

MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA DIFUSION DEL Cl^-
HASTA LA DESPASIVACION DEL ACERO DE REFUERZO CON MICROSILICE
COMO ADITIVO Y SOMETIDO A CARBONATACION

SERGIO ALBERTO SOLANO RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2009

MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA DIFUSION DEL Cl^-
HASTA LA DESPASIVACION DEL ACERO DE REFUERZO CON MICROSILICE
COMO ADITIVO Y SOMETIDO A CARBONATACION

SERGIO ALBERTO SOLANO RODRIGUEZ

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

CODIRECTOR

HUGO ARMANDO ESTUPIÑAN
INGENIERO METALURGICO M.Sc

DIRECTOR

CUSTODIO VASQUEZ QUINTERO
INGENIERO METALURGICO M. Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2009

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

Hugo Armando Estupiñan, ingeniero metalúrgico, Custodio Vásquez Quintero, Ingeniero metalúrgico M.Sc., director de ésta investigación y Darío Yesid Peña, Ingeniero metalúrgico Ph. D., Grupo de Investigación en Corrosión.

Colciencias y la Armada Nacional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. CONCEPTOS TEÓRICOS.	2
1.1 ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO.	2
1.2 MECANISMO DE TRANSPORTE EN EL CONCRETO.	3
1.3 CORROSIÓN INDUCIDA POR CLORUROS.	6
1.4 ASPECTOS GENERALES MÉTODO ELEMENTOS FINITOS.	9
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	9
2.1 METODOLOGÍA.	9
2.2 PARÁMETROS USADOS EN LA SIMULACIÓN.	9
2.3 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS.	12
3. RESULTADOS Y ANALISIS.	16
3.1 PERFILES DE CONCENTRACIÓN DIÓXIDO DE CARBONO.	17
3.2 PERFILES DE CONCENTRACIÓN ION CLORURO.	19
3.3 CORROSIÓN.	22
4. CONCLUSIONES.	26
5. RECOMENDACIONES.	27
BIBLIOGRAFIA.	28
ANEXOS.	31

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procesos de transporte en concreto.	3
Figura 2. Diagrama de Tuutti; Estados idealizados de iniciación y propagación.	7
Figura 3. Cloruros en el sistema poroso del concreto.	7
Figura 4. Etapas metodológicas del desarrollo experimental.	10
Figura 5. Sección de concreto, Corte horizontal del pilote de concreto simulado.	12
Figura 6. Mallado del modelo simulado, pilote de concreto.	13
Figura 7. Algoritmo de cálculo modelos de corrosión.	16
Figura 8. Perfil de concentración simulado del CO ₂ relación 0,4.	17
Figura 9. Perfil de concentración simulado del CO ₂ relación 0,5.	17
Figura 10. Perfil de concentración simulado del CO ₂ relación 0,6.	18
Figura 11. Perfiles de concentración Cl ⁻ simulados, relación 0.4.	19
Figura 12. Perfiles de concentración Cl ⁻ simulados, relación 0.5.	19
Figura 13. Perfiles de concentración Cl ⁻ simulados, relación 0.6.	20
Figura 14. Resistencia óhmica del concreto a/c 0,4.	22
Figura 15. Resistencia óhmica del concreto a/c 0,5.	22
Figura 16. Resistencia óhmica del concreto a/c 0,6.	23
Figura 17. Densidad corriente de corrosión a/c 0,4.	23
Figura 18. Densidad corriente de corrosión a/c 0,5.	23
Figura 19. Densidad corriente de corrosión a/c 0,6.	24

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Criterio para interpretar las densidades de corrosión.	8
Tabla 2. Tipos de mezclas y agregado de elaboración, para el concreto simulado.	10
Tabla 3. Parámetros del modelo propuesto difusión dióxido de carbono.	18
Tabla 4. Resultados para el modelo propuesto carbonatación.	18
Tabla 5. Parámetros de simulación difusión cloruros, resultados prueba ACTM [10].	20

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I.	32
ANEXO B. COMPOSICION DE LA MICROSÍLICE SIMULADA.	32
ANEXO C. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS A PARTIR DEL MÉTODO DE COLORIMETRÍA. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN PARA LAS DIFERENTES RELACIONES A/C [10].	33
ANEXO D. GENERALIDADES MÉTODO ELEMENTOS FINITOS.	33

NOMENCLATURA

OPC: Cemento Portland Ordinario.

c : Carga de cemento [Kg].

a : Carga de agua [Kg].

HS: humo de sílice.

EG: Escoria Granular.

CV: Ceniza Volante.

t : Edad actual del concreto [años].

m : Valor empírico de envejecimiento para mezclas con agregados.

T : Temperatura [Kelvin].

D_{Cl^-} : Representa el coeficiente de difusión aparente del ión cloruro.

$D_{Cl^-,1}$: Representa el coeficiente de difusión aparente del ión cloruro a un año.

C_{CO_2} : Concentración dióxido de Carbono (g/cm^3).

$C_{Ca(OH)_2}$: Concentración Hidróxido de calcio (g/cm^3).

D_{CO_2} : Coeficiente de difusión del dióxido de carbono (cm^2/s).

$D_{CO_2,0}$: Coeficiente de difusión inicial del dióxido de carbono (cm^2/s).

ξ_0 y ξ : Porosidad antes y después de la carbonatación .

γ : Coeficiente de reducción de la porosidad.

HR : Humedad relativa (%).

a/c : Relación agua-cemento

$R_{a/c}$: Relación agregado-cemento

RESUMEN

TITULO: MODELAMIENTO POR ELEMENTOS FINITOS DE LA DIFUSIÓN DEL Cl HASTA LA DESPASIVACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO CON MICROSÍLICE COMO ADITIVO Y SOMETIDO A CARBONATACIÓN.*

AUTOR: Sergio Alberto Solano Rodríguez**.

PALABRAS CLAVES: condiciones de borde; elementos finitos; Transporte de masa; Mallado.

A nivel mundial existen numerosas estructuras de concreto que se encuentran en medios particularmente agresivos, es el caso de las que se hallan expuestas a ambientes marinos donde el principal responsable de la corrosión es el ión cloruro. Este trabajo de grado presenta el modelamiento por elementos finitos sobre la influencia en estructuras de hormigón expuestas a ambientes marinos, de la difusión del ion cloro, el tiempo de exposición, carbonatación y agregados finos en la preparación de las mezclas. El modelamiento se realizo usando ecuaciones diferenciales parciales (PDEs), asociadas al balance en transporte de masa para evaluar el servicio de vida útil de la estructura con acero de refuerzo, con la ayuda del software MATLAB 6.5 Y FEMLAB 2.3. Fueron simuladas tres diferentes mezclas 0,4, 0,5 y 0.6 de agua/cemento, con un 10% de microsíllice como agregado, para una atmosfera sumergida o totalmente saturada por agua de mar. Los resultados mostrados del estudio representan la penetración del cloruro en el concreto, la penetración del dióxido de carbono y la predicción del tiempo de despasivación de las varillas de refuerzo. Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto de investigación titulado: DESARROLLO METODOLÓGICO ELECTROQUÍMICO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CORROSIVIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO SOMETIDAS A LOS AMBIENTES MARINOS DE LAS COSTAS DEL PACÍFICO COLOMBIANO, llevado a cabo por la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Antioquia con el auspicio de Colciencias y la Armada Nacional.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Custodio Vásquez Quintero MSc. Codirector: MSc. Hugo Armando Estupiñan.

ABSTRACT

TITLE: FINITE ELEMENT MODELING OF THE DIFFUSION OF CHLORIDE ION TO NOT PASSIVE STATE OF REINFORCING STEEL WITH MICROSÍLICA AS AN ADDITIVE AND SUBJECTED TO CARBONATION.*

AUTHOR: Sergio Alberto Solano Rodríguez**

KEYWORDS: Boundary conditions, finite element, mass transport; Grid.

Worldwide there are many concrete structures that are in particularly aggressive environments, in the case of those that are exposed to marine environments where the main responsible of corrosion is the chloride ion. This thesis presents a finite element modeling of the influence on concrete structures exposed to marine environments of the spread of chloride ion, the exposure time, carbonation and fine aggregates in the preparation of mixtures. The modeling was performed using partial differential equations (PDEs) associated with the transport of mass balance to assess the service life of the structure with steel reinforcement, with the help of the software MATLAB 6.5 and FEMLAB 2.3. It were simulated with three different mixtures 0.4, 0.5 and 0.6 water / cement, with 10% of microsilica as aggregate, to an atmosphere completely submerged or saturated by seawater. The study results shown represent the penetration of chloride in the concrete; the penetration of carbon dioxide and the prediction of rebar corrosion time. This work is framed within the research project entitled: METHODOLOGICAL DEVELOPMENT OF AN ELECTROCHEMICAL MODEL OF PREDICTION OF THE CORROSION TIME OF CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO MARINE ENVIRONMENTS OF COLOMBIAN PACIFIC COAST, conducted by the Industrial University of Santander and the Antioquia University sponsored by Colciencias and the Navy.

* Work of grade

**Faculty of Physic-Chemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: MSc. Custodio Vásquez Quintero. Co-Director: MSc. Hugo Armando Estupiñan.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen numerosas estructuras de concreto que se encuentran en medios particularmente agresivos, es el caso de las que se hallan expuestas a ambientes marinos donde el principal responsable de la corrosión es el ión cloruro. Los cloruros al llegar a la superficie del metal, provocan que la corrosión se desencadene y se manifieste de diversas maneras: una sobre el metal, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica; otra sobre el concreto, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interface acero-concreto, provocando fisuras y desprendimientos; y por último sobre la adherencia del concreto al refuerzo [18].

El mortero es uno de los materiales de construcción artificiales más antiguo que se conoce caracterizándose por su durabilidad y estabilidad en el tiempo. Se utiliza para proteger el acero en las armaduras, actuando como una barrera física que lo separa del medio ambiente [19].

La difusión del ion cloruro es la principal causa de corrosión y deterioro del acero de refuerzo de estructuras de concreto. En general los procesos corrosivos del acero de refuerzo en el concreto son considerados como procesos electroquímicos [16, 17].

La vida útil de las estructuras con acero de refuerzo está altamente limitada por la acción de la corrosión del refuerzo, por la exposición a ambientes marinos o de sales de deshielo. Este fenómeno físico de corrosión es producto de la despasivación de dichas varillas de refuerzo a causa de la acción del ion cloruro sobre éstas [13, 14].

Este trabajo de grado presenta el modelamiento por elementos finitos sobre la influencia en estructuras de hormigón expuestas a ambientes marinos, de la difusión del ion cloro, el tiempo de exposición, carbonatación y agregados finos en la preparación de las mezclas. El modelamiento se realizó usando ecuaciones diferenciales parciales (PDEs), asociadas al balance en transporte de masa para evaluar el servicio de vida útil de la estructura con acero de refuerzo, con la ayuda del software MATLAB Y FEMLAB. Fueron simuladas tres diferentes mezclas 0,4 , 0,5 y 0,6 de agua/cemento, con un 10% de microsilíce como agregado, para una atmosfera sumergida o totalmente saturada por agua de mar. Los resultados mostrados del estudio representan la penetración del cloruro en el concreto, la penetración del dióxido de carbono y la predicción del tiempo de despasivación de las varillas de refuerzo.

Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto de investigación titulado: DESARROLLO METODOLÓGICO ELECTROQUÍMICO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CORROSIVIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO SOMETIDAS A LOS AMBIENTES MARINOS DE LAS COSTAS DEL PACÍFICO COLOMBIANO, llevado a cabo por la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Antioquia con el auspicio de Colciencias y la Armada Nacional.

1. CONCEPTOS TEORICOS

1.1 ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO

- Concreto

El concreto es básicamente la mezcla del cemento portland con agregados finos (arena) y gruesos (grava). Al mezclarse con agua, el cemento se hidrata formando un conglomerado sólido, compacto, denso y poroso que resulta permeable a líquidos y gases [20].

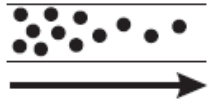


- Refuerzo

El componente metálico que proporciona resistencia a la tracción a la masa de concreto es acero de refuerzo o armadura. La alta alcalinidad del agua en los poros del concreto ($\text{pH} > 12.5$) conduce a la formación de una capa pasivante en el acero que reduce el ataque corrosivo a valores insignificantes. Los procesos más importantes que pueden destruir esta capa protectora son el ataque de cloruros y la carbonatación [21].

1.2 MECANISMO DE TRANSPORTE EN EL CONCRETO

El transporte de gases (O_2 , CO_2), agua e iones (Cl^-) en concreto solo es posible en el sistema poroso del concreto. Este transporte se debe a fuerzas capilares, gradientes de presión (agua, gases) o de concentración (iones), diferencia de presión absoluta (agua, gases) y migración (Figura 1) [22].

Figura 1. Procesos de transporte en concreto

TIPO	FUERZA CONDUCTORA	POROS
Difusión (gases e iones)	 Gradiente de concentración dc Diferencia de presión parcial dp	Llenos con aire o agua
Succión Capilar (líquidos)	 Tensión de superficie s Ángulo de contacto α	Llenos con aire
Permeación (gases y líquidos)	 Diferencia de presión absoluta dp	Llenos con aire o agua

Fuente: Bohni, Hans [21]

- Difusión Del Ión Cloruro

Considerando el concreto totalmente saturado, los iones de cloruro penetran el concreto por difusión, debido a la existencia de un gradiente de concentración entre la superficie expuesta y el medio en el que se encuentra el concreto. El

fenómeno difusivo en estado no estacionario del ion cloruro se describe matemáticamente con la segunda ley de Fick en una dimensión, este proceso se representa así:

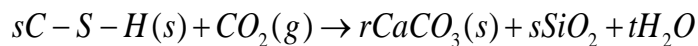
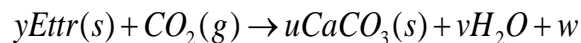
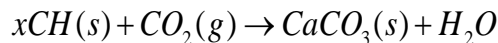
$$\frac{\partial C_{cl^-}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{cl^-} \frac{\partial C_{cl^-}}{\partial x} \right) \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde D es el coeficiente de difusión (m^2/s), y C es la concentración de cloruros libres.

Experimentalmente se ha mostrado que la velocidad de difusión de ion cloruro en concreto, depende de parámetros internos del material como la porosidad, tipo de cemento, temperatura, tipos de cationes asociados con los iones cloruro, contenido de mezcla y condiciones de curado [23].

- Carbonatación

Carbonatación de concreto se considera como un sistema de reacciones heterogéneas en el cual la fase solida reacciona paralelamente con el $CO_2(g)$ de acuerdo con el siguiente esquema:



Sin embargo, para un proceso más real, el sistema se complica, ya que puede variar considerablemente para las ecuaciones estequiométricas, dichas expresiones pueden complicarse por la interacción entre los procesos físicos y químicos.

Los modelos matemáticos de transporte de masa de las especies involucradas en el fenómeno físico de la carbonatación en una dimensión se representan de la siguiente forma [24]:

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} \right)$$

Ecuación 2.

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} \right) - R * \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] * [C_{Ca(OH)_2}]$$

Ecuación 3.

$$\frac{\partial C_{Ca(OH)_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Ca(OH)_2} \frac{\partial C_{Ca(OH)_2}}{\partial x} \right) - R * \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] * [C_{Ca(OH)_2}]$$

Ecuación 4.

$$\frac{\partial C_{CaCO_3}}{\partial t} = R * \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] * [C_{Ca(OH)_2}]$$

Ecuación 5.

La ecuación 2 representa la difusión del dióxido de carbono a través del concreto la ecuación 3 representa la difusión y consumo del dióxido de carbono, la ecuación 4 representa la generación del carbonato mientras desaparece el CO₂ y la ecuación 5 representa la generación de carbonato de calcio.

- Difusión del dióxido de carbono

Como el hidróxido de calcio y el dióxido de carbono reaccionan para formar carbonato de calcio, la porosidad se reduce de acuerdo al aumento en el peso molecular, sin embargo no es apropiado considerar que el cambio en la porosidad sea inversamente proporcional al peso molecular, porque estudios han demostrado que el 50% del dióxido de carbono reacciona con el hidróxido de calcio, mientras que el restante reacciona con C-S-H, el cual también cambia la porosidad [9].

De igual manera existe un gradiente de concentración entre la superficie expuesta y el interior del concreto, la penetración y difusión del gas a través del concreto sigue el modelo de transporte de masa, segunda ley de Fick en una dimensión, representándose de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} \right)$$

Ecuación 6.

1.3 CORROSIÓN INDUCIDA POR CLORUROS

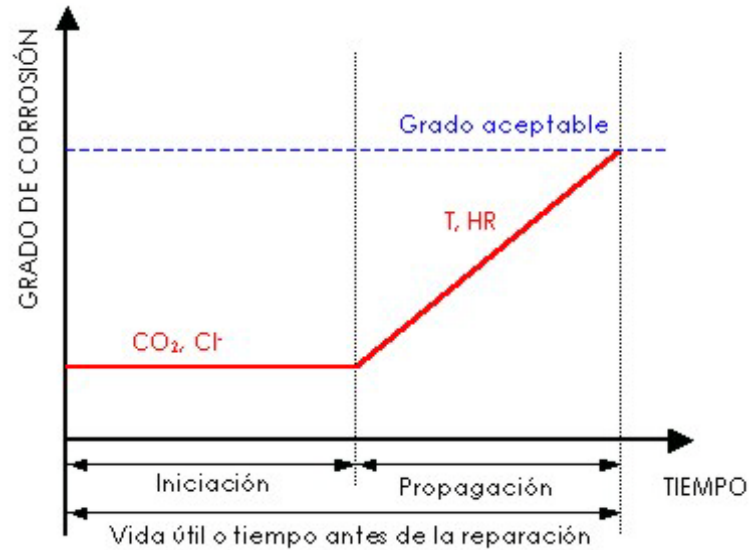
La mayoría de modelos de vida útil asociados con la corrosión del acero de refuerzo en concreto siguen el modelo introducido por Tuutti (1982) (figura 2), este modelo de corrosión se idealiza como una secuencia de dos etapas separadas:

1. Periodo de iniciación, durante el cual el acero permanece en un estado de pasivación, bajo un ambiente alcalino. El inicio de la corrosión corresponde a la despasivación del refuerzo debido a la acumulación de iones cloruro en la capa del refuerzo de acero.
2. Periodo de propagación, durante el cual la estructura se deteriora como resultado de la pérdida de área transversal y la acumulación de productos de corrosión alrededor de la superficie de la barra [13].

Los iones cloruro pueden estar incorporados en el concreto desde la mezcla de componentes en el momento de su preparación (agregados, agua, aditivos) o desde fuentes externas (sales de deshielo, agua de mar, agua subterránea). No todos los cloruros en el concreto están en movimiento, parte de estos iones se encuentran ligados por los componentes del cemento, especialmente a los aluminatos, mediante mecanismos químicos (reacción) y físicos (adsorción), como se muestra en la figura 3.

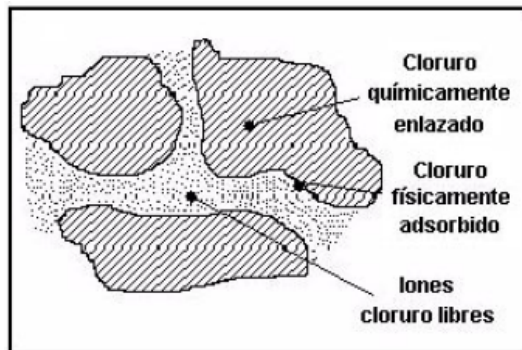
Se considera que solamente los iones cloruro en estado libre, pueden llegar a desencadenar un fenómeno corrosivo sobre la armadura del concreto [18].

Figura 2 Diagrama de Tuutti; Estados idealizados de Iniciación y propagación.



Fuente: Tuutti [15]

Figura 3. Cloruros en el sistema poroso del concreto



Fuente: Del Valle, Pérez, Martínez [28]

En la corrosión inducida por cloruros, la duración del periodo de iniciación depende la tasa de penetración de los iones cloruro en el concreto, la profundidad de la cubierta de concreto, así como la concentración de cloruros requerida para iniciar el proceso de corrosión [25].

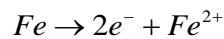
Los principales efectos negativos de los cloruros sobre el concreto reforzado son:

- Destruyen la capa pasivante de la barra de acero y hacen posible el ataque directo del ion cloruro sobre el refuerzo metálico, provocando la corrosión.
- Aumentan la conductividad eléctrica del concreto.
- Disminuyen la resistencia óhmica del concreto.
- La resistencia óhmica del concreto puede cambiar significativamente en el orden de 10^4 ohm cuando hay variaciones entre ambiente seco ambiente húmedo, en concretos secos.

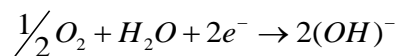
La corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruros requiere una suficiente cantidad de oxígeno para la reacción catódica que toma lugar, además, la humedad actúa como electrolito de baja resistencia; en este orden de ideas la tasa de corrosión del acero en el concreto aumenta, mientras la resistencia del concreto disminuye, en condiciones normales de exposición [14].

En la corrosión del acero dentro del hormigón, el proceso anódico no puede producirse hasta que la capa protectora del acero se elimina. Las reacciones son [8, 26, 27]:

Ánodo:



Cátodo:



Densidades de corrosión superiores a $0,2 \mu A/cm^2$ normalmente indican corrosión activa. Para valores superiores, la clasificación es arbitraria. Bermúdez Odriozola [8] proponen la siguiente tabla:

Tabla 1. Criterio par interpretar las densidades de corrosión.

VELOCIDAD DE CORROSION	CLASIFICACION
< 0,1 a 0,2 $\mu A/cm^2$	PASIVO
0,2 a 0,5 $\mu A/cm^2$	BAJO A MODERADO
0,5 a 1,0 $\mu A/cm^2$	MODERADO A ALTO
> 1,0 $\mu A/cm^2$	ALTO

1.4 ASPECTOS GENERALES MÉTODO ELEMENTOS FINITOS

Las ecuaciones diferenciales parciales (PDEs) aproximan la solución de un problema con un número finito de parámetros desconocidos, a esto se le conoce como discretización de el problema original. Esto implica introducir elementos finitos que describen la posible forma de la solución aproximada. Este método permite obtener una estable discretización de un problema tipo hiperbólico, (anexo D).

- Mallado

El mallado es la partición de la geometría en pequeñas subunidades las cuales cada una de ellas posee las mismas propiedades de la estructura.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

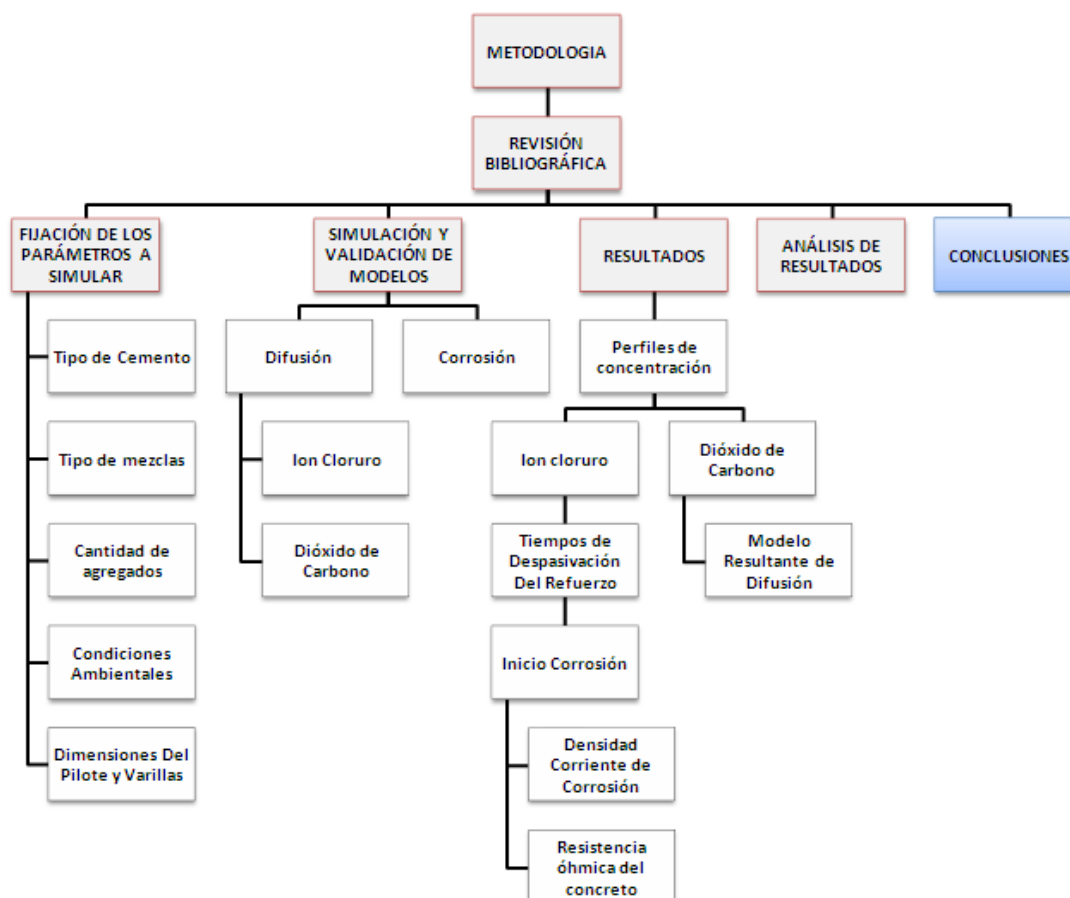
2.1 METODOLOGÍA

La Figura 4 muestra la secuencia de etapas metodológicas para la realización de este trabajo de grado.

2.2 PARÁMETROS USADOS EN LA SIMULACIÓN

- Cemento: Cemento Portland tipo I, cuya composición se encuentra en el anexo 1.
- Tipo de mezclas y cantidad de agregados: El tipo de mezclas (relación agua/cemento equivalente) con microsílíce tomadas en cuenta para el trabajo de grado, aparecen relacionados en la tabla 2.

Figura 4. Etapas Metodológicas del desarrollo experimental



Fuente: autor

Tabla 2. Tipos de mezclas y agregado de elaboración, para el concreto simulado

Relación agua/cemento (a/c)	0,4 0,5 0,6
Tipo de adición	Microsílice (10%)

Fuente: autor

- Condiciones ambientales de simulación ó de frontera: las condiciones de frontera usadas para la simulación por elementos finitos representa un ambiente marino típico a la cual se exponen las estructuras constantemente:

Condiciones simulación del CO₂

$C(t_0)=0$ para $x>0$

$C=C_s=5,4 \times 10^{-7}$ (g/cm³) para $x=0$ cuando $t>0$

HR=78%

T= 15 °C temperatura interface varilla-concreto

Condiciones de simulación del Cl⁻

$C(t_0)=0$ para $x>0$

$C=C_s=4$ Kg/m³ para $x=0$ cuando $t>0$

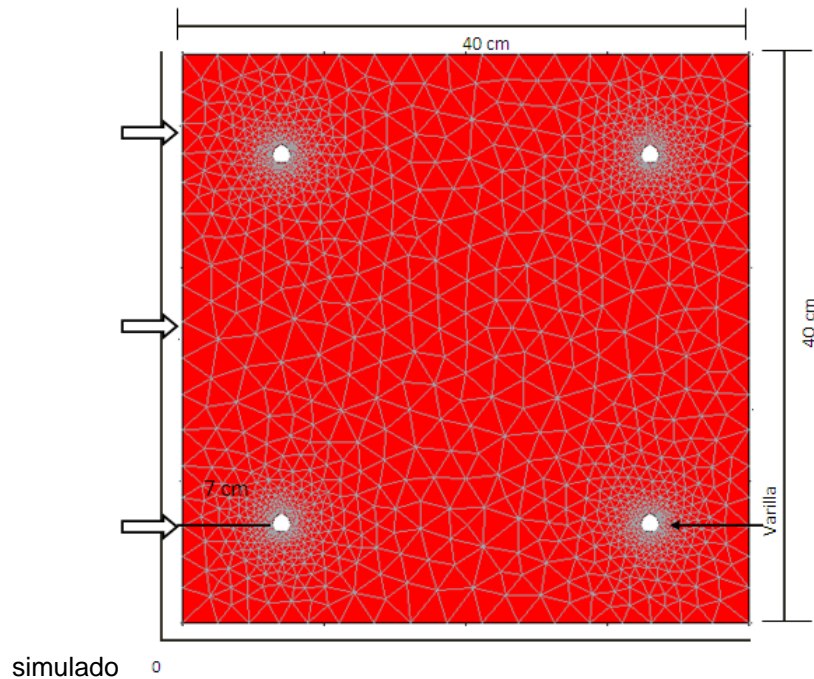
HR=78%

T= 15 °C temperatura interface varilla-concreto

Dichas condiciones de frontera representan el modelo en 1D, pero pueden ser aplicadas a un modelo en 2D, ya que se asume que el pilote se encuentra rodeado por la atmosfera de simulación.

- Dimensiones del pilote y varillas: La figura 5, muestra un corte horizontal de un pilote de 40 cm de ancho por 40 cm de profundidad, en el cual se encuentran empotradas 4 varillas metálicas de ½ pulgada de diámetro, ubicadas a 7 cm de cada esquina del pilote.

Figura. 5 Sección de concreto, corte horizontal de un pilote de concreto

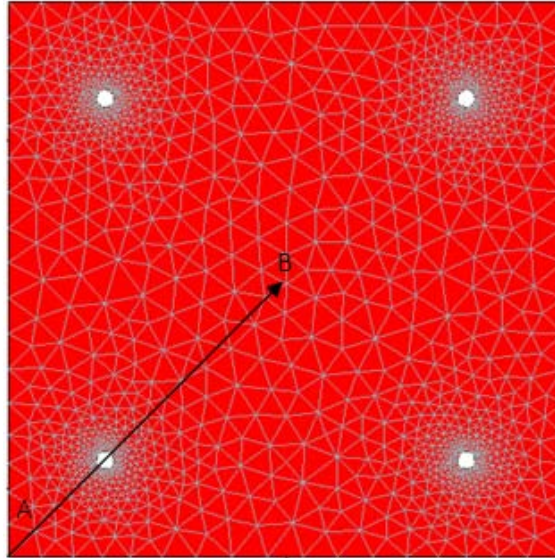


Fuente: autor.

2.3 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS

Usando el método de elementos finitos, con la herramienta de simulación FEMLAB, se plantea la solución de la ecuación diferencial por la segunda ley de Fick en 2D, mediante ODE15, aplicado al pilote mostrado en la figura 5. El mallado del modelo, se muestra en la figura 6 y los perfiles de concentración, tanto del ion cloruro como del CO_2 obtenidos en este trabajo, se asumieron diagonalmente (A-B) y comparados con los perfiles que reportan algunos autores [1, 5, 9,10, 11, 13, 22].

Figura 6. Mallado del modelo simulado, pilote de concreto



Fuente: autor.

- Mecanismo de transporte Ion Cloruro

De manera general, el mecanismo de transporte de difusión del ion cloruro en el concreto adicionado con microsílíce de relación agua/cemento equivalente (ecuación 8), está gobernado por el modelo matemático de la segunda ley de Fick, en el cual el contenido de cloruros, varía respecto al espesor de la estructura y al tiempo de exposición. En este orden de ideas, se plantea la ecuación de Fick bidimensional aplicada al caso de estudio (ecuación 7).

$$\frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Cl^-} \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{Cl^-} \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial y} \right) \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$(a/c)_{eq} = \frac{a}{c + CV * 0.5 + HS * 2 + EG} \quad [8] \quad \text{Ecuación 8.}$$

En esta investigación, el coeficiente de difusión del ión cloruro es no lineal (ecuaciones 9 y 10), debido a que este, es función de la concentración de cloruros

en la superficie de la estructura. Para un coeficiente de difusión calculado a un tiempo de referencia de 28 días y un tiempo de exposición de la misma, elevado a un valor empírico de envejecimiento para mezclas con agregados m [10, 12], se tiene:

$$D_{Cl^-,t} = D_{Cl^-,t_0} * \left(\frac{t_0}{t}\right)^m = D_{Cl^-,1} * t^{-m} \quad \text{Ecuación 9.}$$

$$D_{Cl^-} = D_{Cl^-,0} * 0.0767^m * t^{-m} \quad \text{Ecuación 10.}$$

- Mecanismo de transporte dióxido de carbono

Para este estudio, se tuvo presente la influencia de R (consumo), en la difusión del dióxido de carbono en dos dimensiones (ecuación 11), así como el coeficiente de difusión de la ecuación 14, el cual es función de la humedad relativa y de la porosidad, tal como se muestra en la ecuación 15, 16 y 17. De la misma forma también depende de un coeficiente de difusión inicial, con el fin de presentar una analogía del avance del frente carbonatado como se plantea en la ecuación 13. De acuerdo a esto, el modelo se presenta de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial y} \right) - R * [C_{CO_2}] * [C_{Ca(OH)_2}] \quad \text{Ecuación 11.}$$

Relacionando, $R_{CO_2} = R * [C_{Ca(OH)_2}]$ Ecuación 12.

Entonces,

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{CO_2} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial y} \right) - R_{CO_2} * \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] \quad \text{Ecuación 13.}$$

$$D_{CO_2} = D_{CO_2,0} * \xi^{1.8} * (1 - HR)^{2.2} \quad \text{Ecuación 14.}$$

$$\xi = \xi_0 * \gamma \quad \text{Ecuación 15.}$$

$$\gamma = 0.92 - 3.95 * 0.94^{a/c} \quad \text{Ecuación 16.}$$

$$\xi_0 = \frac{(a/c) * \frac{\rho_c}{\rho_w}}{(a/c) * \frac{\rho_c}{\rho_w} + R_{a/c} * \frac{\rho_c}{\rho_a} + 1} \quad [5] \quad \text{Ecuación 17.}$$

La constante R_{CO_2} representa la relación que hay entre la concentración de hidróxido de calcio que reacciona con el dióxido de calcio y la constante de reacción en la cinética de carbonatación.

- Modelos de corrosión

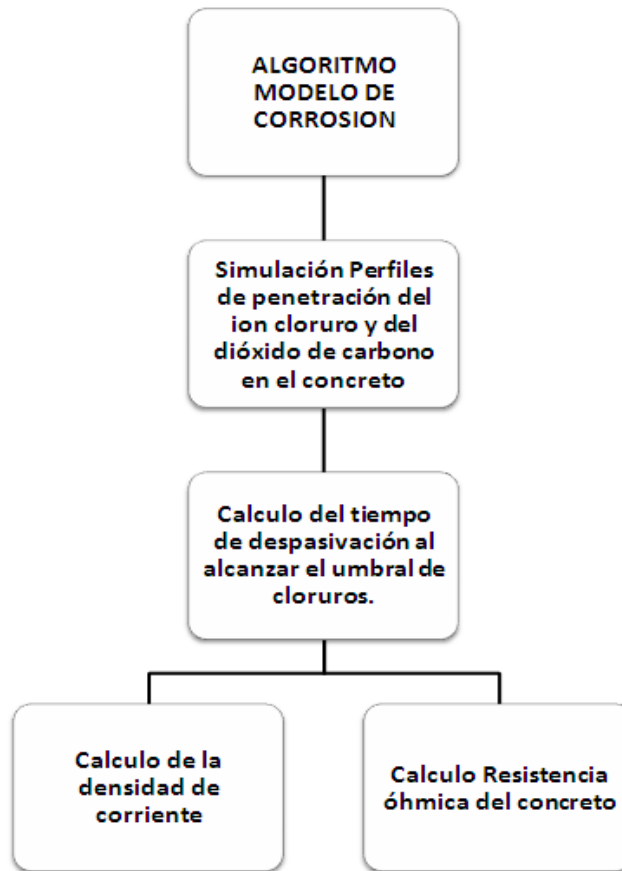
Para obtener los modelos de densidad de corriente de corrosión y resistencia óhmica del concreto se realizó de antemano un procedimiento para calcular la edad a la cual se inicia la corrosión en la estructura. En la figura 7 se muestra un algoritmo de cálculo de los mismos:

Los valores de concentración umbral de cloruros se encuentran entre 0.6 a 1.2 kg/m^3 de concreto [1]. En este trabajo, se asumió, como concentración umbral, un valor de 0.9 $\text{kg cl}^-/\text{m}^3$ de concreto, sobre la varilla de refuerzo, con la cual se calculó el tiempo de iniciación de la corrosión, la densidad de corriente de corrosión y la resistencia óhmica del concreto, empleando las ecuaciones 18 y 19 [1].

$$i_{corr} = 0.926 * \exp \left[7.89 + 0.7771 * \ln(1.69C_{cl^-}) - \frac{3006}{T} - 0.000116R_c + 2.24t^{-0.215} \right] \quad \text{Ecuación 18.}$$

$$R_c = \exp \left[8.03 - 0.549 \ln(1 + 1.69C_{cl^-}) \right] \quad \text{Ecuación 19.}$$

Figura 7. Algoritmo de cálculo para los modelos de corrosión.



Fuente: Autor

3. RESULTADOS Y ANALISIS

Los perfiles mostrados de las concentraciones, son tomados diagonalmente (A-B) (figura 6). El frente carbonatado avanza simultáneamente con la penetración del dióxido de carbono en el pilote (fig. 8-10). Los resultados del modelo difusivo del CO₂ obtenidos, se reportan en la tabla 4 y en el modelo resultante para una difusión natural (ecuación 20). Los perfiles de concentración del ion cloruro son presentados en las figuras 11-13. Las tablas 3 y 5 muestran los parámetros de porosidad y reducción de la misma, de acuerdo a la relación agua/cemento para la

carbonatación y los coeficientes de difusión iniciales, para la difusión del ion cloruro [10]. Además, la tabla 4 muestra los resultados numéricos del modelo difusivo de carbonatación y la tasa R_{CO_2} que indica el consumo del dióxido de carbono a medida que se difunde en el concreto.

3.1 PERFILES DE CONCENTRACIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO

Figura 8. Perfil de concentración simulado del CO_2 relación 0,4.

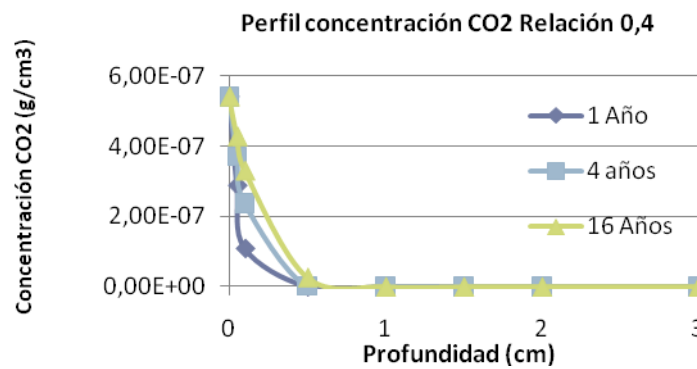


Figura 9. Perfil de concentración simulado del CO_2 relación 0,5.

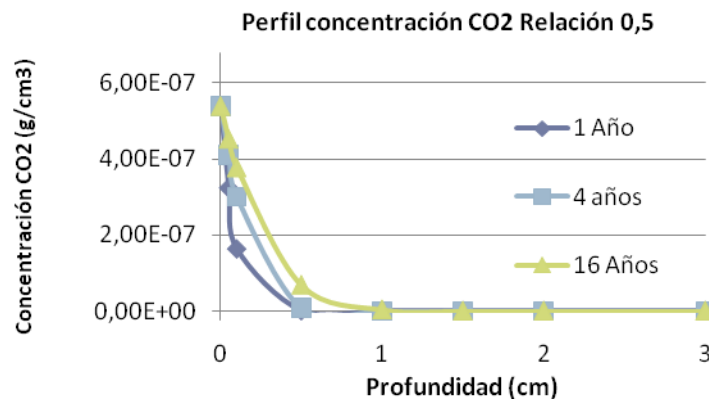


Figura 10. Perfil de concentración simulado del CO₂ relación 0,6.

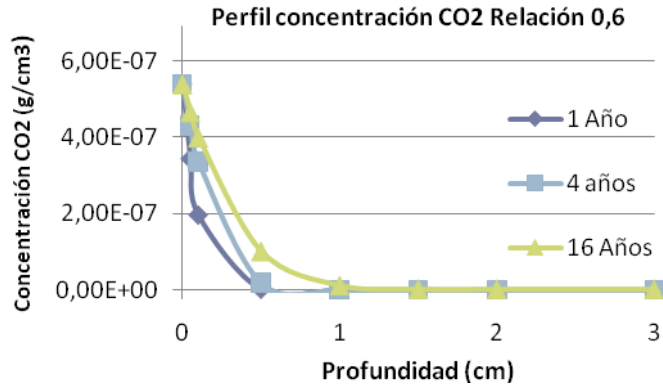


Tabla 3. Parámetros del modelo propuesto de difusión del dióxido de carbono

a/c	ξ_0	γ	ξ
0.4	0,5	0,5475	0,2738
0.5	0,54	0,7126	0,3848
0.6	0,58	0,8039	0,4663

Tabla 4. Resultados para el modelo propuesto de carbonatación

$R_{CO_2}(1/s)$	3,22E-09
$DCO_2; 0 (cm^2/s)$	2,48E-12
RH (%)	78
$C_{CO_2(g)-sup} (g/cm^3)$	5,40E-07
$D_{CO_2} (m^2/s)(a/c:0.4)$	8,63E-15
$D_{CO_2} (m^2/s)(a/c:0.5)$	1,60E-14
$D_{CO_2} (m^2/s)(a/c:0.6)$	2,25E-14

$$D_{CO_2} = 2.4846 * 10^{-8} * \xi^{1.8} * (1 - HR)^{2.2}$$

Ecuación 20.

3.2 PERFILES DE CONCENTRACIÓN DEL ION CLORURO

Los perfiles de concentración del ion cloruro se simularon para 2, 5, 15, 20 y 30 años de exposición de la estructura a un ambiente marino.

Figura 11. Perfiles de concentración Cl⁻ simulada, relación 0,4.

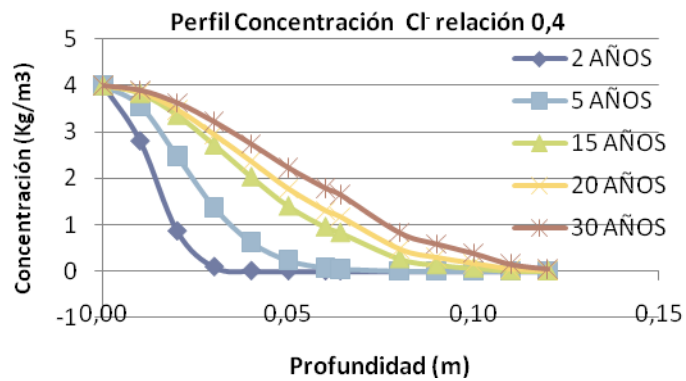


Figura 12. Perfiles de concentración Cl⁻ simulados, relación 0,5.

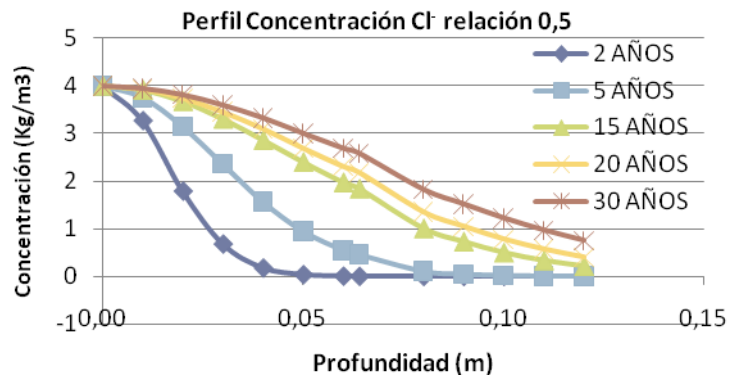


Figura 13. Perfiles de concentración Cl⁻ simulados, relación 0,6.

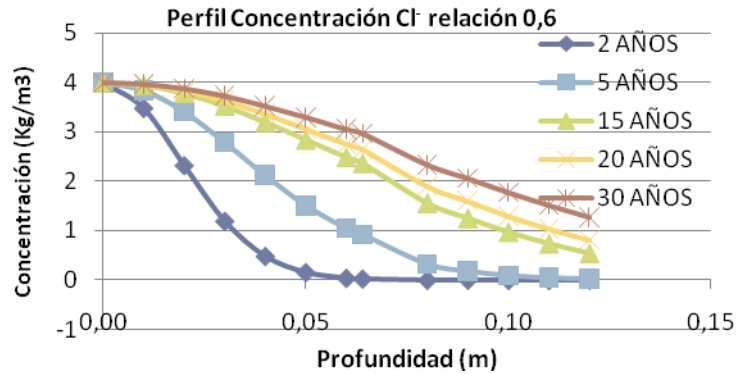


Tabla 5. Parámetros de simulación de difusión de cloruros, resultados prueba ACTM [10].

Relación	D _{cl} , 0*E-11 (m ² /s)
a/c	
0,4	0,535
0,5	1,08
0,6	1,59
m	0,264

Con los resultados de la simulación y los perfiles de concentración del ion cloruro en el pilote, se logró calcular el tiempo de despasivación de las varillas al alcanzar el umbral de cloruros anteriormente fijado (0,9 Kg/m³), los resultados fueron 16, 7 y 5 años para relaciones a/c 0,4, 0,5, 0,6, respectivamente.

Los valores reportados en la tabla 5, muestran el coeficiente de difusión aparente D_{cl} del ion cloruro en el concreto, de acuerdo con la relación agua/cemento equivalente, estos perfiles de concentración, son obtenidos con la solución del coeficiente de difusión evaluado a un año D_{cl,1}, (ec.16). La adición de microsílíce

(10%) en la matriz cementicia, provee una mayor capacidad de resistencia a la permeación de agentes agresivos, hay que agregar que a medida que aumenta la relación a/c, disminuye la resistencia a la permeación, debido a que la porosidad aumenta (aumenta la difusión). Para este estudio se obtuvieron resultados de difusión de dióxido de carbono y de difusión del ion cloruro (tabla 4 y 5). Otros estudios han reportado que el coeficiente de difusión efectivo para cloruros es de $3,5E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ para a/c 0,34 y profundidad de carbonatación inferior a 1 mm, luego de 3 años de exposición [3]; un coeficiente de difusión de CO_2 de $2,8E-7 \text{ m}^2/\text{s}$ y coeficiente de difusión efectivo para el ión cloruro de $2,03E-9 \text{ m}^2/\text{s}$, bajo condiciones de humedad relativa superior a 75% para un cemento portland [4]; mientras que para a/c 0,5 el D_{CO_2} es de $1,85E-8$ y $1,15E-13 \text{ m}^2/\text{s}$ para dióxido de carbono gaseoso y acuoso respectivamente [5].

Los resultados obtenidos en este trabajo, indican que al agregar microsilíce a la mezcla, disminuye el coeficiente de difusión efectivo, lo cual se traduce en una disminución en la penetración de agentes agresivos al concreto, haciéndolo más resistente y por tanto, aumentando la vida de servicio de la estructura. Lo anteriormente mencionado, confirma la importancia de una adecuada escogencia de la relación a/c, ya que ésta, es directamente proporcional a la penetración del ion en la estructura, lo que consecuentemente, afecta la porosidad de la misma.

El coeficiente de difusión del CO_2 se presenta en el orden de magnitud de $10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$, reflejando una muy baja profundidad de penetración del gas en la estructura, lo cual indica, que se está presentando, un efecto bajo en la despasivación del refuerzo.

3.3 CORROSIÓN

Los resultados obtenidos de resistencia óhmica del concreto (ohm) y de densidad de corriente de corrosión (A/m^2), como función de la concentración de cloruros libres, de la relación a/c y del tiempo de corrosión (años), se muestran en las figuras,14 a la 19.

Figura 14. Resistencia óhmica del concreto a/c 0,4

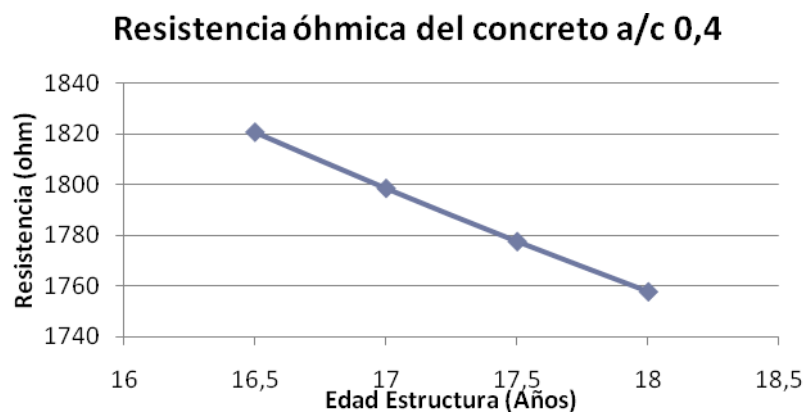


Figura 15. Resistencia óhmica del concreto a/c

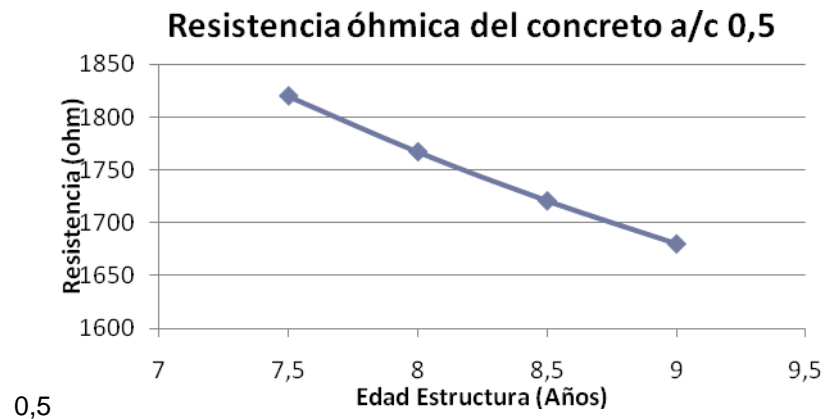


Figura 16. Resistencia óhmica del concreto a/c 0,6

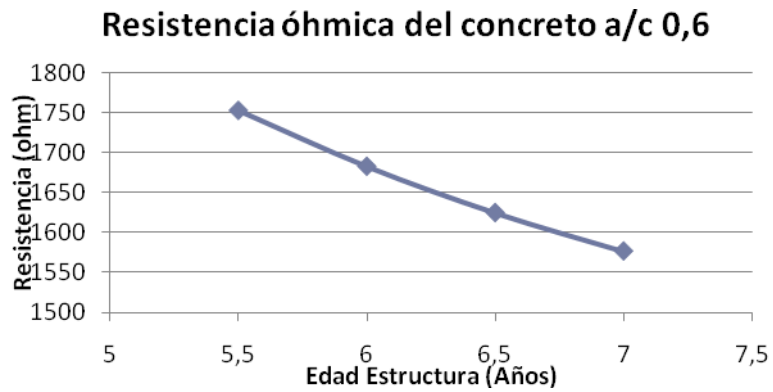


Figura 17. Densidad corriente de corrosión a/c 0,4

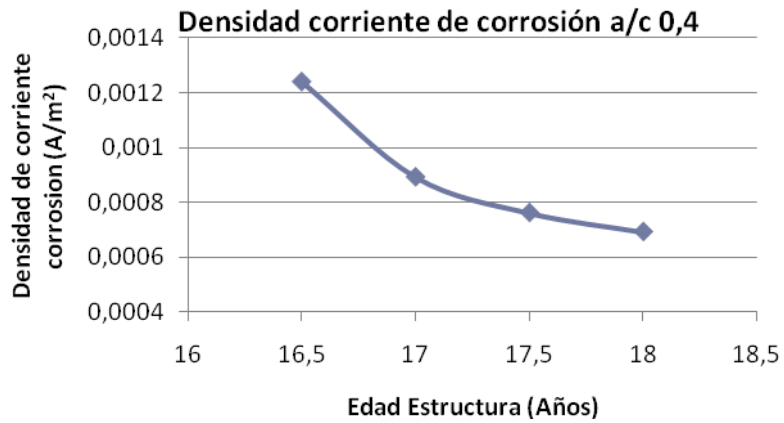


Figura 18. Densidad corriente de corrosión a/c 0,5

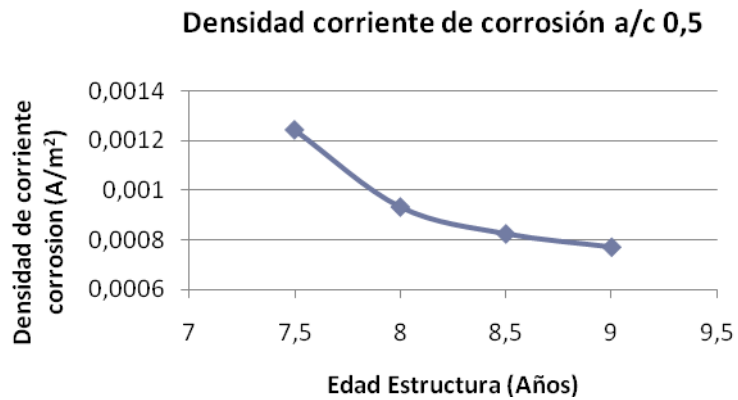
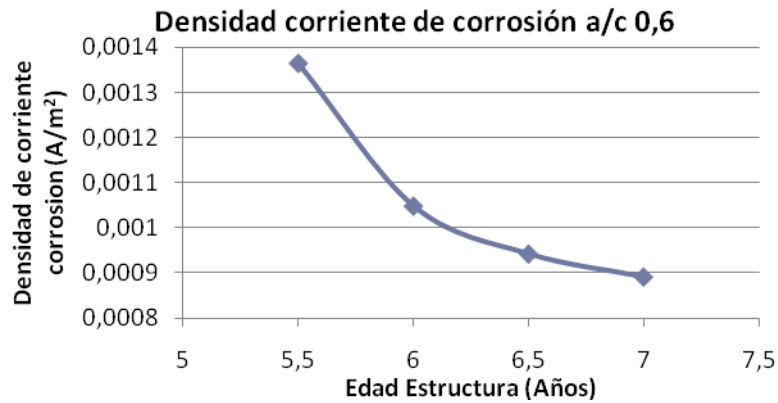


Figura 19. Densidad corriente de corrosión a/c 0,6



- Resistencia óhmica del concreto

Los resultados muestran que la resistencia óhmica del concreto aumenta, de la misma forma que aumenta la relación a/c, pero a su vez, es inversamente proporcional al tiempo de corrosión (años), debido a que la resistencia es función de la concentración de cloruros libres en el concreto, por otra parte, la corrosión en el acero de refuerzo aumenta, a medida que la resistencia del concreto disminuye a condiciones normales de exposición.

- Contenido de cloruros

El contenido de iones cloruro en el concreto afecta de manera directa la tasa de corrosión, lo cual indica que a altos niveles de contaminación por dicho ión, aumenta la tasa de corrosión, dicho fenómeno obedece al incremento en la conductividad del concreto.

- Tiempo de corrosión

El tiempo de exposición sobre la tasa de corrosión del acero de refuerzo, muestra un efecto significativo al inicio de la etapa de propagación de la grieta de la capa

pasiva del acero; disminuyendo drásticamente durante el primer año y tendiendo a ser constante para los años subsiguientes, producto de la reducción en la relación de áreas entre el ánodo y el cátodo, generando herrumbre en el metal y por tanto, disminuyendo la migración de iones de hierro.

4. CONCLUSIONES

- El modelamiento por elementos finitos de la difusión del ión cloruro y del dióxido de carbono, aporta datos importantes para predecir el comportamiento del avance de los mismos en el concreto reforzado.
- Es importante el efecto de la microsílíce como adición y de una adecuada escogencia de la relación a/c, para mejorar la resistencia a la penetración de agentes agresivos en la estructura de concreto para disminuir la porosidad de la misma y el tiempo de iniciación de la corrosión, aumentando el tiempo de servicio de la estructura.
- La difusión del CO₂ en la estructura de concreto muestra una analogía o aproximación al avance del frente carbonatado, incluida la constante cinética de reacción, que representa la interacción que existe entre el consumo del CO₂ y la concentración de hidróxido de calcio.
- El coeficiente de difusión del CO₂, se presentó en el orden de magnitud de 1×10^{-14} m²/s, mostrando una baja profundidad de penetración del CO₂ en la estructura, lo cual indica, un efecto bajo en la despasivación del refuerzo.
- La resistencia óhmica del concreto se presentó inversamente relacionada con la presencia de cloruros libres en el concreto, la relación a/c y por el tiempo de exposición del pilote.
- La evidencia de corrosión sobre el refuerzo metálico obedece a la presencia de cloruros libres en el concreto, lo cual se favorece por las condiciones ambientales de mar.

5. RECOMENDACIONES

El modelamiento por elementos finitos de los fenómenos de transporte en estado no estable, especialmente, el coeficiente de difusión no lineal, presenta un grado de complejidad, producto de la dependencia que tiene con las propiedades del material en la cual se difunde las especies; para propuestas posteriores de modelamiento se recomienda tener en cuenta más variables en este tipo de cálculos como: Temperatura, adsorción(C_{cl}), porosidad(t) y humedad relativa, para representar de una manera más detallada el comportamiento de este tipo de fenómenos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dong Chen, Prodyot K. Basu, David S. Kosson, Florence Sanchez: Computational framework for durability assessment of reinforced concrete structures under coupled deterioration processes; 160, 161 (2006).
- [2] Rafael Rosado: Corrosión del acero en el concreto; pág. 2
- [3] Alejandro Arva, W. Morris, M. Gabriela Alvarez y Gustavo S. Duffo: Corrosión en estructuras de hormigón armado aplicación al contenedor de residuos radioactivos de media actividad (2003).
- [4] Miguel Angel Sanjuan Barbudo, Carmen Andrade Perdrix: Cálculo del periodo de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón (1992).
- [5] Sebastian A. Meier, Malte A. Peter, Adrian Muntean, Michael Böhm: Modeling and simulation of concrete carbonation with internal layers, pág. 4 (2005).
- [8] Miguel angel Bermudez Odriozola, 2007.
- [9] D.C. Park: Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings, (2007).
- [10] Nancy S.: Efecto del tipo aditivo sobre el coeficiente del ion cloruro en ambiente con cloruros (2009).
- [11] Blanca: Tesis coeficiente de difusión del ion cloruro bajo condiciones de carbonatación (2009).
- [12] Maage et al.(1996) and Bamforth (1998)
- [13] B. Martin-Perez, S. J. Pantazopoulou, M. D. A. Thomas: Numerical solution of mass transport equations in concrete structures, (2001).
- [14] T. Liu and R. W. Weyers: Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures, (1997).

- [15] K. Tuutti: Corrosion of steel in concrete; Swedish Cement and Concrete Research Institute. Nº F04 Stockholm, Suecia, page. 469. (1982).
- [16] C. L. Page, Institute of corrosion. SCi Tech. Bul. 77 (1979)
- [17] D. A. Havsman, Mater. Prot. B, 19 (1967)
- [18] MEJÍA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. CYTED. Colombia, 1999.
- [19] CORDERO, Mariela. Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a la corrosión por cloruros. Universitat Politècnica de Catalunya Department d'Enginyeria de la Construcción. Barcelona, 2005.
- [20] HERNÁNDEZ, Rodolfo. SUÁREZ, Sandra. Efecto del ión cloruro en el acero de refuerzo expuesto a soluciones simuladas de concreto. UIS, 1999.
- [21] BÖHNI, Hans: Corrosion in reinforced concrete structures. Woodhead Publishing Ltd y CRC Press, Cambridge, 2005.
- [22] Claudia León Moncada, Sandra Astrid Oróstegui Olarte: Determinación Experimental del coeficiente de difusión aparente del ión cloruro en concreto expuesto a ambientes con cloruros, 2009.
- [23] P. SCHIESSL, S. LAY. Corrosion in concrete reinforced structures.
- [24] M. Castellote, C. Andrade: Modelling the carbonation of cementitious matrixes by means of the unreacted-core model, UR-CORE; (2008).
- [25] MARTÍN, Beatriz. Service life modeling of R.C. highway structures exposed to chlorides. University of Toronto, 1999.
- [26] GÁLLIGO ESTÉVEZ, J. M. (1998). Los procesos de corrosión de las armaduras. En CEDEX. *Curso sobre durabilidad y reparación de estructuras de hormigón*. Madrid: Ed.

[27] MEHTA, P. K. y MONTEIRO, P. J. M. (1986). *Concrete. Structure, Properties and Materials* (113-178). Ed. Prentice Hall.

[28] DEL VALLE, A. PÉREZ, T. MARTÍNEZ, M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Instituto Mexicano del transporte. Sanfandila, 2001.

ANEXO A

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I

Compuesto	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SrO	TiO ₂	MnO	ZrO ₂
Porcentaje	72.4	14.9	4.31	3.29	2.67	1.37	0.54	0.20	0.13	0.02	0.01
	96	17	2	7	9	6	0	8	2	6	8

Fuente: GIC

ANEXO B

COMPOSICION DE LA MICROSÍLICE SIMULADA

Aspecto	Polvo fino gris oscuro
Contenido de SiO ₂	> 90%
Pérdida al fuego	< 5%
Superficie específica	> 30 m ² /g
Humedad	< 5 % aprox
% pasa por tamiz 325	99 %
Diámetro promedio	0.5 μm

Fuente: GIC

ANEXO C

COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS A PARTIR DEL MÉTODO DE COLORIMETRÍA. COEFICIENTES DE DIFUSIÓN PARA LAS DIFERENTES RELACIONES A/C [10]

Tiempo	Difusión natural D (E-11 m ² /s)						ACMT (E-11 m ² /s)	
	30 días		45 días		60 días		9h	2h
Relación a/c	M	B	M	B	M	B	M	B
0.4	0.647	2.018	0.83	3.03	0.738	2.57	0.535	4.73
0.5	1.71	3.76	1.27	4.52	1.74	4.73	1.08	8.79
0.6	3.15	4.74	3.0	5.59	2.72	5.47	1.59	9.97

M: microsílíce B: blanco

ANEXO D

GENERALIDADES MÉTODO ELEMENTOS FINITOS

PROBLEMAS DEPENDIENTES DEL TIEMPO:

La ecuación para problemas dependientes del tiempo es obtenida de la ecuación en estado estacionario, agregando dicha variación.

d_a Es coeficiente de masa para un sistema de ecuaciones, u es un vector que depende de las variables. El problema en forma general se propone de la siguiente manera:

$$\begin{cases} d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = F & \text{in } \Omega \\ -\underline{n} \cdot \Gamma = G + \left(\frac{\partial R}{\partial u}\right)^T \mu & \text{on } \partial\Omega \\ 0 = R & \text{on } \partial\Omega \end{cases}$$

ELEMENTOS FINITOS

Una vez que tenemos una malla, podemos introducir aproximaciones a nuestras variables dependientes. Concentrémonos en el caso de una sola variable u . La idea es aproximar u con una función que se describió por un número finito de parámetros, llamado *Los grados de libertad*. Esta aproximación está entonces inserta en la forma básica de la ecuación, y obtenemos un sistema de ecuaciones para los grados de libertad.

Luego podemos escribir

$$u(x) = U_1 \varphi_1(x) + U_2 \varphi_2(x) + U_3 \varphi_3(x)$$

Donde $\varphi_1(x)$ es una pieza de la función lineal en cada uno de los intervalos de la malla, es igual a 1 en el punto del nodo *del i th*, y es igual a 0 en los otros puntos del nodo. Por ejemplo,

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 1-x & \text{if } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{if } 1 \leq x \leq 2 \end{cases}$$

Y las funciones $U(x)$ son funciones lineales llamadas elementos finitos en el espacio.

DISCRETIZACION DE PROBLEMAS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

La discretización de problemas dependientes del tiempo se denota así,

$$\begin{aligned} D(U, t) \frac{dU}{dt} &= L(U, t) - N(U, t)^T \Lambda \\ 0 &= M(U, t) \end{aligned}$$

La linealización y discretización del problema no estacionario es,

$$K(U_0)(U - U_0) + N(U_0)^T \Lambda = L(U_0)$$
$$N(U_0)(U - U_0) = M(U_0)$$

Donde K es el jacobiano de L :

$$-K = \frac{\partial L}{\partial U}$$