

Análisis da vida útil de estructuras de concreto armado bajo la acción de la corrosión uniforme por medio de un modelo con RNA acoplado al MEF

E. F. Felix*¹, T. J. Rodrigues Balabuch¹, M. Correa Posterlli¹, E. Possan², R. Carrazedo¹

*Autor de Contacto: emerson.felipe.felix@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>

Recepción: 24/08/2017 | Aceptación: 18/12/2017 | Publicación: 31/01/2018

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar y estimar la vida útil de estructuras de hormigón armado bajo la acción de corrosión uniforme. El modelado se dividió en dos etapas, iniciación y propagación. El modelado de la fase de iniciación fue realizado por medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA) y el modelado de la fase de propagación fue hecho por medio del Método de los Elementos Finitos (MEF). El acoplamiento de la RNA en el MEF posibilitó analizar y estudiar la durabilidad de estructuras de hormigón armado bajo la acción de corrosión uniforme, presentándose como una metodología alternativa para la estimación del tiempo de vida útil de estas estructuras.

Palabras clave: hormigón armado; corrosión de las armaduras; vida útil; Redes Neuronales Artificiales; Método de los Elementos Finitos.

Citar como: E. F. Felix, T. J. Rodrigues Balabuch, M. Corrêa Posterlli, E. Possan, R. Carrazedo (2018), “Análisis da vida útil de estructuras de concreto armado bajo la acción de la corrosión uniforme por medio de un modelo con RNA acoplado al MEF”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 16 – 29, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>

¹ Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo, Brasil.

² 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, Página Web: 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 tercer número del año 2018 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2018.

Service life analysis of reinforced concrete structure under uniform corrosion through ANN model coupled to the FEM

ABSTRACT

The present work intends to analyze and numerically model the corrosion process, estimating the service life of concrete structures. The modelling process was divided in two stages, initiation and propagation. The modeling of the initiation phase was carried out by Artificial Neural Networks (ANN), and the modeling of the propagation phase was done by means of Finite Element Method (FEM). The results show the efficiency of the model generated by the coupling of ANN to the FEM to analyze and study the durability of reinforced concrete structures under uniform corrosion, and the numerical model applicability to estimate the service life of reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete; reinforcement corrosion; service life; Artificial Neural Networks; Finite Element Method.

Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise numérica da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão uniforme. O processo de modelagem foi dividido em dois estágios, iniciação e propagação. A modelagem da fase de iniciação foi feita via Redes Neurais Artificiais (RNA) enquanto que a fase de propagação foi modelada através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados demonstram que o modelo gerado pelo acoplamento das RNA ao MEF, possibilita de forma eficiente, a simulação da degradação de estruturas de concreto armado devido à ação da corrosão uniforme e, a aplicabilidade da ferramenta numérica quanto a previsão da vida útil destas estruturas.

Palavras-chave: concreto armado; corrosão de armaduras; vida útil; Redes Neurais Artificiais; Método dos Elementos Finitos.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los factores para el desarrollo sustentable y el crecimiento económico de la sociedad moderna están la confiabilidad y la durabilidad de estructuras e instalaciones de infraestructura, destacando las estructuras de concreto armado. Entre tanto esos sistemas estructurales son vulnerables a procesos de deterioro resultantes de agresiones químicas y daños físicos, que, a lo largo del tiempo, pueden llevar a un desempeño estructural insatisfactorio sobre cargas de servicio ó acciones accidentales.

Ante lo expuesto en los últimos años hubo avances significativos en las áreas de modelaje, análisis y proyecto tanto al deterioro en estructuras, así como nuevos abordajes fueron propuestos en cuanto a la evaluación de la vida útil de las estructuras (Ellingwood, 2016; Biondini et al., 2017, Andrade et al., 2017).

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

Se percibe que el modelaje estructural precisa es computacionalmente eficiente en cuanto al deterioro causado por la corrosión, y es requisito esencial para la confiabilidad estructural y

análisis de la vida útil de modo de reducir los costos de mantenimiento de las estructuras, especialmente las de concreto armado (Vu et al., 2000; Rao et al., 2017).

La corrosión de las armaduras de acero en el concreto es un proceso electroquímico causado por las diferencias en las concentraciones de iones disueltos de manera que parte del metal se vuelve catódico y otro anódico, resultando en la pérdida de volumen del material y en la formación de productos de corrosión, material secundario con volumen de 3 a 10 veces mayor que el inicial (Mehta et al., 2014; Geiker et al., 2016).

El modelaje del deterioro del concreto debido a la corrosión uniforme se ha utilizado en los procesos fenomenológicos en que la corrosión del acero embebido en concreto puede ser segmentada y resumida en dos fases que son iniciación y propagación.

La fase de iniciación de la corrosión corresponde al período en que ocurre el transporte de agentes agresivos, por ejemplo, el CO₂, en la matriz porosa del concreto, teniendo como consecuencia la reducción del pH del medio (de aproximadamente 12,5 a 8,5) y la despasivación de la armadura. En la fase de propagación, se caracteriza por la pérdida de masa del acero y la formación de productos de corrosión que causan la fisuración del concreto de recubrimiento o en fases más avanzadas el desprendimiento del concreto (Tuutti, 1982; Bakker, 1988; Rao et al., 2017).

Es de conocimiento general que los costos de proyectos de estructuras de concreto armado que consideran apenas el período de iniciación de la corrosión no son los más económicos, una vez que no se consideran los costos de mantenimiento causados por la corrosión, principalmente en el período de propagación, dicha consideración es de gran importancia en el análisis de vida útil de las estructuras de concreto armado (Yanaka et al., 2016).

Ante lo expuesto en este trabajo se analiza la vida útil de estructuras de concreto armado por medio del acoplamiento de dos modelos, uno responsable por la estimación del tiempo en que ocurre la despasivación de la armadura (vida útil de proyecto - VUP) y otro referido al tiempo en que el elemento de concreto alcanza el estado límite de servicio (vida útil de servicio - VUS).

2. VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO BAJO CORROSIÓN

La vida útil la seguridad, la confiabilidad y el riesgo de los sistemas de infraestructura civil se volvieron cuestiones emergentes en los últimos años debido a las catástrofes naturales y humanas, aspectos de sustentabilidad y el calentamiento global.

La gestión de la durabilidad de la infraestructura civil envuelve gastos significativos y en una época de recursos públicos limitados, requiere decisiones difíciles para establecer prioridades de mantenimiento, rehabilitación y sustitución. En este aspecto se aprecia la importancia del concepto de vida útil, que sirve como base para un abordaje holístico de proyecto. Las estructuras deben ser idealizadas para la seguridad estructural y el mantenimiento durante un período especificado. Eso incluye un proyecto para durabilidad y sustentabilidad. Con la intención de concebir una estructura con una baja necesidad de mantenimiento durante su vida útil, medidas que deben ser tomadas en la fase de concepción y todavía es necesario realizar el control cuando la estructura está en servicio (Ellingwood et al., 2016).

Una de las principales causas de reducción de la vida útil de estructuras de concreto armado es la corrosión, una vez que esa involucra la pérdida de material de la superficie del acero como resultado de una acción química y la pérdida de material lleva a la reducción de área efectiva en la sección transversal y en consecuencia la disminución de la capacidad de soportar cargas.

Entre tanto la corrosión puede ser retardada adoptando un concreto de media o alta durabilidad (dependiendo del ambiente de exposición) o considerando un espesor adecuado para el concreto de recubrimiento. Broomfield (2007) y Dyer (2015) relatan que cuanto menor es el recubrimiento y la calidad del concreto, mayor será la posibilidad de ocurrencia de la corrosión generando efectos degenerativos, por ejemplo, la fisuración del concreto.

La alcalinidad del concreto se da debido a los poros microscópicos que contienen altas concentraciones de óxidos de calcio, sodio y potasio soluble. Estos forman hidróxidos alcalinos en presencia de agua, creando una condición de pH óptimo (entre 12 y 13). De este modo el concreto protege al acero da corrosión tanto físicamente formando una capa protectora para la armadura, cuanto químicamente por medio de su condición alcalina que induce la formación de la película pasiva en la superficie del acero muy densa, fina y de óxido, llevando a una tasa muy lenta de corrosión (Broomfield, 2007; Kōliö et al., 2017).

El proceso de corrosión uniforme, corrosión por carbonatación, puede ser sub dividido en dos fases, iniciación y propagación. La fase de iniciación se caracteriza por el proceso de difusión de CO₂ y gas carbónico que penetra la matriz porosa del concreto reaccionando con los hidróxidos de calcio (Ca(OH)₂) presente en la pasta de cemento llevando a la formación del carbonato de calcio (CaCO₃) (Figura 1). En la literatura este proceso recibe el nombre de carbonatación, siendo responsable por algunas alteraciones del concreto carbonatado, por ejemplo, reducción de la permeabilidad (Neville, 1997). Además de eso, el proceso reduce el pH del concreto (de aproximadamente 12,5 a 8,5), teniendo por consecuencia la destrucción de una capa química que protege al acero de los mecanismos de corrosión (Chang et al., 2006) (Figura 1).

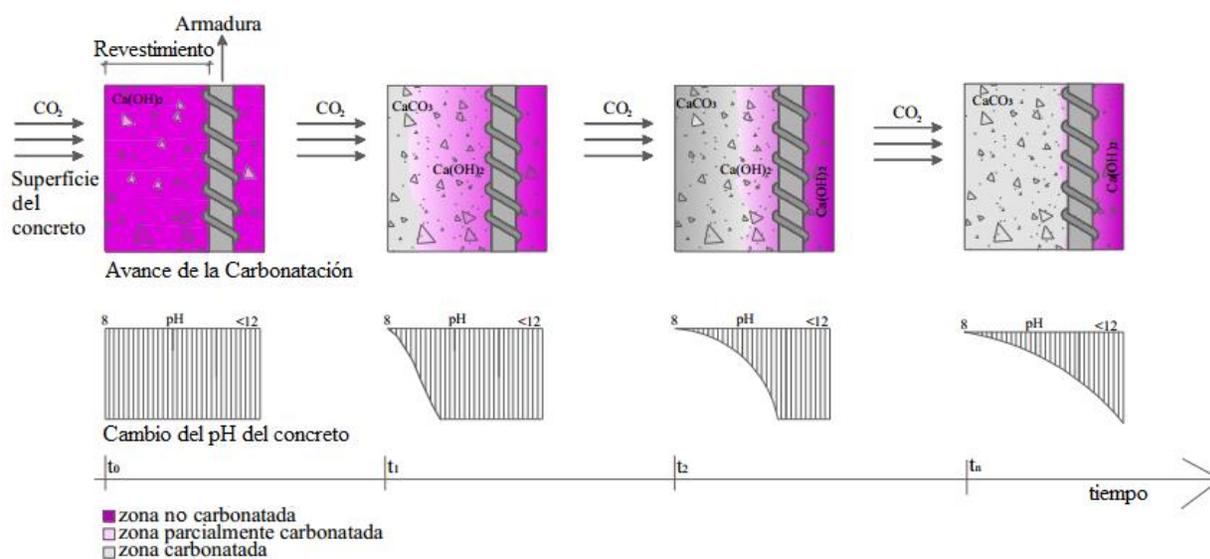


Figura 1. Avance del frente de carbonatación vs. reducción del pH en el concreto (Possan, 2010).

La reacción de carbonatación comienza en la superficie del concreto progresando internamente con el tiempo. A medida que el frente de carbonatación alcanza la profundidad del acero, se inicia la fase de desarrollo de la corrosión, no habiendo presencia de ningún daño real a la estructura hasta este punto (Tuutti, 1982; Possan, 2010; Kōliö et al., 2017).

En la fase de propagación, para que haya la formación de los productos de corrosión, será necesario que primero el hidróxido ferroso se transforme en hidróxido férrico (1) para entonces transformarse en óxido férrico hidratado, también denominado producto de corrosión, demostrado en (2).



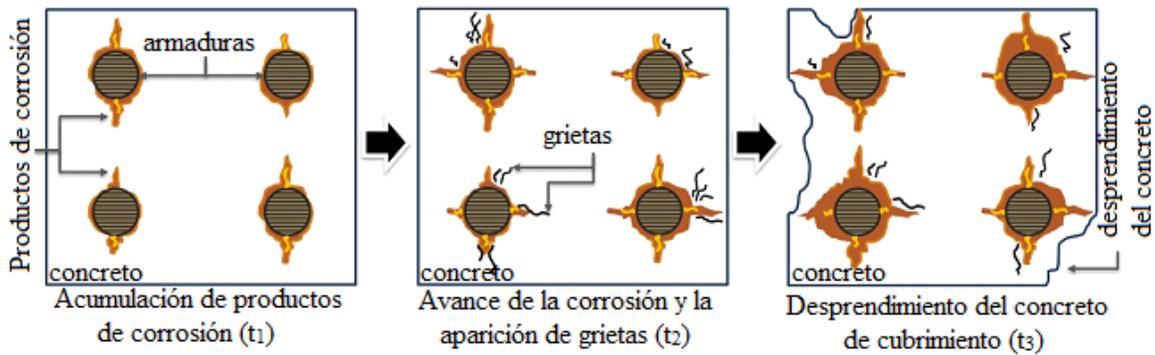


Figura 2. Fases de los daños causados en el concreto en el período de desarrollo de la corrosión.

La propagación es determinada por la tasa de corrosión (que depende de la disponibilidad de oxígeno, humedad relativa y temperatura) de la capacidad del concreto para soportar tensiones internas. El óxido férrico no hidratado (Fe_2O_3) tiene un volumen cercano a dos veces el del acero que sustituye cuando está totalmente denso. El óxido férrico al hidratarse se expande aún más haciéndolo poroso y aumentando el volumen de la interfase acero-concreto de seis a diez veces, causando la pérdida de área efectiva de acero.

La expansión del concreto debido a la formación de los productos de corrosión tiene por consecuencia la fisuración del concreto de recubrimiento, esto ocurre cuando las tensiones inducidas por la capa creciente de productos de corrosión exceden la capacidad de tracción del concreto, especialmente en estructuras con pequeños recubrimientos. Con la fisuración del concreto, la difusión de agentes externos es facilitada y acelerada, pudiendo causar mayores daños al concreto, por ejemplo, el desprendimiento del concreto de recubrimiento (Figura 2), donde todo un segmento del recubrimiento del concreto se desprende de la superficie de la estructura (Broomfield, 2007; Köliö et al., 2017).

3. MODELAJE DE LA VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

3.1 Descripción del modelo implementado para el análisis de la vida útil

Con la intención de determinar la vida útil de estructuras de concreto armado con corrosión, se implementó inicialmente un programa en lenguaje Fortran, para el análisis estructural no lineal geométrica de sólidos bidimensionales compuestos con fibras (para la representación del concreto armado) basado en el Método de los Elementos Finitos Posicional (MEFP), descrito en Coda (2003). Seguidamente se realizó una adaptación del programa para que el mismo incorporara los daños en la fase de propagación de la corrosión a través de la reducción del área útil de acero de las armaduras, utilizando para ellos las ecuaciones para la determinación del diámetro íntegro de acero (Stewart et al., 1998) y la tasa de corrosión de las armaduras (Vu et al., 2000), dadas respectivamente en (3) e (4).

$$d(t_p) = d_0 - (2.0,0116 \cdot \eta \cdot t_p) \quad (3)$$

$$\eta = \left(\frac{37,8 \cdot (1 - a/c)^{-1,64}}{cob} \right) \cdot 0,85 \cdot (t_p)^{-0,29} \quad (4)$$

donde $d(t_p)$ es el diámetro íntegro de acero (en mm) en el tiempo t_p (en años) luego de iniciar el período de desarrollo de la corrosión, d_0 es el diámetro inicial de la barra (mm), η representa

la tasa de corrosión de la armadura ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), a/c es la relación agua/cemento del concreto y cob es el espesor del concreto de recubrimiento (mm).

Para la determinación del instante en que ocurre la despasivación del acero (VUP), se acopló el código, basado en el MEFP, un modelo del avance de la profundidad de carbonatación del concreto, desarrollado por Félix (2016) vía Redes Neuronales Artificiales (RNA) del tipo MultiLayer Perceptron. Las variables de entrada del modelo y la topología de la red responsable por describir el frente de carbonatación son presentadas en la Figura 3.

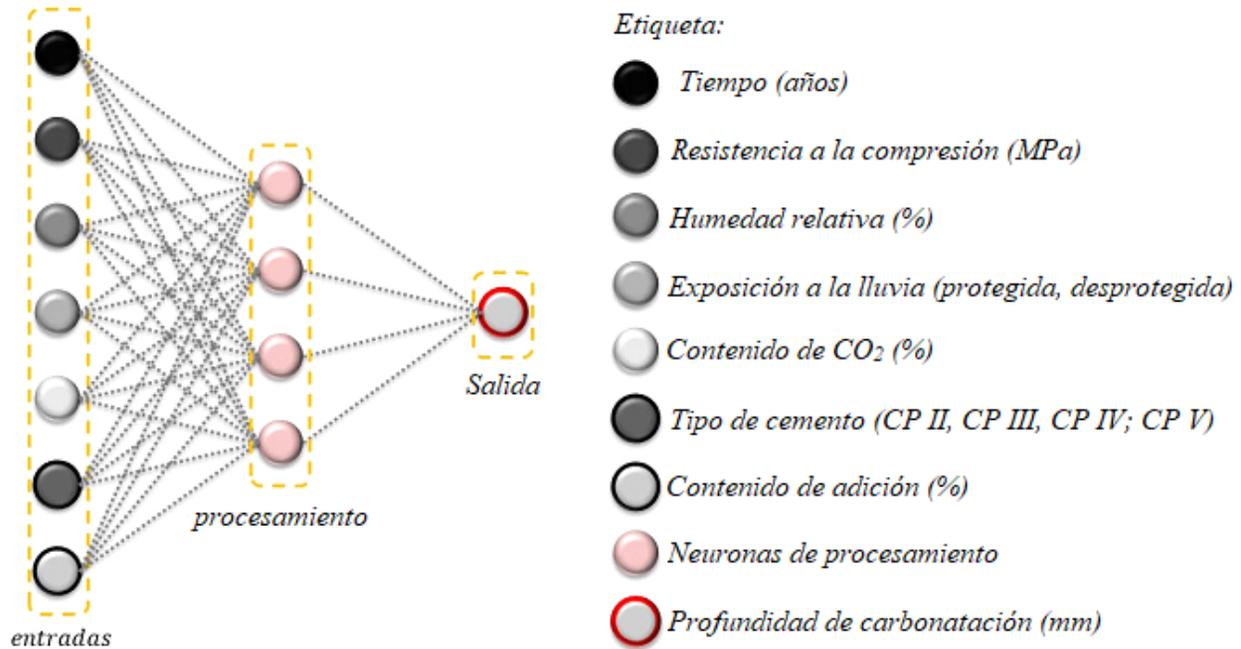


Figura 3. Variables del modelo propuesto y topología de la RNA (Félix et al., 2017).

En cuanto la VUS, la misma es calculada en este trabajo como si fuera el instante de tiempo en que el elemento de concreto bajo corrosión tiene la abertura de fisura característica (5) mayor que los valores aceptables y/o los desplazamientos de la estructura sobrepasan los desplazamientos límites, estos valores son los recomendados por la NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$w \leq \begin{cases} w_1 = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \lambda_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ctm}} \\ w_2 = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \lambda_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \end{cases} \quad (5)$$

donde w es la abertura de fisura característica (mm), ϕ_i es el diámetro de la armadura (mm), λ_i es el coeficiente de conformación superficial de la armadura (1.0 para barras lisas, 1.4 para barras dentadas y 2.5 para barras corrugadas), σ_{si} es la tensión de tracción de la armadura (kN/cm^2), E_{si} es el módulo de elasticidad de la barra de acero (kN/cm^2), f_{ctm} es la tensión de tracción promedio del concreto (kN/cm^2) y ρ_{ri} es la tasa de la armadura en relación al área envuelta.

En la **Figura 4** es presentado el flujograma referente al programa implementado para determinar la vida útil de estructuras de concreto armado bajo la acción de la corrosión.

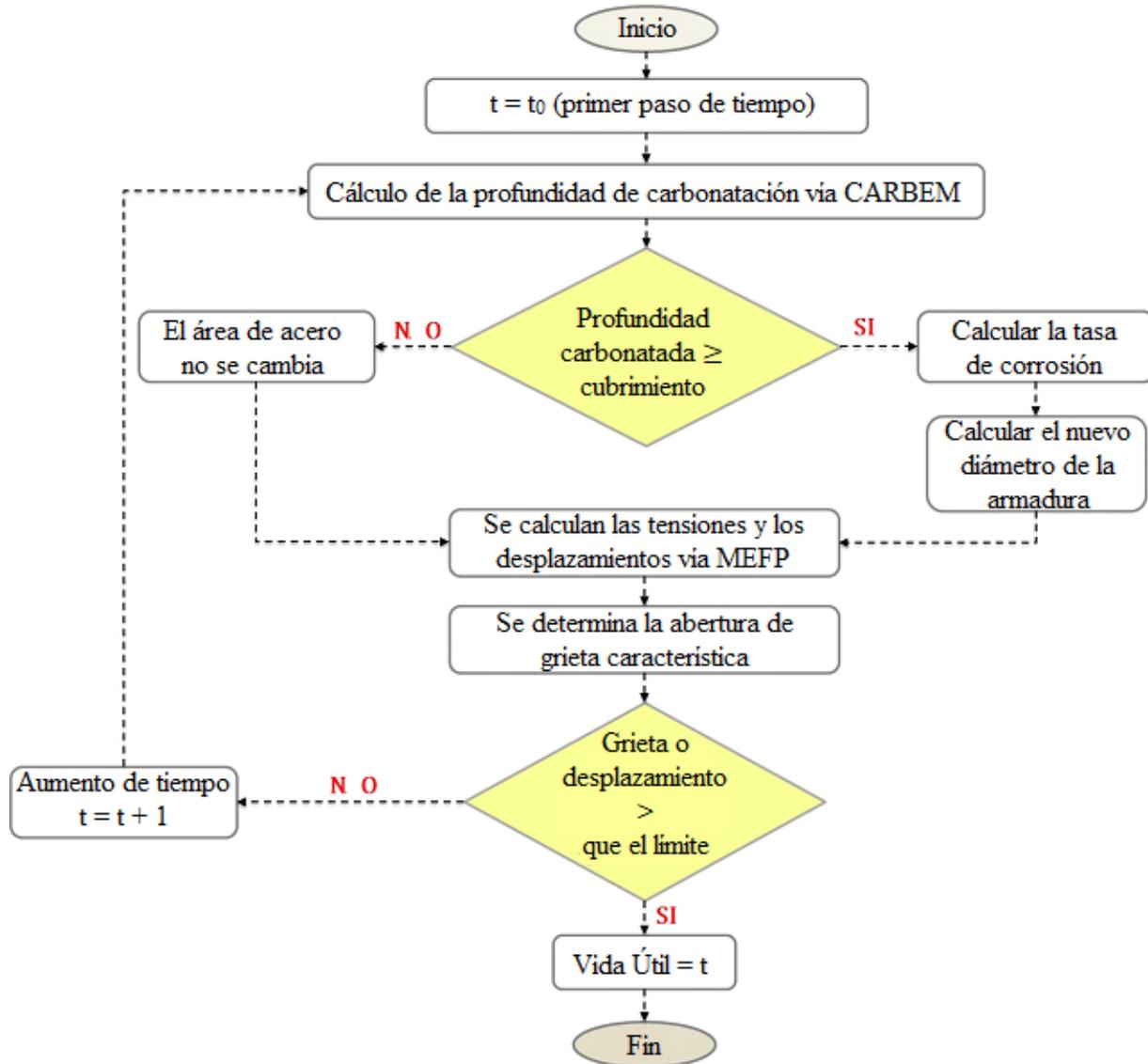


Figura 4. Flujograma referente a los procesos de cálculo del programa desarrollado.

3.2 Validación del modelo de predicción de la profundidad de carbonatación

A fin de demostrar la aplicabilidad del modelo propuesto en las Figuras 5a, 5b, 5c y 5d son presentadas curvas de avance de la profundidad de carbonatación en estructuras de concreto por distintos Escenarios, conforme lo presentado en la Tabla 1. El modelo es comparado a otros existentes en la literatura (Smolczyk, 1969; Vesikari, 1988; Bob et al., 1993; EHE, 2008; Possan, 2010), descritos con detalles en Felix (2016) y con datos reales de degradación de Mehta (2014).

Tabla 1. Escenarios de las estructuras de concreto bajo carbonatación.

Escenario	Concentración de CO ₂ (%)	Humedad relativa (%)	Exposición a lluvia	Tipo de Cemento	Resistencia a compresión (MPa)
I	0.04	70.00	Protegido	CP II – E	30.00
II	0.04	70.00	Protegido	CP III	40.00
III	0.04	65.00	Desprotegido	CP IV	40.00
IV	0.04	65.00	Desprotegido	CP V	40.00

NOTA: En todos los escenarios el contenido de adición es cero y el tiempo de análisis es de 60 años.

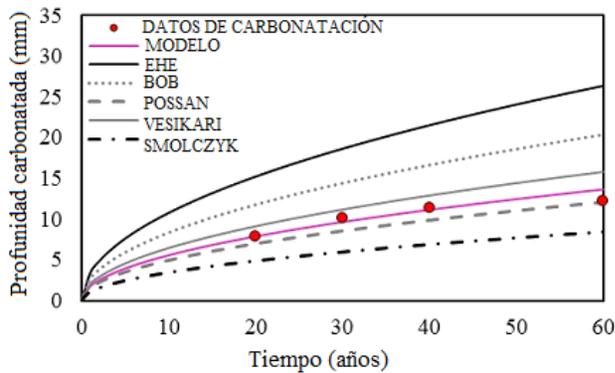


Figura 5(a). Carbonatación en el Escenario I.

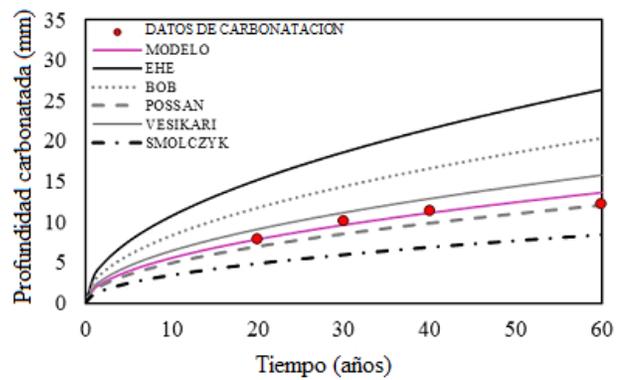


Figura 5(b). Carbonatación en el Escenario II.

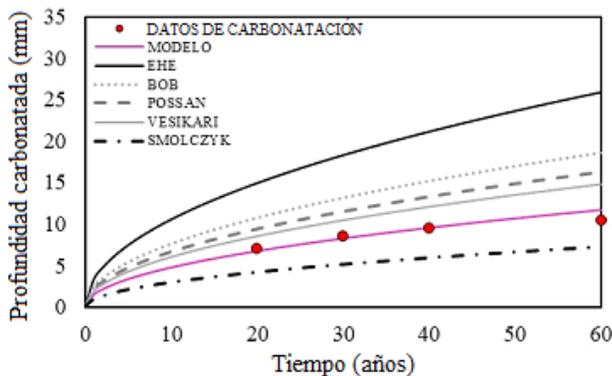


Figura 5(c). Carbonatación en el Escenario III.

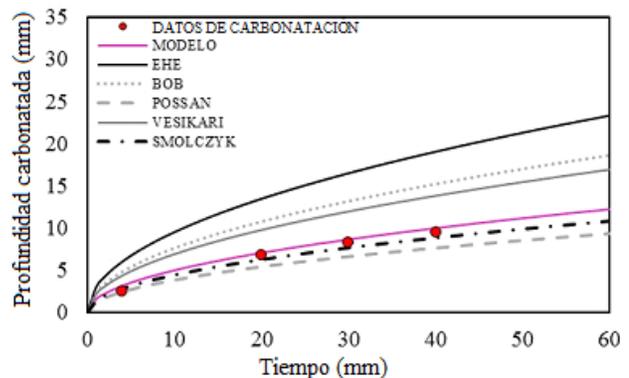


Figura 5(d). Carbonatación en el Escenario IV.

Los resultados encontrados demuestran la aplicabilidad del modelo, y que el mismo representa una herramienta eficiente para la estimación de la profundidad de carbonatación del concreto.

3.3 Validación del modelo referente el modelaje de estructuras de concreto bajo corrosión

Para fines de validación del modelo numérico propuesto, se modeló la degradación impuesta por la corrosión en una viga de concreto armado (Figura 6) ensayada y modelada por Graeff (2007). La estructura consiste en un modelo reducido de una viga de sección rectangular, de dimensión 7x14x130 cm, con vano entre los apoyos de 120 cm. En la Figura 6 es presentado un detalle simplificado de la viga y el esquema referente a la carga impuesta.

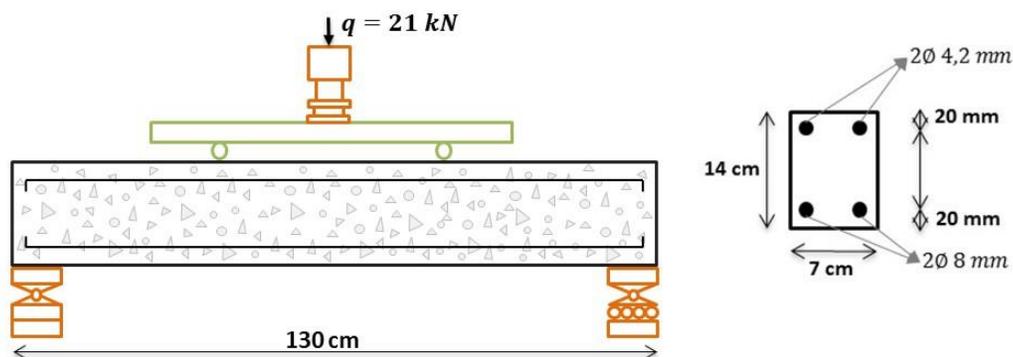


Figura 6. Detalle simplificado de la viga de concreto armado.

La discretización de la malla de elementos finitos de la viga de concreto armado fue hecha con 134 nudos y 34 elementos triangulares con orden de aproximación cúbica para la representación de la matriz de concreto y con 120 elementos de barra simples (fibras) para la representación de

las armaduras. En cuanto a las propiedades de los materiales el concreto tiene módulo de elasticidad de 2600 kN/cm², resistencia a compresión de 2.5 kN/cm², resistencia a tracción de 0.179 kN/cm² y coeficiente de Poisson de 0.2. Ya las armaduras poseen módulo de elasticidad 21000 kN/cm² y resistencia a tracción de 50.0 kN/cm². El modelo constitutivo usado es el de Saint-Venant-Kirchhoff para materiales elástico-lineales.

La Figura 7 presenta la comparación entre los resultados numéricos (modelo propuesto) y experimentales (Graeff, 2007) para el desplazamiento vertical del centro del vano de la viga. Se muestra que el modelo representa de forma coherente el campo de desplazamiento de la viga en el trecho en el rango elástico-lineal.

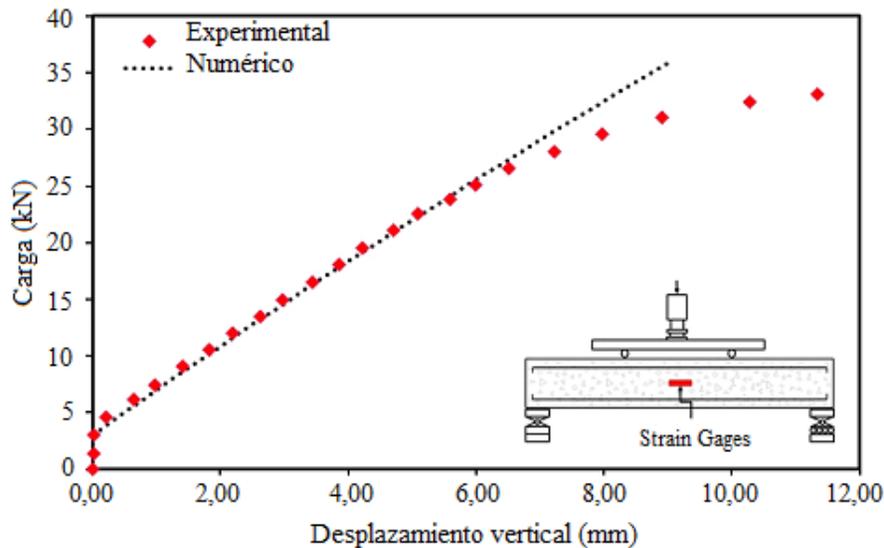


Figura 7. Comparación entre los desplazamientos.

A fin de verificar la aplicabilidad del modelo en cuanto a la determinación de los efectos causados por la corrosión de las estructuras de concreto armado, se comparó la tasa de aumento del desplazamiento vertical del centro de la viga a medida en que las armaduras sufren degradación (pérdida de área), con la obtenida numéricamente por Graeff (2007).

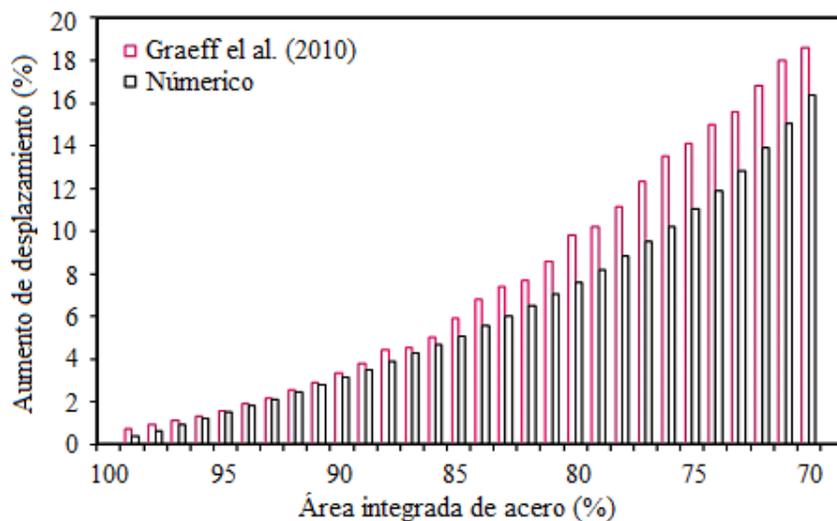


Figura 8. Comparación entre las tasas de aumento de los desplazamientos.

Se observa en la Figura 8, que la creciente diferencia entre las respuestas de los dos modelos con la evolución de la degradación de la armadura, ello ocurre debido a Graeff (2007) adoptar en su modelo una ley constitutiva no lineal. Sin embargo, el modelo propuesto obtiene desplazamientos equivalentes a los de Graeff (2007), presentando una desviación promedio de 3.20%.

3.4 Descripción de la estructura analizada

La estructura analizada en este trabajo consiste en una viga de concreto armado dimensionada de acuerdo con los procedimientos de la NBR 6118 (ABNT, 2014). El Esquema que representa la carga utilizada para el dimensionamiento (obtenido en ELU) y para el análisis de la vida útil (obtenido en ELS) son presentados en la Figura 9, así como los detalles constructivos de la misma. A fin de analizar la durabilidad de la estructura de concreto expuesta a un ambiente con agresividad moderada, la estructura fue dimensionada para tres diferentes recubrimientos, 20, 25 y 30 mm.

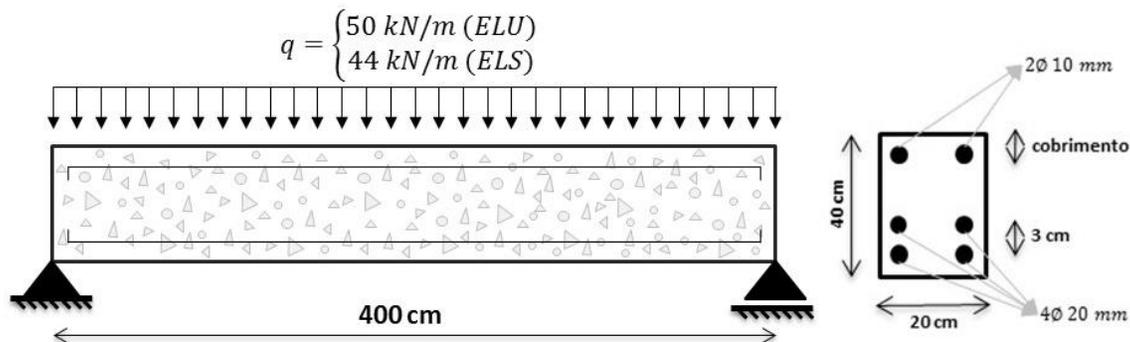


Figura 9. Detalle simplificado de la viga de concreto armado.

La discretización de la malla de elementos finitos de la viga de concreto armado fue hecha con 2317 nodos y 486 elementos triangulares con orden de aproximación cúbica para la representación de la matriz de concreto y con 900 elementos de barra simples (fibras) para la representación de las armaduras.

el modelo constitutivo usado es de Saint-Venant-Kirchhoff para materiales elástico-lineales.

Los datos referentes a las propiedades de los materiales son presentados en la Tabla 2(a), en cuanto que la Tabla 2(b) presenta los datos referentes al concreto y al ambiente de exposición de la estructura.

Tabla 2(a). Propiedad de los materiales.

Material	Propiedad (kN/cm ²)	Valor
Concreto (C30)	Módulo de elasticidad	2607.16
	Coefficiente de Poisson	0.20
	Resistencia a compresión	3.00
	Resistencia a tracción	0.21
Acero (CA-50)	Módulo de elasticidad	21000.00
	Resistencia a tracción	50.00

Tabla 2(b). Datos referentes al concreto y ambiente de exposición.

Característica	Condición
Tipo de cemento	CP III
Concentración de adiciones (%)	0.00
Humedad relativa (%)	60.00
Ambiente	Externo, desprotegido da lluvia
Concentración de CO ₂ (%)	0.04 (ambiente urbano)

4. RESULTADOS

Inicialmente es presentado en la Figura 10 el avance de la profundidad de carbonatación del concreto y la VUP de las vigas de diferentes recubrimientos (20, 25 y 30 mm). De inmediato se nota la importancia del uso de un recubrimiento adecuado en función de la agresividad del medio al cual la estructura de concreto es expuesta, una vez que el recubrimiento adecuado aumenta la VUP y en consecuencia el tiempo necesario para que ocurran las primeras intervenciones humanas y reparaciones de las estructuras.

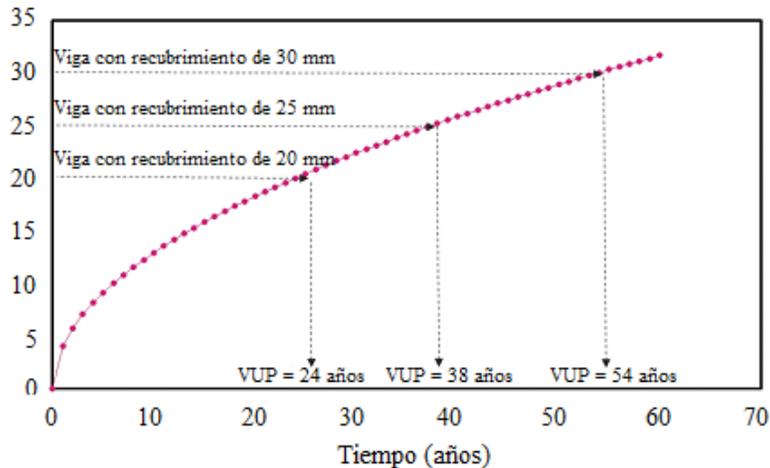


Figura 10. Avance de la carbonatación y VUP de las vigas con diferentes recubrimientos.

En la Figura 11 es posible analizar el avance de la degradación de las armaduras debido a la acción de la corrosión (en el gráfico se presenta el área útil de acero de las armaduras longitudinales). Se observa que durante la fase de iniciación de la corrosión (VUP) el área útil de acero de las armaduras no es reducida, y que la pérdida de sección es significativa en los primeros años del período de propagación de la corrosión, en concordancia con el estudio de Vu et al. (2000). Los autores describen que existe una tendencia de ocurrir mayor pérdida de sección en el período inicial de la corrosión, debido a la tasa de corrosión de las armaduras ser mayor, y que la misma decrece a lo largo del tiempo presentando un comportamiento exponencial.

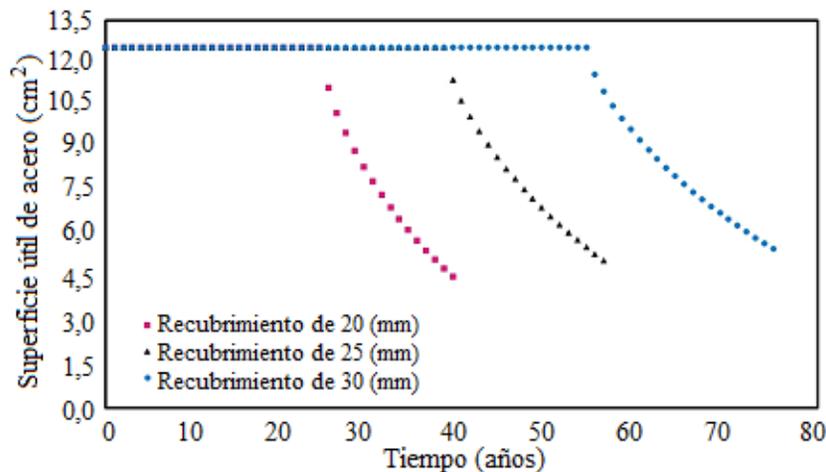


Figura 11. Pérdida del área útil de acero en las vigas de concreto bajo corrosión.

En la figura 12 es presentada la VUS de las vigas de concreto armado analizadas en este trabajo. El valor límite de abertura de fisuras adoptado para el análisis fue $w_{lim} = 0.3$ mm, conforme lo

prescribe la NBR 6118 (ABNT, 2014) para estructuras de concreto con clase de agresividad ambiental II (moderado).

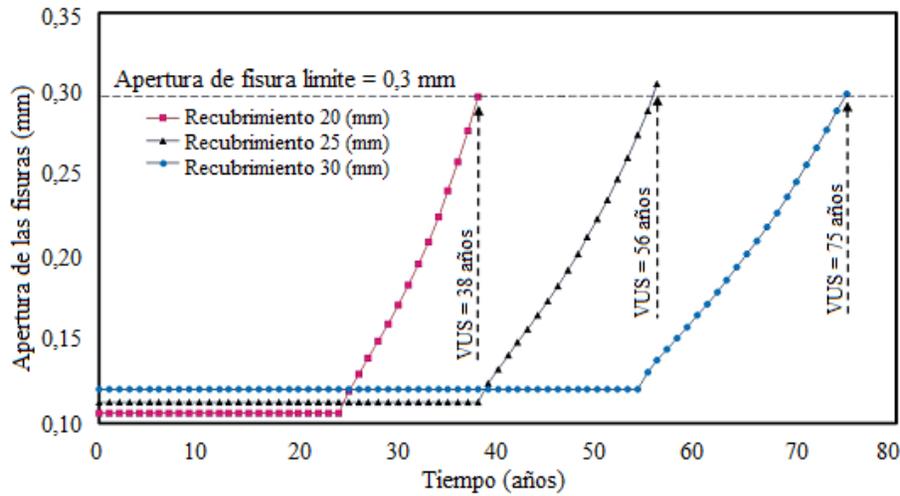


Figura 12. Desarrollo de la apertura de las fisuras y VUS de las vigas de concreto.

Se aprecia que el declive de la curva del avance de la apertura de fisuras decrece con el aumento del recubrimiento, aumentando así el tiempo necesario para que la estructura de concreto armado alcance el estado límite de apertura de fisuras (referente al ELS).

Finalmente se presentan las Figuras 13, 14 y 15 las tensiones longitudinales y los desplazamientos verticales de las vigas de concreto armado con 20, 25 y 30 mm de recubrimiento, en el instante en que las fisuras alcanzan el valor límite (VUS).

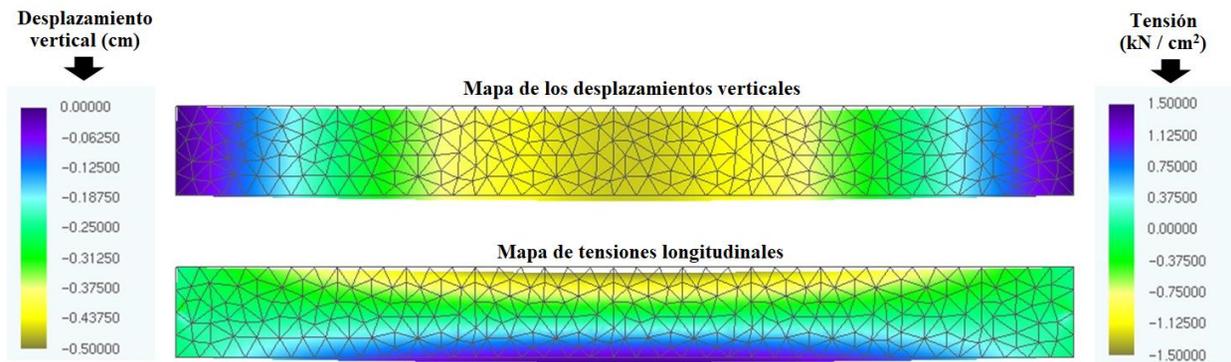


Figura 13. Configuración deformada de la viga con recubrimiento de 20 mm al final de la VUS.

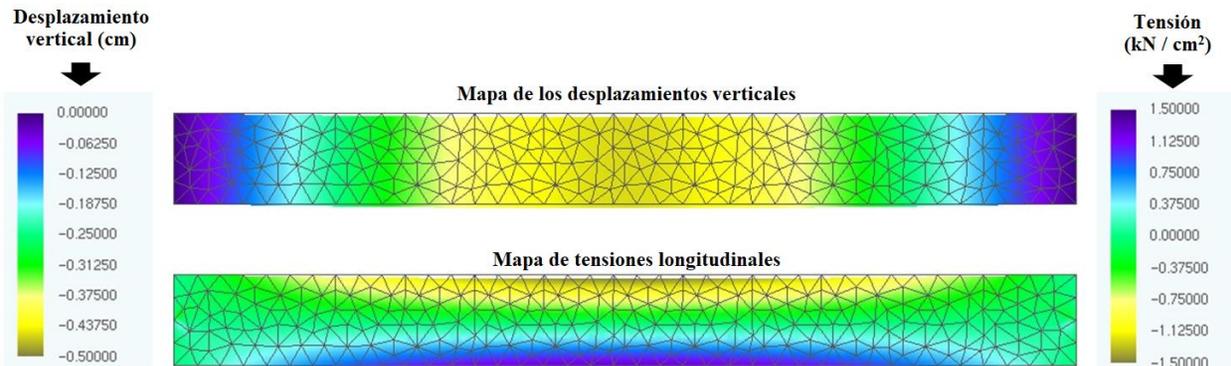


Figura 14. Configuración deformada de la viga con recubrimiento de 25 mm al final de la VUS.

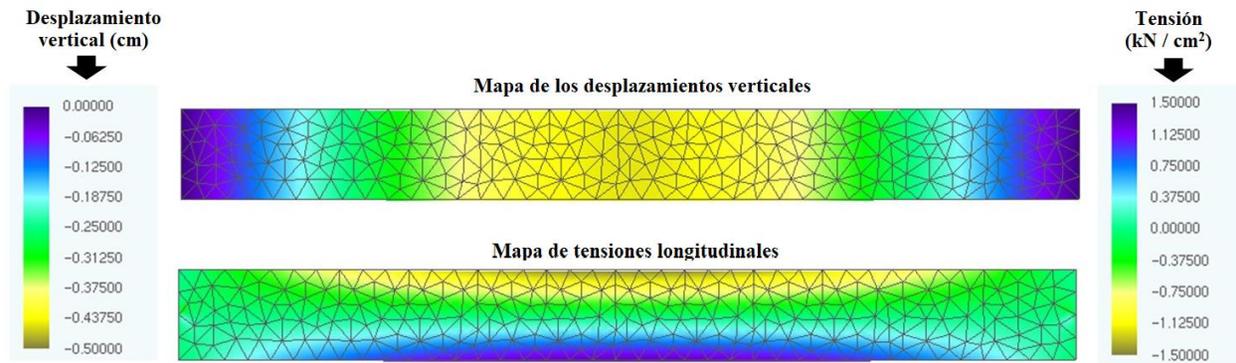


Figura 15. Configuración deformada de la viga con recubrimiento de 30 mm al final de la VUS.

Por medio de los mapas de colores presentados en las Figuras 13, 14 y 15 es posible observar que los desplazamientos de la viga disminuyen con el aumento del recubrimiento de la armadura, eso ocurre debido al hecho de que existe una capa mayor de concreto para la difusión del CO_2 , retardando el inicio de la corrosión y consecuentemente, la degradación de las armaduras, responsable por dar mayor rigidez a la viga de concreto. Este resultado demuestra la necesidad de conocer correctamente el ambiente de degradación al cual la estructura estará sometida, una vez que los elementos de concreto serán proyectados con la durabilidad requerida, garantizando tanto la vida útil de estas estructuras como la seguridad de sus usuarios.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados presentados referente a la validación del modelo desarrollado se puede concluir que tanto la formulación para la determinación de la VUP mediante uso de Redes Neuronales Artificiales (RNAs), cuanto la formulación para el análisis mecánico de estructuras de concreto armado bajo corrosión uniforme, basado en el Método de los Elementos Finitos Posicional (MEF), están coherentemente implementadas y que presentan resultados coherentes cuando son comparados a datos de la literatura.

De las simulaciones realizadas con el modelo generado por el acoplamiento del MEF con las RNA, fue posible concluir que:

- Un recubrimiento adecuado (recubrimiento que toma en cuenta el grado de agresividad al cual la estructura está sometida) garantiza no solo un período mayor para llegar a la despasivación de las armaduras, como también, para alcanzar el límite de abertura de fisuras recomendado por la NBR 6118 (ABNT, 2014);
- La consideración de pérdida de masa del acero, como consecuencia de la corrosión, resulta en el desarrollo de fisuras con dimensión máxima superior a la recomendada por la NBR 6118 (ABNT, 2014), cuando el nivel de corrosión alcanza el 60 %;
- Cuando la tasa de corrosión de las armaduras alcanza el 50 %, se constata el aumento de 30 % en la flecha de las vigas, independientemente del recubrimiento;
- Al aumentar el recubrimiento de las armaduras, se reducen los desplazamientos máximos y la deformación de la viga, al final de la VUS, debido al menor grado de corrosión a la cual las armaduras están sometidas;
- Aun cuando todas las vigas al final de la VUS estén con el concreto en el mismo estado de fisuración, la capacidad mecánica de la viga con 30 mm de recubrimiento es mayor, una vez que las armaduras se encuentran con menor grado de corrosión, y así mayor área útil, demostrando que el recubrimiento es coherente con la agresividad del ambiente al cual la estructura está sometida y proporciona además la durabilidad y seguridad para sus usuarios.

Los resultados obtenidos apuntan a aplicabilidad del código desarrollado como una herramienta eficiente y alternativa para el análisis de la vida útil de estructuras de concreto armado sujetas a corrosión uniforme.

Además, el programa desarrollado demuestra la eficiencia del uso de herramientas numéricas en el desarrollo de modelos para el estudio y la simulación de mecanismos complejos de la degradación de estructuras de concreto armado, corroborando con los estudios de patología de las construcciones.

6. AGRADECIMIENTOS

La coordinación de perfeccionamiento personal de Nivel Superior (CAPES) y al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por el fomento ofrecido a la pesquisa.

7. REFERENCIAS

- Andrade, C. (1992), *“Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras”*, Tradução de Antônio Carmona e Paulo Helene, São 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, V. 2, p. 1-8.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto, Rio de Janeiro, ABNT.
- Bakker, R. M. F. (1988), Initiation period. In: Schiess P. *“Corrosion of steel in concrete”*, London, Chapman and Hall, cap. 3, pp. 22-55.
- Biondini, F., Frangopol D. M. (2017), *“Time-variant redundancy and failure times of deteriorating concrete structures considering multiple limit states”*, Structure and Infrastructure Engineering, V.13, pp. 94-106.
- 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.
- Broomfield, J. P. (2007), *“Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair”*. 2. Ed. New York, Taylor & Francis, pp. 294.
- Carmona, A. F., Marega, A. (1988), *“Retrospectiva da patologia no Brasil: Estudo Estatístico”*, in: Jornadas em Español y Português sobre Estructuras y Materiales, CEDEX, IETcc, pp. 325-348.
- Chang, C. F., Chen, J. W. (2006), *“The experimental investigation of concrete carbonation depth”*, Cement and Concrete Research, V.36, pp. 1760-1767.
- Coda, H. B. (2003), *“Análise não linear geométrica de sólidos e estruturas: uma formulação posicional baseada no MEF”*, Volume II, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 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.
- Dyer, T. (2015), *“A durabilidade do concreto”*. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, pp. 536.
- Ellingwood, B. R., Frangopol, D. M. (2016), *“Introduction to the state of the art collection: risk-based lifecycle performance of structural systems”*, Journal of Structural Engineering, V.142, pp. 1.

- Felix, E. F. (2016), “*Desenvolvimento de software para a estimativa da profundidade de carbonatação, vida útil e captura de CO₂ de estruturas de concreto empregando RNA's*”, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.
- Félix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2017), “*Análise Paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais*”, Revista ALCONPAT, V.7, N. 3, pp. 302-316.
- Geiker, M. R., Polder, R. B. (2016), “*Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete*”, Materials and Corrosion, V.67, pp. 600-606.
- Graeff, A. G. (2007), “*Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Kari, O. P., Puttonen, J., Skantz, E. (2014), “*Reactive transport modelling of long-term carbonation*”, Cement and Concrete Composites, V.52, pp. 42-53.
- Köliö, A., Pakkala, T. A., Hohti, H., Laukkarinen, A., Lahdensivu, J., Mattila, J., Pentti, M. (2017), “*The corrosion rate in reinforced concrete facades exposed to outdoor environment*”, Materials and Structures, V.50, pp. 1-16.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. 2.ed. São Paulo, IBRACON, pp.751.
- Neville, A. M. (1997), “*Propriedades do concreto*”, São Paulo: PINI, pp. 828.
- Possan, E. (2010), “*Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em meio urbano*”, Tese de Doutorado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Rao, A. S., Lepech, M. D., Kiremidjian, A. S., Sun X. Y. (2017), “*Simplified structural deterioration model for reinforced concrete bridge piers under cyclic loading*”, Structure and Infrastructure Engineering, V.13, pp. 55-66.
- 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.
- Stewart, M. G., Rosowsky, D. V. (1998), “*Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion*”, Journal of Infrastructure Systems V.4, pp. 146-155.
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of steel in concrete*”. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Val, D. V., Melchers, R. E. (1997), “*Reliability of deteriorating RC slab bridges*”, Journal of Structural Engineering, V.123, pp. 1638-1644.
- Vesikari, E. (1988), “*Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement*”. Technical Research Centre of Finland, report No. 553, Finland p. 53.
- Vu, K. A. T., Stewart, M. G. (2000), “*Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models*”, Structural Safety, V.22, pp. 313-333.
- Yanaka, M, Ghasemi, S. H., Nowak, A. (2016), “*Reliability-based and life-cycle cost-oriented design recommendations for prestressed concrete bridge girders*”, Structural Concrete, V.17, pp. 836-847.