

Prediction of corrosion initiation in concrete structures using finite volume method

**Carlos Araujo¹, Oleyda Morón², Oladis T. de Rincon², José Rincón¹,
Verónica Bueno², José Rodríguez Montero³**

¹Laboratorio de Simulación Computacional. Telefax: +58-261-7598794. cdaraujo@fing.luz.edu.ve

²Centro de Estudios de Corrosión. Telefax: +58-261-7598175. oleyda111062@hotmail.com
Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apartado 526. Maracaibo 4011-A, Venezuela.

³Escuela de Ingeniería de Caminos, Universidad de Granada, España.

Abstract

Time estimation of rebar corrosion initiation by using control volume method applied to the transient no lineal Fick's second law equation, when the diffusivity is a function of chloride concentration according to the Hall's model, is the main objective of this paper. The direct physical interpretation of procedure is the most important reason that justify the use of Control Volume Method, in comparison with others numerical techniques. An optimization algorithm is used to adjust the parameters necessary in the Hall model from an experimental profile provide by the user. Experimental methodology includes the following measurements: electrochemical by using GECOR 6, the carbonatation depth into the concrete and chloride profiles in different sections. Electrochemical measurements, concrete quality and atmosphere conditions are considered in the final evaluation. There is agreement between numerical results and experimental data from cores located in General Rafael Urdaneta Bridge, in Maracaibo Lake, Zulia State, Venezuela, where investigations were developed previously. The numerical model developed allows to estimate with good precision, the evolution of chloride profile in the structure over time and provides a prediction of time for corrosion initiation in the reinforcement.

Key words: concrete structure, corrosion, chloride profiles, control volume method.

Predicción del tiempo de iniciación de la corrosión en armaduras usando volúmenes finitos

Resumen

El objetivo de este trabajo es la estimación del tiempo de iniciación de la corrosión de la armadura mediante la aplicación del método de volúmenes finitos en la solución de la forma transitoria no lineal de la segunda ley de Fick; cuando la difusividad es dependiente de la concentración de iones cloruros de acuerdo al modelo de Hall. Se usa un algoritmo de optimización para calibrar los parámetros del modelo de Hall que ajustan la solución numérica a un perfil experimental de cloruros para un tiempo dado. La información experimental se obtuvo mediante la determinación del contenido de iones cloruro a diferentes profundidades en el concreto, mediante el método potenciométrico aplicado a muestras extraídas del Puente "General Rafael Urdaneta", Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. Adicionalmente, se efectuaron mediciones electroquímicas (potencial y velocidad de corrosión), utilizando el GECOR 6 para determinar el espesor del concreto carbonatado, mediante el indicador ácido/base fenolftaleína. La evaluación final considera las medidas electroquímicas, la calidad del concreto y las condiciones atmosféricas de exposición. El modelo numérico permite estimar con buena precisión, la evolución del perfil de cloruros en la estructura con el tiempo y provee una predicción del tiempo de iniciación de la corrosión en la armadura.

Palabras clave: estructuras de concreto, corrosión, perfiles de cloruros, volumen finito.

Introducción

Los principales agentes agresivos que eventualmente pueden colocar en riesgo la integridad de una estructura de concreto armado son: los cloruros en regiones marinas y la carbonatación en zonas urbanas, rurales e industriales. Por tal motivo, la calidad de los componentes del concreto así como su dosificación juegan un papel importante, ya que, proporcionan una barrera protectora que pasivan al elemento metálico mediante el valor de pH alcalino alcanzado después de las reacciones de hidratación del cemento. Esto garantiza un periodo de vida útil prolongado de la estructura.

Ahora bien, la interacción con el medio ambiente atenta contra la barrera protectora, dando lugar a la fase de iniciación de corrosión [1], que comienza cuando los agentes agresivos penetran a través del concreto luego de la puesta en servicio y culmina cuando estos alcanzan la superficie metálica, desencadenando la corrosión. Como resultado, la integridad física de la estructura puede verse comprometida, debido a la disminución del diámetro inicial de las cabillas, la acumulación de óxidos expansivos en la interfase acero concreto que causa agrietamiento del concreto y la pérdida de la adherencia acero/concreto, así como la pérdida de la resistencia mecánica.

En este trabajo, el objetivo principal es la predicción del avance del frente de cloruros y la estimación del Tiempo de Iniciación de Corrosión en la Armadura (TICA). Para esto, se usa un modelo numérico basado en volúmenes finitos, que

es calibrado con datos experimentales, para luego obtener el frente de penetración de cloruro mediante la solución transitoria no lineal de la segunda ley de Fick. Los resultados del modelo se validaron con datos experimentales de iniciación de corrosión extraídos del fuste "d" y viga de riostra "a", de la pila 9 del Puente General Rafael Urdaneta.

Parte experimental

Mediciones de campo

La Figura 1 muestra las características generales de la pila 9 del puente General Rafael Urdaneta, la cual se encuentra situada cerca de la costa Nor-Oeste del lago de Maracaibo. La pila está conformada por cuatro fustes de sección variable, unidos en el extremo superior por una viga corona de sección T. Los fustes se encuentran anclados a una zapata o cabezal macizo que es soportado por seis pilotes de 91.44 cm de diámetro, además posee dos cabezales alineados en la dirección axial del puente arriostrado por cuatro vigas.

Se efectuaron mediciones de velocidad de corrosión y de potencial de corrosión utilizando el GECORR 6. Por otra parte, en las localizaciones mostradas en la Figura 1, se extrajeron muestras cilíndricas, de 5 cm de diámetro y 10 cm de longitud, para medir la profundidad de carbonatación y analizar la penetración de cloruros. Para la extracción y la evaluación electroquímica de las muestras, se emplearon los procedimientos establecidos en el manual de DURAR [2]. El criterio de evaluación empleado es:

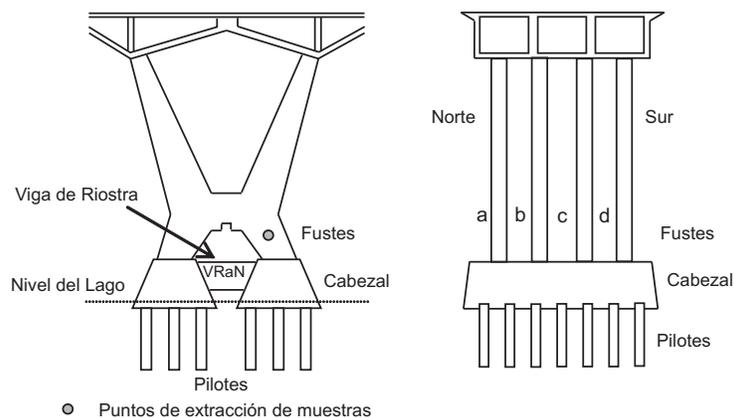


Figura 1. Representación de la pila 9 del Puente General Rafael Urdaneta.

- $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \geq i_{\text{corr}} \geq 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $E_{\text{corr}} < -200$ mV \rightarrow "Potencialidad de corrosión moderada".
- $i_{\text{cor}} < 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $E_{\text{corr}} > -200$ mV \rightarrow "Potencialidad de corrosión despreciable".

Aunque el umbral de cloruros para producir corrosión de la armadura varía en función de muchos parámetros y en climas tropicales se han reportado valores diversos en función de la calidad del concreto y microclima, en esta investigación se adoptó la cantidad de 4000 ppm de cloruros que no solo fue adoptado por el grupo de DURAR, sino que se ha ratificado en muchas evaluaciones de estructuras en Venezuela y en las probetas instaladas en el país del proyecto DURACON [3].

Modelo matemático

La ecuación diferencial que gobierna la penetración de cloruros se conoce como la segunda ley de Fick. La misma resulta de la ley de conservación de la masa y, en su forma parabólica, puede ser utilizada para la estimación de la distribución transitoria de una sustancia química. Dado a que el ancho y alto de los fustes son mucho mayores que su profundidad, el problema puede ser formulado unidimensionalmente como:

$$\frac{\partial C(x)}{\partial t} = D(C(x)) \frac{\partial^2 C(x)}{\partial X^2} \quad (1)$$

donde: C es la concentración de cloruro, D es el coeficiente de difusión que es función de la concentración, y X representa el eje coordenado que coincide con la profundidad de la muestra.

Aunque existen diversos modelos para establecer la relación entre el coeficiente de difusión y la concentración de cloruros, Morón [4] y Arrieta [5] coinciden en considerar al modelo de Hall como el más apropiado entre todos, puesto que presenta el menor error cuadrático total. Además, su uso ofrece resultados conservadores al ser comparados con predicciones suponiendo coeficiente de difusión constante. La ecuación siguiente muestra la expresión matemática para el coeficiente de difusión según el modelo de Hall.

$$D(C(x)) = K_1 \left[\frac{1 + K_2 C(x)}{1 + K_3 C(x)} \right] \quad (2)$$

Los valores de K_1 , K_2 , K_3 se determinan para ajustarse de forma óptima a los datos experimentales en un tiempo t dado. En el proceso de ajuste, se obtiene adicionalmente el valor de concentración de cloruros en la superficie o borde expuesto por cuanto su determinación experimental no es posible. Finalmente, para la predicción del perfil de cloruros se supone que el medio es semi-infinito.

Modelo computacional

La ecuación gobernante del fenómeno de transporte estudiado se resuelve empleando el método de volumen finito descrito por Patankar [6], por cuanto garantiza el balance de la variable estudiada y posee una interpretación física fácil de entender. La subrutina que resuelve la ecuación diferencial es llamada Función modelo en la Figura 2, donde se muestra un flujograma del programa desarrollado.

Función modelo se utiliza para disponer de una ecuación que relacione la concentración de cloruros con la posición y el tiempo, suponiendo valores iniciales de los coeficientes del modelo de Hall y la concentración superficial del borde expuesto. Luego, la subrutina NLINFIT realiza una regresión no lineal con el fin de obtener los coeficientes del modelo de Hall y la concentración superficial, que minimizan la suma de los residuos al cuadrado [7]. En la práctica esto ocurre cuando la diferencia de dicha suma entre dos iteraciones consecutivas no supera una tolerancia de 1×10^{-8} . El procedimiento permite cotejar entre la predicción numérica y la medición experimental en el tiempo de calibración dado.

En este punto, el modelo se utiliza para predecir el avance del frente de cloruros en tiempos posteriores suponiendo un comportamiento acorde con la ley de Fick, para lo cual es necesario emplear nuevamente la subrutina Función modelo.

Referente a las condiciones de borde, se considera que el medio es semi-infinito y se trata de forma análoga a un problema de transferencia de calor de las mismas características, como el presentado por Arpaci [8]. Físicamente, esto implica asumir que el frente de cloruros no alcanza el borde interno del dominio computacional que se considera impermeable. En el borde expuesto, se impone para todos los tiempos el valor de con-

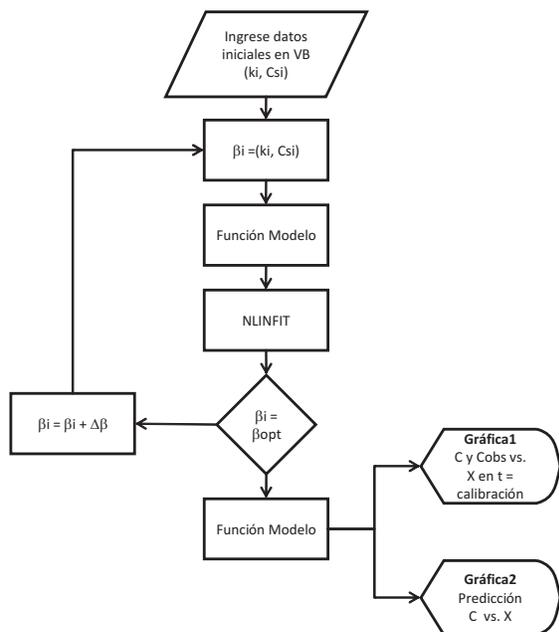


Figura 2. Flujoograma del programa VB desarrollado.

centración de cloruros superficial calculado en el proceso de calibración. A fin de garantizar la correcta imposición de la condición de borde, la longitud del dominio computacional es mucho mayor que la longitud real de la muestra. Esto permite asegurar que el frente no alcance el extremo interno. Por su parte, para la condición inicial se supone que no existen cloruros presentes en el tiempo $t = 0$. Finalmente, el desbalance de masa máximo admitido en la solución numérica fue de 1×10^{-6} .

Casos de estudio

Caso 1. Cara norte del cabezal oeste, fuste d, puente General Rafael Urdaneta

La Tabla 1 muestra la evaluación electroquímica realizada en los años 1996 y 2002, en la zona aledaña a la de extracción del núcleo para análisis de cloruros, en la cara norte del Fuste “d”, donde todas las medidas [4] informan sobre una baja potencialidad de corrosión. Para el año 2002, sólo una de las barras muestra una moderada potencialidad de corrosión, muy cerca del límite inferior ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), pero potenciales muy nobles ($< -200 \text{ mV vs. Cu/CuSO}_4$) [2], en consecuencia la probabilidad de que el acero se esté corroyendo en esa zona es baja.

Por otra parte, se dispone de mediciones experimentales de ensayos de cloruros por el método de Mohr para el año 2002 [9], que son de utilidad como valores de ajuste en el proceso de calibración del modelo. El perfil medido se representa con puntos en la Figura 3.

La línea segmentada muestra el perfil predicho por el modelo luego de optimizar los coeficientes de Hall, alcanzando un error estándar en el ajuste de 0,0606. La edad del ajuste es 40 años y la profundidad del recubrimiento es de 2,4 cm. Una vez calibrado, se realiza la predicción de los perfiles de cloruro mostrada en la Figura 4. El modelo predice que el frente alcanza a la barra con una concentración límite de 4000 ppm a los 79 años (2039), lo que concuerda con la evaluación electroquímica de 1996 y 2002 donde la armadura se encuentra pasiva.

Los resultados obtenidos muestran que el programa reproduce el avance del perfil de cloruro a partir de la medición en un tiempo dado, de forma satisfactoria.

Caso 2. Cara sur del cabezal oeste, fuste d, puente General Rafael Urdaneta

Los resultados del estudio electroquímico realizado en los años 1996 y 2002, en la zona aledaña a la de extracción del núcleo para el análisis de los iones cloruro, pueden observarse en la Tabla 2. Para el año 2002, las medidas de potencial de corrosión de las tres barras analizadas reflejan una moderada potencialidad de que el acero se esté corroyendo. Nótese que la velocidad de corrosión de la barra horizontal (barra más superficial y por lo tanto la más expuesta a sufrir daños por corrosión) indican corrosión moderada, mientras que las barras vertical y la de cruce reflejan una potencialidad de corrosión despreciable. Por lo tanto, el acero ubicado en el área en estudio, presenta una potencialidad de corrosión moderada.

En adición a lo anterior, se halló carbonatación sobre el núcleo analizado, sin embargo, la profundidad de penetración de este agresivo fue muy baja como para ser el responsable de la corrosión de la armadura. Las mediciones de las concentraciones de cloruro indicaron que se había alcanzado la concentración límite a una profundidad de 1 cm que corresponde con el nivel de

Tabla 1
Resultados de la evaluación electroquímica del fuste d, cara norte, pila 9, del P.G.R.U.

Fecha	18-09-96			27-11-2002		
Elemento	FdN2					
Propiedad / Barra	Horizon.	Vertical	Cruce	Horizon.	Vertical	Cruce
Velocidad de Corrosión [i corr] ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	ND	ND	0,066	0,109	0,054	0,03
Potencial de acero en concreto [E corr] (mV)	ND	ND	-212	-77,6	-54	-85,6
Resistencia eléctrica del concreto [R] ($\text{k}\Omega$)	ND	ND	155,60	3,26	3,69	4,01

ND: no determinado

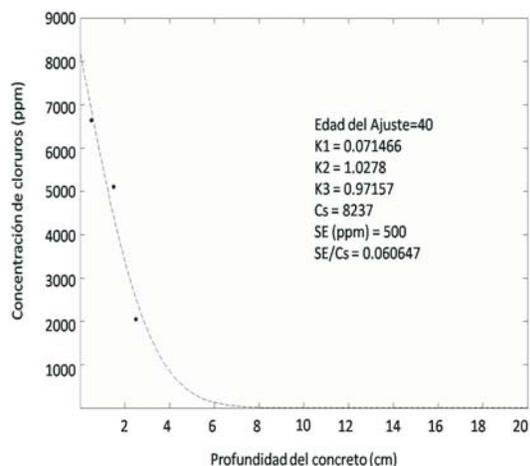


Figura 3. Ajuste del modelo de Hall optimizando K_1 y C_s usando 40 intervalos de 1 año.

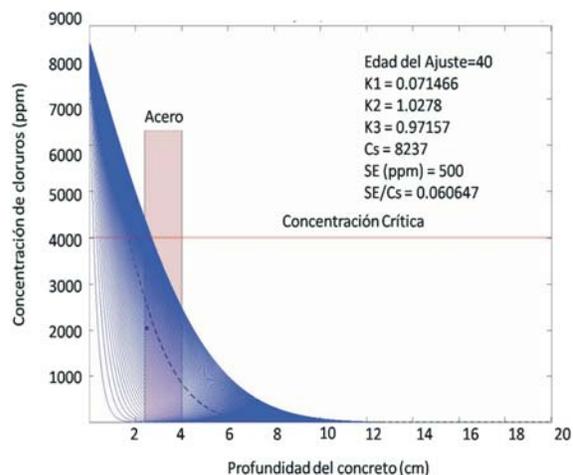


Figura 4. Predicción del tiempo de iniciación de corrosión en la armadura $T_i = 79$ años.

Tabla 2
Resultados de la evaluación electroquímica del fuste d, cara sur, pila 9, del P.G.R.U.

Fecha	18-09-96			27-11-2002		
Elemento	FdS2					
Propiedad / Barra	Horizon.	Vertical	Cruce	Horizon.	Vertical	Cruce
Velocidad de Corrosión [i corr] ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	ND	ND	0,025	0,196	0,011	0,034
Potencial de acero en concreto [E corr] (mV)	ND	ND	-167	-181,5	-154,0	-169,7
Resistencia eléctrica del concreto [R] ($\text{k}\Omega$)	ND	ND	260,40	2,21	2,70	2,30

ND: no determinado.

la armadura. Esto sugiere la presencia de corrosión por penetración de iones de cloruro.

La Figura 5 muestra las mediciones de concentración de cloruros y el perfil predicho por el modelo para el tiempo de calibración de 40 años, alcanzándose un error estándar de 0.0384.

La Figura 6 muestra la predicción del perfil de penetración de cloruros arrojando un tiempo de iniciación de la corrosión estimado de 31 años. Este resultado es coherente con la evaluación electroquímica del 2002. Los registros de las evaluaciones electroquímicas realizadas en 1996 (Edad = 33 años) sobre la misma zona, sugieren que la armadura se encontraba pasivada, pero se halló corrosión en áreas que habían sido reparadas previamente, tal como predice el modelo.

Caso 3. Cara norte de cabezal oeste, fuste c, puente General Rafael Urdaneta

Los resultados electroquímicos se muestran en la Tabla 3, donde para dos de las tres barras evaluadas (zona aledaña a la extracción del núcleo), la medida de la velocidad de corrosión indica una potencialidad de corrosión moderada. Por lo tanto, de acuerdo con los criterios de evaluación, el área en estudio presenta una probabilidad de corrosión moderada.

La Figura 7 muestra los resultados del proceso de calibración del modelo. Se puede observar un ajuste apropiado de la predicción y los datos experimentales en la edad de ajuste, alcanzando un error estándar de 0,0374.

La Figura 8 muestra la predicción del perfil de penetración del cloruro arrojando un tiempo de iniciación de corrosión de la armadura de 46

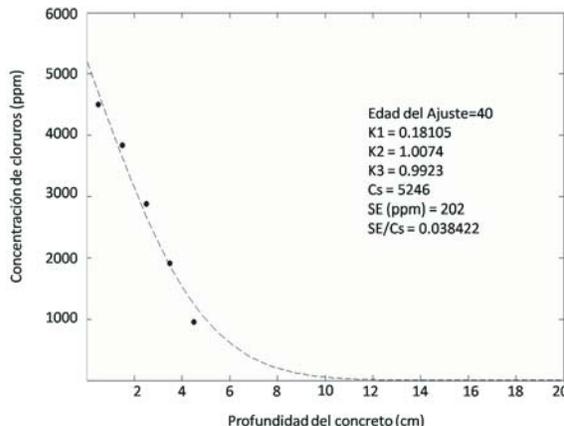


Figura 5. Ajuste del modelo de Hall optimizando K_i y C_s usando 40 intervalos de 1 año.

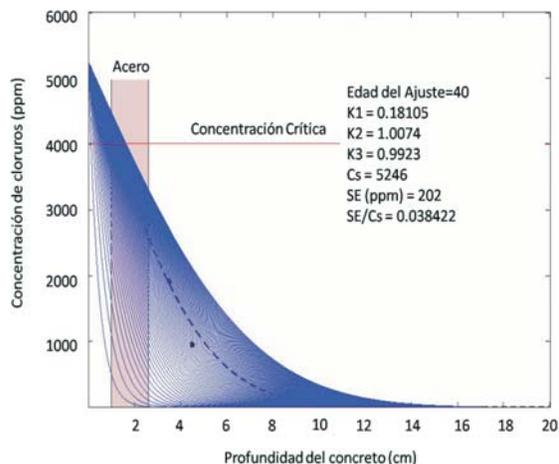


Figura 6. Predicción del tiempo de iniciación de corrosión en la armadura $T_i = 31$ años.

Tabla 3
Resultados de la evaluación electroquímica de fuste c, cara norte, pila 9, del P.G.R.U.

Fecha	18-09-96		27-11-2002			
Elemento	FcN2					
Propiedad / Barra	Horizon.	Vertical	Cruce	Horizon.	Vertical	Cruce
Velocidad de Corrosión [i_{corr}] ($\mu A/cm^2$)	ND	ND	0,015	0,118	0,159	0,069
Potencial de acero en concreto [E corr] (mV)	ND	ND	-116	-108,9	-97,1	-97,1
Resistencia eléctrica del concreto [R] (k Ω)	ND	ND	204,00	2,34	2,58	2,48

ND: No determinado.

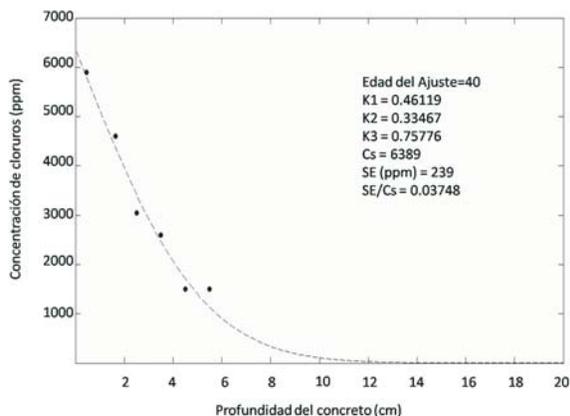


Figura 7 Ajuste del modelo a Hall optimizando K_1 y C_s usando 40 intervalos de 1 año.

años (2008), tiempo que no se corresponde con la evaluación electroquímica, donde dos de las medidas indican actividad de la armadura. No obstante, es importante indicar que las extracciones no se realizan en las mismas zonas de evaluación electroquímica, por lo cual, dada la heterogeneidad natural del concreto los niveles de cloruros en ambas zonas podrían ser diferentes. Es importante indicar que en el caso del PGRU todas las evaluaciones efectuadas hasta el momento [4, 9, 10], demuestran que la corrosión se presenta cuando la concentración de cloruros se encuentra en el orden de los 4000 ppm, independiente de la calidad del concreto en el elemento evaluado.

Análisis del método empleado

Una de las características observadas es que los valores óptimos de los parámetros del modelo de Hall, dependen fuertemente de los valores iniciales que lo alimenten, los cuales son necesarios para su optimización. Debe tomarse en cuenta, que el resultado obtenido representa un mínimo de la función. Se comprobó que los mínimos encontrados corresponden con la realidad física [9].

Una limitación importante de los resultados mostrados es que no se consideran las fluctuaciones que tienen lugar en el borde expuesto de la probeta, por cuanto se asume que la concentración superficial de cloruros permanece

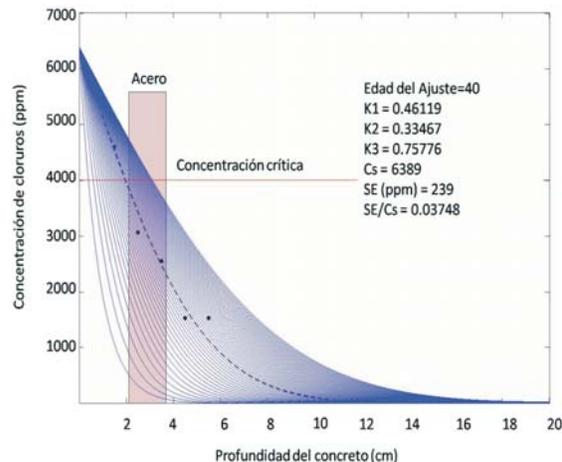


Figura 8. Predicción del tiempo de iniciación de corrosión en la armadura $T_i = 46$ años.

constante cuando en realidad esta cambia, entre otros factores, debido a la variación de las condiciones ambientales. Sin embargo, pese a la simplicidad del modelo, para los casos de estudios considerados en este trabajo, la correspondencia entre los experimentos y la predicción es aceptable.

Conclusiones

Del análisis de resultados se concluye que el software desarrollado, resuelve satisfactoriamente la forma transitoria no lineal de la segunda ley de Fick para predecir la difusión de cloruros en concreto, cuando la difusividad es dependiente de la concentración de cloruros de acuerdo al modelo de Hall, empleando el método de volúmenes finitos. Además, es capaz de optimizar tanto los parámetros del modelo de Hall (K_1 , K_2 y K_3) como la concentración de cloruros en la superficie (C_s), con el fin de predecir la evolución del perfil de cloruros en el interior del concreto en el tiempo y de estimar, en conocimiento de la profundidad del acero de refuerzo, el tiempo de iniciación de la corrosión en la armadura (TICA). Finalmente, las predicciones del tiempo de iniciación de la corrosión en la armadura, obtenidas por el programa desarrollado están en concordancia con los datos experimentales obtenidos del estudio químico y electroquímico realizado en la Pila 9 del P.G.R.U. durante la presente investigación.

Referencias bibliográficas

1. Lea, F. M., "The chemistry of cement and concrete". Chemical Publishing Company, New York, 1971.
2. Rincón de, O. y col., "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado". CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Red Temática XV.B, DURAR, ISBN 980-296-541-3, Maracaibo, 2000.
3. Troconis de Rincón O. and coauthors, "The Effect of the Marine Environment on the Reinforced Concrete Durability in Iberoamerican Countries: Duracon Project/Cyted". Corrosion Science. Vol. 49, 7. July, (2007). Pp. 2832-2843.
4. Moron, O. Desarrollo de un modelo para predecir la durabilidad de estructuras de concreto armado en medios marinos. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Corrosión, Tesis de Maestría, Maracaibo-Venezuela, 2000.
5. Arrieta, F. and Col., "Efecto de la difusión de iones de cloruro en estructuras de concreto armado expuestas en ambientes marinos". Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Corrosión, Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Químico, Maracaibo-Venezuela, 2001.
6. Patankar, J. V., "Numerical heat transfer and fluid flow". Hemisphere, Washington, 1980.
7. Seber, G. A. and Wild, C., "Nolinear Regression", Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2003.
8. Arpaci, V., "Conduction heat transfer". Addison-Wesley Publishing Co., 1966.
9. Bueno, V., "Evaluación del uso de volúmenes finitos en la estimación del tiempo de iniciación de la corrosión en armaduras". Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de Corrosión, Tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Químico, Maracaibo-Venezuela, 2005.
10. Troconis de Rincón, O., Contreras, D., Sánchez, M. Fernández de Romero, M. BRAVO, j., Morón de Bravo, O., Vezga, C., Fernández, R. Navarro, A. y Sarcos, A., "Avaliação/Reabilitação de Estructuras enm Ambientes Marítimos". Caso Histórico: Ponte de Maracaibo". Corrosão e Protecção de Materiais. INETI. Jul/Ago/Set., Vol. 25, No. 3, (2006). Pp 74-91.

Recibido el 26 de Julio de 2010

En forma revisada el 7 de Febrero de 2011