

# OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DE TRANSPORTE IONICO DEL CONCRETO Y SIMULACION DEL ENSAYO ASTM C1202

## OPTIMIZATION OF THE IONIC TRANSPORT RELATED PROPERTIES OF CONCRETE AND SIMULATION OF THE ASTM C1202 TEST

JUAN LIZARAZO MARRIAGA

*Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola Universidad Nacional de Colombia – Bogotá, jmlizarazom@unal.edu.co*

PETER CLAISSE

*Profesor de materiales de construcción, Coventry University, UK., P.Claisse@coventry.ac.uk*

Recibido para revisar julio 21 de 2008, aceptado marzo 18 de 2009, versión final marzo 30 de 2009

**RESUMEN:** En este artículo se presentan los resultados de la simulación computacional del flujo de los principales iones presentes ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , y  $\text{K}^+$ ) en un ensayo ASTM C1202: “Indicación eléctrica de la resistencia del concreto a la penetración de Iones cloruro”. Para la modelación se utilizó un esquema de diferencias finitas definido mediante la ecuación de Nernst – Plank con un campo eléctrico variable, la cual describe los movimientos iónicos en un material poroso saturado. Para lograr esto, los resultados de un nuevo ensayo electroquímico diseñado para medir el potencial de membrana, en compañía de la corriente eléctrica, fueron optimizados para obtener los coeficientes intrínsecos de difusión, la composición inicial de la solución de poros, la capacidad de fijación de cloruros y la porosidad de la mezcla de concreto.

**PALABRAS CLAVE:** Ensayo rápido de permeabilidad a cloruros, migración de cloruros, concreto.

**ABSTRACT:** In this paper the fluxes of the principal ionic species present ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{K}^+$ ) during an ASTM C1202 test “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration” were modelled by a finite differences approach using the Nernst – Plank equation with a variable electrical field. This equation describes the ionic movements in saturated porous materials. To achieve this, a new electrochemical test has been carried out and its results were optimized to obtain the intrinsic diffusion, the hydroxide composition of the pore solution, the porosity, and the chloride capacity of binding.

**KEYWORDS:** Rapid chloride permeability test, chloride, migration, concrete.

### 1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente se ha pensado que las estructuras de concreto reforzado son eternas o que en su defecto tienen una vida útil sumamente larga. Aunque si bien es cierto que cuando son diseñadas, construidas y mantenidas adecuadamente pueden estar en servicio por varios lustros, también es cierto que como cualquier otro material están sometidas a unos mecanismos de deterioro que en ocasiones

pueden causar daños parciales o incluso terminar su vida de servicio. Entre los diferentes mecanismos de daño químico que pueden afectar las estructuras de concreto se encuentra la corrosión del acero que sirve como refuerzo. De acuerdo con la oficina de administración de autopistas de los Estados Unidos (FHWA) [1] los daños por corrosión en infraestructura vial en dicho país ascienden anualmente a 8.3 billones de dólares, correspondientes a la reparación, rehabilitación, reforzamiento o remplazo de

estructuras o elementos de concreto con este tipo de problemas. Para el caso Colombiano, no es del conocimiento de los autores una cifra actualizada sobre la magnitud del problema o los costos que este representa, sin embargo, de acuerdo a las condiciones ambientales y geográficas del país, es de esperarse que una gran parte de las estructuras tengan ya o potencialmente estén en capacidad de sufrir daño por corrosión.

Entre las causas que inducen corrosión en el refuerzo, el ingreso de iones cloruro es considerado el factor principal. La presencia de una determinada cantidad de cloruros en la vecindad del acero de refuerzo rompe la protección natural que normalmente ofrece el ambiente alcalino del cemento. Esta presencia se debe a que estos iones tienen la capacidad de moverse a través de la matriz porosa del concreto, principalmente mediante un proceso de difusión. Lo anterior, implica que la pasividad del refuerzo depende principalmente de la permeabilidad y de la resistencia del concreto a la penetrabilidad del ion cloruro.

Con el objeto de valorar la permeabilidad del concreto al ion cloruro es posible realizar ensayos de difusión [2], sin embargo, estos requieren prolongados tiempos con duraciones superiores a los 90 días. Para solucionar este inconveniente, el proceso normal de difusión es acelerado mediante la aplicación de un campo eléctrico externo (electro-migración). Bajo la influencia de un campo de esta naturaleza todos los iones presentes se someten a una fuerza que los empuja hacia el electrodo que posee carga opuesta [3], acortando notablemente los tiempos de la prueba. Los ensayos de electro-migración consisten en la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a través de una muestra de concreto en contacto con dos reservorios externos, uno lleno con una solución de cloruros y el otro con una solución alcalina [4-5].

El ensayo ASTM C1202 [5] conocido como RCPT por sus siglas en inglés, que es ampliamente usado a nivel mundial y que cada vez es más aplicado en Colombia, fue desarrollado por Whiting [6] con el objeto de valorar de manera rápida la resistencia de un

concreto frente a la penetración de los cloruros. Debido a las críticas y dudas sobre la utilización de los resultados de este ensayo, en este artículo se presentan parte de los resultados teóricos y experimentales de un programa de investigación encaminado a obtener un mejor entendimiento de los complejos fenómenos que suceden durante la migración de especies iónicas en el concreto, especialmente durante el ensayo normalizado ASTM C1202. Mediante un modelo numérico basado en la ecuación de Nernst-Planck y un nuevo ensayo electroquímico se optimizaron las propiedades de transporte iónico durante el ensayo normalizado. Como resultado, las propiedades eléctricas y la concentración de las especies  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , y  $\text{K}^+$  fueron obtenidas.

## 2. ELECTRO-MIGRACIÓN EN EL CONCRETO

Aunque el transporte del ion cloruro es el objetivo principal en un ensayo de migración, existen otras especies iónicas presentes tanto en las soluciones externas como en los poros de la muestra de concreto. Los principales iones presentes son  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y su concentración depende principalmente del tipo y cantidad del cementante usado. Para una muestra totalmente saturada, el flujo total de cualquier ion ( $J_i$ ) se define de acuerdo con la ecuación de Nernst-Planck como la suma de los flujos causados por el gradiente eléctrico y por el gradiente de concentración.

$$J_i = D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_i c_i \frac{\partial E}{\partial x} \quad (1)$$

donde  $J_i$  es el flujo de la especie  $i$  [ $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ],  $D_i$  es el coeficiente de difusión para la especie  $i$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $c_i$  es la concentración de la especie  $i$  en los poros de la muestra [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ],  $x$  es la distancia [ $\text{m}$ ],  $z_i$  es la carga eléctrica para la especie  $i$ ,  $F$  es la constante de Faraday [ $9.65 \times 10^4$  Coulomb/mol],  $E$  es el potencial eléctrico [ $\text{V}$ ],  $R$  es la constante de gas [ $8.31 \text{ J}/\text{mol K}$ ] y  $T$  es la temperatura absoluta [ $\text{K}$ ].

La ecuación de Nernst-Planck permite determinar de manera independiente el flujo para todos los iones presentes dentro del sistema, sin

embargo, no toma en cuenta las interacciones iónicas que se presentan durante la migración de las diferentes especies. Una vez las diferentes especies empiezan a moverse, bien sea por efecto de una diferencia de concentración o una diferencia de potencial eléctrico, no lo pueden hacer libremente pues son partículas con carga eléctrica que interactúan con otras especies de carga similar u opuesta. Como resultado de esa interacción, se genera un campo eléctrico adicional que se superpone al campo eléctrico externo y que causa una no linealidad en la ecuación de Nernst-Planck. El nuevo campo generado se conoce como potencial de membrana y se define teóricamente de acuerdo con la ecuación 2 [7], donde  $u_i$  es la movilidad del ion  $i$  [ $m\ s^{-1}(V\ m^{-1})^{-1}$ ].

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{i_T}{\sum_i z_i^2 F^2 u_i c} - \frac{\sum_i z_i F D_i \frac{\partial c_i}{\partial x}}{\sum_i z_i^2 F^2 u_i c} \quad (2)$$

## 2.1 Modelo Computacional

La modelación del fenómeno de penetración de cloruros en el concreto bajo una diferencia de potencial eléctrico e incluyendo varias especies ha sido estudiada previamente por varios investigadores y puede ser consultada en las referencias [7-11]. Para la presente investigación, el modelo usado corresponde al desarrollado por el grupo de investigación aplicada en materiales de construcción de la Universidad de Coventry [10]. El modelo funciona mediante la solución numérica de la ecuación de Nernst-Planck con un esquema de diferencias finitas para diferentes pasos de tiempo y posición. Los efectos del potencial de membrana son aplicados distorsionando el voltaje aplicado en cada posición, de manera que la condición de electro-neutralidad se mantiene para todos los iones juntos a lo largo de la muestra durante todo el ensayo. Esto se logra mediante una rutina iterativa en la que el voltaje se ajusta en cada posición para que la generación de carga total sea menor de  $10^{-10}$  coulombs en cualquier incremento de longitud.

Para la simulación se seleccionó un incremento de tiempo  $\Delta t$  igual a 1 s y se dividió la longitud

total de la muestra en 100 incrementos de posición  $\Delta x$ . Esto de acuerdo a un análisis de sensibilidad realizado previamente por los autores. De la misma forma, para evitar en dos pasos de tiempo consecutivos una discontinuidad en el flujo de cualquier especie, el cambio de concentración entre estos dos tiempos se limitó al 10% de la concentración anterior. Una representación del proceso numérico se muestra en la figura 1.

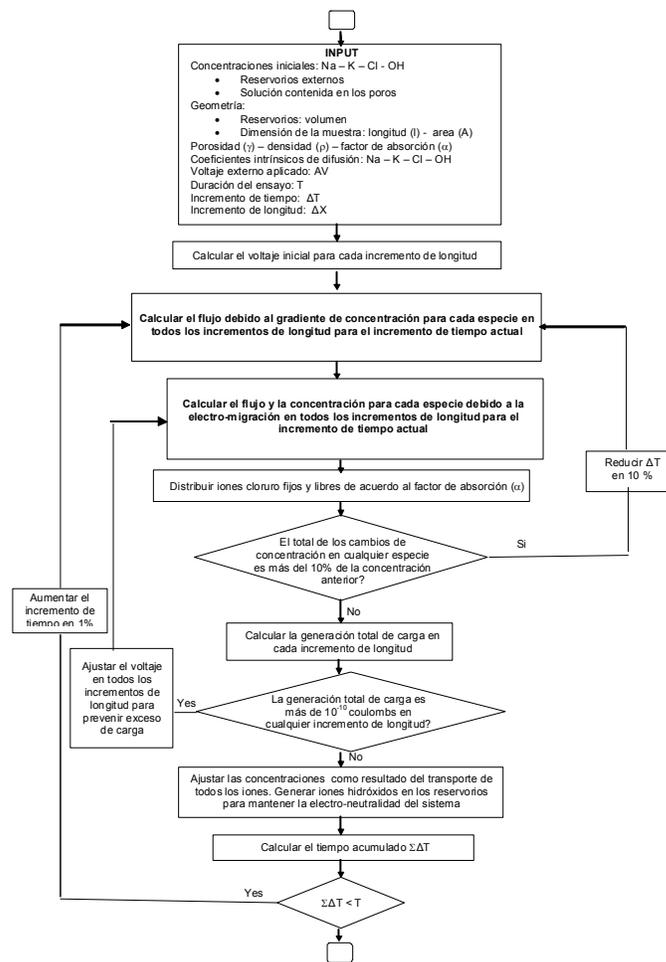


Figura 1. Modelo numérico  
Figure 1. Numerical model

El modelo propuesto utiliza como valores de entrada las condiciones del ensayo como son el volumen, la composición y la concentración de las celdas externas, el voltaje externo aplicado y la duración del experimento. Además, se deben introducir las características del material como son los coeficientes intrínsecos de difusión para

los iones considerados, la composición y concentración de la solución de poros, la porosidad y densidad de la muestra y el factor de fijación o adsorción de iones cloruro. Como resultados del modelo en cambio, se obtienen el perfil transitorio de la corriente eléctrica y del potencial de membrana, y las concentraciones para todos los iones.

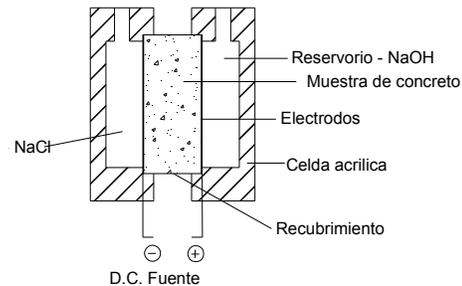
Aunque en teoría a partir de las condiciones del ensayo y las propiedades de la muestra es posible determinar con el modelo la corriente y el potencial de membrana, en realidad es la condición inversa la que se tiene, la corriente y el potencial de membrana pueden ser medidos con cierta facilidad en el laboratorio mientras que los coeficientes de difusión, la composición inicial de la solución de poros, y el factor de fijación, revisten gran complejidad. En la presente investigación, la metodología adoptada consistió en medir experimentalmente la corriente y el potencial de membrana en el punto medio de la muestra de concreto, para con estos datos optimizar las entradas del programa y obtener las propiedades de transporte iónico del concreto. La técnica utilizada para optimizar el modelo consistió en la aplicación de una red neuronal artificial, sin embargo, la aplicación de dicha técnica se sale del alcance del presente artículo y no será discutida

Para un concreto normal la composición inicial de la solución de poros está formada principalmente por iones de  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , quienes deben mantener el principio de neutralidad. Con el objeto de reducir el número de incógnitas en el modelo y con base en los resultados presentados por Bertolini et al. [12] se asumió que las concentraciones de iones potasio y sodio equivalen respectivamente al 66.6% y 33.3% de la concentración de hidróxidos.

## 2.2 Ensayo ASTM C1202-05 RCPT

En este ensayo electroquímico una muestra cilíndrica de concreto de 50 mm de espesor y 100 mm de diámetro es colocada entre dos celdas que sirven como reservorios y entre los cuales están inmersos electrodos metálicos

mediante los cuales se aplica una diferencia de potencial de 60V durante 6 horas. Una de las celdas se llena con una solución 0.3 N de NaOH que sirve como ánodo mientras la otra celda se llena con una solución 3.0% de NaCl que sirve como cátodo. La superficie curva del cilindro se recubre con una resina epóxica que evita que la muestra pierda su condición de saturación durante el ensayo, siendo necesario acondicionar la muestra previamente tal como se especifica en la norma. La figura 2 muestra un esquema del ensayo.



**Figura 2.** Ensayo ASTM C1202  
**Figure 2.** ASTM C1202 test

Durante el ensayo el principal parámetro medido es la corriente a través de la muestra. La carga total medida en coulombs, determinada como el área bajo la curva de corriente versus tiempo, se utiliza para clasificar la penetrabilidad del ion cloruro en el concreto de acuerdo con la tabla 1.

**Tabla 1.** Penetrabilidad del ion cloruro [5]  
**Table 1.** Chloride penetrability [5]

Carga total (coulombs)	Penetrabilidad del ion cloruro
>4,000	Alta
2,000 – 4,000	Moderada
1,000 – 2,000	Baja
100 – 1,000	Muy baja
<100	Ninguna

Desde su introducción en 1981 el ensayo ha sido usado como una medida indirecta para evaluar los parámetros de difusión del ion cloruro. Diferentes investigadores han determinado la relación del ensayo con otros métodos y experimentos [13], sin embargo, existen criticismos acerca de las deficiencias y limitaciones del ensayo. Básicamente los

criticismos se enmarcan en que la carga medida en el ensayo esta relacionada con el movimiento de todos los iones a través de la solución contenida en los poros y que en concretos de baja calidad se presentan incrementos de temperatura debido al efecto Joule [14,15].

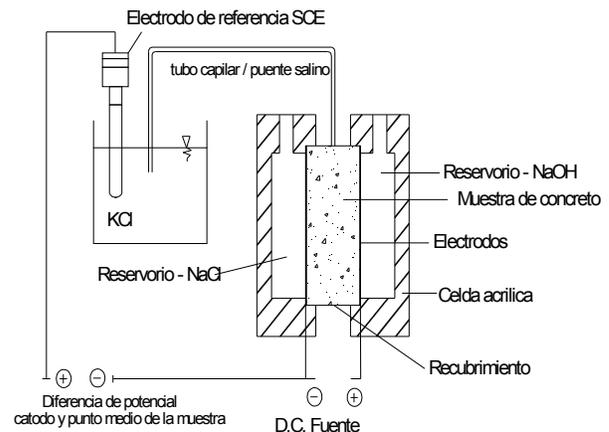
### 2.3 Ensayo de Potencial de Membrana

El procedimiento desarrollado para medir el potencial de membrana fue implementado con base en las recomendaciones del ensayo ASTM C1202, sin embargo, un puente salino fue incluido en algunos puntos dentro de la muestra de concreto con el objeto de medir la variación del voltaje. En los puntos donde se midió el potencial se realizaron perforaciones de aproximadamente 4 mm de diámetro y 6 mm de profundidad y se adicionó un puente salino con una solución 0.1 M de cloruro de potasio (KCl). El voltaje se registró usando un electrodo de referencia de calomel (SCE), conectado con el puente salino. Para cada ensayo se midió continuamente la corriente a través de la muestra de concreto y se registró el voltaje en tres puntos diferentes, la localización ideal de la medición del voltaje se definió en el punto medio y los cuartos de la muestra. Debido a la carga de la señal fue necesario utilizar un equipo de almacenamiento y acondicionamiento de datos con una alta impedancia, esto con el objeto de no distorsionar las lecturas de voltaje por efecto de la medición. Una descripción detallada del ensayo puede ser obtenida en la referencia [16]. La figura 3 muestra una descripción del ensayo.

Debido a la naturaleza del ensayo, se detectó durante la medición de la señal un ruido que fue atenuado con ligeros incrementos en la profundidad de las perforaciones hechas para acomodar los puentes salinos. Se cree que el ruido fue causado por la distribución aleatoria del agregado que limita con el puente salino y la solución de poros. En una investigación anterior realizada por Zhang et al. [17] el potencial de membrana fue medido a través de muestras de mortero de cemento Portland usando electrodos de referencia inmersos en celdas externas simulando una solución de poros. De acuerdo con los resultados encontrados por Zhang et al., el potencial formado entre el puente salino y la

solución estuvo en el rango de 0.8 y -0.6 mV. Esos valores son relativamente pequeños con el potencial de membrana medido durante la presente investigación por lo que se asume que el potencial de membrana corresponde en su totalidad al intercambio iónico dentro de la muestra y no al sistema de medición.

De acuerdo con la ecuación 2 el potencial de membrana para cualquier punto se define como el valor del voltaje leído durante el experimento para cualquier tiempo con el puente salino menos el valor correspondiente al inicio del ensayo. Se supone que al inicio del ensayo todavía no existe ningún tipo de intercambio iónico por lo cual el potencial óhmico corresponde al mismo suministrado por la fuente de poder.



**Figura 3.** Ensayo de Potencial de Membrana  
**Figure 3.** Membrane potential test

### 3. MEZCLAS DE CONCRETO

Para la presente investigación fueron fundidas muestras de concreto Portland (CPO) de acuerdo con las proporciones presentadas en la tabla 2. Una vez desencofradas las muestras fueron mantenidas en una piscina de curado bajo temperatura constante durante 100 días, tiempo suficiente para que las reacciones de hidratación del concreto fueran mínimas. Todos los ensayos se realizaron por duplicado de manera que todos los resultados mostrados en este artículo corresponden a un promedio.

#### 4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS Y OPTIMIZACIÓN

El potencial de membrana medido en tres puntos a lo largo de la muestra de concreto durante las 6 horas que duró el ensayo se muestra en la figura 4. La curva E1 representa la evolución del perfil para el punto localizado a  $\frac{1}{4}$  de la longitud total medido desde el electrodo negativo, la línea E2 representa el perfil del potencial de membrana en el punto medio y el perfil E3 representa la evolución del potencial en un punto localizado a  $\frac{3}{4}$  del tamaño de la muestra medido desde el electrodo negativo. Para las tres curvas se observa que el potencial de membrana además de variar en función del tiempo, también lo hace en función de su localización dentro de la muestra. En las etapas iniciales del ensayo para los tres puntos se observaron voltajes negativos, poco tiempo después se observó un punto de inflexión con un respectivo incremento en el voltaje. De la misma forma que el potencial de membrana, la corriente fue medida continuamente durante el ensayo, la variación de la corriente en el tiempo se muestra en la figura 5. El valor inicial de la corriente fue igual a 145 mA mientras que la carga total fue de 4644 Culombios.

**Tabla 2.** Diseño de mezcla  
**Table 2.** Mix design

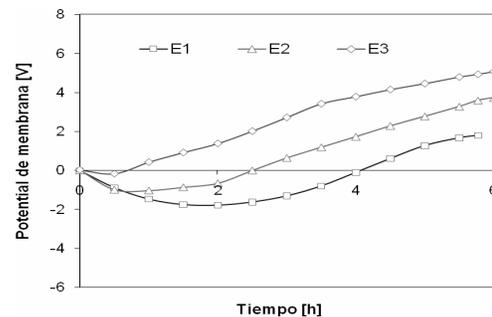
Mix	Agua/cemento	CPO [Kg]	Agreg fino. [Kg]	Agreg grueso [Kg]	Cemento [Kg]
OPC	0.49	394	692	988	394

A partir de los perfiles transitorios del potencial de membrana para el punto medio de la muestra ( $E_2$ ) y la corriente se optimizó el modelo computacional de manera tal que se obtuvieron las propiedades mostradas en la tabla 3 para el material ensayado. Los valores obtenidos se encuentran para cada propiedad dentro de rangos aceptables.

**Tabla 3.** Propiedades optimizadas  
**Table 3.** Optimized properties

OH Conc.	Dif. Cl <sup>-</sup>	Dif. OH <sup>-</sup>	Dif. Na <sup>+</sup>	Dif. K <sup>+</sup>	Ads Cl	Porosidad
mol/m <sup>3</sup>	M <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s		%
234	1.9E-10	7.8E-11	3.5E-11	1.1E-11	0.29	18.8

Con el objeto de verificar que los datos de la tabla 3 corresponden a las propiedades de transporte que definen la muestra ensayada, se corrió el modelo con dichos valores como entradas y se compararon los resultados de la corriente y el potencial de membrana para los casos medidos y simulados. En la figura 5 se muestra la evolución de la corriente total en el tiempo para los resultados medidos experimentalmente, para los resultados del modelo computacional incluyendo la corrección en el voltaje y los resultados del modelo sin ajustar el voltaje. Las curvas para la corriente medida y la simulada con ajustes en el voltaje presentan una gran similitud y prácticamente se traslapan, en cambio, la corriente simulada sin aplicar los ajustes correspondientes al voltaje presentan notables diferencias respecto a los resultados experimentales. La gráfica permite corroborar que la ecuación de Nernst-Planck simula adecuadamente la evolución de la corriente cuando se incluyen dentro del modelo los efectos de la no linealidad del campo eléctrico.



**Figura 4.** Potencial de membrana medido  
**Figure 4.** Membrane potential measured

La figura 6 muestra el potencial de membrana medido y simulado para el punto medio. Aunque las curvas no son tan similares como lo pueden llegar a ser para la corriente, si presentan la misma tendencia y los valores se encuentran en el mismo orden de magnitud. Para condiciones prácticas y teniendo en cuenta las posibles fuentes de error durante la medición se considera que la aproximación es suficientemente buena como para definir adecuadamente el fenómeno.

### 5. SIMULACIÓN DE LA CORRIENTE, EL POTENCIAL DE MEMBRANA, Y EL TRANSPORTE IÓNICO.

Una vez optimizadas las propiedades del concreto que gobiernan los fenómenos de transporte en un ensayo de migración y determinados los coeficientes intrínsecos de difusión para los iones propuestos, la porosidad y el factor de adsorción de cloruros, se simuló el comportamiento eléctrico y la variación de la concentración para cada ion durante el ensayo.

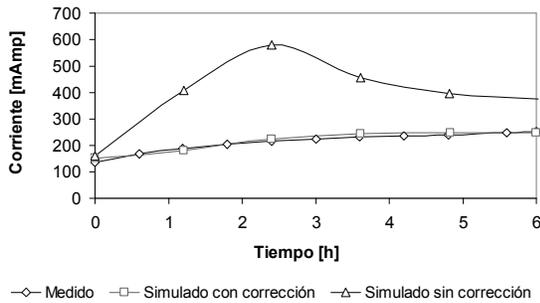


Figura 5 Corriente transitoria  
Figure 5 Transient current

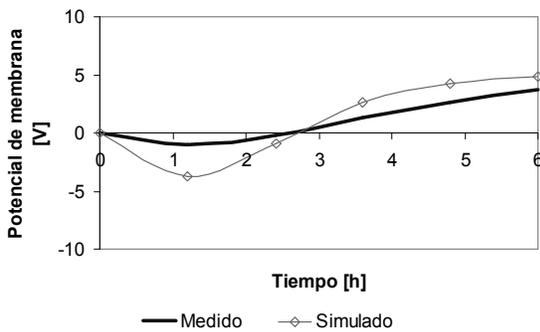


Figura 6. Potencial de membrana en el punto medio  
Figure 6. Mid point membrane potential

La figura 7 muestra la distribución del potencial de membrana simulado y medido para cualquier punto y en cualquier instante durante el ensayo. La figura 8 muestra a manera de isolíneas de corriente eléctrica los valores simulados para cada especie. En estas gráficas el eje vertical representa el tiempo correspondiente al ensayo, mientras que el eje horizontal representa la longitud de la muestra. Para cualquier combinación de tiempo y posición es posible determinar mediante estas gráficas la corriente generada por cada ion.

Aunque el objeto principal del ensayo ASTM C1202 es determinar la resistencia del concreto a

la penetración de los cloruros, la concentración de las diferentes especies móviles consideradas en la simulación tiene un importante valor en la medida que permite entender mejor el comportamiento del concreto durante el ensayo. La figura 9 muestra en forma de isolíneas la evolución de la concentración para cada uno de los iones simulados. Se presentan como contornos la variación de la concentración en moles por metro cúbico, para cada posición (eje horizontal) durante las seis horas de duración del ensayo (eje vertical).

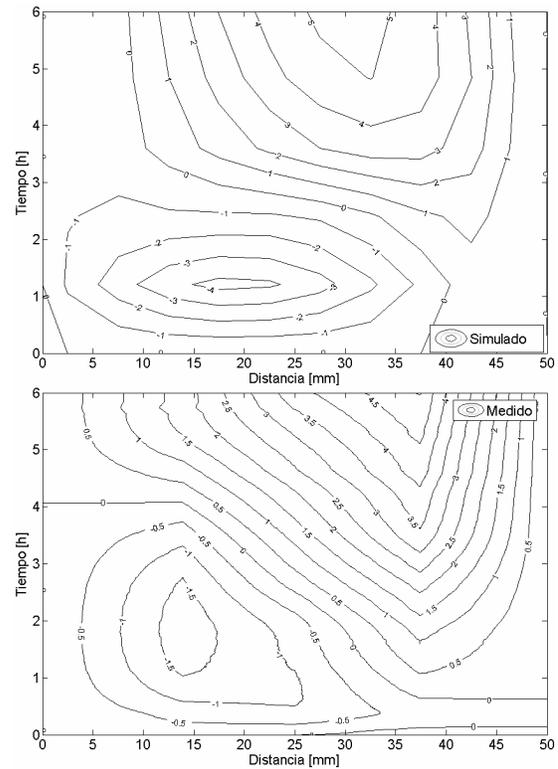


Figura 7. Potencial de membrana [V]  
Figure 7. Membrane potential [V]

### 6. DISCUSIÓN

De la figura 7 se observa que el potencial de membrana medido y simulado presentan un comportamiento similar. Durante las primeras horas en la zona cercana al cátodo se presentan voltajes negativos y en la medida que se aleja, dichos voltajes tienden a volverse positivos. Desde un punto de vista macroscópico, cualquier máximo o mínimo local del potencial de membrana puede ser explicado como el resultado de la variación de la conductividad de

la solución de poros, debido a la migración de las diferentes especies presentes.

La corriente total para un tiempo cualquiera  $t_i$  que pasa en todos los puntos dentro de la muestra debe ser constante de acuerdo a la primera ley de Kirchoff: “la densidad de corriente que entra a un punto determinado debe ser igual a la densidad de corriente que sale del mismo”. Sin embargo, el paso de la corriente total se distribuye en los cuatro iones presentes según la ley de Faraday, que establece la relación entre el flujo iónico y la corriente pasada por determinada especie.

$$i_i = -z_i F J_i \quad (3)$$

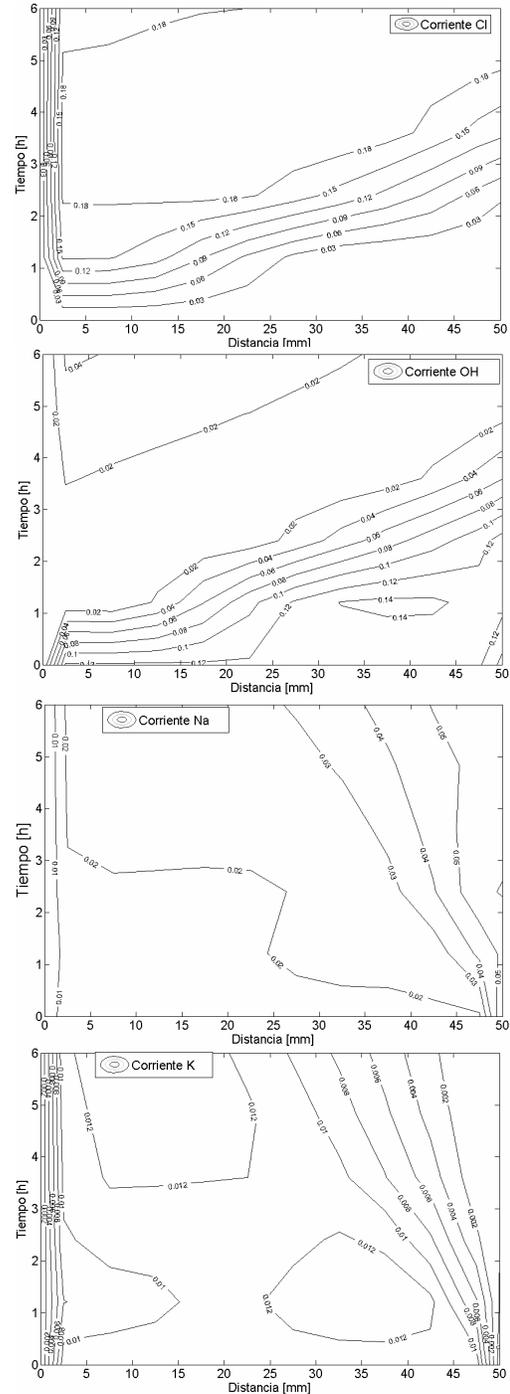
Donde  $i_i$  representa la densidad de corriente para el ion  $i$ . De la figura 8 se observa que los iones hidróxido y cloruro son los que más aportan a la corriente total, mientras que el sodio y potasio aportan en menor medida. Esto se debe principalmente a que el flujo para los cationes es mucho mayor debido al coeficiente de difusión intrínseco obtenido y puede ser explicado mediante la ecuación 3.

De la misma forma, y tal cual como ha sido sugerido en otras investigaciones, de la figura 8 se puede concluir que al inicio del ensayo el paso de la corriente es en su gran mayoría responsabilidad de los iones hidróxidos y que mientras el ensayo transcurre los iones cloruro penetran la muestra y remplazan gradualmente a los hidróxidos. Al final de ensayo los iones cloruro son responsables aproximadamente del 80% de la corriente que pasa. Para este instante, el concreto contiene una alta concentración de iones cloruro quienes a su vez tienen una alta movilidad y pasan un alto porcentaje de la corriente total.

Para cualquier especie iónica el número de transferencia se define como la relación entre la corriente pasada por dicha especie, respecto a la corriente total. Se observa de la figura 8 que este número no es constante y varía en el tiempo y el espacio, siendo siempre menor a 1 contrario a lo establecido por la referencia [18].

Aunque los iones potasio y sodio son responsables únicamente de una pequeña porción de la corriente total, es indispensable

incluirlos en la simulación del fenómeno, pequeñas variaciones en los coeficientes de difusión del sodio y potasio producen pequeñas variaciones en la corriente, pero grandes variaciones en el potencial de membrana.



**Figura 8.** Corriente simulada para cada ion [A]  
**Figure 8.** Current simulated for each ion [A]

En la figura 9 se observa que la concentración de todas las especies varía en cada tiempo y posición. Al inicio del ensayo el concreto no presenta cloruros en su interior, sin embargo, en la medida que el ensayo transcurre estos iones empiezan a penetrar la muestra llegando incluso a atravesarla y depositarse en la celda correspondiente al ánodo. Debido a que en el cátodo se presenta una disminución de la concentración de cloruros en la medida que estos empiezan a penetrar el concreto, el ensayo nunca alcanza un estado de flujo constante (*steady state*). Esta condición es tenida en cuenta en el modelo computacional y determina las características de los coeficientes de difusión obtenidos.

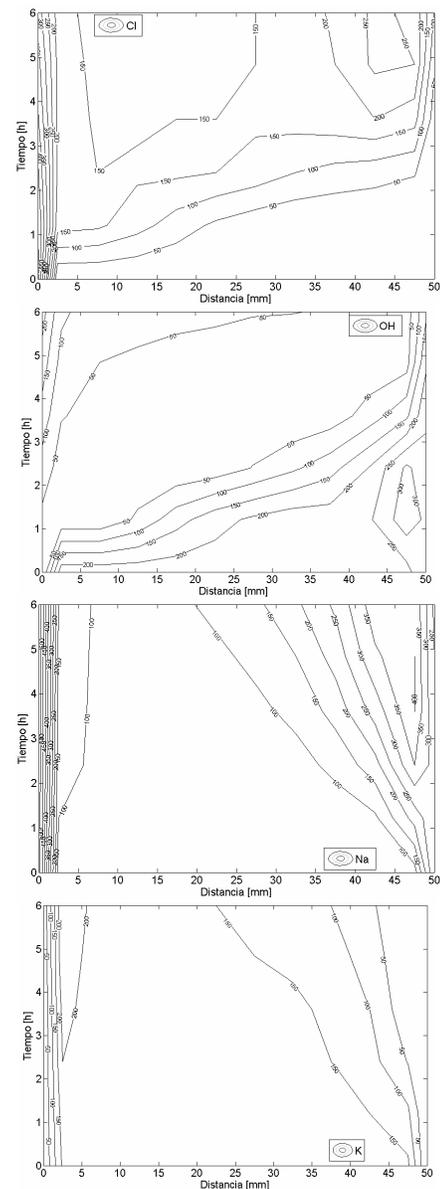
Para la zona cercana al cátodo la concentración del ion cloruro presenta un gradiente importante que tiende a disiparse en la medida que transcurre el ensayo y se penetra dentro de la muestra. En la zona intermedia, comprendida entre 20 y 40 mm la concentración adquiere una condición relativamente uniforme, mientras que la zona aledaña al ánodo presenta un nuevo incremento en los gradientes de concentración. Esta última observación es muy importante, pues demuestra que las condiciones de borde y el tamaño de la muestra de concreto afectan notablemente los resultados.

Al inicio del ensayo los iones hidróxido se encuentran uniformemente distribuidos a lo largo de la muestra y contenidos en el ánodo. En la medida que transcurre el ensayo se observa que la concentración de hidróxidos en el cátodo aumenta, mientras que la concentración en el ánodo disminuye. Físicamente esto se debe a que los hidróxidos migran hacia el ánodo donde son oxidados liberando electrones, simultáneamente en el cátodo se presenta electrolisis donde iones hidróxido y oxígeno son liberados de las moléculas de agua. El modelo propuesto simula adecuadamente esta situación generando iones hidróxido en los reservorios para mantener el principio de neutralidad en las especies presentes.

Finalmente, los iones de sodio y potasio presentan una concentración inicial en la solución de poros del concreto al inicio del ensayo y su evolución se detalla en la figura.

## 7. CONCLUSIONES

- La optimización del modelo numérico propuesto permitió simular espacial y temporalmente la distribución de la corriente, el potencial de membrana y la concentración para cada ion durante un ensayo ASTM C1202, al igual que determinar las propiedades de transporte iónico del concreto.
- las simulaciones realizadas están acordes a los resultados experimentales.



**Figura 9.** Concentración iónica simulada [mol/m<sup>3</sup>]  
**Figura 9.** ionic concentration simulated [mol/m<sup>3</sup>]

- El modelo propuesto y los ensayos utilizados en esta investigación pueden ser utilizados para simular el transporte de cualquier combinación de iones en cualquier medio poroso.

## REFERENCIAS

[1] (FHWA) FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, Corrosion costs and preventive strategies in the United states, Report FHWA-RD- 01-156. 2001

[2] AASHTO T259: Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (Salt Ponding Test). American Association of State Highway and Transportation Officials.

[3] BOCKRIS J., REDDY A., Modern Electrochemistry 1 Ionics, Plenum Press, 1998.

[4] NTBUILD-492. Nordtest method: concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordic Council Ministers, 1999.

[5] ASTM-C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2005.

[6] WHITING D., Rapid determination of the chloride permeability of concrete. FHWA/RD-81/119, 1981.

[7] LORENTE S., BOURBON X, VOINITCHI D., The single-valued diffusion coefficient for ionic diffusion through porous media. J. Appl. Phys, 101(024907), 2007

[8] TRUC O., OLLIVIER J., NILSSON L., Numerical simulation of multi-species transport through saturated concrete during a migration test - MsDiff code. Cement and Concrete Research, 30, 1581-1592, 2000.

[9] NARSILO G., LIR., PIVONKA P., SMITH D., Comparative study of methods used to estimate ionic diffusion coefficients using

migration tests. Cement and Concrete Research, 37, 1152-1163, 2007.

[10] CLAISSE P., BERESFORD T., Obtaining More from the Electrical Chloride Test. ACI - SP170-57, 1997.

[11] KRABBENHOFT K., KRABBENHOFT J., Application of the Poisson-Nernst-Planck equations to the migration test, Cement and Concrete Research, 38, 77-88, 2008.

[12] BERTOLINI L., Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley, 2004.

[13] ANDRADE C., WHITING D., Comparison of AASHTO T-277 and AASHTO T-259 Results, RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete. Saint-Remy-les-Chevreuse, France 1995.

[14] PATRICK F., MCGRATH P., HOOTON R., Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test - An evaluation of chloride penetration testing methods Cement and Concrete Research, 29, 1239-1248, 1999.

[15] MCCARTER W., STARRS G., CHRISP T., Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars. Cement and Concrete Research, 30, 1395-1400, 2000.

[16] LIZARAZO-MARRIAGA J., CLAISSE P., Effect of the non-linear membrane potential on the migration of ionic species in concrete. Electrochimica Acta, 54, 2761-2769, 2009.

[17] ZHANG J., Li J., BUENFELD N., Measurement and modelling of membrane potentials across OPC mortar specimens between 0.5 M NaCl and simulated pore solutions. Cement and Concrete Composites, 24, 451-455, 2002.

[18] LUPING T., Chloride diffusion coefficient of concrete and relevant test methods. Swedish National Testing and Research Institute, Sweden. 1997.