

## Análisis paramétrico de la carbonatación en estructuras de hormigón por Redes Neuronales Artificiales

E. F. Félix<sup>1</sup>, R. Carrazedo<sup>1</sup>, E. Possan<sup>2</sup>

\*Autor de Contacto: [emerson.felipe.felix@gmail.com](mailto:emerson.felipe.felix@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>

Recepción: 04/08/2017 | Aceptación: 07/09/2017 | Publicación: 29/09/2017

### RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo analizar paramétricamente los principales factores que influyen en el avance de la carbonatación de las estructuras de hormigón. Por lo tanto, se desarrolló un modelo numérico utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNAs o NeuroRed), del tipo Multi-Layer Perceptron, desarrollada en lenguaje orientado a objetos C++, la cual fue probada por datos de degradación reales disponibles en la literatura. Los resultados obtenidos en el análisis paramétrico refuerzan conceptos ya conocidos en la literatura, demostrando la eficiencia de las RNAs en el estudio de la carbonatación del concreto, además aportando conocimientos en el área de patología de las construcciones.

**Palabras clave:** carbonatación del hormigón; tiempo de iniciación de la corrosión; Redes Neuronales Artificiales; modelado matemático.

**Citar como:** E. F. Félix, R. Carrazedo, E. Possan (2017), “Análisis paramétrico de la carbonatación en estructuras de hormigón por Redes Neuronales Artificiales”, Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 302-316, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>

<sup>1</sup> Universidade de Sao Paulo, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

### 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)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

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

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2018.

## Parametric analysis of carbonation process in reinforced concrete structures through Artificial Neural Networks

### ABSTRACT

The aim of this paper is parametrically analyze the main factors that influence on the progress of concrete carbonation front. Therefore, a numerical model was developed using Artificial Neural Networks (ANNs), considering the Multi-Layer Perceptron class, designed in a C++ object-oriented program. The software was fed by experimental degradation data available in the current literature. The results obtained in the parametric analysis, besides adding knowledge to the building pathology area, reinforce concepts already known in the literature, demonstrating the efficiency of ANNs in the investigation of concrete carbonation.

**Keywords:** carbonation of concrete; time-to-corrosion initiation; Artificial Neural Network; mathematical modelling.

## Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar parametricamente a influência dos principais fatores que afetam o avanço da carbonatação em estruturas de concreto. Para tal, desenvolveu-se um modelo numérico empregando Redes Neurais Artificiais (RNAs) do tipo Multi-Layer Perceptron, sendo concebido em linguagem orientada a objetos C++, o qual foi testado com dados reais de degradação disponíveis na literatura. Os resultados obtidos na análise paramétrica reforçam conceitos já conhecidos na literatura, demonstrando a eficiência de RNAs no estudo da carbonatação do concreto, além de agregar conhecimento à área de patologia das construções.

**Palavras-chave:** carbonatação do concreto; tempo de iniciação da corrosão; Redes Neurais Artificiais; modelagem matemática.

## 1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las armaduras se presenta como la falla con el mayor índice de aparición en estructuras de concreto armado (Taffese et al., 2013; Kari et al., 2014; Possan, Andrade, 2014; Andrade et al., 2017). En el Brasil, por ejemplo, este índice varía de 14 a 64% dependiendo de la región de análisis (Dal Molin, 1988; Andrade, 1992; Aranha 1994).

El ingreso del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) causa la reducción del hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente en la matriz porosa del concreto y en consecuencia de esa reducción, el pH del concreto disminuye de 13 para aproximadamente 8, dejando la armadura susceptible a la corrosión (Bakker, 1988; Chang et al., 2006). Segundo Possan et al. (2017), con el desarrollo de las ciudades, la tendencia mundial de aumento de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera trae consecuencias directas a las estructuras de concreto en ambiente urbano. Todo ello por la velocidad de carbonatación aumenta con el incremento del  $\text{CO}_2$  en el medio ambiente, afectando el ciclo de vida de las estructuras y disminuyendo la durabilidad de las mismas.

Existe en la literatura diversos trabajos que buscan explicar e modelar a carbonatación do concreto. Hasta mediados de la década de los 80, los modelos para la predicción de la profundidad de la carbonatación se obtuvieron por medio de regresiones lineales y no lineales,

considerando diferentes factores, por ejemplo, la relación agua / cemento (a / c), el tipo del aglomerante y, las condiciones de exposición (Izumi et al., 1986; Kobayashi et al., 1990).

En los años siguientes algunos investigadores, como Papadakis et al. (1991), Ishida et al. (2001) y Maekawa et al. (2003), insertan en sus modelos formulaciones físico-químicas referentes a las reacciones de hidratación de la pasta de cemento y de la disolución del  $\text{CO}_2$  en la matriz porosa del hormigón, a las cuales posibilitan la determinación del frente de carbonatación con mayor exactitud. Sin embargo, Posan (2010) cita que estos modelos poseen gran complejidad en cuanto a la resolución de las ecuaciones que rigen la difusión del  $\text{CO}_2$  en el hormigón, además de poseer parámetros de difícil obtención, por ejemplo, el coeficiente de difusión del dióxido de carbono.

La utilización de herramientas computacionales, un ejemplo las Redes Neuronales Artificiales (RNAs), se presenta como una alternativa para eludir las dificultades impuestas a modelaje de la carbonatación del concreto, debido a la capacidad de mapear y modelar problemas complejos y no lineales sin la necesidad de conocer todos los fenómenos involucrados (Braga et al., 2000, Lu et al., 2009; Kwon et al., 2010; Güneyisi et al., 2014; Taffese et al., 2015; Félix, 2016).

Teniendo en cuenta que diversas variables influyen en el avance de la carbonatación del concreto (Pauletti et al., 2007), se analiza en este estudio la influencia de la humedad relativa del aire, la concentración de  $\text{CO}_2$ , la aparición del concreto, el tipo de cemento, la concentración de adiciones, las condiciones de exposición a la lluvia y la resistencia a la compresión del concreto sobre el fenómeno de la carbonatación. Para ello, se emplea un modelo de predicción de la profundidad de carbonatación del concreto obtenido por medio de RNAs del tipo *Multi-Layer Perceptron* y el algoritmo de entrenamiento *Backpropagation*.

Los resultados encontrados demuestran la potencialidad de las RNAs frente al modelaje de la profundidad de carbonatación del concreto, las cuales se presentan como herramientas potencial para la modelaje de la degradación de estructuras de concreto, corroborando con los estudios del área de patología de las construcciones.

## 2. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

La carbonatación es un fenómeno físico-químico que provoca algunas alteraciones en el concreto, por ejemplo, reducción de la permeabilidad y de la alcalinidad y, cuando en el concreto armado, la corrosión de las armaduras (Neville, 1997). De acuerdo con Vesikari (1988) e Hamada (1969) la profundidad de carbonatación del concreto aumenta gradualmente con el tiempo (Figura 1) siendo su desarrollo en función de varios parámetros intrínsecos del concreto y del medio ambiente.

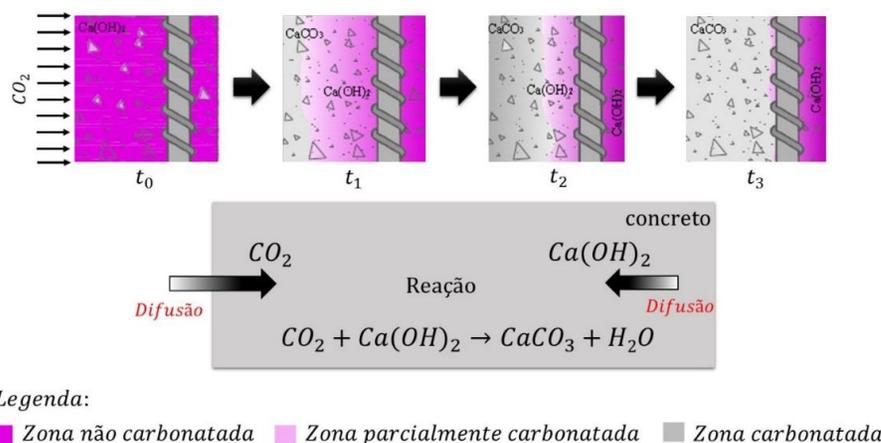


Figura 1. Representación esquemática del avance de la carbonatación del hormigón. Adaptación de Posan (2010).

Existen diversos trabajos en la literatura donde la carbonatación y sus factores de influencia son descritos, existiendo un amplio referencial teórico acerca del tema (Hamada, 1969; Parrot, 1987; Helene, 1993; Houst et al., 2002; Pauletti et al., 2007; Possan 2010; Talukdar et al., 2012). Pauletti et al. (2007) y Possan (2010) citan que, de manera general, los parámetros que influyen en la carbonatación son relacionados a las: (i) condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa del aire y concentración de CO<sub>2</sub>; (ii) características del concreto: composición de la pasta, calidad de su ejecución, concentración de las adiciones, condiciones de cura e composición química do aglomerante; e (iii) condiciones de exposición: ambiente interno, externo y protección a la lluvia.

Estos factores deben ser tomados en consideración tanto en el estado del fenómeno de la carbonatación como en su modelaje, de manera de considerar la contribución de todos los parámetros correlacionados con el problema. En este contexto, el presente trabajo, analiza un modelo de estimación de la profundidad de carbonatación del concreto obtenido vía RNAs, que tiene como variables de entrada la concentración de CO<sub>2</sub>, humedad relativa, resistencia a la compresión del concreto, tipo de cemento, condición de exposición a la lluvia, concentración de adiciones y la edad del concreto.

### 3. MODELO DE PREVISIÓN DA CARBONATAÇÃO VIA RNA'S

La metodología utilizada en el presente estudio se divide en dos etapas, siendo: i) Desarrollo de un modelo de predicción de la carbonatación del concreto vía RNAs; y, ii) Análisis paramétrico de las variables del modelo sobre el comportamiento de la carbonatación del concreto. En la secuencia cada una de las etapas es brevemente descrita.

#### 3.1 Desarrollo del modelo vía RNAs

El modelo de predicción da carbonatación del concreto fue obtenido por medio del entrenamiento de RNAs del tipo *Multi-Layer Perceptron*, utilizando el algoritmo de entrenamiento *Backpropagation Momentum*. La metodología usada para la obtención del modelo de carbonatación del concreto es presentada en forma de flujograma en la Figura 2.

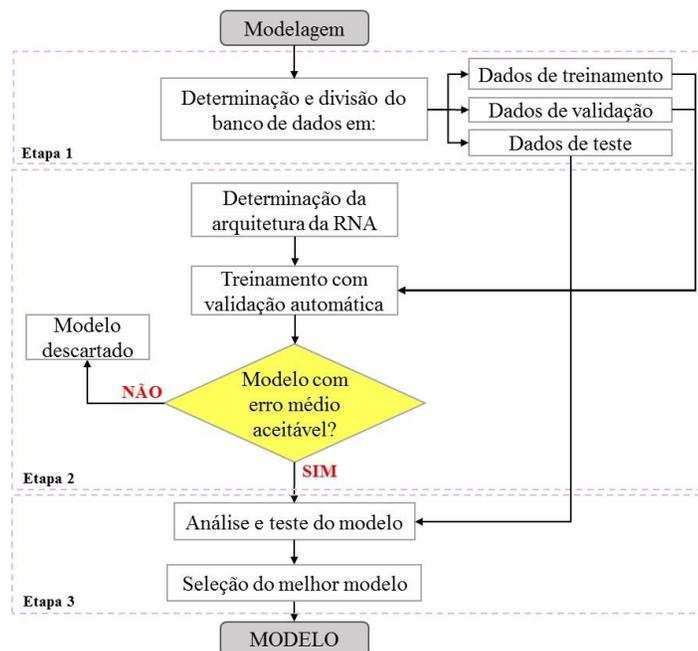


Figura 2. Flujograma referente al modelaje de la profundidad de carbonatación vía RNAs.

En la primera etapa fue realizado el montaje de un banco de datos, con vistas a abarcar las variables de entrada en sus diferentes niveles (concentración de CO<sub>2</sub>, humedad relativa, resistencia a compresión, tipo de cemento, condición de exposición a lluvia, concentración de adiciones y la edad del concreto). Este fue compuesto por informaciones obtenidas de ensayos experimentales de Meira et al. (2006) y Vieira et al. (2009) y datos del grupo focal de Possan (2010), siendo utilizados 179 y 100 datos, respectivamente.

Para que fuera posible realizar el modelaje utilizando las RNAs fue necesario convertir y/o representar todas las variables en cifras, como en el caso de las variables de entrada: tipo de cemento (CP II-E, CP II-F, CP II-Z, CP III, CP IV e CP V ARI), siendo estos enumerados en orden creciente de 1 a 6. A condición de exposición de ambiente interno protegido de la lluvia, externo protegido de la lluvia y externo desprotegido de la lluvia, fue representada, respectivamente, por 1.30, 1.00 y 0.65, según lo determinado en Possan (2010). Este proceso posibilita también la definición del dominio de aplicabilidad del modelo, el cual es presentado en la Tabla 1.

Tabla 1. Dominio de las variables del banco de datos.

Variable	Dominio
Tipo de cemento	[CP II-F <sup>1</sup> ; CP II-Z <sup>2</sup> ; CP II-Z <sup>3</sup> ; CP III <sup>4</sup> ; CP IV <sup>5</sup> ; CP V <sup>6</sup> ]
Humedad Relativa do ar (%)	[30 - 90]
Factor de exposición de la estructura	[1.30, 1.00, 0.65]
Concentración de adición de sílice activa (%)	[0-30]
Concentración de CO <sub>2</sub> en el ambiente (%)	[0.01-3.0]
Resistencia a compresión (MPa)	[20-90]
Tiempo (años)	[0-60]

<sup>1</sup> CP II F: cemento Portland compuesto con filler - NBR 11578. Nao há equivalente na ASTM.

<sup>2</sup> CP II Z: cemento Portland compuesto con pozolana - NBR 11578. *Pozzolan-modified Portland* - ASTM C 595.

<sup>3</sup> CP II E: cemento Portland compuesto con escoria - NBR 11578. *Slag-modified Portland* - ASTM C 595.

<sup>4</sup> CP III: cemento Portland de alto horno - NBR 5735. *Portland blastfuemace slag* - ASTM C 595.

<sup>5</sup> CP V ARI: cemento Portland de alta resistencia inicial - NBR 5733. *Portland with high early strength* - ASTM C 150.

<sup>6</sup> CP IV: cemento Portland pozoalánico - NBR 5736. *Portland pozzolan* - ASTM C 595.

La determinación de este dominio define el límite de uso del modelo, una vez que las RNAs no poseen la capacidad de extrapolar resultados, siendo posible apenas el mapeo y el aprendizaje de patrones dentro del dominio de entrenamiento (Braga et al., 2000).

En el modelaje con las RNAs es necesario hacer la división del conjunto de datos en tres subconjuntos, uno para el entrenamiento de las redes, otro para la validación y otro para la fase de prueba del modelo. La Figura 3 presenta la proporción de los datos asignados en cada subconjunto.

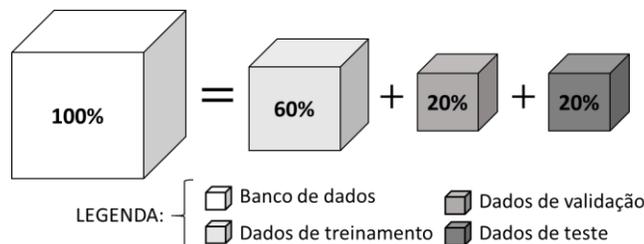


Figura 3. Proporción de los datos asignados en cada subconjunto.

Cada uno de estos subconjuntos (entrenamiento, validación y prueba) fue utilizado en una etapa do proceso de modelaje con las RNAs. El primero es responsable por presentar los pares de entradas y salidas para que la red pueda aprender. El segundo es responsable por la verificación y validación del entrenamiento de la red. Y el tercero es responsable por probar y verificar el potencial de generalización del modelo.

En la segunda etapa se realizó el entrenamiento de las RNAs diferenciadas por la topología, función de activación y nivel de aprendizaje del algoritmo de entrenamiento, según lo descrito en Félix (2016).

En este trabajo fueron creados 1200 RNAs, siendo estas diferenciadas por la tasa de aprendizaje (0.1, 0.2, 0.3 e 0.4), por el número de entradas (4, 5 y 7) (ver Figura 4), por la arquitectura interna de la red (que podría tener una o dos capas internas) y por el número de neuronas contenido en cada capa interna (de 0 a 9 neuronas). Fue realizada, por lo tanto, la combinación de todas las posibilidades de configuración de las redes (4\*3\*10\*10), totalizando 1200 redes.

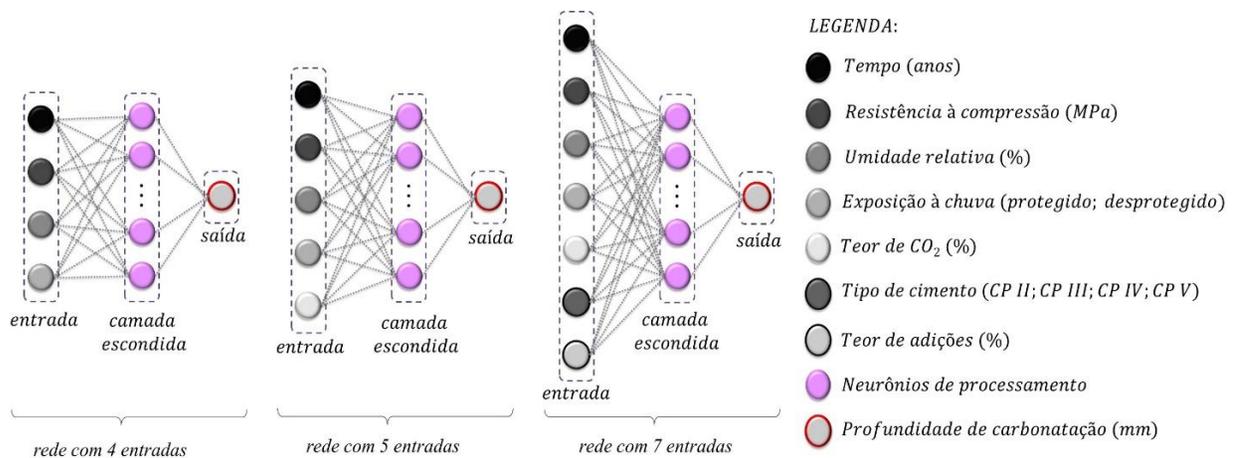


Figura 4. Configuración das RNAs entrenadas.

Para el entrenamiento de las RNAs, se usó como criterio de convergencia la raíz del error promedio cuadrático (RMSE), conforme lo presentado en (1), entre las profundidades del banco de datos y las estimadas por la red.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \tag{1}$$

Siendo que  $n$  es el número de salidas,  $x_i$  el valor dado por la red para la  $i$ -ésima salida y  $x_m$  representa el promedio de los valores de todas las salidas.

Para el entrenamiento se usó el paquete computacional Project-Yapy (Konzen et al., 2011), el cual fue desarrollado en lenguaje orientada a objetos C++.

El desempeño de las RNAs fue analizado por medio de algunos parámetros, como por ejemplo, el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), la raíz del error medio cuadrático (RMSE), el error máximo ( $E_{max}$ , mayor error presentado por la red) y el error mínimo ( $E_{min}$ , menor error presentado por la red). Estos parámetros fueron analizados tanto en la fase de entrenamiento como en la fase de validación.

Para la fase de pruebas, todos los parámetros antes citados ( $R^2$ , RMSE,  $E_{max}$  y  $E_{min}$ ) fueron nuevamente analizados, permitiendo verificar cual es el desempeño de la red. De esta forma,

todas las redes fueron probadas y ordenadas en función de su desempeño, lo que posibilita seleccionar el modelo que mejor representase el avance del frente de carbonatación del concreto. El mejor modelo posee la topología presentada en la Figura 5, conteniendo tres capas de neuronas, siendo que, en la primera están dispuestos siete neuronas que hace referencia a las variables de entrada. En la segunda capa existen cuatro neuronas, los cuales son responsables por el procesamiento de informaciones y, en la última capa se tiene la neurona referente a la salida de la red, es decir, a profundidades de carbonatación de concreto.

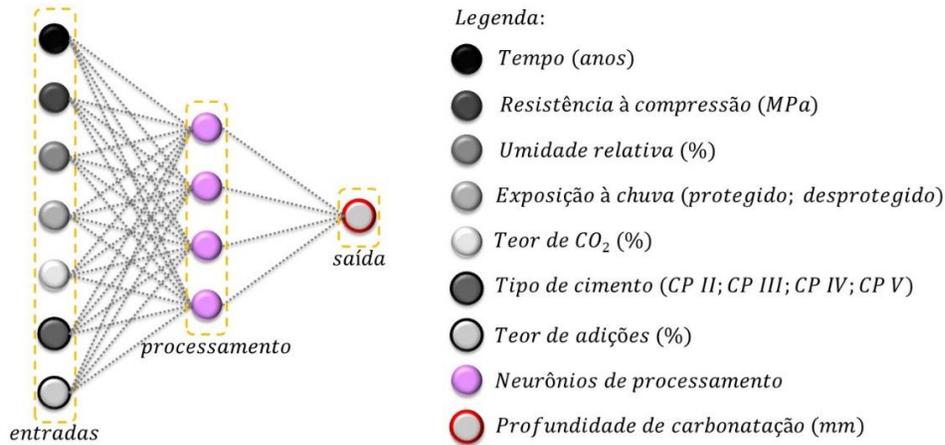


Figura 5. Topología y variables do modelo desarrollado.

A los fines de demostrar o nivel de perfección del modelo obtenido, en las Figuras 6(a) y 6(b) son presentados los gráficos de correlación entre las profundidades modeladas por el programa (profundidad modelada) y las profundidades de carbonatación natural (profundidad observada) presentados en Possan (2010).

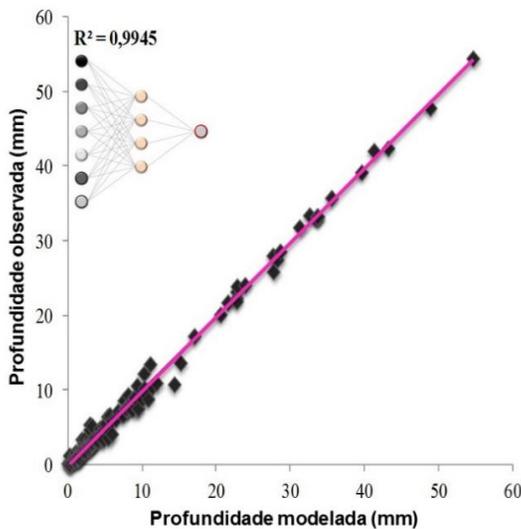


Figura 6(a). Correlación obtenida en el entrenamiento.

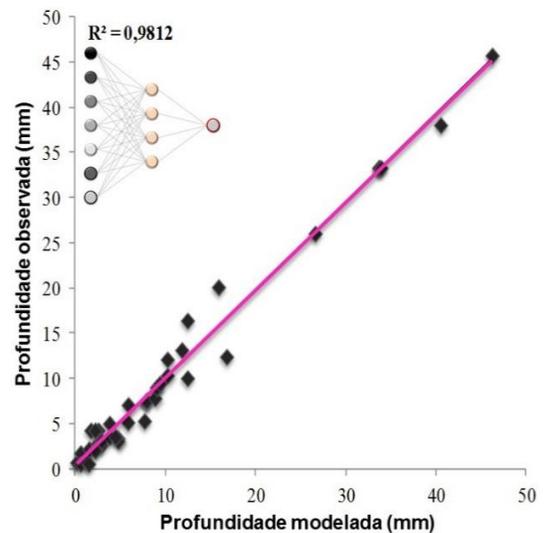


Figura 6(b). Correlación obtenida en la validación.

La descripción completa del proceso de entrenamiento de las redes y de los parámetros utilizados en el modelaje se encuentran en Félix (2016).

### 3.2 Análisis paramétrico da la carbonatación

A fin de estudiar la influencia de las variables de entrada del modelo en cuanto al comportamiento de la carbonatación del concreto, se decidió realizar un análisis paramétrico del mismo. El estudio fue dividido en cuatro análisis, considerando la influencia de una o dos variables de entrada del modelo para cada análisis, conforme lo esquematizado en la Figura 7.

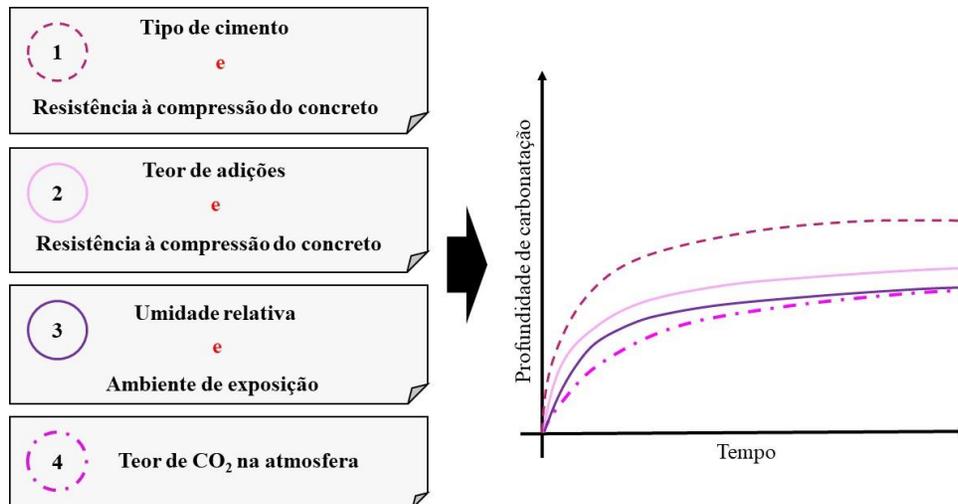


Figura 7. Factores estudiados en cada análisis paramétrico.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Comparación del modelo

Inicialmente, con el objetivo de comprobar la potencialidad del modelo desarrollado se hizo la comparación con otros modelos existentes en la literatura, confrontándolos con datos de degradación presentados en Possan (2010). En las ecuaciones (2)-(6) son presentados los modelos de Smolczyk (1976), Vesikari (1988), Bob & Afana (1993), EHE (2008) e Possan (2010), respectivamente.

$$y = a \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{10f_c}} - \frac{1}{\sqrt{10f_{clim}}} \right) \cdot \sqrt{52 \cdot t} \quad (2)$$

$$y = [26 \cdot (ac - 0.3)^2 + 1,6] \quad (3)$$

$$y = 150 \cdot \left( \frac{c \cdot k \cdot d}{f_c} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

$$y = C_{amb} \cdot C_{ar} \cdot a \cdot f_{cm}^b \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

$$y = k_c \cdot \left( \frac{20}{f_c} \right)^{k_{fc}} \cdot \left( \frac{t}{20} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ \left( \frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left( \frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left( \frac{k_{RU} \cdot (UR - 0.58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (6)$$

Donde  $y$  es la profundidad carbonatada (mm),  $a$  la velocidad de carbonatación,  $f_c$  se refiere a resistencia a la compresión del concreto (Mpa),  $f_{clim}$  valor límite de la resistencia a la compresión del concreto que puede ser carbonatada (MPa),  $t$  es el tiempo de exposición (años) y  $ac$  es la relación agua/cemento del concreto. Las otras variables son dependientes del tipo de cemento y ambiente de exposición siendo ellas definidas por cada uno de los autores por medio de tablas. Más detalles sobre las ecuaciones y su uso pueden ser obtenidos en Félix (2016).

Para demostrar la aplicabilidad del modelo desarrollado, en las Figuras 8(a)-8(d) son presentadas curvas del avance de la profundidad de carbonatación en estructuras de concreto a lo largo del tiempo, conforme los escenarios presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Escenarios de las estructuras de concreto bajo carbonatación.

Escenario	Concentración de CO <sub>2</sub> (%)	Humedad relativa (%)	Exposición a lluvia	Tipo de Cemento	Resistencia a compresión (MPa)
I	0.01	70.00	Protegido	CP II – F	30.00
II	0.01	70.00	Protegido	CP III	40.00
III	0.01	65.00	Desprotegido	CP IV	40.00
IV	0.01	65.00	Desprotegido	CP V	40.00

OBS.: En todos los escenarios la concentración de adición (en el concreto) es cero y el tiempo de análisis de 60 años.

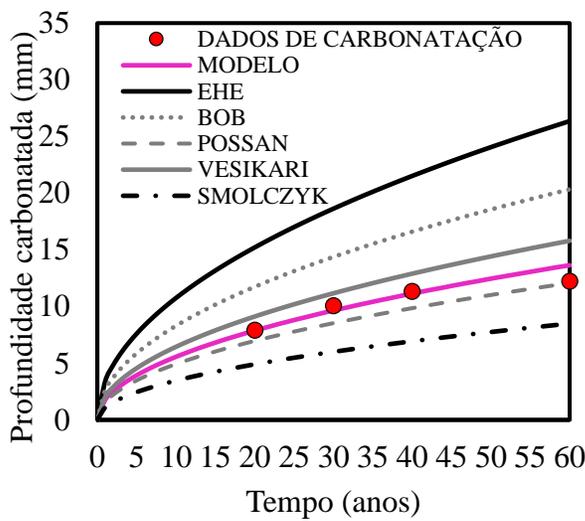


Figura 8(a). Carbonatación en el escenario I.

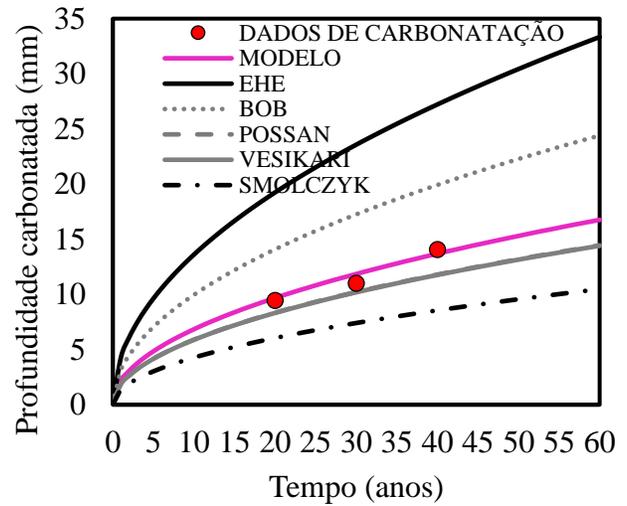


Figura 8(b). Carbonatación en el escenario II.

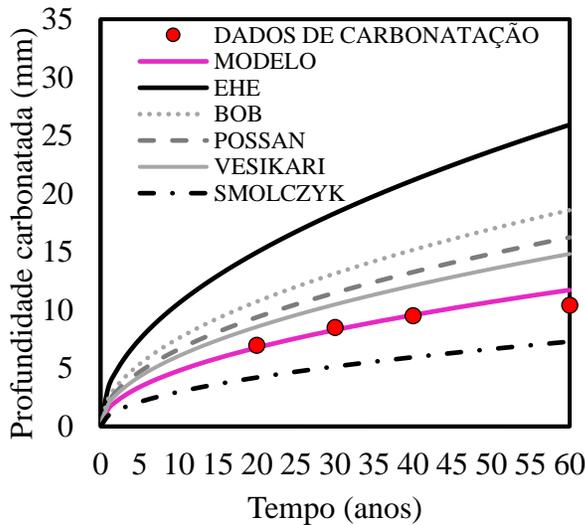


Figura 8(c). Carbonatación en el escenario III.

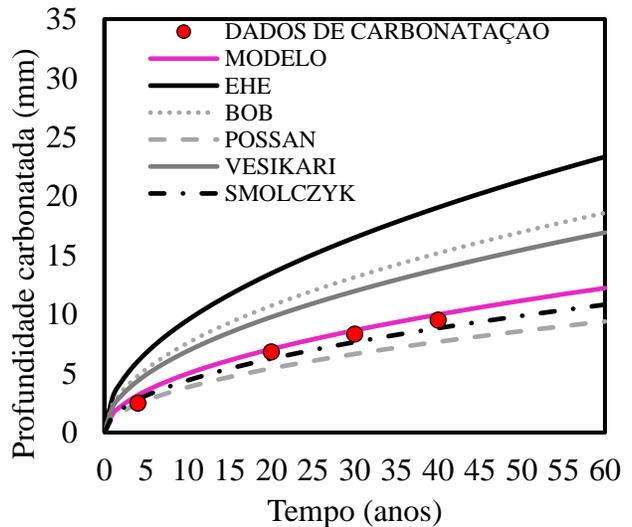


Figura 8(d). Carbonatación en el escenario IV.

Los resultados encontrados, demuestran la aplicabilidad del modelo, y que lo mismo se presenta como una herramienta eficiente para la estimación de la profundidad de carbonatación en el concreto.

#### 4.2 Análisis paramétrico

En la Figura 9 es presentada la profundidad de carbonatación del concreto (a los 50 años) obtenido por medio del modelaje con RNAs, variando el tipo de cemento y la resistencia a la compresión. Para la simulación se usó una estructura expuesta a un ambiente externo protegido de la lluvia, con 65% de humedad relativa, concentración 0.04% de CO<sub>2</sub> en el aire sin adiciones (adiciones para la producción del concreto).

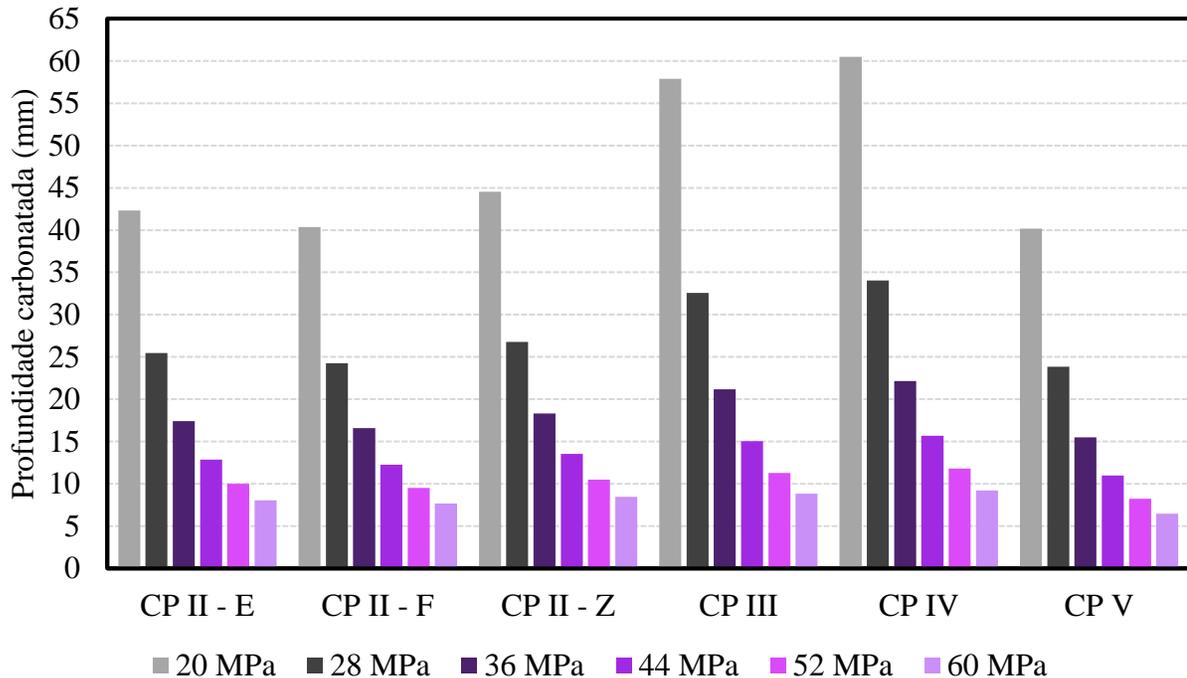


Figura 9. Variación de la profundidad de carbonatación en función del tipo de cementos y de la resistencia a compresión.

Se observa en la Figura 9 que concretos producidos con cementos CP III y CP IV presentan mayor profundidad de carbonatación, principalmente en concretos con baja resistencia a compresión. En trabajos encontrados en literatura (Jiang et al., 2000; Possan, 2010) se verifica la existencia de una influencia negativa de las adiciones en el avance del frente de carbonatación, debido a la reducción de la reserva alcalina del concreto cuando son producidos con cementos CP III y CP IV, los cuales poseen elevadas concentraciones de escoria (de 35 a 70%) y pozolana (de 15 a 50%) en sus composiciones, respectivamente. Se destaca que los cementos compuestos CP II-E y CP II-Z también poseen adiciones en su composición (escoria y pozolana, respectivamente), con ello en concentraciones menores que los cementos CP III y CP IV, lo que explica a menor profundidad carbonatada para concreto producidos con estos cementos.

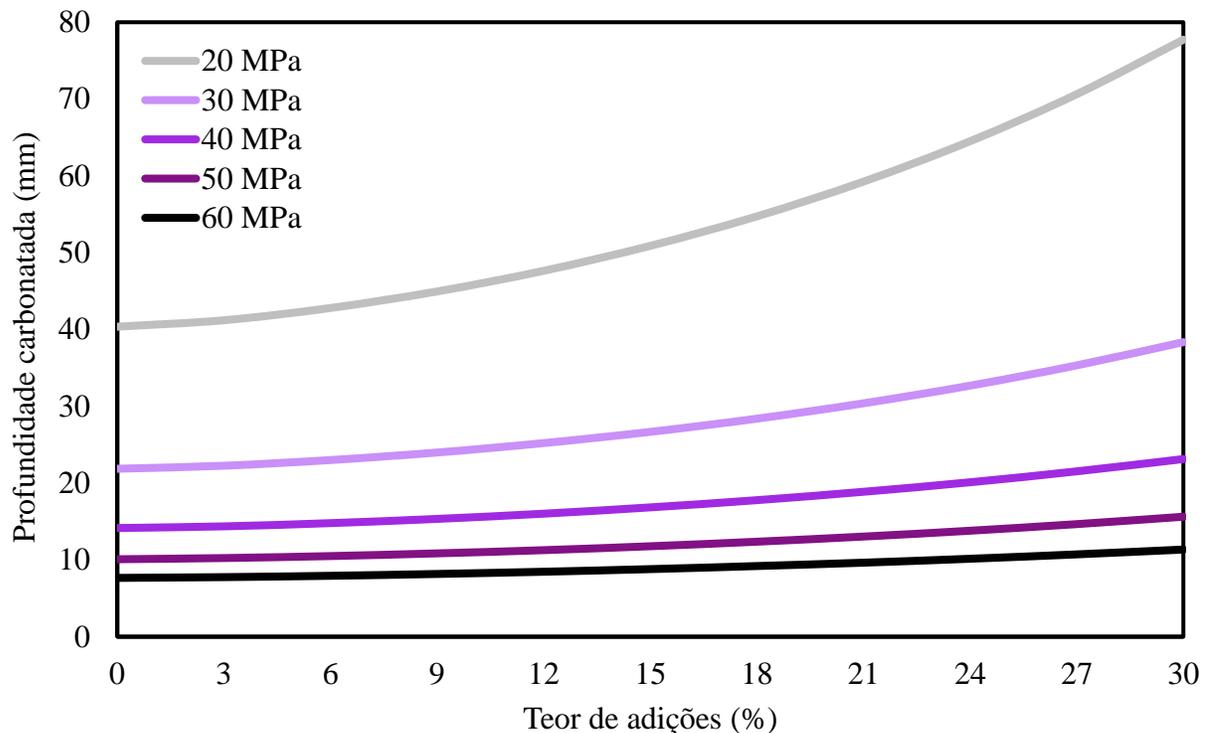


Figura 10. Variación de la profundidad de carbonatación en función de la concentración de adiciones y la resistencia a compresión.

En la Figura 10 es posible ver la influencia de la concentración de adiciones (i.e., sílice activa) en el avance de carbonatación, en el cual se constata que en concretos de resistencia superior (40, 50 o 60 MPa) la carbonatación es bastante reducida, habiendo poca influencia de la concentración de adición. Para concretos con resistencia inferior a 40 MPa, se nota que cuanto mayor la concentración de adición, mayor la profundidad carbonatada. Luego se observa en la simulación que a medida que la resistencia a compresión del concreto aumenta, la concentración de adiciones deja de influir en la profundidad de carbonatación. Kulakowski et al. (2009) relatan que en concretos de resistencias más elevadas (superior a 30 MPa), debido a la menor relación agua/aglomerante (inferior a 0.50), la porosidad es menor, habiendo dificultad de acceso del  $\text{CO}_2$  para el interior del concreto y, consecuentemente, menor profundidad de carbonatación del material, aun para concretos con baja reserva alcalina. Los autores destacan que, para concretos de resistencias superiores a 40 MPa, el avance del frente de carbonatación independientemente de las adiciones y del tipo de cemento. Ya para concretos de resistencia inferior (relación agua/aglomerante más elevada), la presencia de adiciones aumenta la profundidad carbonatada, y predomina el efecto de la reserva alcalina (Kulakowski et al., 2009).

La Figura 11 presenta la profundidad de carbonatación (a los 50 años) al variar la humedad relativa del aire y el ambiente de exposición a lluvia. Para la simulación se usó una estructura de concreto con resistencia a compresión de 30 MPa, cemento CP III, concentración 0.04 % de  $\text{CO}_2$  en el aire sin adiciones

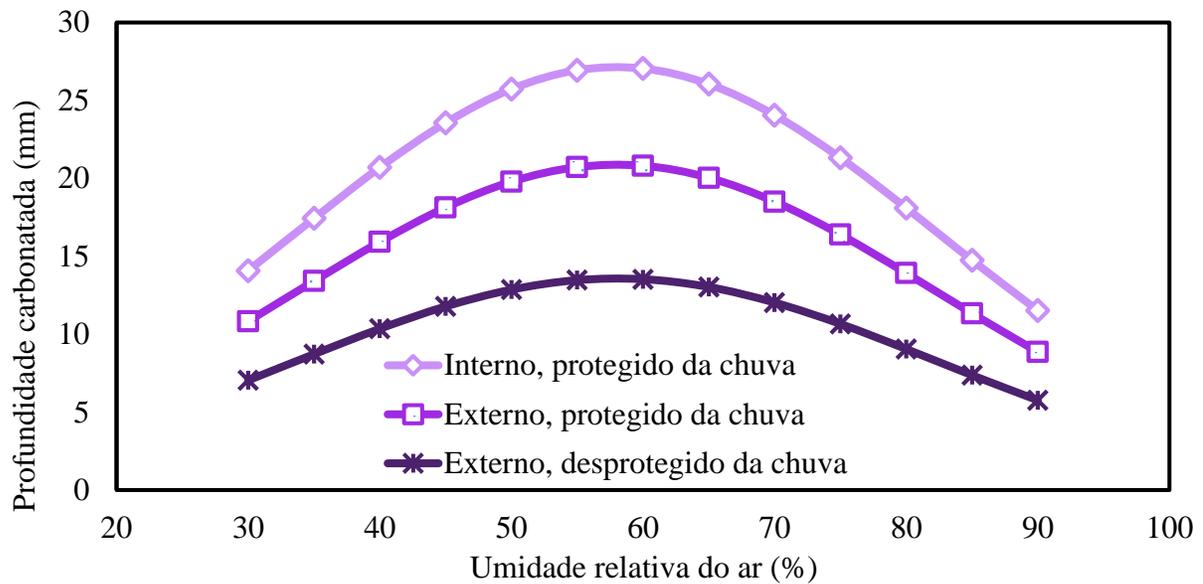


Figura 11. Carbonatação en función de la humedad relativa y del tipo de exposición.

Por medio del modelo desarrollado, se observa la Figura 11 que la carbonatación es máxima para humedad cercana a los 60%. Parrot (1987), Neville (1997) y Possan (2010) apuntan que la carbonatación alcanza su valor máximo cuando la humedad relativa se sitúa entre 50 y 80% y que la misma puede ser considerada como el factor ambiental de mayor influencia en la carbonatación. Possan et al. (2017) comprobaron la influencia de la humedad interna del concreto en la profundidad de carbonatación en una estructura real. Los autores observaron en una presa de concreto con 35 años de construcción, que cuanto mayor es la humedad interna, menor la profundidad de carbonatación observada, siendo que para humedad alrededor de 100% la carbonatación medida en campo fue nula.

En la Figura 12 es presentada la evolución de la profundidad de carbonatación en función del ambiente de exposición, siendo este diferenciado por el grado de exposición del CO<sub>2</sub> para una estructura de concreto con resistencia a la compresión de 30 MPa, cemento CP III, humedad relativa de 65%, sin adiciones y situado en ambiente externo desprotegido de la lluvia.

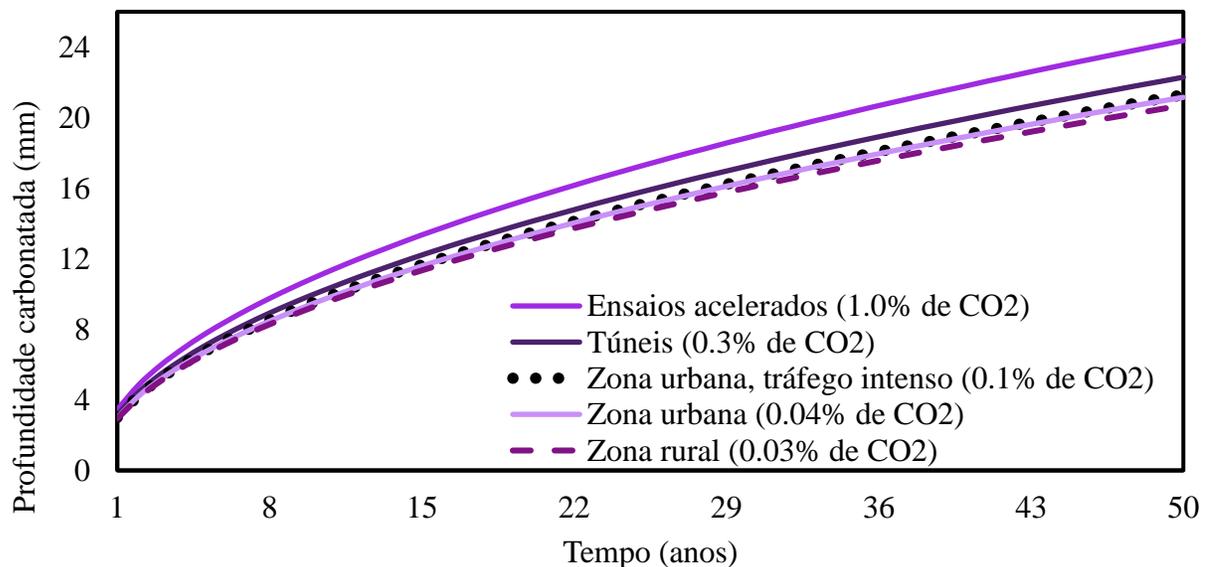


Figura 12. Profundidad de carbonatación en función de la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente.

Con los resultados, fue posible observar que cuanto mayor el grado de exposición al CO<sub>2</sub> mayor es el avance de la carbonatación del concreto a lo largo del tiempo, y que el aumento de 0.1% en el grado de exposición al CO<sub>2</sub> provoca un avance de 2.15% en la profundidad carbonatada, siendo este valor obtenido promediando las profundidades de carbonatación para los diferentes ambientes listados en la Figura 12.

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo fue presentado un modelo vía Redes Neuronales Artificiales (RNAs) para la predicción de la profundidad de carbonatación de estructuras de concreto. Los resultados encontrados demuestran la potencialidad de las redes frente al modelaje de la profundidad de carbonatación del concreto tomando en consideración los diferentes tipos de cementos comercializados en Brasil.

Las redes de tipo MLP generaron un modelo que es capaz de representar correctamente el frente de carbonatación del concreto en función de tipo de cemento utilizado, resistencia del concreto, humedad relativa del ambiente y ambiente de exposición de la estructura, demostrando la eficiencia de la técnica de modelaje utilizada.

En relación al estudio paramétrico realizado sobre el modelo desarrollado, se comprobó algunos resultados ya descritos por la literatura, por ejemplo:

1. La carbonatación decrece a medida en que se aumenta la resistencia a la compresión del concreto;
2. El tipo de cemento posee influencia secundaria en la carbonatación del concreto, una vez que la carbonatación pasa o no a ser acelerada debido a la concentración de adiciones presente en el cemento;
3. La concentración de adiciones tiene influencia en la carbonatación apenas para concretos con baja resistencia a la compresión (elevando hasta 60% la profundidad carbonatada), siendo esta reducida o eliminada en concretos con alta resistencia;
4. La exposición del concreto en ambientes con elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> (i.e., túneles, estacionamientos, ambiente urbano con tráfico intenso de vehículos, etc.) acarrea en un aumento de la carbonatación.

De esta forma, los resultados obtenidos en el análisis paramétrico demuestran la eficiencia de RNAs en el estudio de la carbonatación del concreto, agregando conocimientos al área de patología de la construcción.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El Centro de Estudios Avanzados en Seguridad de Presas (CEASB), la Fundación Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI) e la Coordinación de Mejoramiento personal de Nivel Superior (CAPES) por fomento ofrecido a la investigación.

## 7. REFERENCIAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM C 150: Standard Specification for Portland Cement. Philadelphia, 2001.
- American Society for Testing and Materials. ASTM C 595: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. Philadelphia, 2003.
- Andrade, C. (1992), “*Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosión de armaduras*”, Tradução de Antônio Carmona e Paulo Helene, Sao Paulo: PINI, p. 104.

- Andrade, J. J. O., Possan, E., Dal Molin, D. C. C. (2017), “*Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments*”, Journal of Building Pathology and Rehabilitation 6, pp. 1–8.
- Aranha P. M. (1994), “*Contribución ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11578: Cimento Portland compuesto. Rio de Janeiro, 1991.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistencia inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5735: Cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, 1991.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- Bakker, R. M. F. (1988), Initiation period. In: Schiess P. “*Corrosion of steel in concrete*”, London, Chapman and Hall, cap. 3, pp. 22-55.
- Bob, C., Afana, E. (1993), “*On-site assessment of concrete carbonation*”, Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Carbonation, RILEM, Bratislava, pp. 84–87.
- Braga, A. P., Ludemir, T. B. Carvalho, A. C. (2000), “*Redes Neuronales Artificiales: Concentración e Aplicações*”, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora.
- Chang, C. F., Chen, J. W. (2006), “*The experimental investigation of concrete carbonation depth*”, Cement and Concrete Research, V.36, pp. 1760–1767.
- Comission Permanente del Hormigón, EHE (2008), “*Instrucción de Hormigón Estructural. Ministério de obras públicas e urbanismo*”. Madrid, Espanha.
- Dal Molin, D. C. C. (1988), “*Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Felix, E. F. (2016), “*Desarrollo de software para a estimación da profundidad de carbonatación, vida útil e captura de CO<sub>2</sub> de estructuras de concreto empregando RNA's*”, Trabajo de conclusao de curso, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.
- Güneyisi, E. M., Mermerdas, K., Güneyisi, E., Gesoglu, M. (2014), “*Numerical modeling of time to corrosion induced cover cracking in reinforced concrete using soft-computing based methods*”, Materials and Structures 48, pp. 1739–1756.
- Hamada, M. (1969), “*Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion reinforcing steel*”, proceeding of the 1969 International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, v. II/4, pp. 343–369.
- Helene, P. R. L. (1993), “*Contribución ao estudo da corrosión em armaduras de concreto armado*”, Tese Livre Docencia, Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo.
- Houst, Y. F., Wittmann, F. H. (2002), “*Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*”, Cement and Concrete Research 32, pp. 1923–1930.
- Ishida, T., Maekawa, K. (2001), “*Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory*”, Concrete Library of JSCE 37, pp. 151–166.
- Izumi, I., Kita, D., Maeda, H. (1986), “*Carbonation*”, Kibodang Publication, pp. 35–88.
- Jiang, L., Lin, B., Cai, Y. (2000), “*A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete*”, Cement and Concrete Research 30, pp. 699–702.
- Kari, O. P., Puttonen, J., Skantz, E. (2014), “*Reactive transport modelling of long-term carbonation*”, Cement and Concrete Composites 52, pp. 42–53.

- Kobayashi, K., Uno, Y. (1990), “*Mechanism of carbonation of concrete*”, Concrete Library of JSCE 16, pp. 139–151.
- Konzen, P. H. A., Felix, E. F. (2011), Paquete computacional de RNAs orientado-a-objetos project-yapy. Disponível em: <<https://code.google.com/archive/p/project-yapy>>.
- Kulakowski, M. P., Pereira, F. M., Dal Molin, D. C. C. (2009), “*Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete*”, Construction and Building Materials 23, pp. 1189–1195.
- Kwon, S. J., Song, H. W. (2010), “*Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling*”, Cement and Concrete Research 40, pp. 119–127.
- Lu, C., Liu, R. (2009), “*Predicting carbonation depth of prestressed concrete under different stress states using artificial neural network*”, Advances in Artificial Neural Systems 2009, pp. 1–8.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003), “*Multi-scale modeling of concrete performance*”, Journal of Advanced Concrete Technology 1, pp. 1–126.
- Meira, G. R., Padaratz, I. J., Borba Júnior, J. C. (2006), “*Carbonatación natural de concretos: resultados de cerca de cuatro años de monitoramento*”. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Florianópolis, Antac, Porto Alegre.
- Neville, A. M. (1997), “*Propriedades do concreto*”, Sao Paulo: PINI, p. 828.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N. (1991), “*Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation*”, ACI Materials Journal 88, pp. 363–373.
- Parrot, L. J. (1987), “*A review of carbonation in reinforced concrete*”. Cement and concrete Association report.
- Pauletti, C., Possan, E., Dal Molin, D. C. C. (2007), “*Carbonatación acelerada: estudo da arte das pesquisas no Brasil*”, Ambiente Construído 7, pp. 7–20.
- Possan, E. (2010), “*Modelaje da carbonatación e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/28923>.
- Possan, E., Andrade, J. J. O. (2014) “*Markov Chains and reliability analysis for reinforced concrete structure service life*”, Materials Research, v. 17, p. 593-602.
- Possan, E., Thomaz, W. A., Aleandri, G. A., Félix, E. F., Dos Santos, A. C. P. (2017), “*CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study*”, Case Studies in Construction Materials 6, pp. 147–161.
- Smolczyk, H. G. (1969), “*Written Discussion*”, proceeding of the 1969 International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, v. II/4, pp. 369–384.
- Taffese, W. Z., Sistonen, E. (2013), “*Service life prediction of repaired structures using concrete recasting method: state-of-the-art*”, Procedia Engineering 45, pp. 1138–1144.
- Taffese, W. Z., Sistonen, E., Puttonen, J. (2015), “*CaPrM: Carbonation prediction model for reinforced concrete using machine-learning methods*”, Construction and Building Materials 100, pp. 70–82.
- Talukdar, S., Banthia, N., Grace, J. R. (2012), “*Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change – Part I: Experimental results and model development*”, Cement and Concrete Composites 34, pp. 924–930.
- Vesikari, E. (1988), “*Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement*”. Technical Research Centre of Finland, report n. 553, Finland p. 53.
- Vieira, R. M., Meira, G. R., Marques, V. M., Padilha, Jr. M. (2006), “*Carbonatación natural e acelerada concretos – influencia dos factores ambientais e do material*”. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Curitiba, Ibracon, Sao Paulo.