

Development of a model to predict the durability of reinforced concrete structures in marine environment

Oleyda Morón, Oladis de Rincón, César García, Idelfonso Arrieta y José Bravo

Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Apartado 10482, Maracaibo, Venezuela

Abstract

This paper proposes a model that enable to estimate the durability of reinforced concrete structures exposed to marine environment. To that effect, different models proposed by the literature were used, where the diffusion coefficient is function of the concentration, departing of the fact that the transfer process of the chloride ions is controlled by purely diffusion flow. A total of 44 concrete nucleus served as base for this research. Thus, the results of chloride ions contamination determined in different elements of the General Rafael Urdaneta Bridge (PGRU) were used. The PGRU, a 39 year structure, is located front Caribbean Sea with a very aggressive environmental condition. The results indicate that it does not exist an unique model that is applied to all the evaluated structure, for the valuation criteria assumed in the selection of the models, but, as a rule depend on the quality of the concrete (equal model for a same element). However, the Hall's model was the one which fit better to the results (70% of the cases).

Key words: Diffusion, chloride ions, durability, reinforced concrete.

Desarrollo de un modelo para predecir la durabilidad de estructuras de concreto armado en medios marinos

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad proponer un modelo que permita estimar la durabilidad de estructuras de concreto armado expuestas a un ambiente marino. A tal efecto, se utilizaron diferentes modelos propuestos por la literatura, donde el coeficiente de difusión es función de la concentración, partiendo de que el proceso de transferencia de los iones cloruro es controlado por un flujo puramente difusional. Un total de 44 núcleos de concreto sirvieron como base para esta investigación. Así, se utilizaron los resultados de contaminación de iones cloruro determinados en diferentes elementos del Puente General Rafael Urdaneta (PGRU), estructura de concreto de 39 años en servicio. El PGRU se encuentra frente al Mar Caribe con condiciones ambientales marinas agresivas. Los resultados indican que no existe un modelo único que se aplique a toda la estructura evaluada, para los criterios de valoración asumidos en la selección de los modelos, sino que, en general dependen de la calidad del concreto (igual modelo para un mismo elemento). Sin embargo, fue el modelo de Hall el que mostró el mejor ajuste a los resultados (70% de los casos). Además se observó que la calidad del concreto tiene un marcado efecto sobre la difusión del ión cloruro y que en general el coeficiente de difusión se ve más afectado por agentes externos que por la variación de la concentración dentro del concreto.

Palabras clave: Difusión, iones cloruro, durabilidad, concreto.

Introducción

La corrosión en armaduras es una de las causas responsables del deterioro de las estructuras de concreto armado en el mundo, que conlleva a invertir grandes capitales en gastos de reparación y mantenimiento de obras públicas y privadas.

Una de las causas más habituales que provoca la corrosión en las armaduras, es la penetración de los cloruros a través de la red de poros, cuando está situada en ambientes marinos o cuando en la mezcla se hayan incorporado dichos iones. Los iones cloruro son capaces de provocar corrosión localizada y por tanto producir el fallo prematuro e inesperado de la estructura. La necesidad de determinar un modelo que permita establecer el momento en que los iones cloruro alcanzan la armadura, a niveles que causen su corrosión, ha dado lugar para realizar una serie de investigaciones sobre el particular.

En la búsqueda de soluciones prácticas, hay que tener en cuenta que los procesos de difusión son en general lentos, lo que supone invertir tiempo de ensayos muy prolongados para obtener información acerca de un determinado tipo de concreto, siendo aún más difícil con los concretos de alta resistencia con los que es a veces imposible obtener datos de Difusión con ensayos inferiores a 2 ó 3 años. Con el fin de solucionar este problema algunos estudios de laboratorio, aplicando campos eléctricos al concreto, han permitido abrir un nuevo campo al poder acelerar el movimiento de los iones contenidos en los poros bajo la acción del campo eléctrico (migración) y las ecuaciones básicas de transporte de masa (Nernst-Planck, Nernst-Einstein) las cuales pueden ser aplicadas para calcular movimientos iónicos [1].

Cuando se dispone de mediciones de la cinética y del equilibrio, el coeficiente de difusión, puede ser determinado con la ayuda de modelos matemáticos que representen el proceso específico de transferencia de masa. Algunos de estos se basan en las leyes de Fick con difusividad constante, mientras que otros utilizan difusividad variable dependiente de la concentración de la partícula; todos estos investigadores [2] consideran partículas esféricas.

Existen modelos de difusión gobernados por las ecuaciones de transferencia de masa, ca-

paces de estimar el coeficiente de difusión considerando el efecto del factor de geometría de la partícula, mediante los métodos de optimización de Davies, Swann y Campey [2-3].

La distribución de cloruro en estructuras de concreto armado en general se modela como un proceso de difusión pura en estado no estacionario, aplicando los postulados de la segunda ley de Fick [4-6], y en función de un coeficiente de difusión constante.

Para muchos procesos de transferencia de masa entre fluidos alrededor de partículas sólidas, el coeficiente de difusión muestra una gran dependencia con la concentración. En particular, en sistemas de adsorción con isoterms no lineales, se han encontrado analogías entre éstas y la relación funcional del coeficiente de difusión y la concentración [7-9].

Así, para el análisis de la distribución de cloruros en estructuras de concreto armado se propone un modelo de transferencia de masa basado en la 2da Ley de Fick con un coeficiente de difusión variable con la concentración, $D = f(C)$. De acuerdo a los modelos reportados en la literatura [7-11]:

$$\text{Modelo de Langmuir: } D = K_1 C / (1 + K_2 C) \quad (1)$$

$$\text{Modelo de Freundlich: } D = K_1 C^{1/K_2} \quad (2)$$

$$\text{Modelo de Temkin: } D = K_1 \ln(K_2 C) \quad (3)$$

$$\text{Modelo de Gilliland: } D = K_1 e^{K_2 C} \quad (4)$$

$$\text{Modelo de Hall: } D = K_1 (1 + K_2 C / 1 + K_3 C) \quad (5)$$

donde:

D = difusividad del cloruro a través del concreto.

C = concentración de cloruro en el concreto.

K_1, K_2, K_3 = constantes a determinar de la data experimental.

Los cuatro primeros modelos establecen la analogía entre la difusión y la adsorción.

En el caso del Modelo de Hall, K_1 (D_0) es el coeficiente de difusión a bajas concentraciones ($C \rightarrow 0$), mientras el más alto coeficiente de difusión se obtiene a altas concentraciones ($C \rightarrow \infty$, $D = K_1 K_2 / K_3$). Los coeficientes K_2 y K_3 se refieren a la carga iónica y a la movilidad iónica del sistema, respectivamente.

El presente estudio tiene como objetivo primario evaluar los diferentes modelos de transferencia de masa referidos anteriormente para así proponer aquel que mejor estime la durabilidad de una estructura de concreto armado, utilizando para ello los resultados obtenidos en el Puente General Rafael Urdaneta. Además de la comparación de los tiempos de despasivación del refuerzo, obtenidos de los modelos evaluados, con las mediciones electroquímicas realizadas en el campo.

Procedimiento Experimental

Para el siguiente trabajo de investigación, se procesaron datos obtenidos de la estructura de concreto armado del Puente General Rafael Urdaneta (PGRU), con 38 años en servicio. Este puente se encuentra localizado al noroeste de Venezuela, frente al mar caribe, cuyas condiciones ambientales marinas son agresivas.

En el Puente General Rafael Urdaneta la temperatura y humedad relativa promedio anual es de 30°C y 83% respectivamente, con un contenido de cloruros en las aguas del Lago de Maracaibo en el orden de 3000 ppm. La velocidad del viento oscila entre 1,4 a 11 m/s, con dirección predominante noreste.

En este trabajo se presentan los resultados, al considerar el coeficiente de difusión variable con la concentración, utilizando diferentes elementos estructurales del PGRU específicamente de las Pilas 3 y 9. La Figura 1 muestra la Pila 9 y las características generales del concreto de los elementos evaluados en ambas pilas.

Obtención de los Datos para Evaluar los Modelos

Los datos que sirvieron de base para evaluar los diferentes modelos, fueron extraídos de las evaluaciones efectuadas a la estructura del PGRU. Se evaluaron en este estudio las Pilas 3 y 9 de las 135 pilas con las que cuenta el Puente. Esta selección se realizó dada la experticia obtenida en trabajos anteriores [12-13] y a su facilidad de acceso.

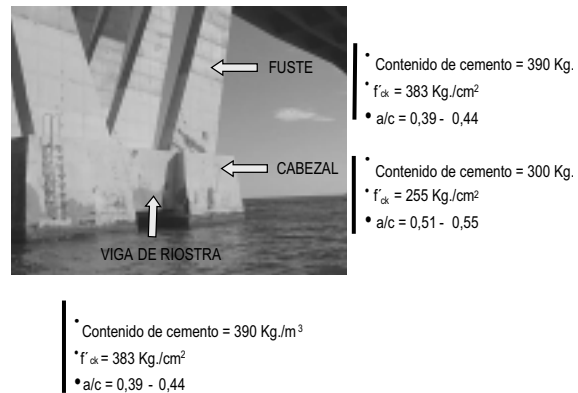


Figura 1. Pila 9. Características generales del concreto en elementos del PGRU.

Las pilas 3 y 9 se encuentran situadas cerca de la costa Nor-Oeste del Lago de Maracaibo. La pila 3 está compuesta por cuatro (4) fustes rectos de sección variable, unidos en el extremo superior con una viga corona de sección T. Los fustes se encuentran anclados a una zapata o cabezal macizo que es soportado por seis (6) pilotes de 36" de diámetro. La estructura de la pila 9 es similar a la pila 3, solo que ésta posee dos cabezales alineados en la dirección del eje del puente arriostrados por cuatro (4) vigas de riostra. Sobre estos cabezales se anclan cuatro fustes de geometría en forma de X y de sección variable.

Todas las muestras de concreto analizadas (núcleos) extraídos de la estructura del Puente General Rafael Urdaneta específicamente, así como los elementos de la estructura, fueron identificados de acuerdo a su localización en la estructura (Tabla 1). Es importante mencionar que las Pilas se enumeran en orden creciente desde Punta de Piedra (Oeste) hacia Punta Iguana (Este). Cada una de ellas está constituida por Pilotes, Cabezales, Vigas de Riostra, Fustes y Viga mesa.

La determinación del contenido de cloruros libres se realizó a cada corte o rebanada aplicando el método de titulación fraccionada, de acuerdo a la Norma ASTM C-1152.

Dado que la estructura se encuentra ubicada en un ambiente marino, se estableció como base que la corrosión del refuerzo se encuentra

Tabla 1
Nomenclatura utilizada para la identificación de los elementos del PGRU

<p>Cabezales X1X2X3X4</p> <p>Ejemplo: CWS52 Cabezal Oeste Cara Sur Núcleo 52</p> <p>CET28 Cabezal Este Tope Núcleo 28</p>	<p>X1: Inicial del elemento C (Cabezal)</p> <p>X2: Ubicación Cardinal del Cabezal E (Este) W (Oeste)</p> <p>X3: Cara del Cabezal N (Norte) S (Sur) E (Este) W (Oeste) T (Tope)</p> <p>X4: Identificación numérica según el orden de extracción.</p>	<p>Vigas de riostra X1X2X3X4X5</p> <p>Ejemplo: VRcS57 Vigas de Riostra "c" Cara Sur Núcleo 57</p>	<p>X1, X2 : Inicial del elemento VR (Viga de Riostra)</p> <p>X3: Ubicación respecto al norte a (VR más al Norte) b c d (VR más alejada del norte)</p> <p>X4 : Cara de la VR N (Norte) S (Sur) F (Fondo) T (Tope)</p> <p>X5: Identificación numérica según el orden de extracción.</p>	<p>Fustes X1X2X3X4X5</p> <p>Ejemplo: FdWN37 Fuste "d" Cabezal Oeste Cara Norte Núcleo 37</p> <p>FbN8 Fuste "b" Cara Norte Núcleo 8</p>	<p>X1 : Inicial del elemento F (Fuste)</p> <p>X2 : Ubicación respecto al Norte a (Fuste más al Norte) b c d (Fuste más alejado del norte)</p> <p>X3: Cabezal donde se encuentra el fuste E (Este) W (Oeste). Este dígito no aplica para el caso de pilas de un (1) cabezal como Pila 3.</p> <p>X4 : Cara del Fuste N (Norte) S (Sur) E (Este) W (Oeste)</p> <p>X5: Identificación numérica según el orden de extracción.</p>
---	---	---	---	--	--

X1, X2, X3...XN: Representa la posición de un dígito.

directamente relacionada con la contaminación por iones cloruros del concreto que vienen del exterior, y que un contenido mayor de 0,4% [4] en base al contenido de cemento destruye la pasividad del acero en concreto armado.

Análisis de los Diferentes Modelos que Relacionan la Difusividad-Concentración

La Difusión se interpreta como un proceso por el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otra como consecuencia de la existencia de un gradiente de concentración, entre éstos. Una de las expresiones matemáticas más usadas para predecir la velocidad de penetración de los cloruro en el concreto es la Segunda Ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{(c)} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (6)$$

Con el interés de obtener una ecuación que correlacione la difusión-concentración describiendo la relación de estas variables con el mejor ajuste posible a los valores experimentales, se utilizaron los modelos mencionados en las ecuaciones [1] a [5]. Las ecuaciones definitivas una vez sustituidos estos modelos de relación Difusión-Concentración en la ecuación [6] son:

Modelo de Langmuir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{K_1 C}{1 + K_2 C} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{K_1}{(1 + K_2 C)^2} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)^2 \quad (7)$$

Modelo de Freundlich:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_1 \ln(K_2 C) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{K_1}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)^2 \quad (8)$$

Modelo de Temkin:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_1 C^{\frac{1}{k_2}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{K_1}{K_2} C^{\frac{1-k_2}{k_2}} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)^2 \quad (9)$$

Modelo de Gilliland:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_1 e^{K_2 C} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_1 K_2 e^{K_2 C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)^2 \quad (10)$$

Modelo de Hall:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_1 \left(\frac{1 + K_2 C}{1 + K_3 C} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{K_1 (K_2 - K_3)}{(1 + K_3 C)^2} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)^2 \quad (11)$$

Sujetas a las siguientes condiciones de transferencia:

i) Inicialmente se considera que no hay cloruro en el elemento de concreto armado, esto es

$$C(x, 0) = 0. \quad (12)$$

ii) La concentración de cloruro hacia la superficie es constante para $t > 0$, esto es

$$C(0, t) = C_s. \quad (13)$$

iii) El flujo de cloruro hacia el extremo del elemento de concreto armado es despreciable, esto es

$$\partial C / \partial x = 0 \text{ a } x = L \quad (14)$$

Como puede notarse en la Figura 1, en general la calidad del concreto utilizado en el PGRU es buena y al ser una estructura con más de 38 años de haber sido puesta en servicio, es adecuado considerar que C_s es aproximadamente constante, específicamente en las zonas atmosféricas. Esto ha sido demostrado en otros trabajos [14].

Inicialmente se aplicaron todos los modelos para el universo de muestras, determinándose así para cada una de ellas el error cuadrático total y las constantes asociadas (K_1 , K_2 y K_3). Esto se realizó resolviendo las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales por el Método de Colocación Ortogonal, que las transforma en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Estas a su vez se resuelven simultáneamente por el Método de Runge Kutta, utilizando como procesador matemático, el Programa Matlab 5.1.

Posteriormente se seleccionó como modelo de mejor ajuste para cada núcleo, aquel cuyo error cuadrático total resultara menor a $1E-03$. Luego se resuelve la ecuación general del modelo (ecuaciones [7] a [11]) para tiempos diferentes al tiempo de muestreo mediante igual procedimiento matemático y de esta manera se estima el tiempo necesario para despasivar a la armadura.

Resultados

De la selección comparativa de los modelos aplicados al universo de las muestras, se determinó que el modelo de Hall arrojó el menor error cuadrático total y aplicó en 29 muestras (70%) de 44 ensayadas (Figuras 2-5). El resto de los modelos presentaron errores mayores del criterio asumido.

Para la determinación de los tiempos de despasivación se seleccionaron tres (3) núcleos de diferentes elementos de las pilas. Las Figuras 3-5, presentan la variación de la concentración de cloruros con la profundidad de cubrimiento de concreto, para diferentes edades de la estructura, utilizando la 2da Ley de Fick (difusividad variable) para el modelo de Hall aplicado a los núcleos FdN4, VraN43 y CWW55 de las pilas 3 y 9.

La predicción del tiempo estimado para la despasivación del refuerzo se obtuvo con el intercepto sobre el gráfico (anteriormente descrito), de la profundidad del refuerzo y la concentración límite de cloruro libre que induce a la despasivación del refuerzo (4000 ppm/cem). Aun cuando algunos investigadores [15] han determinado que estos niveles pueden variar en un rango de valores, incluyendo los 4000 ppm, este valor ha sido ratificado en toda la estructura del PGRU al presentarse corrosión de la armadura siempre que este ión se encuentre a este nivel y/o por encima. También ha sido demostrado en otros tra-

bajos realizados por los autores [16] para otros tipos de mezclas.

Los resultados obtenidos muestran que para el núcleo FdN4 (Figura 3), el tiempo de despasivación estimado obtenido fue de 33 años; para el núcleo VraN43 (Figura 4), el tiempo de despasivación estimado fue de 25 años y para el núcleo CWW55 (Figura 5), el tiempo de despasivación estimado fue de 55 años. De la comparación realizada de estos tiempos de despasivación (difusión variable), con los parámetros electroquímicos que estiman la actividad real del refuerzo embebido en el concreto (Tabla 2), se nota que para el núcleo FdN4 el tiempo de despasivación del refuerzo obtenido fue de 33 años, este valor coincide con las medidas electroquímicas realizadas antes de extraer el núcleo ($E = -369$ mV vs Cu/CuSO₄ y $i_{corr} = 0,582$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) que indican actividad del refuerzo. Para el núcleo VraN43 el tiempo de despasivación del refuerzo obtenidos fue de 25 años, este valor está de acuerdo con las medidas electroquímicas realizadas antes de extraer el núcleo ($E = -342$ mV vs Cu/CuSO₄ y $i_{corr} = 0,201$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) que indican corrosión del refuerzo. Para el núcleo CWW55 el tiempo de despasivación del refuerzo obtenidos fue de 55 años, este también está de acuerdo con las medidas electroquímicas realizadas antes de extraer el núcleo ($E = -238$ mV vs Cu/CuSO₄ y $i_{corr} = 0,013$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) lo que indica que aún el refuerzo no ha perdido su pasividad, y se estima perderla en 17 años más. Todos estos

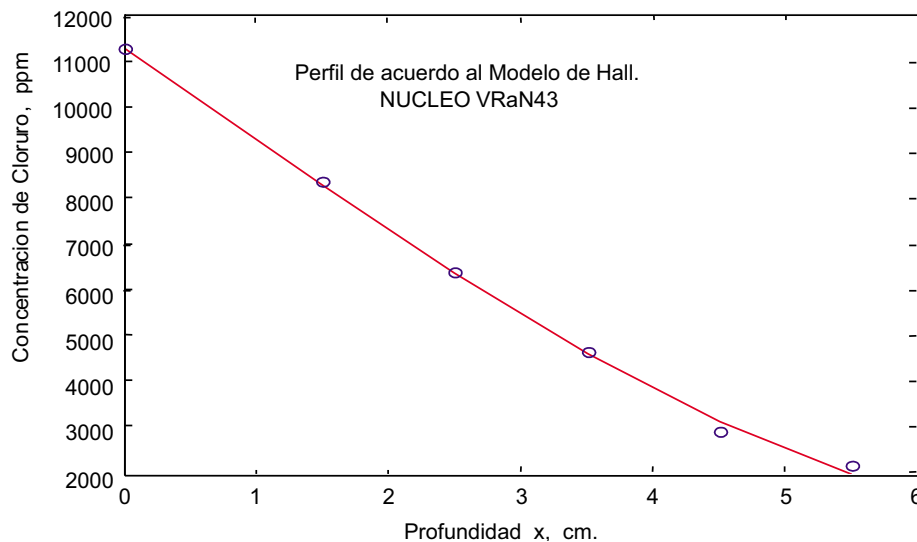


Figura 2. Curva de ajuste obtenida a partir del modelo de Hall para los datos del núcleo VraN43. Observe la precisión del ajuste con un error cuadrático de $6,64\text{E}-04$.

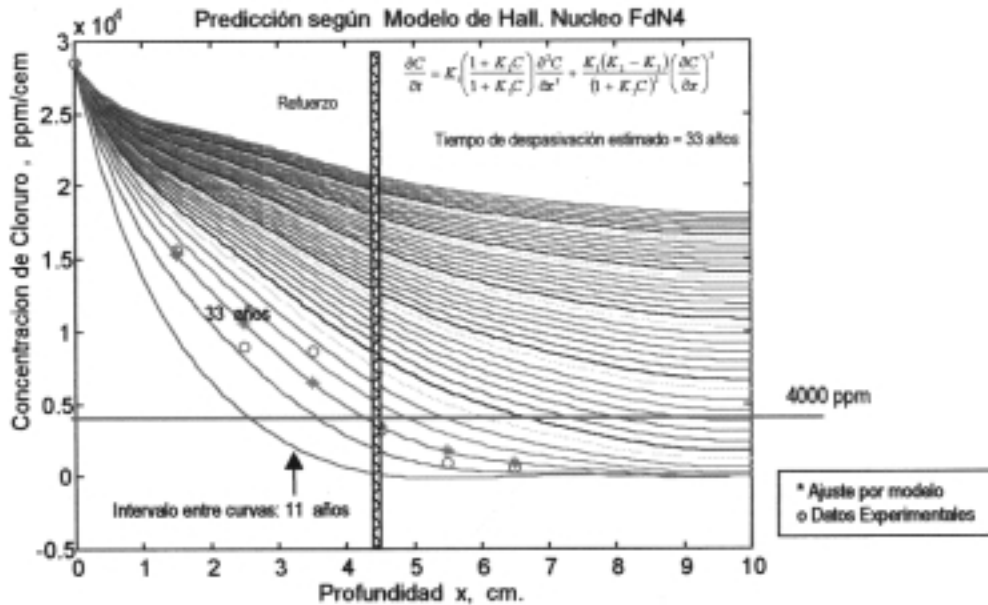


Figura 3. Determinación del tiempo estimado de despasivación del refuerzo utilizando la 2da Ley de Fick (Difusividad Variable) para el modelo de Hall aplicado al núcleo FdN4.

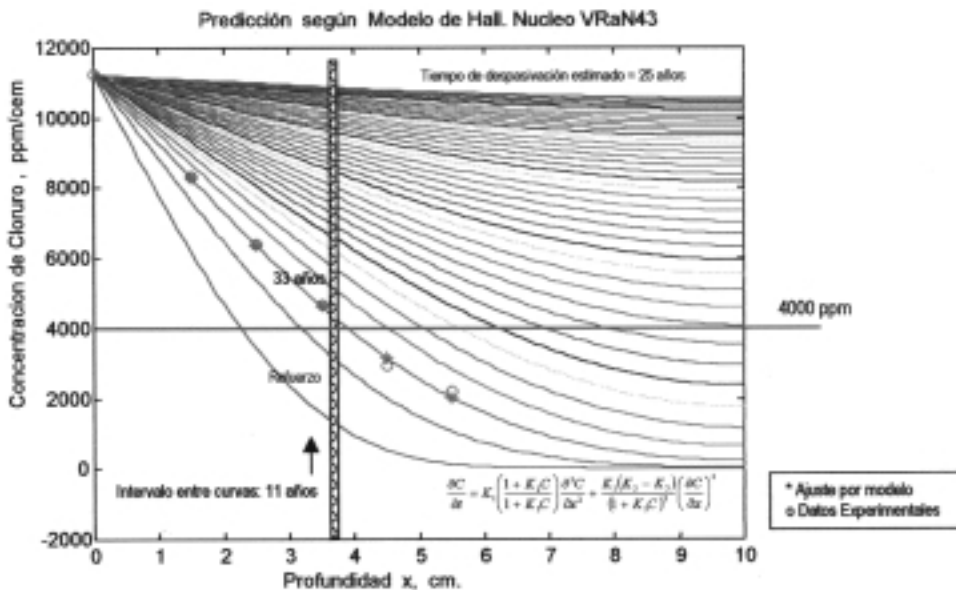


Figura 4. Determinación del tiempo estimado de despasivación del refuerzo utilizando la 2da Ley de Fick (Difusividad Variable) para el modelo de Hall aplicado al núcleo VRa43.

resultados coinciden con los de la concentración de iones cloruro a nivel de la armadura, donde en este último caso ésta se encontraba muy por debajo de 4000 ppm (Tabla 2).

De esto se deduce que las proyecciones obtenidas de los modelos aplicados se ajustan a la realidad de la estructura.

En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan los resultados de los coeficientes de difusión promedio vs altura sobre el nivel del lago (asnl) por núcleo para distintos elementos de las Pilas 3 y 9. Con relación a los Fustes los resultados reportan los valores más bajos de difusión para las zonas sin resguardo y no se observa un marcado efecto de

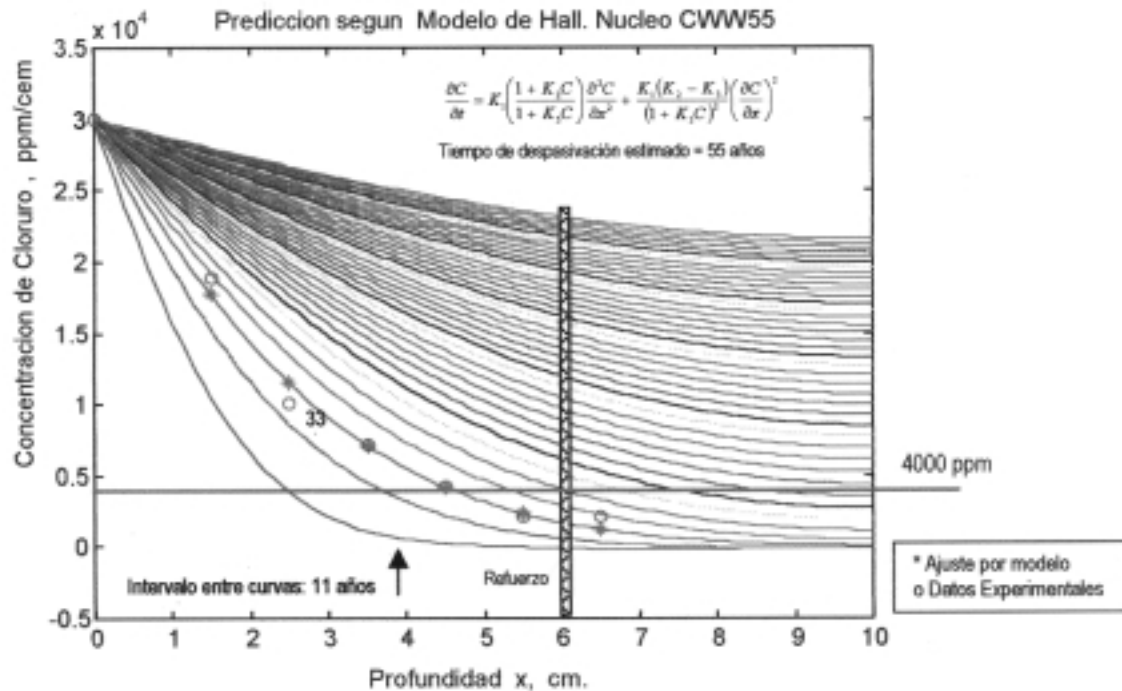


Figura 5. Determinación del tiempo estimado de despasivación del refuerzo utilizando la 2da Ley de Fick (Difusividad Variable) para el modelo de Hall aplicado al núcleo CWW55.

Tabla 2
Resultados de los tiempos estimados de despasivación obtenidos con difusión variable y comparación con los parámetros electroquímicos de campo

Núcleo	Tiempo estimado de despasivación Difusión Variable	Parámetros electroquímicos		Concentración de cloruro libre (soluble en agua) a nivel de la barra
	años	Potencial E (mV Cu/CuSO ₄)	Corriente de corrosión i _c (μA/cm ²)	ppm/cm
FdN4	33	-369	0,582	3800
VRaN43	25	-342	0,201	4676
CWW55	55	-238	0,013	2160

la altura sobre el coeficiente de difusión (Figura 6). Esto se debe a que las zonas resguardadas mantienen mejor la humedad y por consiguiente la difusión del ión es más rápida.

Para los cabezales se observaron valores de coeficiente de difusión más altos que el resto de los elementos (Figura 9) y un marcado efecto del frente de exposición con la difusividad (Figura 7),

mostrando las caras Norte y Este expuestas al frente de viento y oleaje los valores mas bajos de difusión (1,41E-09 y 2,09E-09 cm²/s). Además no se evidencia diferencias significativas entre los coeficientes de difusión obtenidos entre las caras. Esto se debe a que el concreto de este elemento no es de tan buena calidad (Figura 1), como el de los Fustes, lo que permite que estos iones ataquen más rápidamente a la armadura.

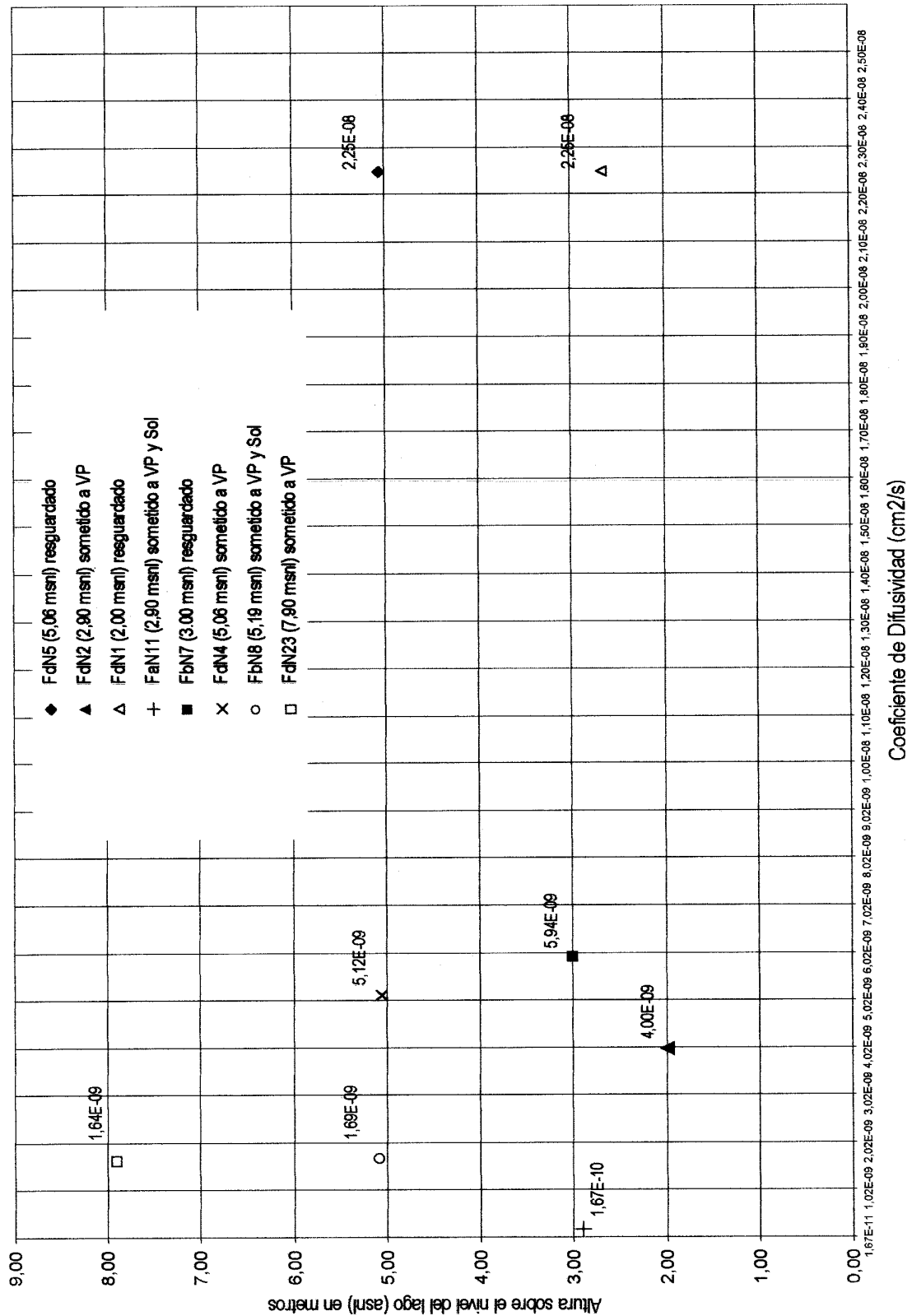


Figura 6. Resultados de relación coeficiente de difusión vs altura para los fustes de la pila 3 del PGRU

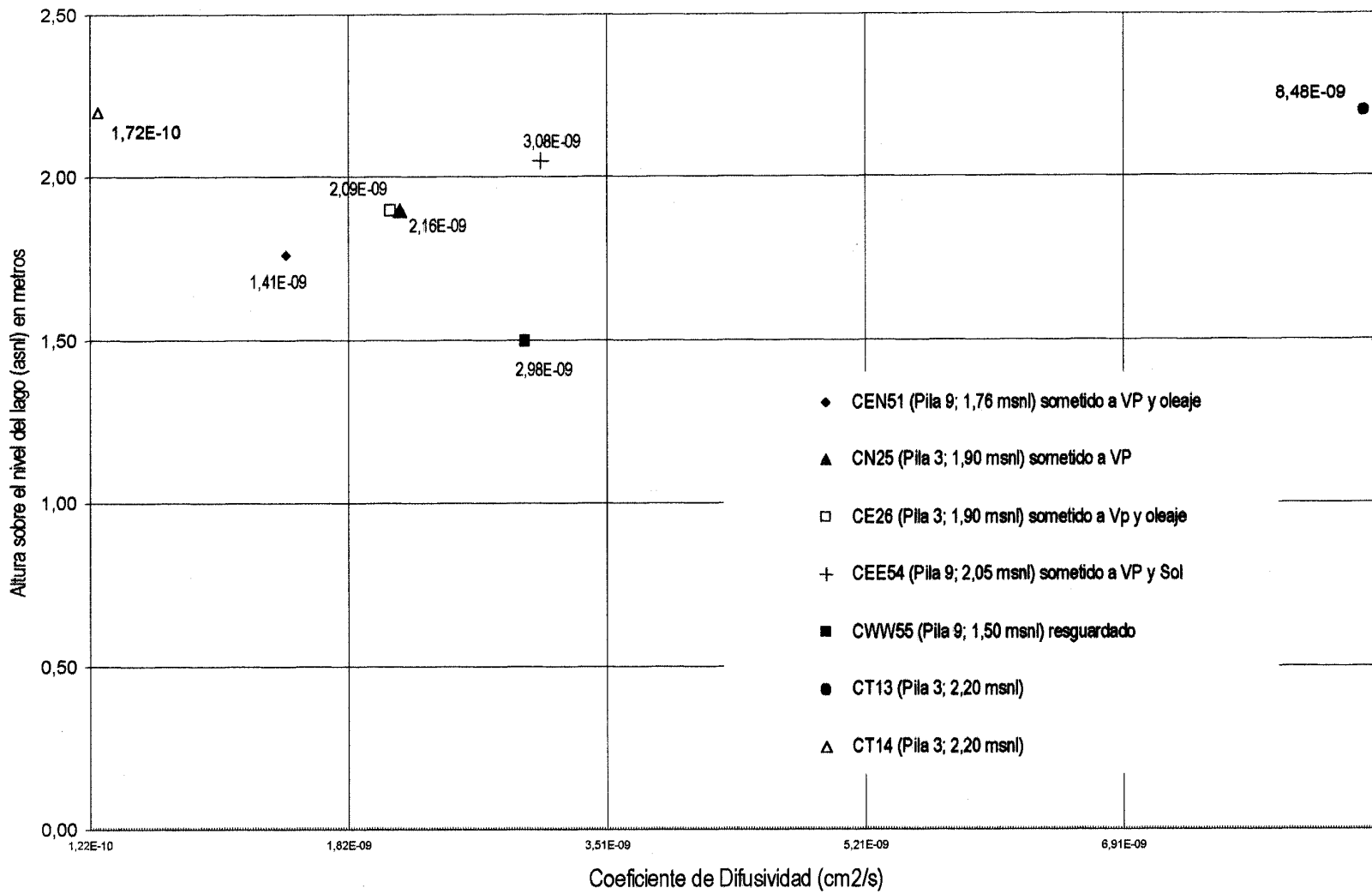


Figura 7. Resultados de relación coeficiente de difución vs altura por núcleo para los cabezales de las pilas 3 y 9 del PGRU.

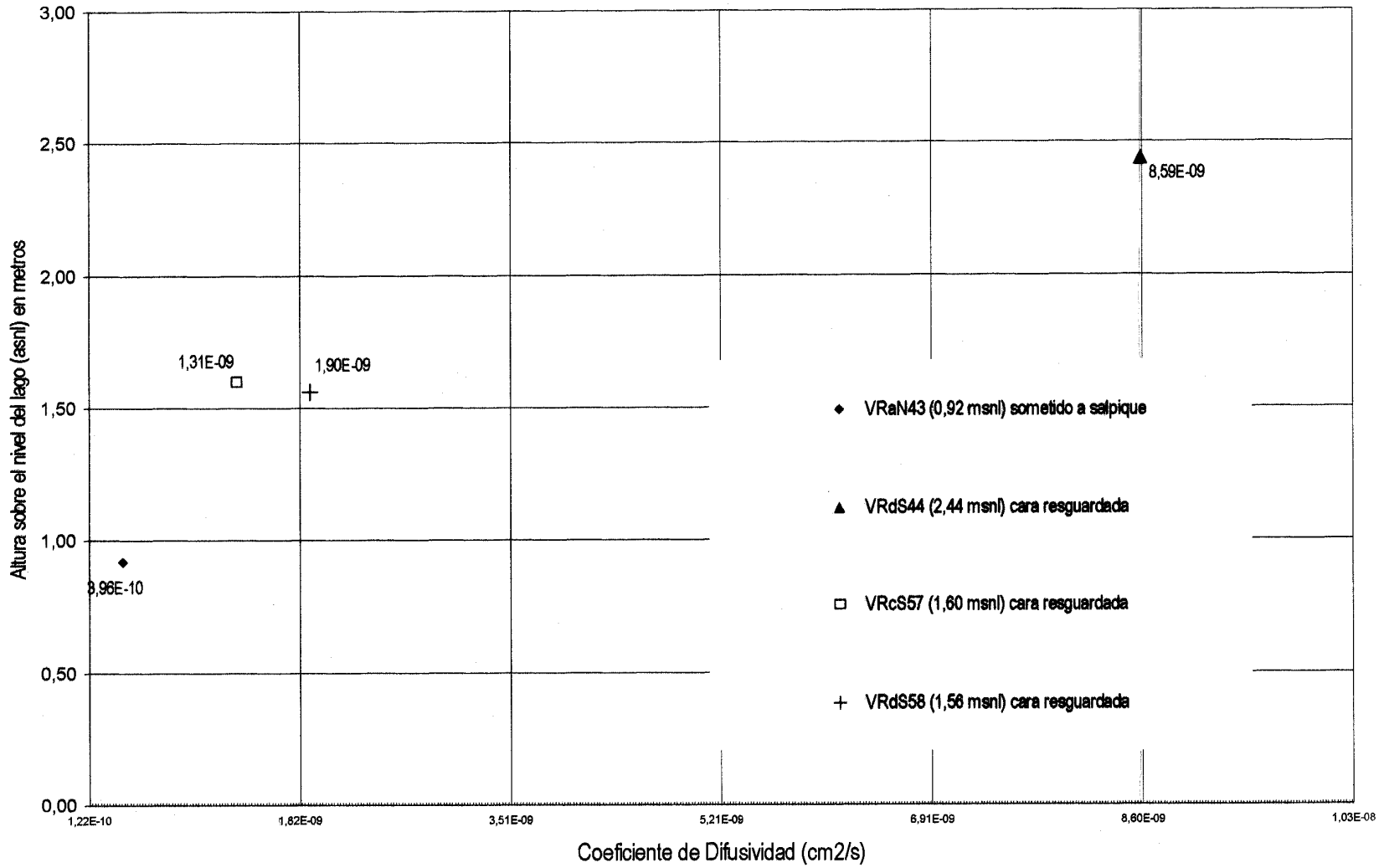


Figura 8. Resultados de relación coeficiente de difusión vs altura por núcleo para las vigas de riostra de la pilas 9 del PGRU.

Núcleo	Coefficiente de Difusión Promedio. (cm ² /S)
FdN37	4,49E-10
VraN43	3,96E-09
VRdS44	1,59E-09
CEN51	1,41E-09
CEE54	3,08E-09
CWW55	2,98E-09
VRcS57	1,31E-09
VRdS58	1,90E-09



Figura 9. Resultados del coeficiente de difusión promedio para una muestra de núcleos de la pila 9 del PGRU.

Con relación a las vigas de riostras se nota también una incidencia del frente de exposición sobre los valores de los coeficientes de difusión (Figura 8). Esto es el caso del núcleo VraN43 (0,92 msnl) ubicado en la cara norte con viento y oleaje predominante que presenta la menor difusividad (3,96E-10 cm²/s), en comparación a las caras resguardadas (1,31E-09, 1,90E-09 y 8,59E-09 cm²/s). Adicionalmente no se observa un efecto marcado de la altura sobre el coeficiente de difusión. Por otra parte, para la pila 9 se observa que los valores del coeficientes de difusión en los cabezales son mayores (1,41E-09 a 3,08E-09 cm²/s) que en los fustes y en las vigas de riostra (4,09E-10 a 1,31E-09 cm²/s). Esto es debido a que el cabezal tiene un concreto con una cantidad de cemento relativamente baja (300 Kg/m³ de concreto) y una relación a/c alta (0,51-0,55). Por el contrario, las vigas de riostra y los fustes presentan un concreto con una cantidad de cemento de 390 Kg/m³ con una relación a/c baja (0,39-0,44) razón por la cual los coeficientes de difusión son más bajos en estos elementos, condiciones que los hacen menos vulnerable en este medio agresivo de exposición.

En general se determinó que la mayor variación del coeficiente de difusión, en un mismo elemento, se debe a los factores medioambientales de exposición. Sin embargo, es importante indicar que todavía existe

mucha controversia en relación a este tema ya que los valores de Coeficiente de Difusión pueden estar sujetos a dispersiones propias de los datos y que su significado debe de ser interpretado cuidadosamente pudiendo no ser extrapolado a otras condiciones atmosféricas y materiales diferentes.

Conclusiones

- Aplicando los modelos, a muestras agrupadas por altura y por frente de exposición, se determinó que el modelo de Hall, en general muestra el mejor ajuste para todos los elementos.
- El coeficiente de difusión es afectado fuertemente por las condiciones de exposición de los elementos.
- El coeficiente de difusión se muestra ligeramente afectado por la calidad del concreto.
- Los resultados del tiempo estimado de despasivación del refuerzo, asumiendo difusividad variable, coinciden con la actividad corrosiva de la armadura medida en campo.

Agradecimiento

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES), por su asistencia financiera.

Referencias Bibliográficas

1. Andrade C.: "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements". *Cement and Concrete Research*. Vol. 23. No. 3. pp.724-742. 1993.
2. Fernández N., Chourio E., García C.: "Comparación de Modelos de Difusión en la Cinética de Adsorción de Fenol en Fase Acuosa". *Revista Técnica de Ingeniería*. Universidad del Zulia. Vol. 11. N° 2. pp. 99-110.1988.
3. Chourio E., Ferrer X., Arrieta I., Fernández N., Sarmiento C.: "Diffusion Model under the Solid Phase Control for Adsorption and Ion-Exchange". *Revista Técnica de Ingeniería*. Universidad del Zulia. Vol. 20. No. 3. pp 245-255, 1997.
4. De Rincón 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, ISBN 980-296-541-3, Red Temática XV. B. Durabilidad de la Armadura, 1997.
5. Castañeda H., Castro P., Gonzalez C. y Genesca J.: "Propuesta de un Modelo de Difusión de Cloruro en Estructuras de Concreto Armado Expuestas en la Península de Yucatán México". 2nd. Latin American. Region Corrosion Congress. Septiembre. 1996.
6. Castro P.: "Difusión y Corrosión por Iones Cloruro en el Concreto Reforzado". Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 1995.
7. Neretnieks I.: *Chem. Eng. Sci.*, 30, 1231 1976.
8. Sudo Y.: et al., *Chem. Eng. Sci.*, 33, 1287 1978.
9. Suzuki M. and Fujii T., *AIChE J.*, 28, 380 1982.
10. Helfferich F. and Plesset M.: Ion Exchange Kinetics- A non linear diffusion problem.- *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 28, N° 3, pp. 418-424, 1958.
11. García C., Arrieta I., y Sarmiento C.: Efectos Limites de migración iónica en la cinética de intercambio iónico bajo control de la fase sólida, *Rev. Tec. Universidad del Zulia*, Vol 18, N° 2, pp. 229-238, 1995.
12. De Rincón O. y col.: Informe del Centro de estudios de Corrosión / LUZ. "Diagnóstico de la Pila 9 del Puente General Rafael Urdaneta". Presentado al S.A.P.G.R.U. Julio 1995.
13. De Rincón O. y col.: Informe del Centro de estudios de Corrosión / LUZ. "Diagnóstico de la Pila 3 del Puente General Rafael Urdaneta". Presentado al S.A.P.G.R.U. Julio 1995.
14. De Rincón O., Morón O., García C., Arrieta I., García D., Morales J.: "Modelling of Chloride ingress in the lake Maracaibo Bridge". 15 th. ICC. Granada-España, 22-27-11-2002.
15. Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P.: " Chloride threshold value to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar". *Cement and Concrete Research* Vol. 30 pp. 1048, 1054, 2000.
16. Hernandez Y., De Rincón O., Fernández R., Inciarte K., Morales M.: "Evaluación de mezclas de mortero con microsilice y ceniza volante expuestas a ambientes marinos". *Coloquia* 2002, pp. 47, 2002.

Recibido el 15 de Enero de 2002

En forma revisada el 07 de Julio de 2003