos realizados sobre testigos de hormigón, es posible identificar con relativa facilidad la posición actual del frente de carbonatación y evaluar si este ha alcanzado ya las armaduras, o bien, estimar el momento en el que lo hará, en función de la edad del elemento estructural.

El procedimiento más común consiste en la extracción de testigos mediante perforación con taladro, seguida de su rotura mediante un ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño). Tras la rotura, se aplica la **fenolftaleína** sobre las superficies internas expuestas, lo que permite visualizar con precisión la profundidad de carbonatación (ver Imagen 2).



Imagen 2. Ejemplo de análisis del frente de avance de la carbonatación. Elaboración propia.



Conociendo la profundidad de carbonatación y el tiempo de exposición (o edad) del elemento estructural analizado, es posible determinar el coeficiente de carbonatación aparente. A partir de este parámetro, pueden formularse distintas hipótesis: prever la profundidad que alcanzará el frente de carbonatación a una edad futura determinada, o bien estimar la edad a la que dicho frente alcanzará una profundidad crítica, como la correspondiente al recubrimiento de las armaduras.

En los apartados siguientes se presentará un caso de aplicación práctica que ilustra este enfoque metodológico.

No obstante, tras esta primera vía de análisis basada en ensayos experimentales, cabe preguntarse, ¿es posible llevar a cabo este estudio sin realizar ensayos sobre el propio elemento estructural?

El Código Estructural, en su Anejo 12: Estimación de la vida útil de elementos de hormigón, contempla esta posibilidad. En su artículo 3.1, se establece una alternativa metodológica para aquellos casos en los que no se disponga del coeficiente de carbonatación aparente determinado experimentalmente. En tales situaciones, se permite estimar dicho valor de forma aproximada a partir de expresiones empíricas y condiciones de exposición, según la siguiente formulación:

$$K_{ap,carb} = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot (f_{ck} + 8)^b$$

En la ecuación anterior, " f_{ck} " hace referencia a resistencia característica de proyecto especificada para el hormigón de estudio (MPa). Tanto el coeficiente referido al ambiente (c_{env}) como el coeficiente que considera o no la utilización de aireantes (c_{air}), así como los parámetros adimensionales a y b , todos ellos se encuentran tabulados en las Tablas A12.3.1.a, A12.3.1.b y A12.3.1.c del Anejo 12 del Código Estructural, respectivamente. Estas se presentan a continuación.

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1,00
Expuesto a la lluvia	0,50
Elementos enterrados, por encima del nivel freático	0,30
Elementos enterrados, por debajo del nivel freático	0,20

Tabla 1. Coeficiente " c_{env} " para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Tabla A12.3.1.a, Anejo 12, Código Estructural).

Aire ocluido	c_{air}
<4,5%	1,00
≥ 4,5 %	0,70

Tabla 2. Coeficiente " c_{air} " para estimar el coeficiente de carbonatación aparente ((Tabla A12.3.1.b, Anejo 12, Código Estructural).



Conglomerante	a	b
Cemento Portland	1800	-1,7
Cemento Portland + 28% cenizas volantes	360	-1,2
Cemento Portland + 9% humo de sílice	400	-1,2

Tabla 3. Coeficientes “a” y “b” para estimar el coeficiente de carbonatación aparente (Tabla A12.3.1.c, Anexo 12, Código Estructural).

De este modo, y teniendo en cuenta las características de la obra analizada, es posible estimar de manera aproximada el coeficiente de carbonatación aparente sin necesidad de estudios experimentales. Sin embargo, el Código Estructural recomienda evitar este procedimiento en favor de estudios *in situ*.

4 Caso práctico

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

4.1 Supuesto A

Ante la ausencia de datos experimentales, se solicita estimar la profundidad de carbonatación en una estructura de hormigón armado expuesta a la intemperie, aunque protegida del agua de lluvia, y con una vida útil de 40 años. La estructura se localiza en la ciudad de Mérida. Se conocen los siguientes datos:

- tipo de cemento: Portland convencional (CEM I);
- sin adiciones ni inclusores de aire;
- resistencia característica del hormigón: 30 MPa;
- recubrimiento nominal de las armaduras: 20 mm.

A partir de esta información, se solicitan las siguientes estimaciones.

1. Estimar la profundidad de carbonatación transcurridos 40 años, utilizando el procedimiento simplificado recogido en el Código Estructural (Anexo 12), aplicable cuando no se dispone de resultados experimentales.
2. Determinar si el frente de carbonatación ha alcanzado las armaduras, y en qué momento (aproximado) ocurrió o cuando es previsible que esto ocurra.

4.1.1 Solución Supuesto A

Contrariamente a lo recomendado por el Código Estructural, en este supuesto no se dispone de datos experimentales, lo que obliga a recurrir a una estimación teórica del coeficiente de carbonatación aparente. Para ello, se emplea la expresión propuesta en el Anexo 12 del citado código:

$$K_{ap,carb} = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot (f_{ck} + 8)^b$$



En este caso, y teniendo en cuenta los datos descritos en el enunciado:

$$c_{env} = 1,0 \rightarrow \text{elemento protegido de la lluvia}$$

$$c_{air} = 1,0 \rightarrow \text{elemento con aire ocluido} < 4,5\%$$

$$a = 1.800,0 \rightarrow \text{cemento Portland}$$

$$b = -1,7 \rightarrow \text{cemento Portland}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$K_{ap,carb} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1.800,0 \cdot (30 + 8)^{-1,7}$$

$$K_{ap,carb} = 3,712 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Conocido este coeficiente, puede estimarse la profundidad de carbonatación tras 40 años de exposición, de acuerdo con los datos presentados en el enunciado:

$$d = K_{ap,carb} \cdot \sqrt{t}$$

$$d = 3,712 \cdot \sqrt{40} \rightarrow d = 23,48 \text{ mm}$$

Dado que el recubrimiento nominal de las armaduras es de 20 mm, se puede concluir que el frente de carbonatación ya ha superado dicha barrera, lo cual hace probable el inicio de procesos de corrosión en las armaduras.

Para complementar el análisis, se puede estimar el momento en que el frente de carbonatación alcanzó dicha profundidad. Aislando el tiempo en la ecuación anterior:

$$d = K_{ap,carb} \cdot \sqrt{t}$$

$$t = \left(\frac{20}{3,712} \right)^2 \rightarrow t = 29,02 \text{ años}$$

Por tanto, se estima que las armaduras fueron alcanzadas por el frente de carbonatación aproximadamente a los 29 años de servicio de la estructura. Esto implica que, durante más de 10 años, las armaduras han estado expuestas a un entorno potencialmente corrosivo, lo que podría haber generado daños significativos en el elemento estructural.

Cabe destacar que todas estas estimaciones deben considerarse aproximadas, dada la ausencia de ensayos específicos sobre el hormigón en cuestión.

4.2 Supuesto B

En este segundo caso, y manteniendo las características de la estructura descrita en el Supuesto A, se dispone ahora de un dato experimental obtenido mediante una cata realizada *in situ*. En concreto, sobre un testigo extraído del elemento estructural, se ha determinado que la profundidad de carbonatación es de 28 mm, correspondiente a una edad de 40 años. A partir de esta información, se pide revisar las hipótesis extraídas en el supuesto previo y comparar resultados.

4.2.1 Solución Supuesto B

En este segundo caso el enunciado facilita datos experimentales que permiten evitar tener que recurrir a la estimación del coeficiente de carbonatación aparente. Por tanto, este coeficiente puede obtenerse directamente según:



$$d = K_{ap,carb} \cdot \sqrt{t}$$

$$\frac{d}{\sqrt{t}} = K_{ap,carb} \rightarrow K_{ap,carb} = \frac{28}{\sqrt{40}} \rightarrow 4,427 \text{ mm/año}^{1/2}$$

Dado que el recubrimiento nominal de las armaduras es de 20 mm, es posible estimar la edad en la que fueron alcanzadas por el frente de carbonatación, utilizando el valor experimental del coeficiente obtenido anteriormente:

$$d = K_{ap,carb} \cdot \sqrt{t}$$
$$t = \left(\frac{20}{4,427} \right)^2 \rightarrow t = 20,41 \text{ años}$$

En este caso, se concluye que las armaduras fueron alcanzadas por el frente de carbonatación a una edad aproximada de 20 años, es decir, diez años antes de lo estimado en el supuesto teórico del caso anterior.

Esta diferencia temporal implica diez años adicionales de exposición potencial a procesos de corrosión, lo que conlleva un aumento significativo del daño estructural acumulado. La comparación entre ambos supuestos pone de manifiesto la importancia de contar con datos experimentales reales, ya que las estimaciones teóricas pueden infraestimar el riesgo y, en consecuencia, afectar negativamente a la evaluación de la durabilidad y seguridad de la estructura.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje se ha abordado, tanto desde un enfoque teórico como práctico, el procedimiento para evaluar el riesgo de corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón, considerando el fenómeno de la carbonatación como factor determinante.

La carbonatación es un proceso clave en la evaluación de la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, debido al riesgo que representa la corrosión para la vida útil de este tipo de construcciones. Por ello, conocer y aplicar los métodos de estimación de la profundidad de carbonatación —ya sea mediante técnicas experimentales o a través de aproximaciones teóricas— resulta de gran utilidad práctica.

Este conocimiento no solo permite estimar el grado de deterioro de un elemento estructural, sino que también puede facilitar la detección temprana del daño, incluso antes de que la carbonatación alcance el nivel de las armaduras y se activen los procesos corrosivos. En consecuencia, su aplicación adecuada contribuye significativamente a la gestión preventiva del mantenimiento, al diseño de intervenciones de rehabilitación más eficaces, y a la prolongación de la vida útil de las estructuras de hormigón armado.

6 Bibliografía

6.1 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. 6^a edición. Madrid. 2003.

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

Otero Huerta, E. Corrosión y degradación de materiales. Editorial Síntesis. 2012.

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

6.2 Normativa:

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