

Predicción de la vida útil de estructuras en concreto a partir de modelos para el avance del frente de carbonatación

R. Costa^{1*} , A. Franchetto¹ , A. Gouveia¹ , F. Ziegler¹ , K. Pessoa¹ , M. Garcez¹ 

*Autor de Contacto: rayarapintocosta@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

Recepción: 14/09/2021 | Aceptación: 02/12/2021 | Publicación: 01/01/2022

RESUMEN

Este artículo evalúa la variabilidad en la predicción de la vida útil de estructuras de concreto a través de cuatro modelos que estiman el avance natural del frente de carbonatación. Los resultados muestran que hay variabilidad en el frente de carbonatación estimado. Los modelos de Possan (2010) y Eklou (2018) presentan valores estimados cercanos a los medidos, mientras que Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) tienden, respectivamente, a subestimar y sobreestimar el frente natural de carbonatación. Solo se consideran concretos sin la adición de materiales cementicios suplementarios debido a las limitaciones de los modelos. La resistencia a la compresión, concentración de CO₂ y la humedad relativa del aire presentan una influencia significativa en los resultados, y la variabilidad depende de qué parámetros se consideran en los modelos.

Palabras clave: carbonatación; predicción de vida útil; frente de carbonatación; durabilidad del concreto.

Citar como: Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M. (2022), "Predicción de la vida útil de estructuras en concreto a partir de modelos para el avance del frente de carbonatación", Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 47 – 60, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.558>

¹ Núcleo orientado para a inovação da construção (NORIE), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Contribución de cada autor

En este trabajo los autores A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez contribuyeron a la concepción de la idea y metodología del estudio con 16,66% de participación. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa participaron en la investigación y el análisis formal de los resultados con 20% de participación. A. Franchetto; A. Gouveia; F. Ziegler; R. Costa; K. Pessoa; M. Garcez aportaron contribuciones al manuscrito en la discusión de los resultados con 16,66% de participación.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) 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 2022 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2022.

Service life prediction for concrete structures based on carbonation front depth models

ABSTRACT

This paper seeks to evaluate the variability in predicting the service life of concrete structures through four models that estimate the natural advance of the carbonation front. The results show that there is variability in the estimated carbonation front. The models by Possan (2010) and Ekolu (2018) show estimated values close to measured ones, while Ho and Lewis (1987) and Bob and Affana (1993) tend to underestimate and overestimate the natural carbonation front, respectively. Only concretes without added supplementary cementitious materials were considered, due to model limitations. Compressive strength, CO₂ concentration and relative humidity have significant influence on the results and the variability depends on which parameters are considered in the models.

Keywords: carbonatation; service life prediction; carbonatation depth; concrete durability.

Previsão da vida útil de estruturas de concreto com base em modelos para avanço da frente de carbonatação

RESUMO

Este artigo busca avaliar a variabilidade na previsão da vida útil de estruturas de concreto através de quatro modelos que estimam o avanço natural da frente de carbonatação. Os resultados mostram que há variabilidade na frente de carbonatação estimada. Os modelos de Possan (2010) e Ekolu (2018) apresentam valores estimados próximos aos medidos, enquanto Ho e Lewis (1987) e Bob e Affana (1993) tendem, respectivamente, a subestimar e superestimar a frente natural de carbonatação. Somente concretos sem adição de materiais cimentícios suplementares foram considerados, por limitações dos modelos. A resistência à compressão, concentração de CO₂ e umidade relativa do ar têm influência significativa nos resultados e a variabilidade depende de quais parâmetros são considerados nos modelos.

Palavras-chave: carbonatação; previsão de vida útil; frente de carbonatação; durabilidade do concreto.

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, Página Web: 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 carbonatación es un fenómeno generado por la interacción del concreto con el ambiente. Ocurre cuando hay una reacción del dióxido de carbono (CO_2) del aire con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), producto de la hidratación del cemento, y que propicia una alta alcalinidad en la solución intersticial del concreto, formando el carbonato cálcico (CaCO_3). El cemento Portland hidratado presente en el concreto tiene un pH alcalino (12-13), debido principalmente al $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sin embargo, con la formación de CaCO_3 ocurre una reducción de ese pH a valores como 9,4, que a la temperatura ambiente propicia la precipitación de CaCO_3 . Entonces, esa acidificación de la matriz cementicia causa la despasivación de la armadura, dejándola susceptible a procesos corrosivos. La corrosión es la principal manifestación patológica en las estructuras de concreto armado (Peter *et al.*, 2008; Chen, 2019).

Los principales factores que afectan la carbonatación y su velocidad son: temperatura, humedad relativa del ambiente (HR), concentración de CO_2 , revestimiento de la superficie, factor agua/cemento, tipo de cemento utilizado, proporción de cemento y agua utilizado, condiciones de curado y grado de hidratación de la matriz, permeabilidad del concreto y red de poros (Ribeiro *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Song; Kwon, 2007; Houst; Wittmann, 2002). A edades tempranas (hasta 28 días, por lo general), la carbonatación presenta baja incidencia. Sin embargo, con un tiempo de exposición más largo al ambiente saturado con CO_2 , la carbonatación se hace más evidente y puede manifestarse en gran parte de la estructura de concreto (RIBEIRO *et al.*, 2018).

Según la norma brasileña *NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 1* (traducción: NBR 15575-1: Edificaciones Habitacionales – Desempeño Parte 1) (ABNT, 2013), la vida útil (VU) es el período en el que un edificio y/o sus sistemas se prestan a las actividades para las que fueron diseñados y construidos, cumpliendo con los niveles de desempeño establecidos en esa norma. Para la determinación de la VU de las estructuras de concreto carbonatadas, se procede a la aplicación de modelos basados en ecuaciones matemáticas a fin de mensurar la profundidad de carbonatación y así descubrir la velocidad a la que ese frente de carbonatación avanza hacia el interior de la estructura (Possan, 2010).

Los modelos que estiman la profundidad de carbonatación presuponen que el concreto es homogéneo. En la práctica eso no ocurre, pues su consistencia depende del tiempo de compactación y curado, además de las condiciones de la (HR) del ambiente. Ese supuesto asegura que las propiedades determinantes de la tasa de carbonatación sean semejantes en todas las profundidades del concreto, lo que simplifica los cálculos (Köliö *et al.*, 2014).

No hay un modelo que representa fielmente el comportamiento de la carbonatación en el concreto, y eso se debe a los diferentes factores explicados anteriormente. Por lo tanto, la elección de qué modelo se debe aplicar depende de las características del objeto de estudio y de las variables del modelo.

En ese sentido, este trabajo analiza la variabilidad en la predicción de la VU a través de cuatro modelos que estiman la profundidad de la carbonatación. El estudio se realiza a partir de la base de datos de ensayos realizados bajo condiciones naturales de envejecimiento y exposición encontrados en la literatura. Se aplicó un análisis de sensibilidad para la identificación de los parámetros que más influyen en las variaciones encontradas entre los valores estimados por los modelos y obtenidos experimentalmente. Este estudio busca, sobre todo, contribuir con la comunidad técnico-científica en el tema de las manifestaciones patológicas, especialmente en la definición de modelos que puedan estimar mejor el avance del frente de carbonatación, auxiliando en la toma de decisiones relativas a la durabilidad y vida útil de las estructuras de concreto armado en la etapa de diseño.

2. MÉTODO

El método utilizado se divide en: *i*) selección de modelos matemáticos de la literatura para predecir la profundidad de carbonatación en concretos; *ii*) creación de una base de datos de concretos a partir de estudios de la literatura; *iii*) análisis comparativo de los modelos; *iv*) análisis de sensibilidad para comprender las respuestas de los modelos de predicción de profundidad de carbonatación, de acuerdo con las variables que considera cada modelo.

2.1 Modelos de estimación de la profundidad de carbonatación

2.1.1 Modelo de Possan (2010)

El modelo de Possan (2010) considera los factores que influyen en la carbonatación, además de presentar datos de entrada fácilmente obtenibles según la ecuación 1. La profundidad de carbonatación está representada por el factor "y" (mm); k_c es un factor variable según el tipo de cemento (Tabla 1); f_c es la resistencia media a la compresión (MPa); k_{fc} es el factor variable a la resistencia a la compresión axial del concreto (Tabla 1); t es la edad (años); ad es la proporción de adición puzolánica (% en relación a la masa de cemento); k_{ad} es el factor variable referente a las adiciones puzolánicas del concreto (Tabla 1); CO_2 es la proporción de CO_2 de la atmósfera (%); k_{CO_2} es el factor variable referente a la proporción de CO_2 del ambiente (Tabla 1); HR es la media del ambiente (%*0.01); k_{ur} es el factor variable referente a la HR (Tabla 1); y k_{ce} es el factor variable referente a la exposición a la lluvia (Tabla 2).

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40+f_c}\right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60+f_c}\right) + \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR-0,58)^2}{100+f_c}\right) \right] \cdot k_{ce} \quad (1)$$

Tabla 1. Coeficientes del modelo Possan (2010) por tipo de cemento

Tipos de cemento	Características del concreto			Características del ambiente	
	Cemento	f_c	Adición	CO_2	HR
	(k_c)	(k_{fc})	(k_{ad})	(k_{CO_2})	(k_{ur})
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Fuente: Possan, 2010.

Tabla 2. Coeficientes del modelo Possan (2010) en función de las condiciones de exposición

Tipo de exposición	k_{ce}
Ambiente interior protegido de la lluvia	1,3
Ambiente externo protegido de la lluvia	1
Ambiente externo desprotegido de la lluvia	0,65

Fuente: Possan, 2010.

2.1.2 Modelo de Ekolu (2018)

El modelo matemático de Ekolu (2018) considera varios parámetros relacionados a la carbonatación, como la HR y la temperatura del ambiente, la concentración de CO_2 , la protección

de la estructura y la incidencia de lluvia, y estima la profundidad de carbonatación a partir de cinco ecuaciones aplicadas en secuencia. La profundidad de carbonatación está representada por el factor "y" (mm); e_h es el coeficiente relacional referente a HR; e_s es el coeficiente relacional referente a la resistencia a la compresión del concreto; e_{co} es el coeficiente relacional referente a la concentración de CO₂ en el ambiente; $F_{c(t)}$ es la función de crecimiento de la resistencia del concreto; t es el tiempo de exposición del concreto (años); g es el factor dependiente del tipo de cemento; y RH es la HR media del ambiente (%).

$$y = e_h \cdot e_s \cdot e_{co} \cdot 1000 \cdot F_{c(t)}^g \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

$$e_h = 16 \cdot \left(\frac{RH-35}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{1,5} \rightarrow 50\% \leq RH \leq 80\% \quad (3)$$

$$e_s = \begin{cases} 1,0 \rightarrow \text{Exposição externa protegida} \\ f_{c28}^{-0,2} \rightarrow \text{Exposição externa desprotegida} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_{co} = \begin{cases} \alpha f_{c28}^r \rightarrow 20 < f_c < 60 \text{MPa} \\ 1,0 \rightarrow f_c > 60 \text{MPa} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_{c(t)} = \frac{t}{a+bt} \cdot f_c \rightarrow f_c = f_{c28} \text{ ou } f_{cbn} \quad (6)$$

Para que se encuentre el " e_{co} ", se utiliza la ecuación 5, insertando, si necesario, la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días de curado (f_{c28}) y los respectivos coeficientes de corrección " α " y " r " de la Tabla 3. $F_{c(t)}$ se obtiene mediante la ecuación 6, y sus coeficientes "a" y "b" (Tabla 4) dependen de los valores de resistencia del concreto considerados (f_{c28} , considerada la resistencia del concreto a los 28 días, y f_{cbn} , considerada la resistencia del concreto a largo plazo), así como las edades del concreto considerado. Los coeficientes "g" aplicados en la ecuación 2 se deben consultar en la Tabla 5.

Tabla 3. Coeficientes de Ekolu (2018) para la ecuación de e_{co}

Coeficientes	Concentración de CO ₂ de la atmósfera (ppm)				
	200	300	500	1000	2000
α	1,40	1,00	2,50	4,50	14,00
r	-0,25	0,00	-0,25	-0,40	-0,67

Fuente: Ekolu, 2018.

Tabla 4. Coeficientes de Ekolu (2018) para la ecuación de $F_{c(t)}$

Resistencia a la compresión	Edad del concreto	a	b
f_{c28}	$t < 6$ años	0,35	$0,6 - t^{0,5}/50$
	$t > 6$ años	$0,15t$	$0,5 - t^{0,5}/50$
f_{cbn}	$t < 15$ años	0,35	$1,15 - t^{0,6}/50$
	$t > 15$ años	$0,15t$	$0,95 - t^{0,6}/50$

Fuente: Ekolu, 2018.

Tabla 5. Coeficientes de Ekolu (2018) para la ecuación de g

Materiales suplementarios del cemento (MSC)	Tipos de cemento*	Factor de conductancia "g"
20% (MSC)	CEM I, CEM II/A	-1,5

30% ceniza volante	CEM II/B, CEM IV/A	-1,4
50% escoria	CEM III/A	
* Según la norma británica BS EN 197-1		

Fuente: Ekolu, 2018.

2.1.3 Modelo de Ho e Lewis (1987)

El modelo de Ho y Lewis (1987) es una optimización del modelo de Tuutti (1982), con un parámetro para la carbonatación inicial agregado en la ecuación, como se observa en la ecuación 8. La profundidad carbonatada está representada por el factor e_c (mm); e_0 es la profundidad de carbonatación inicial (mm); k es el coeficiente de carbonatación (mm/ano)^{0,5}; y t es el tiempo (años).

$$e_c = e_0 + k\sqrt{t} \quad (7)$$

El modelo de Ho y Lewis (1987) no informa cómo determinar el coeficiente de carbonatación (k). Así, se desarrollaron diferentes propuestas para la determinación de ese coeficiente, como el modelo de Helene (1997), que tiene en cuenta el tipo de cemento utilizado, la concentración de CO₂ en el ambiente y la resistencia a la compresión del concreto (ecuaciones 8, 9 y 10). El coeficiente de carbonatación está representado por el factor k (mm/ano)^{0,5}; fck es la resistencia a la compresión (MPa); y CCO_2 es la concentración de CO₂ (%).

Concretos en general (ecuación 9):

$$k = (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (8)$$

Concretos con cemento puzolánico (ecuación 10):

$$k = 1,1 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (9)$$

Concretos con cemento de alto horno (ecuación 11):

$$k = 1,2 \cdot (21,46617 - 0,35765 \cdot fck) \cdot \sqrt{CCO_2} \quad (10)$$

2.1.4 Modelo de Bob e Affana (1993)

El modelo de Bob y Affana (1993) también se basa en el modelo desarrollado por Tuutti (1982), pero los autores se dieron cuenta de que la profundidad de carbonatación del concreto estaba relacionada con más factores, como la HR del aire, el tipo de cemento y la resistencia a la compresión del concreto. El modelo se presenta en la ecuación (11). La profundidad de carbonatación está representada por el factor "y" (mm); c es el coeficiente del tipo de cemento (Tabla 6); k es el coeficiente dependiente de la HR del aire (Tabla 6); fc es la resistencia a la compresión del concreto (MPa); t es el tiempo (años); y d es el coeficiente referente a la cantidad de CO₂ (Tabla 6).

$$y = 150 \cdot \left(\frac{c \cdot k \cdot d}{fc}\right) \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

Tabla 6. Coeficientes *k*, *d* y *c* del modelo Bob e Affana (1993)

Humedad relativa	<i>k</i>
HR ≤ 60	1,0
70 ≤ HR ≤ 75	0,7
80 ≤ HR ≤ 85	0,5
HR ≥ 90	0,3
Cantidad de CO₂	<i>d</i>
CO ₂ ≤ 0,03%	1,0
0,03 < CO ₂ ≤ 0,1%	2,0
Tipo de cemento	<i>c</i>
Cemento Portland CP40 y CP45	0,8
Cemento Portland CP50 y CP55	1,0
Cemento Portland + 15% de adiciones minerales	1,2
Cemento Portland + 30% de adiciones minerales	1,4
Cemento Portland + 50% de adiciones minerales	2,0

Fuente: Bob y Affana, 1993.

2.2 Base de datos

Para la creación de la base de datos se realizó una búsqueda bibliográfica en las literaturas nacional brasileña e internacional. A partir de esos trabajos, que evaluaron diferentes muestras de concreto bajo los efectos de la carbonatación natural, se seleccionaron un total de 300 datos. Posteriormente, con ese grupo de datos, se realizó una nueva selección de los datos que efectivamente podrían ser utilizados en los modelos matemáticos de carbonatación utilizados en este trabajo, mencionados en el ítem 3.1. A partir de esos datos de diferentes concretos, se utilizaron 24 para el desarrollo del presente trabajo, presentados en la Tabla 7, donde el término TE corresponde al tiempo de exposición y *ce*, a la profundidad carbonatada.

Tabla 7. Base de datos

Datos	TE (años)	a/c	Cemento	fck 28 (MPa)	CO₂ (%)	HR (%)	Exposición	ec (mm)
Possan (2010)	7,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepll	12,01
	12,00	0,80	CP V	19,80	0,035	0,70	aepll	15,1
Pauletti (2009)	2,50	0,40	CP I	38,96	0,071	0,70	aedll	1,31
	4,83	0,40	CP I	38,96	0,071	0,70	aedll	2,00
Tasca (2012)	2,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipll	0,92
	4,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipll	1,41
	14,00	0,55	CP V	45,90	0,035	0,65	aipll	6,35
Nardino et al. (2018)	3,33	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipll	6,00
	6,41	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipll	8,10
	7,80	0,61	CP V	30,00	0,053	0,70*	aipll	7,44
Rozière et al. (2009)	1,00	0,63	CP V*	47,80	0,053	0,50	aedll*	1,20
	1,00	0,63	CP V*	36,20	0,053	0,50	aedll*	10,90
Ribeiro et al.	10,00	0,65	CP V	32,30	0,015	0,55	aedll	11,90

(2018)	10,00	0,44	CP II F	54,20	0,015	0,55	aedll	3,00
Sanjuan et al.	2,00	0,69	CP V	17,00	0,030	0,50	aipll	7,00
(2003)	2,00	0,49	CP V	28,00	0,030	0,50	aipll	5,00
	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aedll	7,56
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	12,86
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	13,89
Ferreira	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	13,57
(2013)	3,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	10,00
	7,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	15,36
	9,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	16,80
	10,00	0,55	CP II F	24,8	0,034	0,65	aepll	15,96

HR: humedad relativa; aepll: ambiente exterior protegido de la lluvia; aedll: ambiente exterior desprotegido de la lluvia; aipll: ambiente interior protegido de la lluvia; TE: tiempo de exposición; ec: profundidad carbonatada; *dato estimado.

2.3 Comparación de los modelos y análisis de sensibilidad

Se realizó una comparación de la profundidad de carbonatación real (mm) en relación a la profundidad de carbonatación estimada, y se cuantificó un error (mm y %). Además, se determinó el nivel de sensibilidad de los modelos, teniendo en cuenta tres factores: resistencia a la compresión (MPa); concentración de CO₂ en el ambiente (%); HR del ambiente (%). A partir de esos criterios, se realizó una simulación de escenarios de carbonatación natural, en los que variaron en proporción los factores, mientras que otras variables permanecieron fijas. Los factores estipulados para los escenarios se definieron con base en las informaciones obtenidas en la base de datos. Las profundidades de carbonatación se delimitaron por un período de 50 años. Teniendo en cuenta esos factores, se determinaron tres escenarios, los cuales se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Descripción de los escenarios A, B y C

Escenario A: varía la resistencia a la compresión a los 28 días				
Resistencia a la compresión (MPa)	40		20	
Humedad relativa (%)	65		65	
Dióxido de carbono (%)	0,035		0,035	
Tipo de ambiente	Interior		Interior	
Tipo de cemento	CP V		CP V	
Escenario B: varía el dióxido de carbono del medio ambiente				
Resistencia a la compresión (MPa)	40		40	
Humedad relativa (%)	65		65	
Dióxido de carbono (%)	0,03		0,07	
Tipo de ambiente	Interior		Interior	
Tipo de cemento	CP V		CP V	
Escenario C: varía la humedad relativa del medio ambiente				
Resistencia a la compresión (MPa)	40	40	40	40
Humedad relativa (%)	30	50	70	90
Dióxido de carbono (%)	0,035	0,035	0,035	0,035
Tipo de ambiente	Interior	Interior	Interior	Interior
Tipo de cemento	CP V	CP V	CP V	CP V

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 1 (a) muestra que existe una tendencia en la que generen los modelos resultados diferentes a los observados en los experimentos. Esas observaciones son más explícitas para el modelo de Bob y Affana (1993), que sobrestimó las profundidades de carbonatación, y el modelo de Ho y Lewis (1987), que las subestimó.

Los datos presentados en la Figura 1 (b) permiten comparar las profundidades estimadas por cada modelo, en relación a las profundidades reales medidas.

La línea roja punteada representa resultados iguales para los valores estimados y obtenidos experimentalmente: los puntos por encima de la línea representan valores sobreestimados por el modelo, mientras los valores debajo de la línea representan estimaciones subestimadas para la profundidad de carbonatación.

Se puede notar que el modelo de Ho y Lewis (1987) resulta en valores que subestiman más evidentemente las profundidades y que el modelo de Bob y Affana (1993) las sobreestima. Los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018), por otro lado, se acercan a la línea punteada, ya que los valores estimados son más consistentes con los obtenidos en los experimentos, y subestiman la profundidad de carbonatación.

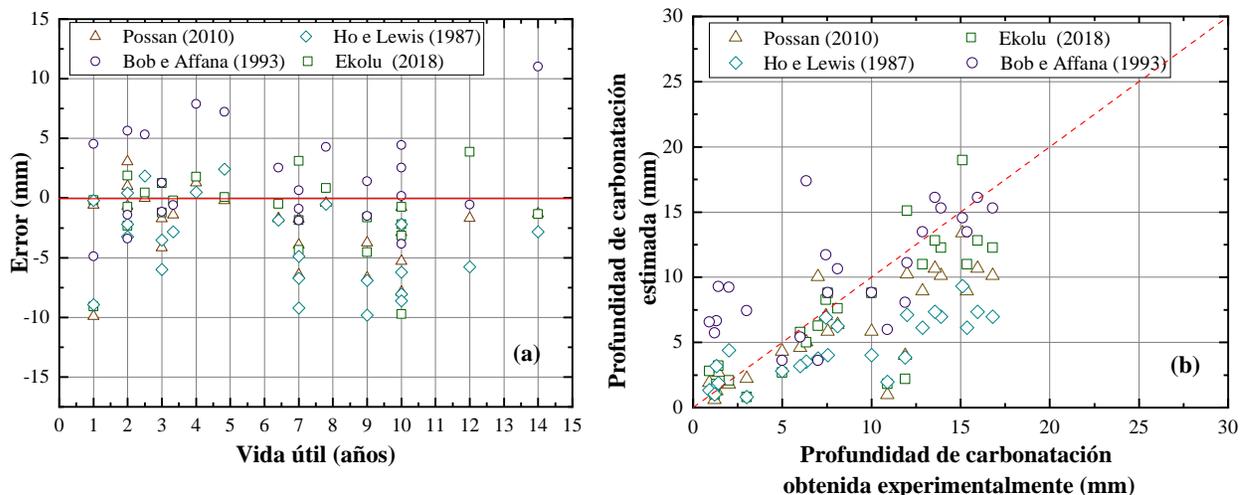


Figura 1. Errores para las profundidades de carbonatación en función del tiempo (a) y comparación entre la profundidad de carbonatación estimada y la obtenida experimentalmente (b)

La Figura 2 (a) contiene los resultados del análisis de sensibilidad de los modelos con respecto a la resistencia a la compresión, considerando valores de 20 y 40 MPa en el proceso de carbonatación natural durante un período de 50 años. En esa figura se presentan las profundidades de carbonatación y el tiempo de VU, siendo indicada la cobertura mínima de 25 mm estipulada por la norma brasileña NBR 6118 (2014) para las estructuras en ambiente urbano (clase de agresividad II, moderada).

En todos los modelos del escenario A, el crecimiento de la resistencia a la compresión del concreto resulta en menores profundidades de carbonatación. Ese comportamiento es consistente con el predicho en la literatura, ya que menores relaciones agua/concreto están directamente relacionadas con la reducción de la porosidad de la matriz, lo que reduce la profundidad de carbonatación y es un factor determinante de la resistencia del concreto (Tuutti, 1982; Ho y Lewis, 1987; Kulakowski, 2002).

La reducción de la profundidad de carbonatación provocada por el aumento de la resistencia a la compresión de concretos de 20 a 40 MPa, considerándose resultados para el mismo período de

tiempo, es de aproximadamente el 68,55%, 70,3%, 49,97% y 50% para los modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho y Lewis (1987), Bob y Affana (1993), respectivamente. Esos valores se obtienen fijándose las variables de las fórmulas de cada método, variándose solo la resistencia a la compresión. Eso muestra que el factor de resistencia a la compresión ejerce mayor influencia en las profundidades de carbonatación estimadas por los modelos de Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993). Además, los modelos de Possan (2010) y Bob y Affana (1993) predicen que el concreto de 20 MPa no conseguiría cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas para el escenario A. En cuanto a los demás modelos, el concreto de 20 MPa ya cumpliría ese requisito.

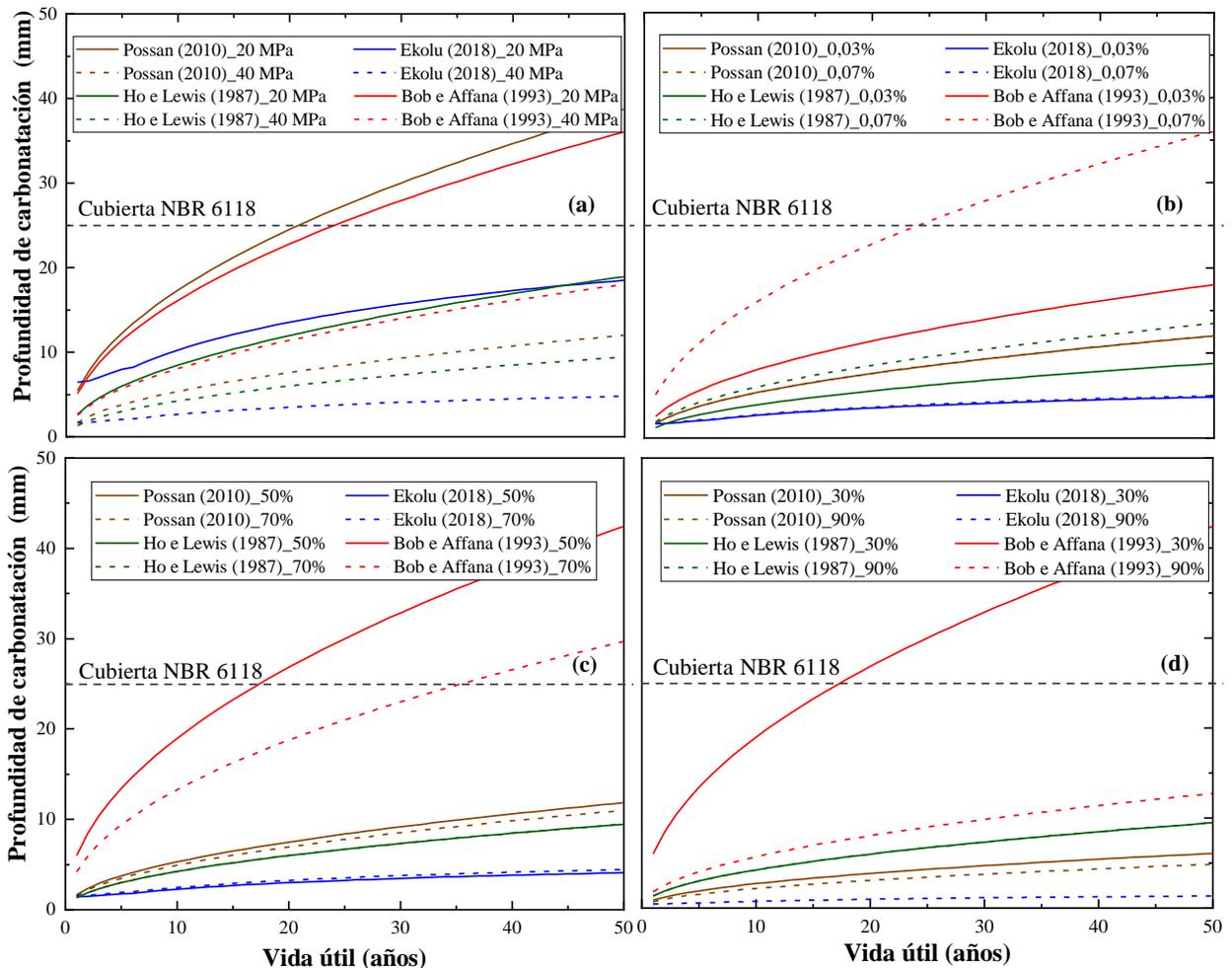


Figura 2. Tiempo de vida útil y profundidad de carbonatación en relación a la resistencia a la compresión. Escenario A: (a) dióxido de carbono en el medio ambiente; escenario B: (b) humedad relativa del 50% y el 70%; escenario C: (c) humedad relativa del 30% y el 90%; escenario C: (d).

La Figura 2 (b) muestra la sensibilidad de los modelos en relación a la proporción de CO₂ presente en el ambiente. Los niveles de CO₂ se delimitaron a partir de los valores obtenidos en la base de datos y en las definiciones presentadas en el trabajo de Possan (2010). Se estipularon, entonces, concentraciones del 0,03% y 0,07% en el proceso de carbonatación natural durante el período de 50 años. Pires (2016) presenta la concentración de CO₂ como uno de los factores intervinientes en el proceso de carbonatación del concreto y Cadore (2008) sugiere que la velocidad de penetración del frente de carbonatación está directamente relacionada con la concentración de CO₂ en el

ambiente, es decir, se eleva la velocidad de la carbonatación con el aumento de la concentración de CO₂.

Se observa en la Figura 2 (b) que, aunque la carbonatación crezca con la elevación de los niveles de CO₂, en los modelos de Possan (2010) y Ho y Lewis (1987) ese crecimiento se muestra menor. El incremento de la profundidad de carbonatación provocada por el crecimiento del nivel de CO₂ del ambiente, considerándose sus promedios, es de aproximadamente el 0,17%, 2,89%, 53,84% y 100% para los modelos de Possan (2010), Ekolu (2018), Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) respectivamente. Ese resultado indica que el factor CO₂ de los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018) ejercen menos influencia en las profundidades de carbonatación estimadas para el escenario B, en comparación con los otros modelos mencionados. El modelo de Bob y Affana (1993) sugiere que, en ambientes con el 0,07% de CO₂, el concreto no conseguiría cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas para el escenario B.

La Figura 2 (c) ilustra la sensibilidad a la HR ambiental en el proceso de carbonatación natural durante 50 años. Las HR seleccionadas son valores extremos encontrados en la literatura para los procesos de carbonatación natural. Esas proporciones fueron seleccionadas inicialmente porque son valores extremos encontrados en la base de datos de carbonatación natural construida a partir de la literatura (Pauletti, 2009; Tasca, 2012; Rozière, 2009; Nardino, 2019).

En el escenario C, se verifica que el aumento de la HR del ambiente resulta en una reducción de la profundidad de carbonatación para los modelos de Possan (2010) y Bob y Affana (1993). Sin embargo, mientras el modelo de Possan (2010) presenta una disminución del 7,16% en términos de promedio, el de Bob y Affana (1993) muestra una reducción del 30%. Eso sugiere que el método de Bob y Affana (1993) tiene una mayor sensibilidad a esa variable. En el modelo de Ekolu (2018) ocurre un crecimiento en la profundidad de carbonatación del 8,44%, considerando los promedios. En el modelo de Ho y Lewis (1987), por otro lado, los valores de carbonatación permanecen sin cambios con el aumento del 20% en la HR. Eso se explica debido a que el modelo de Ho y Lewis (1987) no posee entrada de datos para la HR, por lo tanto la ecuación es insensible a ese factor.

La HR del ambiente es un factor relevante para el proceso de carbonatación y se la debe contabilizar directa o indirectamente en los modelos de predicción de la VU por carbonatación natural. En ese fenómeno, el agua presente en los poros es responsable de disolver el CO₂, formando el ácido carbónico (H₂CO₃) y Ca(OH)₂, producto de la hidratación del cemento. El resultado es la formación de CaCO₃ (Pauletti, 2009). El volumen y la composición del agua de los poros están influenciados por factores como la relación agua/cemento, el tiempo de curado, la temperatura e, incluso, la HR del ambiente, un factor evaluado aquí (Vieira et al., 2016).

La literatura también indica que los ambientes con HR baja o excesiva no son propicios para el proceso de carbonatación natural. En la primera situación, los poros del concreto se rellenarían de agua, lo que dificultaría la penetración del CO₂ para formar H₂CO₃. Por otro lado, en condiciones de baja HR, el agua en los poros del concreto sería insuficiente para generar tasas de carbonatación natural más aceleradas, ya que se necesita de agua para generar H₂CO₃ (Félix et al., 2017; Possan et al., 2017; Elsalamawy et al., 2019; Dierfeld et al., 2020).

Considerándose el escenario C, los resultados de Possan (2010) y Bob y Affana (1993) muestran una reducción en las profundidades de carbonatación debido al crecimiento de la HR de 50 para 70%, que sugieren que la saturación de poros se predice en esos rangos de HR del ambiente. Por el contrario, los resultados obtenidos por Ekolu (2018) sugieren que esos niveles de HR favorecen el proceso de carbonatación. En este sentido, Chen et al., (2018) observaron un aumento en la profundidad de la carbonatación con un aumento de la HR del ambiente, con un pico de alrededor del 70%. Los datos adquiridos por medio del método de Ekolu (2018) en el escenario C siguen al sugerido por estos autores.

Para una mejor comprensión, se probaron los modelos de Possan (2010), Ekolu (2018) y Bob y Affana (1993) en el escenario C, considerándose el 30% y el 90% de HR. Los resultados se

muestran en la Figura 2 (d). Para el método de Possan (2010), se obtienen profundidades de carbonatación inferiores en rangos de HR del 30% y el 90% en comparación a niveles del 50% y el 70%. Mientras los promedios de profundidad de carbonatación de 50 años para el 50% y el 70% de HR son del 8,01mm y el 7,43 mm, respectivamente, para el 30% y el 90% de HR son del 4,10 mm y el 3,28 mm respectivamente. Eso indica que el modelo es sensible a condiciones de HR excesiva y baja.

Asimismo, en el modelo de Ekolu (2018), el nivel del 30% genera valores negativos, mientras que el 90% predice resultados significativamente inferiores al 50% y al 70%. Por lo tanto, se sugiere que ese modelo reconozca el rango de HR del 50% y el 70% como el más propicio para el proceso de carbonatación. Para el modelo de Bob y Affana (1993), el 30% de UR resulta en una profundidad de carbonatación igual a la condición del 50%. Eso ocurre porque el modelo de Bob y Affana (1993) no tiene como dato de entrada la HR, sino coeficientes determinados en base a los rangos de HR. De ese modo, se utiliza el mismo coeficiente (1,0) para HRs iguales o inferiores al 60%, entonces el modelo no es sensible a HRs inferiores a ese valor. Lo mismo sucede con valores iguales o superiores al 90%, con los que se adopta el coeficiente 0,3. Sin embargo, el modelo considera que para $RH \leq 60\%$ la profundidad de carbonatación es superior que la condición con $RH > 90\%$. Para el 30% se obtuvo un promedio de profundidad de carbonatación para 50 años de 28,68 mm, mientras que para el 90% se encontró un 8,6 mm. La Figura 2 (c) también indica que, según el modelo de Bob y Affana (1993), concretos en ambientes con el 50% y el 70% de HR no conseguirían cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas para el escenario C. Además, según el modelo de Bob y Affana (1993), el concreto en el ambiente con 30% de HR y condiciones como en el Escenario C, Figura 2 (d), no cumpliría con una VU de 50 años para una cubierta de 25mm.

4. CONCLUSIONES

Las principales consideraciones que se pueden tomar en base a los resultados discutidos en este artículo son:

- Los modelos matemáticos de Possan (2010) y Ekolu (2018) resultan en profundidades de carbonatación más cercanas a las encontradas en las pruebas;
- El modelo de Ho y Lewis (1987) tiende a subestimar la profundidad de carbonatación;
- El modelo de Bob y Affana (1993) tiende a sobreestimar la profundidad de carbonatación;
- Los modelos de Ho y Lewis (1987) y Bob y Affana (1993) mostraron mayor influencia del factor de resistencia a la compresión en las profundidades de carbonatación;
- El factor de concentración de CO_2 de los modelos de Possan (2010) y Ekolu (2018) ejerce la menor influencia sobre las profundidades de carbonatación estimadas para el escenario B en comparación con los demás modelos mencionados;
- El modelo de Bob y Affana (1993) presenta la mayor sensibilidad a la variable HR, mientras el modelo de Ho y Lewis (1987) no posee entrada de datos para esa variable.

Los modelos de Possan (2010) y Bob y Affana (1993) con un concreto de 20 MPa en el escenario A, el modelo de Bob y Affana (1993) con un concreto expuesto al 0,07% de CO_2 en el ambiente en el escenario B y el modelo de Bob y Affana (1993) con un concreto expuesto en un ambiente con el 30%, 50% y el 70% de HR en el escenario C no conseguirían cumplir con una VU de 50 años con una cobertura de 25 mm en las condiciones estipuladas.

Así, se observa que existe variabilidad en los resultados del frente de carbonatación estimados por los modelos seleccionados en comparación con los resultados reales de la carbonatación natural. Y esa variabilidad ocurre en mayor o menor grado dependiendo de los parámetros considerados en las ecuaciones. El análisis de sensibilidad realizado con los tres parámetros evaluados - resistencia a la compresión, concentración de CO_2 y humedad relativa del aire – muestra que esas variables

tienen una influencia significativa en los resultados emitidos por los modelos y, por lo tanto, deben ser consideradas en las ecuaciones.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ubicada en Porto Alegre, Brasil, y a su Programa de Postgrado en Ingeniería Civil: Construcción e Infraestructura (PPGCI) por proporcionar las subvenciones necesarias para el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bob, C., Afana, E. (1993). “On-site assessment of concrete carbonation”. Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Structures, RILEM, Bratislava: (Rep. Eslovaca), pp. 84–87.
- Cadore, W.C. (2008), “Estudo da camada de cobertura de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p.149.
- Chen, T., Gao, X. (2019), *Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste*. Journal of CO₂ Utilization, 34:74-86. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.034>
- Chen, Y., Liu, L., Yu, Z. (2018), *Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength*. Materials, 11, 2167. <https://doi.org/10.3390/ma11112167>
- Dierfeld, S. G. et al. (2020), *Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC*. Materials and Structures, 53:136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
- Elsalamawy, M., Mohamed, A. R., Kamal, E. M. (2019), *The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete*. Alexandria Engineering Journal 58(4):1257–1264. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.008>
- Ekolu, S. O. (2018), *Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation*. Cement and Concrete Composites. 86:40-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.006>
- Ferreira, M. B. (2013), “Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, p. 197.
- Félix, E. E., Carrazedo, R., Possan, E. (2017), *Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais*. Revista ALCONPAT, 7(3), pp. 302-316. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>
- Helene, P. (1997). “Vida útil das Estruturas de Concreto”. in: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais. Porto Alegre: RS (Brasil).
- Ho, D. W. S., Lewis, R. K. (1987), *Carbonation of concrete and its prediction*. Cement and Concrete Research, 17(3):489-504. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)
- Housty, Y. F., Wittmann, F. H. (2012), *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research, 32(12):1923-1930. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)
- Köliö, A. et al. (2014), *Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish*

- concrete buildings in changing climate. *Engineering structures*, 62-63:42-52. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.032>
- Kulakowski, M. P. (2002), “*Contribuição ao estudo de carbonatação de concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: RS (Brasil), p. 180.
- Li, D. et al. (2018), *Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures*. *Construction and Building Materials*, 167:73-81 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.127>
- Nardino, C. et al. (2019) “*Previsão de vida útil de estruturas por modelos matemáticos e carbonatação natural*” in: 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, Curitiba:PR (Brasil), pp. 300-311. <https://doi.org/10.4322/2526-7248.052>
- Pauletti, C. (2009). “*Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre:RS (Brasil), p. 285.
- Peter, M. A. et al. (2008), *Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study*. *Cement and concrete research*, 38(12):1385-1393. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.003>
- Pires, P. F. (2016). “*Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás. p. 141.
- Possan, E. (2010), “*Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 263.
- Possan, E. et al. (2017), *CO2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study*. *Case Studies in Construction Materials*, 6:147-161. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>
- Ribeiro, D. V. et. al. (2018), “*Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção*”. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, p. 426.
- Ribeiro, A. B., Santos, T., Gonçalves, A. (2018), *Performance of concrete exposed to natural carbonation: Use of the k-value concept*. *Construction and Building Materials*. 175:360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.206>
- Rozière, E., Loukili, A., Cussigh, F. (2009), *A performance based approach for durability of concrete exposed to carbonation*. *Construction and Building Materials* 23(1):190–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.006>
- Sanjuán, M., Andrade, C., Cheyrezy, M. (2003), *Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions*. *Advances in Cement Research*, 15(4):171–180. <https://doi.org/10.1680/adcr.2003.15.4.171>
- Song, H., Kwon, S. (2007), *Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure*. *Cement and Concrete Research*, 37(6):909-915. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.011>
- Tasca, M. (2012), “*Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, p. 178.
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of Steel in Concrete*”. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, p.468.
- Vieira, R. E. et al. (2016). “*Aspectos sobre a extração e composição da água de poro de pasta de cimento hidratado com vista à durabilidade do concreto armado*”. in: 7 Congresso Brasileiro de Cimento - CBCI, São Paulo: SP (Brasil), pp. 15.