

## Evaluación del frente carbonatado en muestras de hormigón sujetas a ciclos no regulares de humedecimiento-secado al aire.

A. Guzmán<sup>1\*</sup> , S. Acosta<sup>1</sup> , C. Dagne<sup>1</sup> 

\*Autor de Contacto: [mguzman@frm.utn.edu.ar](mailto:mguzman@frm.utn.edu.ar)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.732>

Recibido: 04/03/2024 | Correcciones recibidas: 06/11/2024 | Aceptado: 13/12/2024 | Publicado: 01/01/2025

### RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es evaluar experimentalmente cómo influyen ciertas características que presentan los hormigones de estudio en el fenómeno de carbonatación. Para ello se elaboran hormigones con tres relaciones a/c, dos tipos de cemento, y con la incorporación de un aditivo hidrófugo, expuestos luego al humedecimiento-secado al aire durante un periodo de 6 años. De los resultados obtenidos se observó la correspondencia del avance del frente carbonatado con la resistencia a tracción, así como su dependencia con las características de diseño y con las particularidades de la condición de exposición.

**Palabras clave:** hormigón armado; carbonatación; corrosión; durabilidad.

**Citar como:** Guzmán, A., Acosta, S., Dagne, C. (2025), "Evaluación del frente carbonatado en muestras de hormigón sujetas a ciclos no regulares de humedecimiento-secado al aire.", Revista ALCONPAT, 15 (1), pp. 35 – 49, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.732>

<sup>1</sup>CeReDeTeC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología y la Ingeniería Sísmica), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza Argentina.

#### Contribución de cada autor

En este trabajo, todos los autores contribuyeron proporcionalmente con todas las actividades. Las actividades mencionadas incluyen: idea original, antecedentes, ejecución de ensayos, relevamiento de datos, discusión de resultados y redacción del trabajo.

#### Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

#### Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2025.

## **Evaluation of the carbonated front in concrete samples subjected to non-regular wetting-air drying cycles.**

### **ABSTRACT**

The objective of this research is to experimentally evaluate how certain characteristics of the concretes under study influence the carbonation phenomenon. To do this, concretes are prepared with three w/c ratios, two types of cement, and with the incorporation of a water-repellent additive, then exposed to air-drying and wetting for a period of 6 years. From the results obtained, the correspondence of the advance of the carbonate front with the tensile strength was observed, as well as its dependence on the design characteristics and the particularities of the exposure condition.

**Keywords:** reinforced concrete; carbonation; corrosion; durability.

## **Avaliação da frente carbonatada em amostras de concreto submetidas a ciclos não regulares de umidificação-secagem do ar.**

### **RESUMO**

O objetivo desta pesquisa é avaliar experimentalmente como determinadas características dos concretos em estudo influenciam o fenômeno da carbonatação. Para isso, o concreto é elaborado com três relações a/c, dois tipos de cimento e com incorporação de aditivo hidrorrepelente, sendo posteriormente exposto à umidificação-secagem do ar por um período de 6 anos. A partir dos resultados obtidos, observou-se a correspondência do avanço da frente carbonática com a resistência à tração, bem como sua dependência das características de projeto e das particularidades da condição de exposição.

**Palavras-chave:** concreto reforçado; carbonatação; corrosão; durabilidade.

### **Información Legal**

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

## 1. INTRODUCCIÓN

La degradación de las estructuras de hormigón armado asociada a los mecanismos de corrosión de la armadura, resulta ser muy significativa. Esto trae aparejado elevados costos para la reparación de las estructuras afectadas. Estudios realizados en la región, por ejemplo en Argentina (Di Maio et al., 2009) y en Brasil (Dal Molin, 1988), han permitido establecer una incidencia elevada de la degradación de estructuras asociadas al fenómeno de corrosión por sobre otros mecanismos de deterioro. Pero por naturaleza, el hormigón presenta un pH elevado lo cual permite bajo dicha condición pasivar a las armaduras embebidas, protegiéndolas así del desarrollo de procesos corrosivos. El avance del frente de carbonatación (por penetración de  $\text{CO}_2$ ) da lugar a la pérdida de alcalinidad en el hormigón, produciendo con ello la despasivación de las armaduras y permitiendo así el posible desarrollo de corrosión en el acero, lo que conlleva a la degradación del hormigón. Dicha situación se debe a que cuando una barra de acero se corroe, el volumen resultante es aproximadamente seis veces más que el del hierro que reemplaza cuando la barra no está corroída (Marcotte, 2001). Esto hace que se presenten elevados esfuerzos de tracción en la interfaz armadura/hormigón, lo que conduce entre otras manifestaciones, al agrietamiento y pérdida del hormigón de recubrimiento. En la Figura 1 se muestran los productos resultantes de la corrosión del hierro.

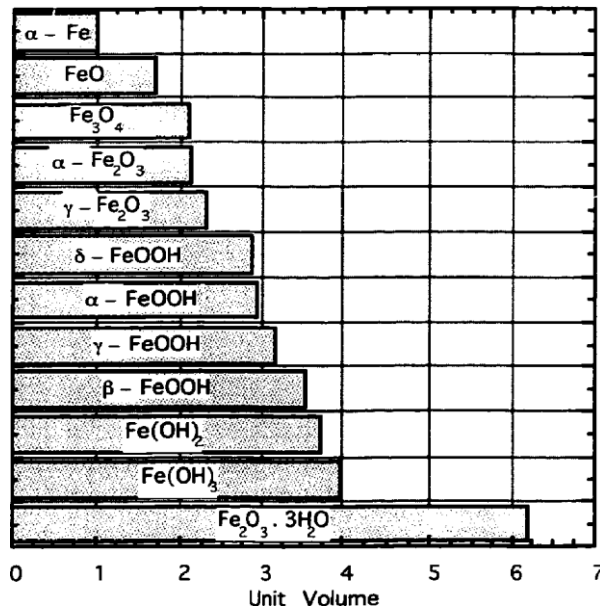


Figura 1: Productos resultantes de la corrosión del hierro (Marcotte, 2001).

Es por ello que el hormigón del recubrimiento de las armaduras cumple un rol fundamental, siendo de vital importancia para morigerar el fenómeno de la corrosión. Este ofrece a las barras embebidas una doble protección. Por una parte resulta ser una barrera física que separa a estas del medio ambiente, y por otro parte, el líquido encerrado en la solución de poros del hormigón presenta una elevada alcalinidad ( $\text{pH} \sim 12$  a  $13$ ), siendo un electrólito capaz de formar una capa de óxido protectora alrededor de las armaduras, conocida como capa pasivadora, la cual es compacta e invisible, adhiriéndose fuertemente a las mismas (Irassar, 2001). Pero cuando la alcalinidad natural del hormigón se ve comprometida debido al fenómeno de carbonatación, las armaduras se despasivan de forma homogénea en toda su superficie, dando lugar a una corrosión generalizada. No obstante ello, el avance del frente carbonatado resulta sensible al microclima al cual se encuentra expuesta la estructura. Castro et al. (2000) evaluaron la carbonatación de hormigones en el Golfo de México, señalando la importancia de considerar en dicha evaluación a los diferentes

microambientes marinos que se pueden constituir, por ejemplo, como consecuencia de la distancia a la costa. Esto último afecta el avance de la carbonatación, y en consecuencia, no resulta lógico establecer recomendaciones generales basadas en la exposición de especímenes en un solo microambiente.

En este sentido, el contenido de humedad del hormigón condiciona la velocidad con la cual penetra el CO<sub>2</sub>. Al respecto, Houst and Wittmann (2002) en su investigación pudieron establecer que la profundidad del frente carbonatado resultó mayor cuando las superficies de los morteros expuestas al exterior estuvieron protegidas de la lluvia, favoreciendo la difusión del CO<sub>2</sub>. Resultados similares obtuvieron Priano y Señas (2013) cuando evaluaron la carbonatación de estructuras de hormigón ubicadas en ambiente urbano y rural, estableciendo que el deterioro de un elemento de hormigón armado depende del microclima de exposición, ya que éste puede variar para diferentes zonas de un mismo elemento, y con ello, de la humedad disponible. Por otra parte, otro condicionante para el avance del fenómeno de carbonatación obedece a las características de diseño de los mismos. Una mayor relación *a/c* contribuye a una mayor profundidad del frente de carbonatación (Rao and Meena, 2017), mientras que el empleo de cementos con adiciones minerales puede hacer que la resistencia a dicho fenómeno disminuya (Leemann et al., 2015).

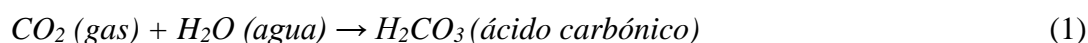
En la presente investigación se aborda la evaluación cualitativa del fenómeno de carbonatación a partir de mediciones obtenidas en probetas de hormigón, y al mismo tiempo, su correspondencia con el aspecto superficial que presentaba una barra de acero embebida al momento del moldeo de cada una de estas. Se propone como objetivo evaluar el efecto sobre el avance del frente carbonatado que tiene: i) la calidad del hormigón, inferida a partir de valorar la resistencia a tracción por compresión diametral, asumiendo la relación de esta última con la resistencia a compresión; ii) el tipo de cemento utilizado; iii) la incorporación de un aditivo hidrófugo; y iv) la condición particular de exposición ambiental a la cual estuvieron las muestras sujetas durante un periodo ininterrumpido de 6 años. Dicha condición de exposición correspondió a la de ciclos no regulares de humedecimiento-secado al aire. El tiempo de exposición a cada condición particular no fue una variable considerada en el estudio. Cabe destacar que aproximadamente cada dos meses se renovaba el nivel de agua en los recipientes donde se alojaban las muestras.

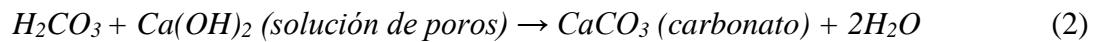
Cabe aclarar que el presente desarrollo es la continuidad de investigaciones anteriormente realizadas (Guzmán et al., 2018; Guzmán et al., 2019; Guzmán, 2023), en las cuales se evaluó en estos casos la resistividad eléctrica del hormigón y el potencial de corrosión desarrollado.

## 2. CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN

Como fuera señalado, el líquido encerrado en la solución de poros del hormigón de recubrimiento y dada su elevada alcalinidad, permite la preservación de una capa de óxido protector alrededor de las armaduras, conocida como película pasiva. En presencia de humedad y oxígeno, dicha película pasiva impide la disolución del hierro, imposibilitando de este modo la corrosión de las armaduras. No obstante, esta protección puede desaparecer al destruirse la película pasiva como consecuencia de la pérdida de alcalinidad ( $\text{pH} < 9$ ) del hormigón del recubrimiento (Behnood et al., 2016). El fenómeno de carbonatación del hormigón es una de las causas de dicha despasivación.

La carbonatación tiene lugar cuando el dióxido de carbono del aire (CO<sub>2</sub>) entra en el hormigón a través de sus poros y reacciona con los hidróxidos de la fase líquida intersticial y con los compuestos hidratados del cemento, de tal manera que el hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), el hidróxido de sodio (Na(OH)) y el hidróxido de potasio (K(OH)) presentes en la solución de poros se carbonatan. Dichas reacciones se pueden simplificar a partir de las siguientes ecuaciones (Broomfield, 2023):





De este modo, la acidificación de la solución de poros del hormigón (Pu et al., 2012) provocada por la carbonatación rompe la capa pasiva del refuerzo de acero y se inicia la corrosión del mismo. Cabe destacar que a diferencia de la mayoría de los otros ácidos, el ácido carbónico no ataca la pasta de cemento, sino que simplemente neutraliza los álcalis presentes en la solución de poros, formando principalmente carbonato de calcio el cual recubre a estos.

Una vez iniciada la carbonatación, se comienza a desarrollar un frente (dc) el cual avanza hacia el interior del hormigón. El mecanismo de transporte o movimiento de la carbonatación dentro del hormigón es explicado por la teoría de la difusión, y se describe por la primera ley de Fick, según la siguiente ecuación (Broomfield, 2023):

$$dc = kc \ t^{1/2} \quad (3)$$

El avance del frente (dc) depende de la raíz cuadrada del tiempo (t) al que se encuentra expuesto el hormigón, de la velocidad de carbonatación (kc) la cual depende de la difusividad efectiva del CO<sub>2</sub> a través del hormigón, y de la concentración de este gas en el medio ambiente de exposición. Dicho avance es simple de detectar y medir utilizando como indicador de pH la disolución de fenolftaleína disuelta en alcohol etílico (UNE 112-011, 2011). La fenolftaleína toma color rojo-púrpura para valores de pH > a 9.5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora para valores de pH < a 8 (hormigón carbonatado). Para valores intermedios, vira al color rosa pálido.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La evaluación cualitativa del frente carbonatado fue llevada a cabo sobre un grupo de 12 muestras, constituidas cada una de ellas por tres probetas, las que se mantuvieron aproximadamente durante seis años en una condición de exposición ambiental particular, la cual tuvo que ver con someter a las probetas a ciclos alternados no regulares de sumersión, sumersión parcial, y secado al aire (Figura 2). El tiempo de cada ciclo de exposición no fue establecido como una variable de estudio y en consecuencia tampoco controlado, resultando ser el mismo para cada muestra. Cabe destacar que el nivel de agua en los recipientes donde estaban las muestras se renovaba aproximadamente cada dos meses.

Se utilizaron probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura (IRAM 1534, 2004), en tanto que los materiales reportados en la confección de las mismas fueron cemento Portland puzolánico (CPP-40) y fillerizado (CPF-40), ambos cumpliendo la norma respectiva (IRAM 50000, 2000); agregados naturales rodados de tamaño máximo 19 mm; y aditivo impermeabilizante inorgánico identificado en su hoja técnica como aditivo hidrófugo, incorporado a la mezcla fresca en una dosis correspondiente al 10 % del agua de amasado. Este aditivo presenta una suspensión de silicatos coloidales en una emulsión acuosa líquida viscosa, de color amarillo pálido, la cual se distribuye dentro de la matriz cementicia, bloqueando sus capilares y obteniéndose así el efecto impermeabilizante. Por otra parte, estos silicatos reaccionan con la portlandita que libera el cemento, formando compuestos insolubles que también obturan poros y capilares.



Figura 2. Condición de exposición de las probetas a evaluar.

En cuanto a la barra embebida en la cara superior de las probetas (Figura 3), correspondió a una varilla de diámetro 8 mm, de acero ADN 420 (IRAM/IAS U 500-528, 2022) y con una profundidad embebida en el hormigón de aproximadamente 100 mm.



Figura 3. Barra embebida en la cara superior de las probetas.

En la Tabla 1 se presentan las referencias y materiales utilizados en cada una de las muestras evaluadas.

Tabla 1. Designación de las muestras de estudio. Proporción de materiales en partes.

Desig.	a/c	Tipo de cemento	Tipo de aditivo	Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Agua [lts/m <sup>3</sup> ]	Arena [kg/m <sup>3</sup> ]	Ripio [kg/m <sup>3</sup> ]	Aditivo [lts/m <sup>3</sup> ]
P-05	0.5	CPP-40 Puzolánico (P)	-	362	181	725	1086	-
P-06	0.6			349	209	698	1047	-
P-07	0.7			337	236	675	1012	-
P-05-H	0.5		hidrófugo (H)	362	163	725	1086	18.1
P-06-H	0.6			349	189	698	1047	20.9
P-07-H	0.7			337	213	675	1012	23.6
F-05	0.5			CPF-40 Fillerizado (F)	-	362	181	725
F-06	0.6	349	209			698	1047	-
F-07	0.7	337	236			675	1012	-
F-05-H	0.5	hidrófugo (H)	362		163	725	1086	18.1
F-06-H	0.6		349		189	698	1047	20.9
F-07-H	0.7		337		213	675	1012	23.6

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la evaluación del frente carbonatado, las probetas fueron sometidas previamente al ensayo de tracción por compresión diametral (IRAM 1658, 1995) (Figura 4), lo cual permitió obtener dos mitades, y con ello, dos superficies internas de evaluación. Si bien las probetas tenían una barra embebida, a partir del ensayo señalado se procedió a inferir la tensión de rotura.



Figura 4. Izq.) Ensayo de tracción por compresión diametral. Der.) Mitades obtenidas del ensayo.

Sobre cada superficie interna obtenida se aplicó una solución de fenolftaleína, permitiendo con ello evaluar el avance del frente carbonatado. En la Figura 5 se presentan las superficies internas de una de las muestras antes del ensayo de carbonatación y posterior a este.



Figura 5. Superficies internas antes del ensayo (izq.) y posterior a este (der.).

Como era de esperar, parte de la armadura embebida en la probeta fue despasivada debido al avance del frente de carbonatación. Sumado a ello, las condiciones de exposición a las cuales se encontraron las muestras a lo largo de 6 años, dieron lugar a la iniciación y posterior propagación del proceso corrosivo en dicho tramo de barra despasivada. En la Figura 6 se presenta uno de los casos evaluados, donde se observa la penetración alcanzada por el frente carbonatado, y con ello, la clara delimitación entre el tramo de barra corroída y no corroída.

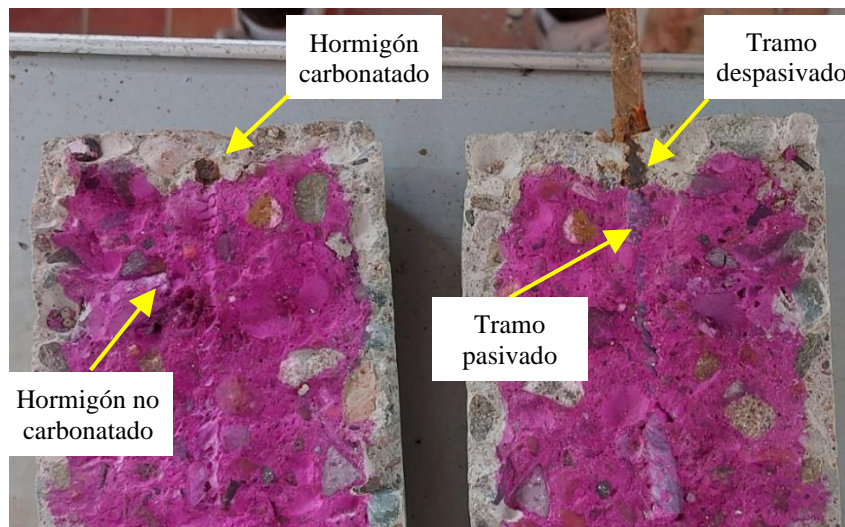


Figura 6. Avance del frente de carbonatación. Tramo de barra pasivado y despasivado.

Las condiciones de exposición a las cuales estuvieron sujetas las probetas en el tiempo, hizo que diferentes zonas de las mismas se encontraran bajo microambientes distintos. Mientras la cara inferior se encontró la mayor parte del tiempo sumergida, la cara superior resultó ser la que mayor parte de este tiempo estuvo al aire libre. Por lo tanto, la cara inferior fue la que presentó ciclos más prolongados de poros saturados, a diferencia de lo que sucedió con la cara superior. Estas condiciones particulares, se entiende, hicieron que el avance del frente carbonatado en la cara inferior se desarrollara a una velocidad menor. Ello, debido a la mayor dificultad de disolución del  $\text{CO}_2$  en la solución saturada de poros que presentó esta zona de las probetas. Contrariamente, dicha



velocidad de penetración resultó mayor en la cara superior debido a que esta zona fue la que presentó los ciclos más prolongados en condición de poros secos o parcialmente saturados. En la Figura 7 se muestran las diferencias observadas en el avance del frente de carbonatación entre la cara inferior y la superior, para las muestras elaboradas con cemento puzolánico (P) y con cemento fillerizado (F), y sin aditivo hidrófugo.

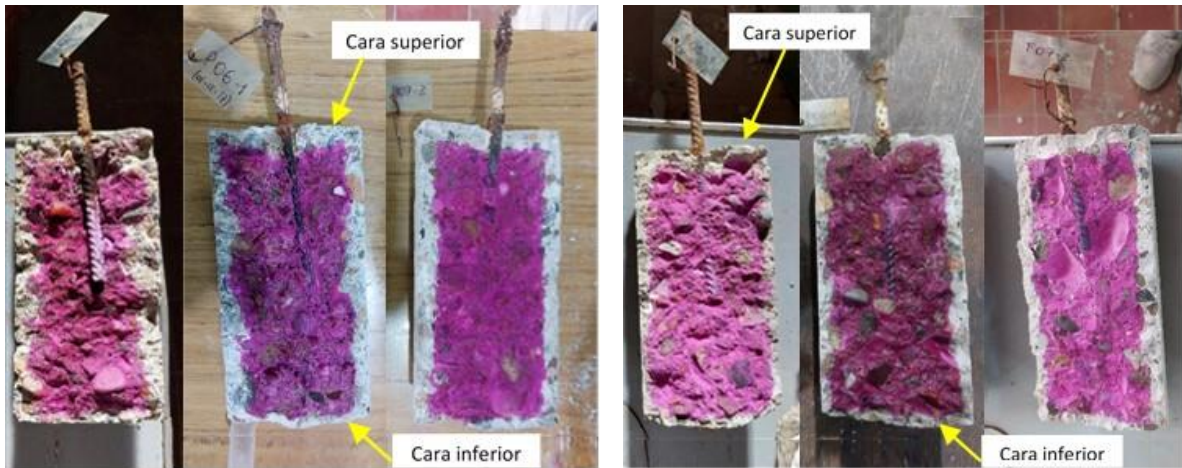


Figura 7. Avance del frente carbonatado. Izq.) Muestras “P-0x”. Der.) Muestras “F-0x”.

En la Tabla 2 se presentan los resultados correspondientes a la tensión de rotura a la tracción por compresión diametral ( $f_t$ ), señalándose los valores determinados para cada una de las tres probetas que forman parte de cada muestra de estudio. Se indica también el resultado promedio obtenido para cada muestra, así como la desviación estándar ( $S_n$ ) y el coeficiente de variación (C.V.).

Tabla 2. Tensión de rotura a tracción.

Designación	$f_{t1}$ [MPa]	$f_{t2}$ [MPa]	$f_{t3}$ [MPa]	$f_t$ promedio [MPa]	$S_n$ [MPa]	C.V. [%]
P-05	2.76	2.95	2.87	2.86	0.08	2.7
P-06	2.65	2.59	2.76	2.67	0.07	2.6
P-07	2.61	2.68	2.72	2.67	0.05	1.7
P-05-H	3.81	3.51	3.67	3.66	0.12	3.3
P-06-H	2.59	2.42	2.51	2.51	0.07	2.8
P-07-H	1.77	1.96	1.90	1.88	0.08	4.2
F-05	3.42	3.57	3.32	3.44	0.10	3.0
F-06	2.76	2.66	2.97	2.80	0.13	4.6
F-07	2.62	2.53	2.56	2.57	0.04	1.5
F-05-H	3.33	3.41	3.59	3.44	0.11	3.2
F-06-H	2.47	2.41	2.29	2.39	0.07	3.1
F-07-H	2.27	2.28	2.33	2.29	0.03	1.1

En las Tablas 3 y 4 y con igual análisis estadístico a lo señalado para la Tabla 2, se presentan los resultados obtenidos para la profundidad de avance del frente carbonatado ( $d_c$ ), tanto para la cara inferior de las probetas, como para su cara superior.

Por último en la Tabla 5 se presenta la determinación de la velocidad de carbonatación ( $k_c$ ) obtenida a partir de la ecuación (1), teniendo en cuenta para esto último los resultados del avance del frente indicados en las Tablas 3 y 4, y el tiempo de exposición ( $t$ ) de 6 años al cual estuvieron sujetas las muestras desde su elaboración y hasta el momento de las mediciones llevadas a cabo.

Tabla 3. Frente carbonatado en la cara inferior para un tiempo de exposición de 6 años.

Designación	Frente carbonatado cara inferior				Sn [MPa]	C.V. [%]
	dc <sub>1</sub> [mm]	dc <sub>2</sub> [mm]	dc <sub>3</sub> [mm]	dc promedio [mm]		
P-05	9.7	8.1	9.3	9.0	0.7	7.5
P-06	9.5	11.8	9.0	10.1	1.2	12.1
P-07	11.6	11.6	9.7	11.0	0.9	8.2
P-05-H	10.4	11.6	11.2	11.1	0.5	4.5
P-06-H	12.0	14.5	12.5	13.0	1.1	8.3
P-07-H	16.8	13.3	14.5	14.9	1.5	9.8
F-05	7.2	6.0	8.4	7.2	1.0	13.6
F-06	8.2	11.0	8.0	9.1	1.4	15.1
F-07	8.7	10.1	8.5	9.1	0.7	7.8
F-05-H	8.9	6.5	6.3	7.2	1.2	16.3
F-06-H	8.0	9.5	9.7	9.1	0.8	8.4
F-07-H	10.7	9.9	9.6	10.1	0.5	4.6

Tabla 4. Frente carbonatado en la cara superior para un tiempo de exposición de 6 años.

Designación	Frente carbonatado cara superior				Sn [MPa]	C.V. [%]
	dc <sub>1</sub> [mm]	dc <sub>2</sub> [mm]	dc <sub>3</sub> [mm]	dc promedio [mm]		
P-05	13.3	12.1	13.2	12.9	0.5	4.2
P-06	13.8	14.3	11.3	13.1	1.3	10.0
P-07	19.5	17.3	17.2	18.0	1.1	5.9
P-05-H	15.7	18.8	15.9	16.8	1.4	8.4
P-06-H	15.0	17.8	15.1	16.0	1.3	8.1
P-07-H	26.3	24.2	24.2	24.9	1.0	4.0
F-05	10.4	10.2	12.8	11.1	1.2	10.6
F-06	11.9	13.4	10.6	12.0	1.1	9.6
F-07	12.1	14.9	14.7	13.9	1.3	9.2
F-05-H	12.2	11.1	10.1	11.1	0.9	7.7
F-06-H	10.6	11.5	11.3	11.1	0.4	3.5
F-07-H	14.8	14.6	12.7	14.0	1.0	6.7

Tabla 5. Velocidad promedio de carbonatación para un tiempo de exposición de 6 años.

Designación	kc promedio [mm/año <sup>0.5</sup> ]	
	Cara inferior	Cara superior
P-05	3.7	5.3
P-06	4.1	5.3
P-07	4.5	7.3
P-05-H	4.5	6.9
P-06-H	5.3	6.5
P-07-H	6.1	10.2
F-05	2.9	4.5
F-06	3.7	4.9
F-07	3.7	5.7
F-05-H	2.9	4.5
F-06-H	3.7	4.5
F-07-H	4.1	6.1

En la Figura 8 y para cada una de las muestras de estudio, se presenta la evolución del avance del frente carbonatado en función de la resistencia a la rotura a tracción (ft). Se observa que a mayores valores de resistencias obtenidas en los ensayos, menor resultó ser el avance del frente carbonatado (dc).

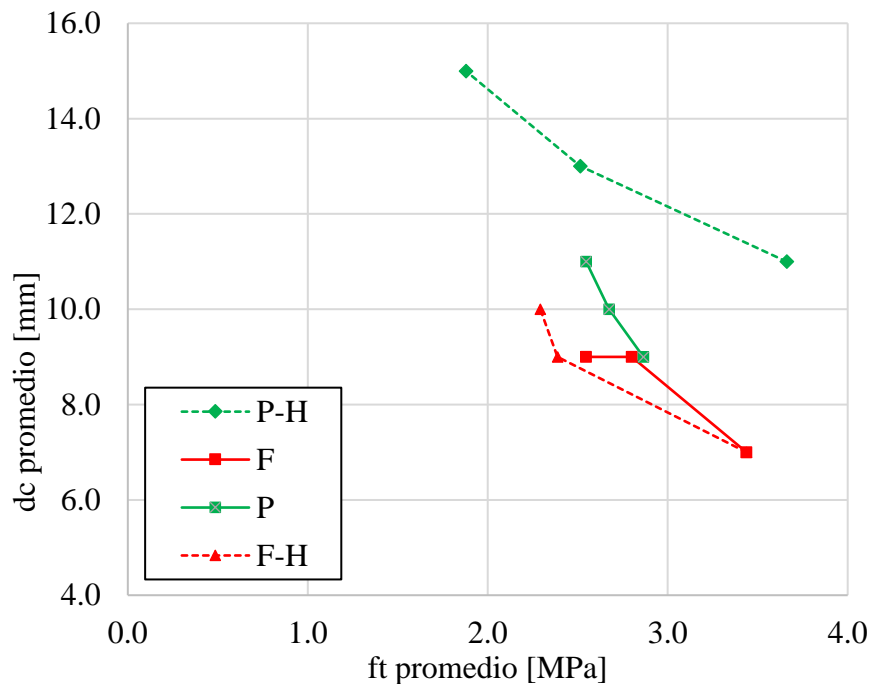


Figura 8. Tensión de rotura a tracción vs. avance del frente carbonatado en cara inferior.

Para similares niveles de tensión de rotura a tracción, el avance del frente carbonatado fue superior en aquellas muestras elaboradas con cemento puzolánico. Esto podría deberse a la menor reserva alcalina disponible debido al consumo de portlandita que resulta de la reacción puzolánica (de Medeiros et al., 2017). En cuanto al efecto del aditivo hidrófugo, la incorporación del mismo dio lugar a un leve incremento del frente carbonatado. Esto podría deberse a que dichos aditivos son materiales hidrofóbicos basados en sales de ácidos grasos, calcio, amonio, etc., las cuales

reaccionan con la portlandita (Ramachandran, 1996), haciendo nuevamente disminuir la reserva alcalina.

## 5. APLICACIÓN DEL CIRSOC 201 A LOS CASOS DE ESTUDIO

De lo señalado y considerando como ejemplo el de un elemento de hormigón armado que forma parte de una estructura de fundación, con clase de exposición medioambiental A2 correspondiente a corrosión por carbonatación (CIRSOC 201, 2005), en contacto vertical con el suelo y con armaduras de diámetro menor a 16 mm, el recubrimiento mínimo necesario resultaría ser de 30 mm. De las velocidades de carbonatación  $k_c$  determinadas en la Tabla 5, se podría obtener el tiempo que debería transcurrir desde la puesta en servicio del hormigón hasta que la carbonatación alcanzara la ubicación de las armaduras. En la Tabla 6 se presentan los valores de estos tiempos a través del modelo predictivo (ecuación 1) aplicados a las muestras de estudio.

El tiempo transcurrido desde la puesta en servicio del hormigón hasta que el frente carbonatado alcanza la ubicación de la armadura, se lo conoce como periodo de iniciación. A partir de este tiempo y en adelante, comienza el periodo definido como de propagación, periodo en el cual se desarrolla la corrosión de la armadura (Tuutti, 1982). Por otra parte, la vida útil de una estructura se define como un punto en el tiempo en el cual ésta deja de poder cumplir con requisitos esenciales tales como seguridad, funcionalidad y aspecto estético. Dicha vida útil está constituida por el periodo de tiempo de iniciación y parte o la totalidad del periodo de tiempo de propagación.

En ese sentido, el Reglamento CIRSOC 201 (CIRSOC 201, 2005) establece una vida útil en servicio de 50 años. Por lo tanto, a partir de los resultados indicados en la Tabla 6 y con respecto a la cara inferior de las probetas, se observa que sólo dos muestras, la P-06-H y la P-07-H, estuvieron con tiempos  $t$  muy por debajo de la vida útil señalada. En tanto que para la cara superior, salvo las muestras F-05, F-05-H y F-06-H, el resto presentaron nuevamente un tiempo  $t$  significativamente menor al previsto para dicha vida útil.

Tabla 6. Tiempo  $t$  en años para el inicio de la eventual propagación de corrosión.

Desig.	Tiempo $t$ para un $d_c = 30$ mm	
	Cara inferior	Cara superior
P-05	67	32
P-06	54	32
P-07	45	17
P-05-H	45	19
P-06-H	32	21
P-07-H	24	9
F-05	110	45
F-06	67	38
F-07	67	28
F-05-H	110	45
F-06-H	67	45
F-07-H	54	24

Suponiendo entonces una condición de servicio para los hormigones evaluados bajo el ambiente de exposición humedecimiento-secado y con requerimientos de recubrimiento de 30 mm, resultaría en general y sin diferenciar el comportamiento entre caras, que las muestras con relaciones  $a/c$  no mayores a 0.5 y con cemento fillerizado, la vida útil estaría en el orden de lo establecido por la reglamentación. En tanto que diferenciando el comportamiento entre caras, para la condición

particular de cara mayormente saturada en el tiempo, relaciones a/c no superiores a 0.6 podrían cumplir con la vida útil, con excepción del caso P-06-H.

Finalmente, lo anteriormente señalado en este estudio cualitativo muestra la diferencia de comportamiento observada para el frente carbonatado, dependiendo entre otras posibles causas, de la condición de exposición en el tiempo a la que particularmente estuvieron sujetas las caras de las muestras, aun cuando de forma general se trató de una condición de humedecimiento-secado.

De convalidarse estos resultados en futuras investigaciones previstas, esto podría dar lugar a una recomendación para la reglamentación actualmente vigente en la República Argentina. De este modo, se podría considerar una diferenciación en cuanto a la definición de las clases de exposición medio ambiental, situación definida también por otros autores como microambientes, toda vez que se prevea que el hormigón en servicio se encontrará bajo la condición de saturado, o bien, bajo la condición de exposición al aire libre.

Actualmente dichas condiciones medio ambientales, saturación-aire libre, están representadas en la reglamentación (CIRSOC 201, 2005) de forma general bajo una misma clase de exposición.

## 6. CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado y de la interpretación cualitativa de las tendencias observadas en los resultados, se presentan las siguientes conclusiones obtenidas para las muestras de estudio:

- A mayor resistencia a tracción por compresión diametral del hormigón, menor resultó ser el avance del frente carbonatado. Este comportamiento está en total concordancia con la relación a/c.
- Para similares niveles de resistencia, el avance del frente fue mayor en muestras elaboradas con cemento puzolánico con respecto a las muestras elaboradas con cemento fillerizado.
- La incorporación del aditivo hidrófugo dio lugar a un incremento en el avance del frente.
- Durante los 6 años de exposición de las muestras, el avance fue más profundo en las caras mayormente expuestas al aire libre que en las caras mayormente saturadas.

## 7. AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Técnica, Universidad Tecnológica Nacional, por el financiamiento al Proyecto PID 8573.

## 8. REFERENCIAS

Behnood, A., Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2016), *Methods for measuring pH in concrete: A review*. Construction and Building Materials, 105, 176-188.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.032>

Broomfield, J. P. (2023), *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>

Castro, P., Sanjúan, M., Genescá, J. (2000), *Carbonation of concretes in the Mexican Gulf*. Building and Environment 35, 145-149. [doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00009-8)

CIRSOC 201 (2005), *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*. INTI, Argentina. <https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-013/area100/area100a/reglamento201completo.pdf>

Dal Molin, D. (1988), *Fissuras en estructuras de concreto armado: Análisis das manifestacoes típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul*, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

- De Medeiros, M., Raisdorfer, J., Hoppe Filho, J., Medeiros-Junior, R. (2017). *Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>
- Di Maio, A., Sota, J., Traversa, L. (1999), “*Patología de estructuras de hormigón. Análisis de algunos casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años*”, III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad, La Habana, Cuba.
- Guzmán, M., Maldonado, G., Giolo, E. (2018), *Evaluación de la resistividad eléctrica del hormigón como parámetro de durabilidad frente a la corrosión del acero*, XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Lima, Perú.
- Guzmán, M., Maldonado, G., Roldan, V., Acosta, S., Dagne, C. (2019), *END para la valoración cualitativa del proceso corrosivo en probetas de hormigón armado con distintas características de diseño*, XII Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales CORENDE, Buenos Aires, Argentina.
- Guzmán, A. (2023), *Umbral de resistividad para evaluar durabilidad del hormigón con hidrofugantes y diferentes relaciones agua/cemento*. Revista ALCONPAT, 13(3), 286-298. [doi.org/10.21041/ra.v13i3.699](https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.699)
- Houst, Y., Wittmann, F. (2002), *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research 32, 1923-1930. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1995), *IRAM 1658: Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2000), *IRAM 50000: Cemento para uso general*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2004), *IRAM 1534: Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2022), *IRAM/IAS U 500-528: Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructura de hormigón*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Irassar, E. (2001), *Durabilidad del hormigón estructural*, XIV Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón y Seminario de Durabilidad del Hormigón Estructural, Olavarría, Buenos Aires, Argentina.
- Leemann, A., Nygaard, P., Kaufmann, J., Loser, R. (2015). *Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete*. Cement and Concrete Composites 62, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.020>
- Marcotte, T. (2001), *Characterization of chloride-induced corrosion products that form in steel-reinforced cementitious materials*, PhD Thesis in Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada. <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/694/NQ65251.pdf?sequence=1>
- Priano, C., Señas, L. (2013), *Carbonatación de estructuras de hormigón ubicadas en ambiente urbano y rural*. International Journal of Innovation and Applied Studies, 2(1), 6-15. <http://www.issr-journals.org/ijias/>
- Pu, Q., Jiang, L., Xu, J., Chu, H., Xu, Y., Zhang, Y. (2012), *Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete*. Construction and Building materials, 28(1), 519-524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.006>
- Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew. <https://www.sciencedirect.com/book/9780815513735/concrete-admixtures-handbook>

Rao, N., Meena, T. (2017). *A review on carbonation study in concrete*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 263(3), IOP Publishing.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/263/3/032011/pdf>

Trocónis, O., Romero, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. (1997), *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil.

<https://repositorio.usp.br/item/000923678>

Tuutti, K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4709458/3173290.pdf>

UNE 112-011 (2011), *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación.

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0047865>