

**SIMULACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE IONES CLORURO EN UN ELEMENTO DE  
HORMIGÓN**

**MARY YORLEY GONZÁLEZ SANDOVAL  
LAURA CRISTINA SANTANA SALAZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2005**

**SIMULACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE IONES CLORURO EN UN ELEMENTO DE  
HORMIGÓN**

**MARY YORLEY GONZÁLEZ SANDOVAL  
LAURA CRISTINA SANTANA SALAZAR**

**Trabajo de tesis para optar al título de  
Ingeniera Civil.**

**Director**

**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ  
Dr. En Ciencias Técnicas.**

**Codirector**

**CUSTODIO VÁZQUEZ QUINTERO  
Msc. Ingeniero Metalúrgico.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2005**

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser mi fuente de paz y fuerza en todo momento.

A mis padres por su entrega y dedicación, por confiar en mi y ser artífices en la realización de mis metas.

A mis hermanos por su apoyo y colaboración.

Al Padre Freddy Ramírez por ser un guía espiritual en mi vida universitaria, al maestro Gustavo Gómez Ardila por hacer del canto coral un complemento para mi carrera y a todas las personas que de una u otra forma hicieron parte en la realización de este proyecto.

*Mary Yorley González Sandoval*

## DEDICATORIA

A Dios por orientar mi vida, por acompañarme siempre y hacer realidad los anhelos de mi corazón.

A mis padres, Luis Ernesto y Betty Ruth, por brindarme su amor, enseñanzas, apoyo incondicional, por hacerme la persona que soy y por confiar en mí siempre.

A mis hermanas, Edith Sofía y Silvia Marcela, por brindarme su apoyo, amistad, compañía y por creer en mí.

*Laura Cristina Santana Salazar*

## **AGRADECIMIENTOS**

Las autoras expresan su agradecimiento a:

Dr. Ing. Ricardo A. Cruz H., por su apoyo y orientación durante la dirección de este proyecto.

Msc. Ing. Custodio Vásquez, por su apoyo y orientación en la codirección de ésta investigación.

Ing. Metalúrgico Jorge Suárez e Ing. Civil Wilson Felipe Jaimes, por su colaboración y asesoría computacional en el desarrollo de esta investigación.

Dr. Ing. Gustavo Chio Cho, cuyo apoyo y orientación científica fueron valiosos en la culminación de este proyecto.

Grupo de Investigación en nuevos Materiales y Estructuras, INME, por brindarnos su espacio físico y soporte técnico.

A nuestros padres, por la paciencia y el ánimo impartido para la terminación de esta investigación.

Y, a cada una de las personas que colaboraron directa ó indirectamente en la ejecución de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ARMADO ANTE UN ATAQUE QUÍMICO</b> .....	<b>18</b>
1.1.1. Composición y reacciones de hidratación del hormigón.....	20
1.1.2. Degradación de las estructuras de hormigón armado por ataques químicos. ....	22
1.1.3. Efecto de los iones cloruro en el concreto. ....	26
1.1.4. Tipos de corrosión electroquímica .....	32
<b>CAPITULO II. MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DEL FENÓMENO</b> .....	<b>35</b>
<b>2.1 MODELO DE DURABILIDAD</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2 MODELO DE TRANSPORTE</b> .....	<b>37</b>
2.2.1. Umbral de cloruros.....	41
2.2.2. Influencia de los materiales puzolánicos .....	43
<b>CAPITULO III. MODELOS DE SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL CONCRETO.</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1. MODELO DE THOMAS Y BAMFORTH</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2. MODELO DE TORRES Y MARTINEZ</b> .....	<b>54</b>
<b>3.3. MODELO DE BERKE Y HICKS</b> .....	<b>54</b>
<b>CAPITULO IV. MODELO DE SIMULACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB 7.0</b> .....	<b>56</b>
<b>4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO</b> .....	<b>56</b>
4.1.1. Validación del modelo de difusión por diferencias finitas con los datos de Thomas y Bamforth. ....	56
4.1.2. Validación de la ecuación de Torres y Martínez .....	62
4.1.3. Validación del método de Berke y Hicks .....	65
<b>CARGA</b> .....	<b>65</b>
<b>PERMEABILIDAD</b> .....	<b>65</b>
<b>A CLORUROS</b> .....	<b>65</b>
<b>4.2. APLICACIÓN DEL MODELO</b> .....	<b>70</b>
4.2.1. Evaluación del comportamiento del concreto sometido a diferentes ambientes de cloruros.....	70
4.2.2. Estimación de la vida útil de las estructuras de concreto. ....	73
4.2.3. Determinación de la influencia de las adiciones al concreto. ....	76
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>84</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>85</b>

<b><i>ANEXOS</i></b> .....	<b>89</b>
<b>ANEXO 1. MODELO EN MATLAB</b> .....	<b>90</b>
<b>ANEXO 2. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DEL <math>D_{EF}</math></b> .....	<b>98</b>
<b>ANEXO 3. COMO PREVENIR LA CORROSIÓN?</b> .....	<b>102</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Componentes fundamentales del cemento Pórtland. ....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla No. 2 Rango de valores de Cs (%del peso del material cementante) [21] .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla No. 3 Detalles de las mezclas de concreto.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla No. 4 Coeficientes de difusión y concentraciones superficiales de cloruros para los bloques de concreto reforzado.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla No. 5 Ajustes de los coeficientes de difusión y las concentraciones... superficiales de cloruros. ....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla No. 6 Lecturas de comparación .....</b>	<b>62</b>
<b>Tabla No. 7 Coeficientes de difusividad obtenidos de la ecuación empírica propuesta por Torres y Martínez. ....</b>	<b>63</b>
<b>Tabla No. 8 Clasificación de la permeabilidad al ión cloruro, ASTM C1202. ..</b>	<b>65</b>
<b>Tabla No. 9 Nivel umbral de cloruros para los diferentes tipos de mezcla.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla No. 10 Coeficientes de difusividad obtenidos con la curva de mejor ajuste .....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE FOTOS

<b>Foto 1. Deterioro de una estructura de hormigón armado por carbonatación.</b> .....	<b>23</b>
<b>Ref. Revista Ciencia hoy en línea, vol 14, 2004</b> .....	<b>23</b>
<b>Foto 2. Deterioro de un pilote afectado seriamente por el proceso corrosivo.</b> .....	<b>24</b>
<b>Ref. Revista Ciencia hoy en línea, vol 14, 2004</b> .....	<b>24</b>
<b>Foto 3. Loza que comienza a deteriorarse como consecuencia del avance de la corrosión.</b> .....	<b>26</b>
<b>Foto 4. Corrosión en zona de alta y baja marea y de salpicadura</b> .....	<b>29</b>
<b>Foto 5. Corrosión por picaduras sobre estructura ubicada en el Océano Atlántico.</b> .....	<b>32</b>
<b>Foto 6. Manifestación externa del estado de corrosión del acero de refuerzo.</b> .....	<b>36</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura No.1 Mecanismo del proceso de corrosión.</i>	25
<i>Figura No. 2 La corrosión en ambiente marino según el Comité Euro Internacional del Hormigón.</i>	29
<i>Figura No. 3 Modelo de Durabilidad seguido en esta investigación.</i>	37
<i>Figura No. 4 Perfiles obtenidos para la mezcla de control.</i>	49
<i>Figura No. 5 Perfiles obtenidos para la mezcla que contiene ceniza volante (P/PFA).</i>	50
<i>Figura No. 6 Perfiles obtenidos para la mezcla con contenido de escoria (P/GBS)</i>	51
<i>Figura No. 7 Perfiles de cloruros a 30 años.</i>	53
<i>Figura No. 8 Perfiles de concentración obtenidos en este proyecto para datos de campo de la mezcla de solo cemento Portland</i>	58
<i>Figura No. 9 Perfiles de concentración obtenidos en este proyecto para datos de campo de la mezcla con ceniza volante.</i>	59
<i>Figura No. 10 Perfiles de concentración obtenidos en este proyecto para datos de campo de la mezcla con escoria.</i>	60
<i>Figura No. 11 Validación del modelo en MATLAB</i>	61
<i>Figura No. 12 Perfiles de concentración de cloruros a los 8 años.</i>	64
<i>Figura No. 13 Perfil de concentración de cloruros a un año para una zona de salpicadura.</i>	67
<i>Figura No. 14 Perfil de concentración de cloruros a un año para ambiente marino.</i>	68
<i>Figura No. 15 Perfil de concentración de cloruros a un año para zona de marea</i>	69
<i>Figura No. 16 Influencia de la relación a/c sobre la difusividad de los iones cloruro en zona de marea.</i>	71
<i>Figura No. 17 Influencia de la relación a/c sobre la difusividad de los iones cloruro en zona de salpicadura.</i>	71
<i>Figura No. 18 Influencia de la relación a/c sobre la difusividad de los</i>	71

<i>iones cloruro en zona de ambiente marino. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura No. 19 Mejor ajuste de los datos de campo para un.....</i>	<i>74</i>
<i>concreto con ceniza volante.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura No. 20 Mejor ajuste de los datos de campo para un.....</i>	<i>74</i>
<i>Concreto con escoria .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura No. 21 Perfiles de predicción para un concreto con ceniza volante ...</i>	<i>75</i>
<i>Figura No. 22 Perfiles de predicción para un concreto con escoria .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura No. 23 Perfiles de concentración obtenidos para datos de .....</i>	<i>77</i>
<i>campo a los 8 años de exposición. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura No. 24 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo de la</i>	
<i>mezcla PC control.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura No. 25 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo de la</i>	
<i>mezcla P/PFA .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura No. 26 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo de la</i>	
<i>mezcla P/GBS.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura No. 27 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo.....</i>	<i>80</i>
<i>Con un recubrimiento de 6 cm .....</i>	<i>80</i>

## LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO 1. MODELO EN MATLAB.....</i>	<i>90</i>
<i>ANEXO 2. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DEL <math>D_{EF}</math> .....</i>	<i>98</i>
<i>ANEXO 3. COMO PREVENIR LA CORROSIÓN? .....</i>	<i>102</i>

**TITULO: SIMULACION DE LA DIFUSION DE IONES CLORURO EN UN ELEMENTO DE HORMIGON \***

**AUTORAS: MARY YORLEY GONZALEZ SANDOVAL  
LAURA CRISTINA SANTANA SALAZAR \*\***

**PALABRAS CLAVES:** Cloruros, corrosión, umbral de cloruros, Segunda Ley de Fick, adiciones puzolánicas, durabilidad, relación agua/cemento, difusión.

**RESUMEN:** Ante el deterioro que sufren estructuras de concreto expuestas a ambientes con cloruros (principales causantes de la corrosión del acero de refuerzo), se presenta el desarrollo de un modelo por diferencias finitas en el software MATLAB 7.0 para simular la difusión de iones cloruro en una matriz de concreto a través del tiempo, utilizando los modelos matemáticos de durabilidad y transporte de Tutti y Fick respectivamente. Datos de pruebas de campo de diversos autores con elementos expuestos a ambientes de cloruros, son usados para validar dicho modelo.

Se evalúa la influencia e importancia de la incorporación de adiciones puzolánicas como escoria y ceniza volante en diferentes proporciones al cemento Pórtland, así como la importancia de un buen diseño de mezcla y un buen recubrimiento, para prolongar la vida de servicio de una estructura. Este diseño óptimo de mezcla debe contemplar la selección del cemento más adecuado, la adición de puzolanas y una relación (A/C) menor a 0.4 para obtener valores de difusividad bajos, disminuir la penetración de los iones cloruro, desarrollar una buena resistencia y asegurar el buen comportamiento del concreto frente a la corrosión. El modelo de Simulación por Diferencias Finitas puede aplicarse en la rehabilitación de estructuras sometidas al ataque de iones cloruro.

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico mecánicas, Ingeniería Civil, Director: Dr. Ricardo Cruz Hernández

**TITLE: SIMULATION OF THE ION DIFFUSION CHLORIDE IN A CONCRETE ELEMENT \***

**AUTHORS: MARY YORLEY GONZALEZ SANDOVAL  
LAURA CRISTINA SANTANA SALAZAR \*\***

**KEY WORDS:** Chloride, corrosion, threshold chloride, Fick's second law, puzolanics additions, durability, water-to-binder ratio, diffusion.

**SUMMARY:** Before the deterioration which they undergo exposed structures of concrete to atmospheres with chlorides (main causes of the corrosion of the reinforcement steel), the development of a model by finite differences in software MATLAB 7,0 appears to simulate the ion diffusion chloride in a concrete matrix through the time, using the mathematical models of durability and transport of Tutti and Fick respectively. Test data of field of diverse authors with exposed elements to chloride atmospheres, are used to validate this model.

It evaluates the influence and importance of the incorporation of puzolánicas additions like slag and fly ash in different proportions from the Pórtland cement, as well as the importance of a good design of mixture and a good covering, to prolong the life on watch of a structure. This optimal design of mixture must contemplate the selection of the most suitable cement, the addition of puzolanas and a relation (A/C) smaller to 0,4 to obtain low values of difusividad, to diminish the penetration of ions chloride, to develop a good resistance and to assure good behavior the concrete front to the corrosion. The model of Simulation by Finite Differences can be applied in the rehabilitation of structures submissive the ion attack chloride.

\*Research paper

\*\* Físical-mechanical engineerings faculty, Civil engineering, Director: Dr. Ricardo Cruz Hernández

## INTRODUCCIÓN

Ante el deterioro que sufren las estructuras de concreto expuestas a ambientes con cloruros (principales causantes de la corrosión del acero de refuerzo), se pretende desarrollar un modelo por diferencias finitas en el software MATLAB 7.0 para simular la difusión de iones cloruro en una matriz de concreto a través del tiempo, utilizando los modelos matemáticos de durabilidad y transporte de Tutti y Fick respectivamente.

Este modelo es de utilidad en la predicción del tiempo de vida útil de estructuras sometidas al ataque de cloruros. Así mismo permite determinar mediante una herramienta sistematizada (software) los recubrimientos adecuados de elementos de concreto normales o adicionados con puzolanas. Igualmente permite determinar la importancia de un buen diseño de mezcla y un buen recubrimiento, para prolongar la vida de servicio de una estructura.

Los objetivos planteados son la definición del modelo matemático teniendo en cuenta las condiciones del software, Implementar un procedimiento para modelar la propagación de cloruros en una matriz de concreto, determinar mediante el modelo propuesto, el tiempo de propagación de cloruros en un elemento de concreto y finalmente comparar los resultados del modelo con los de otros autores.

El informe final del proyecto se presenta de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta un planteamiento teórico del problema, dónde se hace énfasis al comportamiento del hormigón armado y de las estructuras ante el ataque de agentes químicos como el cloruro.

En el segundo capítulo se muestran los modelos matemáticos realizados por diferentes autores que han simulado el fenómeno de difusión, como el modelo de durabilidad de Tutti y el modelo de transporte de Fick.

El tercer capítulo contiene la descripción de los trabajos realizados por Thomas y Bamforth, Torres y Martínez y Berke y Hicks, cuyos resultados permiten obtener el coeficiente de difusión de cloruros a utilizar en el modelo propuesto.

En el último capítulo se presenta el modelo de simulación por diferencias finitas utilizando el software MATLAB 7.0. El modelo ha sido validado con base en el modelo de Thomas y Bamforth, enseguida se valida la ecuación de Torres y Martínez y se comprueba la ecuación de difusividad de Berke y Hicks basada en el ensayo de la Permeabilidad Rápida. Finalmente se presentan las posibles aplicaciones del modelo propuesto.

## **CAPITULO I. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA**

### **1.1 CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ARMADO ANTE UN ATAQUE QUÍMICO**

El hormigón armado es uno de los materiales de construcción por excelencia debido a que sus propiedades están por encima de otros materiales, tales como la madera y el acero; representa el material de mayor importancia y utilización en obras civiles y edificaciones debido a su capacidad ante grandes sollicitaciones y poco mantenimiento. Sin embargo, contrario a lo que anteriormente se pensaba sobre la duración ilimitada del hormigón armado, se ha comprobado que éste sufre deterioro en mayor o menor grado a través del tiempo considerándose ahora como un material aceptablemente durable que sufre degradaciones o deterioros [1].

El hormigón debe gran parte de su importancia al acero con el que se combina y con el que da origen al nombre, hormigón armado. En un elemento de hormigón armado, el acero absorbe los esfuerzos de tensión y el hormigón los de compresión, esta combinación, permite realizar grandes obras siempre y cuando sean correctos el diseño, la fabricación y el tratamiento que garantice buen comportamiento durante largo tiempo.

Además de tener en cuenta los esfuerzos que influyen sobre la resistencia del elemento de hormigón armado, deben considerarse también los agentes que pueden alterar la estructura físico-química de éste, los cuales pueden generar degradaciones o deterioros al elemento de hormigón afectando su funcionalidad y durabilidad, no cumpliendo muchas veces con los fines para los que fue diseñado. Estos agentes tienen diversas procedencias, y actúan de manera distinta en un elemento de hormigón armado, es decir, algunos afectan directamente a la pasta

de cemento y otros al acero de refuerzo; en fin, sea cual sea su procedencia siempre se verán comprometidos resistencia, durabilidad y aspectos estéticos.

Según sea la composición del hormigón y las condiciones de exposición, varias reacciones químicas pueden deteriorarlo; sin embargo, este deterioro muchas veces puede provenir de algún agente nocivo contenido dentro del mismo. Algunos de estos agentes nocivos penetran desde el exterior a través de los poros interconectados en la matriz de concreto o a través de fisuras presentes en su superficie; en otras ocasiones estos agentes nocivos se introducen inocentemente dentro del hormigón porque los contienen algunos de los componentes (agua de mezclado, agregados). Es así que deben considerarse entonces cuales factores afectan y desencadenan los procesos de deterioro en el hormigón armado. La dosificación, la compactación, la homogeneidad, así como el espesor del recubrimiento, el estado superficial del acero y la humedad, son factores que afectan estos procesos de deterioro [2]. El hormigón se caracteriza por tener entre el 10 – 30% de porosidad, ésta depende principalmente de la relación del cemento con el agua con que reacciona para formar la pasta ligante que une los agregados, y de las condiciones de curado; menores relaciones agua/cemento garantizan un concreto impermeable de elevada resistencia.

El hormigón debe ser homogéneo, compacto, resistente y poco poroso; debe cumplir con una doble función: por un lado ser una barrera física que separe el acero de refuerzo del medio ambiente y por otro, el electrolito encerrado en los poros de este, debe formar una capa de óxido protector (pasivación) duradero. Cuando la capa pasiva que recubre el acero de refuerzo se rompe, empieza el proceso de corrosión.

En particular, interesa para este estudio el efecto que produce en el hormigón armado el ataque por cloruros. La corrosión ocasionada por iones cloruro se inicia cuando la concentración de estos es tan grande que la alcalinidad del concreto

con carácter básico ó alcalino (pH entre 12 y 13), no es suficiente para proteger al acero. Una vez el proceso de corrosión se ha iniciado, el óxido formado ocupa un volumen mucho mayor que el acero en estado pasivo. Debido a este aumento de material y a la baja resistencia a tensiones internas del hormigón, comienzan a aparecer grietas y fisuras en la superficie. Estos deterioros facilitan la entrada de sustancias agresivas hasta el acero acelerando los procesos de corrosión y ocasionando pérdida de la sección del mismo y desplazamiento del recubrimiento, entre otros.

La vida útil de las construcciones con hormigón armado se ve condicionada por la corrosión de su acero de refuerzo. Las patologías del hormigón causadas por la corrosión generan múltiples inconvenientes, debido a ello se han desarrollado estudios para identificar factores que determinan el inicio de la corrosión y su posterior propagación, todo ello orientado a aplicar técnicas que contribuyan a minimizar la influencia de agentes nocivos en el hormigón, ó de realizar un debido diagnóstico para recomendar procedimientos de reparación que lleven a extender la vida útil de las estructuras [3].

### **1.1.1. Composición y reacciones de hidratación del hormigón**

El hormigón armado es una material compuesto, formado por acero inmerso en una matriz de concreto. Este último es a su vez un material formado por la combinación de cemento, agua, agregado fino (arena), agregado grueso (gravas) y algunas veces aditivos, en proporciones variables.

El cemento comúnmente utilizado en la elaboración del concreto es el "Pórtland" normal. Está constituido por cuatro componentes fundamentales que se muestran en la tabla No.1 [4]:

**Tabla 1. Componentes fundamentales del cemento Pórtland.**

<b>COMPONENTES</b>	<b>FORMULA QUIMICA</b>	<b>ABREVIATURA</b>
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Los silicatos de calcio ocupan el 80% de masa en el concreto y son ellos los que al reaccionar con el agua de mezclado, generan una serie de reacciones químicas que desarrollan la resistencia del concreto. La reacción más rápida que ocurre cuando se mezclan cemento y agua es la hidratación del aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ). Químicamente, el  $\text{C}_3\text{A}$ , el yeso y el agua formarían un recubrimiento protector de sulfoaluminato de calcio hidratado (estringita) sobre las superficies de  $\text{C}_3\text{A}$  que permanecerían expuestas durante varias horas. La hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$  se reactiva a medida que comienza el principio de fraguado, consumiendo el sulfato y formando más estringita. Los silicatos y aluminatos son convertidos en un gel con características químicas bien definidas (silicato de calcio hidratado, C-S-H), el cual es insoluble y ocupa el 70% en peso del material sólido final. El hidróxido de calcio soluble, representa el 20% en peso del material sólido y el 10% restante es constituido por diversos productos que dependen de la composición inicial del cemento.

El cemento hidratado es una mezcla heterogénea donde se observan dos fases: una matriz endurecida constituida por el gel C-S-H, la cual contiene el hidróxido de calcio, y la otra fase, formada por hidratos de aluminatos y ferritas, conformada por un elevado número de poros y capilares donde se encuentra una fase líquida saturada en hidróxidos que constituye una solución intersticial, así como también espacios con aire debidos a una mala compactación. El hidróxido de calcio, le confiere al concreto alto grado de alcalinidad ( $\text{pH} > 12$ ), que aumenta después de algunas semanas, debido a la disolución de óxidos de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y sales alcalinas

como  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Debido a la estructura porosa mencionada anteriormente, se facilita la entrada de iones agresivos que generan disminución del pH y con ayuda del agua y oxígeno, generan un proceso de deterioro en el hormigón y en el acero de refuerzo.

### **1.1.2. Degradación de las estructuras de hormigón armado por ataques químicos.**

El deterioro de las estructuras de hormigón armado involucra dos aspectos: la degradación del concreto y la corrosión del acero de refuerzo.

**Degradación del concreto:** Se debe a acciones de origen externo ó interno [5], las cuales están relacionadas con las características del concreto, el proceso de elaboración y curado, el medio ambiente al que será expuesto y las condiciones de servicio. De estas acciones, las externas ambientales tienen demasiada importancia porque dan origen a otros fenómenos que afectan el comportamiento, la apariencia, la durabilidad, además de ver comprometidos aspectos estéticos y elevados costos de rehabilitación. Estos fenómenos pueden ser de diferentes tipos:

- Tipo Físico: Variación de temperatura, de humedad, Ciclos de congelamiento y deshielo, etc.
- Tipo Químico: Carbonatación, lluvia ácida, ciclos de humedecimiento y secado, corrosión, ataque de ácidos, aguas blandas, residuos industriales, fuego, etc.
- Tipo Biológico: Microorganismos, algas, suelos y/o aguas contaminados, etc.

los cuales alteran la estructura físico-química del hormigón armado originando estados de corrosión en el acero y desmoronamiento del concreto.

En la degradación física se produce desprendimiento del material por desgaste mecánico, lo que genera fisuración o agrietamiento del concreto permitiendo el ingreso de iones agresivos. En la degradación química se presenta una pérdida de material ocasionada por el ataque de una disolución agresiva al concreto.

La acción ejercida al concreto por una sustancia química depende en gran parte de la concentración de dicha sustancia, al igual que de otras condiciones, como su duración y temperatura. La foto 1 muestra el deterioro de una estructura de hormigón armado por el fenómeno de carbonatación.

**Foto 1. Deterioro de una estructura de hormigón armado por carbonatación.**

**Ref. Revista Ciencia hoy en línea, vol 14, 2004**

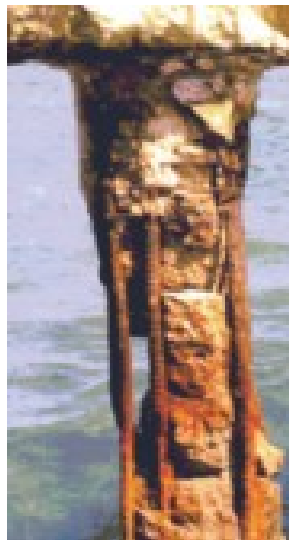


**Degradación del acero de refuerzo:** La corrosión consiste en la oxidación destructiva del acero como resultado de la falta de uniformidad en el mismo, del contacto con otros metales menos activos así como la heterogeneidad en el medio físico-químico (hormigón) que lo rodea [2]. Si el hormigón se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de la película que recubre al acero y la corrosión se desencadena ocasionando disminución de la sección del acero o incluso su conversión total en óxido, fisuración del hormigón o delaminación debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo y disminución o

desaparición de la adherencia acero-hormigón. El tiempo de aparición de las fisuras depende de la calidad y espesor del recubrimiento de hormigón, así como del diámetro y la ubicación del acero de refuerzo y del tipo de producto de corrosión que se genere [5].

**Foto 2. Deterioro de un pilote afectado seriamente por el proceso corrosivo.**

**Ref. Revista Ciencia hoy en línea, vol 14, 2004**



Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse existen dos mecanismos que en general son los aceptados:

- Reducción de la alcalinidad del concreto por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido.
- Por acción electroquímica que involucra al ión cloruro en presencia de oxígeno.

Sin la presencia de oxígeno, temperatura y humedad en el hormigón no es posible termodinámicamente que se genere el proceso de corrosión. El incremento de

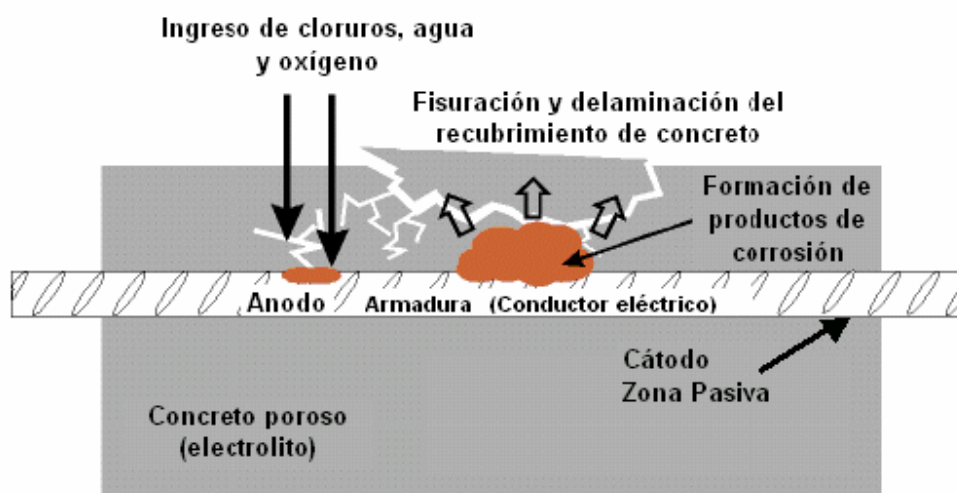
temperatura potencia todas las reacciones químicas. Se estima que un aumento de la temperatura en 10° C duplica la velocidad de la reacción. En el caso de la corrosión por cloruros el efecto de la humedad es importante en especial en los niveles de 70 a 90 % de humedad relativa. Es por esto que en regiones cálidas la elevada humedad relativa favorece el fenómeno de la corrosión.

Todo proceso de corrosión electroquímica requiere la presencia de mínimo cuatro elementos:

- El ánodo, donde ocurre la reacción de oxidación del acero (zona corroída).
- El cátodo, donde ocurre la reacción de reducción (zona pasiva).
- El conductor eléctrico, por donde circulan los electrones liberados en el ánodo y consumidos en el cátodo (armadura).
- El electrolito, donde ocurren las reacciones en el concreto, generándose corriente por el flujo de iones en un medio acuoso (hormigón).

**Figura No.1 Mecanismo del proceso de corrosión.**

Ref. [www.corrosion-club.com/concretecorrosion.htm](http://www.corrosion-club.com/concretecorrosion.htm)



Teniendo en cuenta lo anterior, es importante conocer qué tipo de corrosión y para qué valores de pH la alcalinidad del hormigón protege o no al acero, para ello se deben distinguir los siguientes mecanismos de oxidación:

- La oxidación de superficies a un pH de 8.9 aproximadamente.
- La corrosión por picadura a partir de pH 10

La oxidación de las superficies se produce cuando la alcalinidad es muy débil y se encuentra raras veces en el acero, lo mas común es encontrar corrosión por picadura.

**Foto 3. Loza que comienza a deteriorarse como consecuencia del avance de la corrosión.**

**Ref. Revista Ciencia hoy en línea, vol 14, 2004**



### **1.1.3. Efecto de los iones cloruro en el concreto.**

La importancia de los iones cloruro en el concreto radica en la influencia que tienen estos en el desarrollo del fenómeno de corrosión del acero de refuerzo, su proceso degradante tiene poca importancia en relación con sus efectos en una matriz de concreto cuando éste es simple o sin refuerzo [1].

Un problema por el ataque de cloruros surge cuando los iones penetran desde el exterior. Una fuente importante de iones cloruro es el agua de mar en contacto con

el concreto, también puede depositarse sobre la superficie de concreto en forma de gotitas de agua de mar que transporta el viento. El agua freática salobre en contacto con el concreto es también una fuente de cloruros. Cualquiera que sea su origen externo, los cloruros penetran en el concreto por transporte de agua que los contiene, así como por difusión de los iones en el agua y por absorción. Más adelante se define el concepto del fenómeno de difusión y el principio de despasivación por penetración de los iones cloruro.

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior:

- El tiempo que tardan en llegar hasta la armadura
- La proporción que induce la despasivación
- La velocidad de corrosión que provocan los cloruros cuando se desencadena la corrosión.

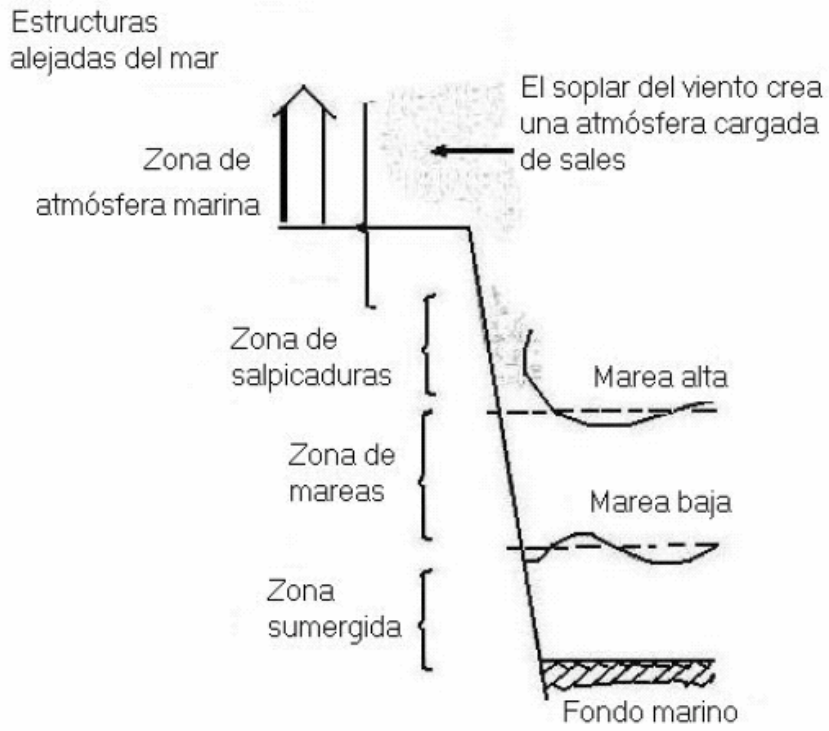
El ingreso prolongado y repetido, genera una alta concentración de cloruros en la superficie del acero de refuerzo. Cuando el concreto está sumergido permanentemente, los cloruros ingresan hasta una profundidad de consideración, sin embargo, si no hay presencia de oxígeno no se desencadena el proceso de corrosión.

Por lo tanto, es importante identificar que la magnitud del daño causado por los iones cloruro depende de la ubicación de la estructura y las condiciones agresivas del medio. Se han establecido las siguientes zonas, cuyas fronteras en la realidad no están bien definidas:

- a) Zona de inmersión: el concreto que se encuentra sumergido permanente por debajo de las zonas de mareas, es capaz de proteger las barras de refuerzo debido a la débil concentración de oxígeno en el agua que impide la acción corrosiva del ión cloruro.

- b) Zona de marea: Comprende los elementos entre los niveles de marea alta y baja, donde el concreto está permanente húmedo, debido a que la inmersión es cíclica en el lapso de un día.
  
- c) Zona de salpicaduras: Se ubica por encima del nivel de la marea alta, propensa a la salpicadura de las olas y el baño de la espuma, presenta el riesgo de ciclos alternados de humedificación y secado, de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad del medio, que pueden afectar severamente el concreto. En el período húmedo se produce el ingreso del ión cloruro por difusión, en el secado se elimina el agua en exceso, pero el concreto retiene el cloro, al repetirse el ciclo sucesivamente el porcentaje ión cloruro resulta muy elevado.
  
- d) Zona de ambiente marino: El concreto no está en contacto con el agua de mar, pero recibe las sales procedentes de la brisa marina y la niebla salina. Puede comprender muchos kilómetros al interior de la costa dependiendo de las características de los vientos dominantes. Las construcciones de concreto ubicadas en esta zona, son propensas a la corrosión por cloro en suspensión en la atmósfera, en forma de microscópicas gotas de agua de mar. En la niebla o aerosol la concentración salina de cloruros y sulfatos eventualmente puede ser mayor que en el agua de mar, debido a la gran dispersión de las gotas y la evaporación parcial de agua, en especial cuando la temperatura es alta y la humedad relativa es baja.

**Figura No. 2 La corrosión en ambiente marino según el Comité Euro Internacional del Hormigón**



**Foto 4. Corrosión en zona de alta y baja marea y de salpicadura.**



**Difusión de iones cloruro:** Para explicar mejor el transporte por difusión, se hará una descripción de lo que sucede a las estructuras en ambientes marinos. El concreto seco toma agua de mar por absorción, muchas veces hasta llegar a saturarse. Si las condiciones del medio cambian a secas, la dirección del movimiento del agua se invierte (por la evaporación). Sin embargo, lo que se evapora es solo el agua pura y las sales quedan como residuo. Así, la concentración de sales va aumentando en el concreto.

El gradiente de concentración establecido, conduce las sales del agua que esta cerca de la superficie de concreto hacia las zonas de concentración mas bajas, es decir, hacia adentro; esto se conoce como transporte por difusión.

Dependiendo de la humedad relativa del exterior y la duración del proceso de secado, es posible que toda el agua de la zona exterior del concreto se evapore de manera que el agua que permanece en el interior se satura con sal ó se precipita como cristales. El siguiente ciclo de humedecimiento traerá mas sal presente en solución dentro de los poros capilares; si el período de humedecimiento es corto y el secado se reinicia rápidamente, el ingreso del agua de mar llevará las sales a gran profundidad dentro del concreto; el secado posterior eliminará el agua pura, dejando las sales (si el período de secado es corto, como sucede en zonas de mareas, el concreto es menos vulnerable a corrosión). Un ingreso progresivo de sales hacia el acero de refuerzo ocurre entonces con ciclos de humedecimiento y secado alternados, estos ciclos varían de una localización a otra y dependen del movimiento del mar y del viento, de la exposición al sol y del uso de la estructura.

**Principio de despasivación:** El acero de refuerzo embebido en concreto se despasiva cuando una cantidad determinada de cloruros se hace presente en su superficie. La relación  $Cl^-/OH^-$  es un parámetro muy aceptado para tomar en cuenta el inicio de la corrosión pues pesa mas la acción de los cloruros que son

despasivantes con la de los  $\text{OH}^-$  que permiten mantener pasivo al acero. Según lo descrito por Hausmann, el principio de la etapa crítica de la despasivación, a partir del cual la corrosión se desarrolla a una velocidad importante, corresponde cuando la relación  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  es igual a 0.6 (D. A. Hausmann y V. K. Gouda), valor obtenido de la simulación de la solución contenida en los poros del concreto [6]. Sin embargo, debido a la dificultad que representa en ocasiones la medición de los  $\text{OH}^-$ , se suelen utilizar también otros parámetros como los cloruros totales o libres para expresar el riesgo de corrosión, trabajos recientes han encontrado ventajas considerables al usar los cloruros totales para evaluar el riesgo de corrosión [7,8].

Cuando el  $\text{Cl}^- < \text{OH}^-$  se forma el óxido ferroso estable; por el contrario, cuando  $\text{Cl}^- > \text{OH}^-$  el hidróxido formado es inestable, contiene cloruro y se transforma en un compuesto intermedio reconocido con el nombre de herrumbre verde antes de producir finalmente el lépidocrocite (óxido ferrítico hidratado) conteniendo cloro. Cuando la penetración de cloruros se efectúa dentro del concreto carbonatado superficialmente, el bajo valor del pH disminuye la estabilidad de los cloroaluminatos, logrando con ello producir iones cloruro libres aumentando la concentración. El principio de despasivación se inicia rápidamente y, por lo tanto, la corrosión se hace mas grave.

El efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de concreto endurecido está constituido por la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. En el caso del concreto reforzado, la absorción de las sales establece áreas anódicas y catódicas; la acción electrolítica resultante conduce a una acumulación de producción de la corrosión sobre el acero, con la consecuente ruptura del concreto que lo rodea, de tal manera que los efectos se agravan.

#### 1.1.4. Tipos de corrosión electroquímica

Las formas que puede adoptar la corrosión de la armadura son diversas, puede presentarse corrosión por picaduras y corrosión generalizada ó uniforme.

El primer tipo de corrosión se forma por la disolución localizada de la película pasiva, formándose una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero.

**Foto 5. Corrosión por picaduras sobre estructura ubicada en el Océano Atlántico.**

Ref. [corrosion.ksc.nasa.gov/corr\\_forms.htm](http://corrosion.ksc.nasa.gov/corr_forms.htm)



El tiempo que tardan los iones despasivantes en llegar hasta la armadura dependerá principalmente de:

- Concentración de los iones despasivantes en el exterior ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ , otros)
- Naturaleza del catión que acompaña al ión despasivante.
- Calidad y características del concreto

- Temperatura
- Fisuras
- Otros

El segundo tipo de corrosión es la corrosión uniforme, resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, disolviéndose ésta de manera homogénea en toda su superficie como si estuviera expuesta a la atmósfera sin ningún tipo de protección. Este tipo de corrosión es grave, pues la humedad que permanece en el interior del concreto está en contacto más tiempo con la armadura que si estuviese libremente expuesta; esto debido a que el concreto absorbe humedad rápidamente pero su secado es lento. La corrosión uniforme se caracteriza porque el adelgazamiento o disolución a lo largo del metal es parejo y uniforme.

**Factores acelerantes de la corrosión electroquímica:** Una vez se ha despasivado el acero e iniciado el proceso de corrosión electroquímica, la velocidad del deterioro sólo es significativa en términos de vida útil y su cinética depende de:

- El contenido de humedad (electrolito).
- Resistividad del concreto.
- Proporciones de iones agresores.
- Temperatura.

Un contenido de humedad sin saturación de poros es el factor que mas influye en la aceleración de la velocidad de corrosión; se propicia en concretos con alta humedad donde la resistividad disminuye debido a que los poros sin saturar facilitan la entrada de oxígeno al acero.

Cualitativamente se ha comprobado que con la presencia de iones despasivantes, en especial los cloruros, se incrementa ó acelera la corrosión. En cuanto a la

temperatura, si ésta se eleva provoca mayor movilidad de iones aumentando la velocidad de corrosión, pero si ésta desciende, puede dar lugar a condensaciones que aumentan la humedad.

## CAPITULO II. MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DEL FENÓMENO

El objetivo fundamental de este capítulo es proporcionar los modelos de durabilidad y transporte que representan el fenómeno de difusión de cloruros bajo condiciones ambientales diversas. Con el modelo de durabilidad se pretende conocer el tiempo de inicio de la corrosión cuando se ha llegado a un umbral de cloruros que junto con el modelo de transporte permitirán representar a través del tiempo la difusividad de los iones cloruro en un elemento de concreto.

### 2.1 MODELO DE DURABILIDAD

En la actualidad existen varios modelos de durabilidad propuestos que relacionan la degradación por corrosión del acero de refuerzo en el concreto en función del tiempo. Algunos de estos modelos son los propuestos por Tutti [9], Bazant [10,11], Browne [12] y Beeby [13]. El modelo de Tutti (en el cual se basan gran parte de los existentes), diferencia dos periodos:  $T_1$  y  $T_2$ . Los modelos de Bazant, Browne y Beeby también diferencian estos dos períodos. Para Bazant y Browne,  $T_2$  finaliza al encontrarse daños visibles en la estructura ó elemento estructural; para Beeby,  $T_2$  finaliza hasta que no se ha alcanzado un nivel inaceptable de corrosión.

Para el desarrollo de esta investigación se tomará como base el modelo propuesto por Tutti,

$$T_{UV} = T_1 + T_2 \quad (1)$$

Donde  $T_1$  y  $T_2$ , son considerados como los períodos de iniciación y propagación de la corrosión.  $T_1$  se define como el lapso de tiempo que demora el ión cloruro en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y ocasionar la despasivación.  $T_2$

se define como el período entre la pérdida de la capa pasiva y la manifestación externa de la corrosión (daños, agrietamientos, manchas visibles, desprendimiento del concreto).  $T_{UV}$  se define como el periodo de vida útil de la estructura. Según Tutti, la etapa  $T_2$  finalizará a la formación de grietas con anchos menores a 0.1 mm ó con la aparición de manchas de óxido.

**Foto 6. Manifestación externa del estado de corrosión del acero de refuerzo.**

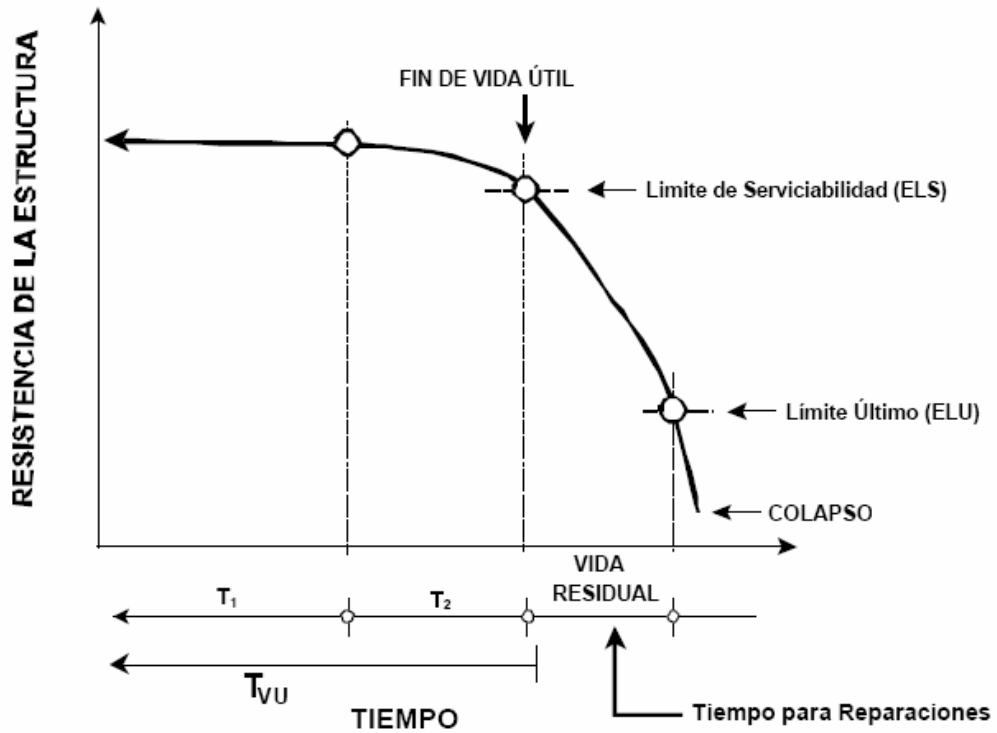
Ref. [corrosion.ksc.nasa.gov/corr\\_forms.htm](http://corrosion.ksc.nasa.gov/corr_forms.htm)



Si en la estructura se observan degradaciones como grietas mas anchas de 0.1 mm, delaminaciones, barras de refuerzo expuestas con corrosión visible y demás, dicha estructura estará más allá de su vida útil, es decir, en el período de vida residual.

La figura 3 presenta de manera gráfica lo explicado anteriormente.

**Figura No. 3 Modelo de Durabilidad seguido en esta investigación.**  
 Ref. Diseño de Estructuras de Concreto con criterios de Durabilidad, IMT, 2001.



## 2.2 MODELO DE TRANSPORTE

El ingreso de cloruros en el concreto puede ser modelado, como se ha dicho anteriormente, por un proceso de difusión. La difusión en una dimensión de los iones cloruro a través de un medio poroso sigue la Segunda Ley de Fick de Difusión;

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial X^2} \quad (2)$$

Esta correlación puede ser usada para calcular el  $D_{EF}$ , Coeficiente efectivo de difusión de cloruros, si se conoce la concentración de cloruros en algún tiempo como función de la profundidad [14,19]. En general, los métodos para medir el coeficiente de difusión en líquidos pueden ser divididos en dos grandes grupos. En el primero de ellos se observa la difusión en un estado estacionario o casi estacionario, donde generalmente se mide el flujo y el gradiente de concentración, relacionados por la Primera Ley de Fick, a partir de la cual se calcula  $D$ . El segundo grupo comprende aquellos experimentos donde se parte con una distribución inicial de concentración,  $C(x,y)$  para  $t=0$  y en consecuencia el flujo es no estacionario. En estos casos la distribución de concentración se mide en un tiempo conocido  $t$ , posterior al comienzo del proceso de difusión. La solución de la ecuación de difusión (Segunda Ley de Fick) con las condiciones iniciales apropiadas, conduce a una curva concentración - distancia teórica en función de la variable  $Dt$ .

La difusión de los iones cloruro en el concreto puede ser calculada usando una de las soluciones a la segunda Ley de Fick:

$$C(x,t) = C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{X}{2 * \sqrt{D_{ef} * t}} \right) \right] \quad (3)$$

Donde  $C(x,t)$  es la concentración a una profundidad ( $X$ ) y un tiempo ( $t$ ),  $C_o$  es la concentración en la superficie y  $\operatorname{erf}$  es la función de error.

En la actualidad existen varios estándares para definir el valor de  $C(x,t)$  el cual depende de factores como tipo de cemento a usar, del contenido de cemento de la mezcla, de si el concreto tiene o no aditivos y adiciones, de la humedad del ambiente. Un coeficiente de difusión de cloruros típico a 25 °C para un concreto de alta calidad es aproximadamente  $2 \times 10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s, pero puede tener un valor mas

elevado para concretos de baja calidad y de magnitud baja para concretos que contengan adiciones con puzolana [14].

**Coeficiente efectivo de difusión de cloruros ( $D_{EF}$ ):** Se ha definido que los valores de  $D_{EF}$  fluctúan entre  $10^{-7}$  y  $10^{-8}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , y son dependientes de la calidad del concreto [20,22]. Como regla general se puede decir que incrementando la calidad del concreto (disminuyendo la relación agua/cemento (a/c), aumentando la cantidad del material cementante, aumentando el tiempo de curado, adicionando puzolanas, etc.) el valor de  $D_{EF}$  tiende a disminuir.

En los últimos veinticinco años se ha hecho gran énfasis en el estudio del tema de difusión de cloruros y la estimación experimental de  $D_{EF}$  usando probetas de laboratorio o por evaluaciones de elementos de concreto expuestos directamente a un ambiente marino.

Para la determinación de  $D_{EF}$  (así como de  $C_S$ ) de un concreto en particular es necesario realizar un diagnóstico de la estructura en servicio. El procedimiento, a grandes rasgos, es el siguiente [23]: (1) la extracción de corazones en varios elementos de la misma estructura en zonas de alto riesgo de corrosión (principalmente en zona de mareas o en contacto directo con el agua de mar); (2) el corte de los corazones en rodajas; (3) la pulverización de cada rodaja; (4) la obtención de la concentración de cloruros totales mediante algún método químico conocido; (5) la obtención de  $C_S$  y  $D_{EF}$  mediante el modelo matemático citado; (6) el valor del recubrimiento (C) se obtiene usando un Pacómetro.

Para el diseño por durabilidad de estructuras nuevas en ambiente marino se necesitaría conocer los valores aproximados de  $C_S$  y  $D_{EF}$ . Para ello se utilizarán los valores obtenidos por otros autores de  $C_S$  y  $D_{EF}$  y correlacionarlos con las propiedades del concreto.

**Concentración de cloruros en la superficie (Cs):** Se define como la concentración de cloruros presente en el agua de mar y que rodea a la superficie de hormigón armado. Se ha establecido que existen varios factores que afectan el valor de Cs, los cuales están relacionados con el medio ambiente y también con las propiedades del concreto. Aunque es obvio esperar que Cs varíe con el tiempo, por cuestiones de diseño se puede considerar que después de seis meses que la estructura entra en servicio, el valor promedio de Cs permanece constante.

El valor de Cs es afectado por el tipo de concreto, principalmente por la cantidad de cemento que posee la mezcla y si en ésta se usan puzolanas (ceniza volante, humo de sílice, escoria) o no. Se ha observado también que el valor de Cs es inversamente proporcional al contenido de cemento, Cf. Esta relación alcanza valores de Cs constantes (p. ej: 4.5% del peso del cemento para Cf de 350 kg/m<sup>3</sup>) [23].

Según análisis realizados en la zona de alta-baja marea (o zona de salpicado) se encontró que el valor medido de Cs llega a valores tan altos como 0.8% del peso del cemento. Cs es también afectado por la distancia de la estructura con respecto a la costa. Con esta información, Bamforth [22] presentó los valores (conservadores) de la Tabla No.2 con los rangos de los valores de Cs para el diseño por durabilidad de estructuras en ambiente marino para concretos con o sin puzolanas.

**Tabla No. 2 Rango de valores de Cs (%del peso del material cementante) [21]**

Ambiente	Material Cementante	
	Cemento Portland	Cemento Puzolánico
Ambiente Extremo	>0.75%	>0.90%
Ambiente Severo	0.50% - 0.75%	0.60% - 0.90%
Ambiente Moderado	0.25% - 0.50%	0.30% - 0.60%
Ambiente Benigno	<0.25%	<0.30%

Valores típicos para la concentración en la superficie son  $17.8 \text{ kg/m}^3$  para ambientes marinos severos en la zona de oleaje. Para estructuras de ambiente marino cerca a la playa, la acumulación anual de cloruros es desde  $1,2 \text{ kg/m}^3$  hasta  $17.8 \text{ kg/m}^3$ . Para zona de salpicaduras, debido al efecto del lavado de la lluvia y otros factores, la rata de concentración de cloruros está entre  $0,7 \text{ kg/m}^3$  y  $14.8 \text{ kg/m}^3$ .

### **2.1.1. Umbral de cloruros.**

El umbral límite de cloruros concierne al nivel crítico de cloruros necesarios para despasivar la película protectora del acero de refuerzo e iniciar la corrosión. Este umbral depende de varios factores como [24]:

- a) la dosificación del concreto
- b) la temperatura
- c) la humedad relativa (HR)
- d) el pH de la solución del poro
- e) el contenido de agua
- f) la proporción de cloruros solubles
- g) el contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) en el cemento

- h) la fuente del cloruro
- i) la fuerza iónica de la solución
- j) la resistividad del material, entre otros.

Desde varios años atrás se han hecho trabajos para encontrar este valor bajo determinadas condiciones y materiales, encontrándose rangos entre los cuales se mueve.

Se asume frecuentemente que dicho umbral es igual a 0,4% de cloruro sobre cemento, aunque algunos autores han informado valores mayores. Para M. Thomas y P. Bamforth [18] un umbral de cloruros de 0.4% por masa de cemento es comparable a 0.05% de cloruros por masa de concreto. Algunas especificaciones proponen valores comprendidos entre 0,2% y 1%. Habiendo una diferencia tan amplia es necesario recurrir a datos estadísticos. Vassie [25], del análisis de 450 datos, demostró que para valores de cloruro por debajo de 0,2%, el riesgo de corrosión es insignificante, mientras que por encima de 0,2%, dicho riesgo es del 20%. A medida que el contenido de cloruros crece, la cantidad de barras de acero corroídas también se incrementa. Browne [26] basado en los resultados del programa United Kingdom Concrete-in-the-Ocean, propone los siguientes valores: para un nivel de cloruros menor que 0,4% el riesgo de corrosión es despreciable; para valores comprendidos entre 0,4% y 1%, la corrosión es posible; entre 1% y 2%, la corrosión es probable, y por encima de 2%, la corrosión es significativa. Estos datos son consistentes con los informados por Vassie, quien indica un valor de probabilidad de corrosión intermedio (50%) para aproximadamente 1% de cloruro.

El uso de uno u otro criterio para la despasivación podría causar pequeñas pero significativas diferencias en el umbral obtenido. Por eso, es importante que al momento de comparar resultados entre varios autores se tenga en cuenta que las diferencias encontradas pudiesen estar influenciadas por estos factores. Siempre

es importante conocer como se han encontrado los umbrales reportados, pero también es importante conocer si el umbral reportado es obtenido en soluciones acuosas, en morteros o en concreto pues la experiencia demuestra que puede haber diferencias [24].

La Tabla 1 reportada por Alonso y Andrade [27], muestra promedios de umbrales de varios autores. Se puede apreciar fácilmente como, para diversas condiciones, los promedios de los umbrales pueden cambiar en función de su procedencia (solución, mortero o concreto).

En base a lo reportado por diversos autores se ha optado por tomar un valor umbral de cloruros del 0,4 % por peso de cemento para el posterior análisis.

### **2.1.2. Influencia de los materiales puzolánicos**

Las adiciones minerales son materiales inorgánicos que son incorporados al cemento ó al concreto en diferentes porcentajes, que actúan mejorando propiedades hidráulicas del cemento, ó mejorando otras cualidades como aumento de la trabajabilidad y retención de agua, disminución de la porosidad y reducción de la fisuración. Estas adiciones se clasifican como:

1. Puzolanas naturales ó artificiales
2. Escoria de alto horno
3. Filler

La Puzolana es un material silíceo, que por si mismo puede tener poca ó ninguna actividad hidráulica, pero que, finamente dividido y en presencia de agua reacciona químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas.

Las puzolanas artificiales son sub-productos industriales de materiales tratados térmicamente. La puzolana artificial mas ampliamente utilizada en el concreto es la ceniza volante.

La ceniza volante (fly ash) es un subproducto de centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible. Es un Polvo fino constituido esencialmente de partículas esféricas. La Norma ASTM C 618 define dos clases de cenizas volantes:

- Clase F: producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso.
  - Clase C: producidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito.
- Además de las propiedades puzolánicas tiene propiedades cementicias.

La escoria granulada de alto horno posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada. Se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria procedente de la fusión del mineral de hierro en un horno alto.

La práctica de utilizar ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida en las mezclas de concreto de cemento Portland, ha ido aumentando en los últimos años. Una de las principales razones de este incremento es el interés en la conservación de la energía así como la reducción en el costo del concreto que se obtiene al emplear cenizas o escorias para reemplazar parcialmente al cemento. Las mezclas de concreto que contienen cenizas volantes o escorias granuladas de alto horno molidas, casi siempre requieren menos agua (aproximadamente de 1 a 10 %) para obtener un cierto revenimiento de los concretos que solo contienen cemento portland.

Si se cuenta con un curado adecuado, las cenizas volantes y las escorias de alto horno generalmente reducen la permeabilidad del concreto aun cuando el contenido de cemento sea relativamente bajo; a este respecto, el humo de sílice es especialmente efectivo. Las pruebas indican que la permeabilidad del concreto disminuye conforme aumenta la cantidad de material cementante hidratado y

disminuye la relación agua/cemento. La absorción de un concreto con ceniza volante casi es la misma de un concreto sin ceniza, aunque algunas cenizas pueden reducir la absorción en un 20 % o más.

### **CAPITULO III. MODELOS DE SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL CONCRETO.**

La habilidad del concreto para resistir la penetración a iones cloruro es un parámetro crítico en la determinación de la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado expuestas a sales en ambientes marinos, agua salobre, agua de mar o rociaduras de estas fuentes. Este fenómeno ha sido extensamente estudiado y se han propuesto algunos modelos que simulan la difusividad de los iones cloruro a través del concreto. En este proyecto se han escogido los modelos de Thomas y Bamforth, Torres y Martínez y Berke y Hicks para proponer el modelo usando el método de diferencias finitas, aplicando el software MATLAB 7.0 Estos modelos se describen a continuación.

#### **3.1. MODELO DE THOMAS Y BAMFORTH**

En 1987 M.D.A Thomas y P.B Bamforth [18], realizaron un estudio con ocho bloques de concreto reforzado que fueron expuestos a ambiente marino en una zona de marea en el sureste de la costa de Inglaterra. Este trabajo se desarrolló con tres mezclas de concreto: una mezcla de control (solo PC), y mezclas con 30% de ceniza volante (P/PFA) y 70% de escoria (P/GBS) como reemplazo parcial para el cemento Portland. Las dosificaciones de las mezclas de concreto usadas están dadas en la siguiente tabla:

**Tabla No. 3 Detalles de las mezclas de concreto**

MEZCLA	Proporciones de la mezcla (kg/m <sup>3</sup> )		
	PC	P/PFA	P/GBS
Cemento Portland	288	227	110
Ceniza volante	-	98	-
Escoria	-	-	255
Total contenido cementante	288	325	365
Agua	190	170	177
Relación agua-cemento	0.66	0.54	0.48
Grava	1240	1305	1240
Arena	660	585	600
Resistencia a 28 días (Mpa)	39.4	49.6	37.9

El concreto fue diseñado para proveer a los 28 días de curado una resistencia a la compresión de 40 MPa. Los datos mostrados en la tabla 3 indican que el concreto con ceniza volante excede significativamente la resistencia de diseño normal de estructuras. Se establecieron unos perfiles de concentración de cloruros con 50 mm de recubrimiento. Los valores de  $C_s$  y  $D_{EF}$  fueron encontrados por iteración al producto del mejor ajuste por mínimos cuadrados. Los resultados para los diferentes perfiles se presentan en la tabla No 4.

Los datos de la tabla No. 4 muestran que los valores de  $D_{EF}$  decrecen con el tiempo para concretos que contienen ceniza volante ó escoria, mientras que para la mezcla de control PC estos valores no conservan una tendencia en el tiempo.

Los perfiles obtenidos por los autores son los mostrados en las figuras 4, 5 y 6.

**Tabla No. 4 Coeficientes de difusión y concentraciones superficiales de cloruros para los bloques de concreto reforzado.**

<b>concreto</b>	<b>T (años)</b>	<b>D<sub>EF</sub> (x10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Cs (%concreto)</b>
<b>PC control</b>	0.5	9.5	0.35
	1	3.0	0.69
	2	7.6	0.38
	3	5.6	0.42
	6	10	0.28
	8	8.7	0.31
<b>P/PFA</b>	0.5	4.3	0.42
	1	2.0	0.53
	2	1.9	0.45
	3	1.1	0.54
	6	0.81	0.48
	8	0.59	0.56
<b>P/GBS</b>	0.5	7.5	0.58
	1	2.9	0.68
	2	1.9	0.46
	3	0.99	0.54
	6	1.0	0.46
	8	0.63	0.48

Figura No. 4 Perfiles obtenidos para la mezcla de control.

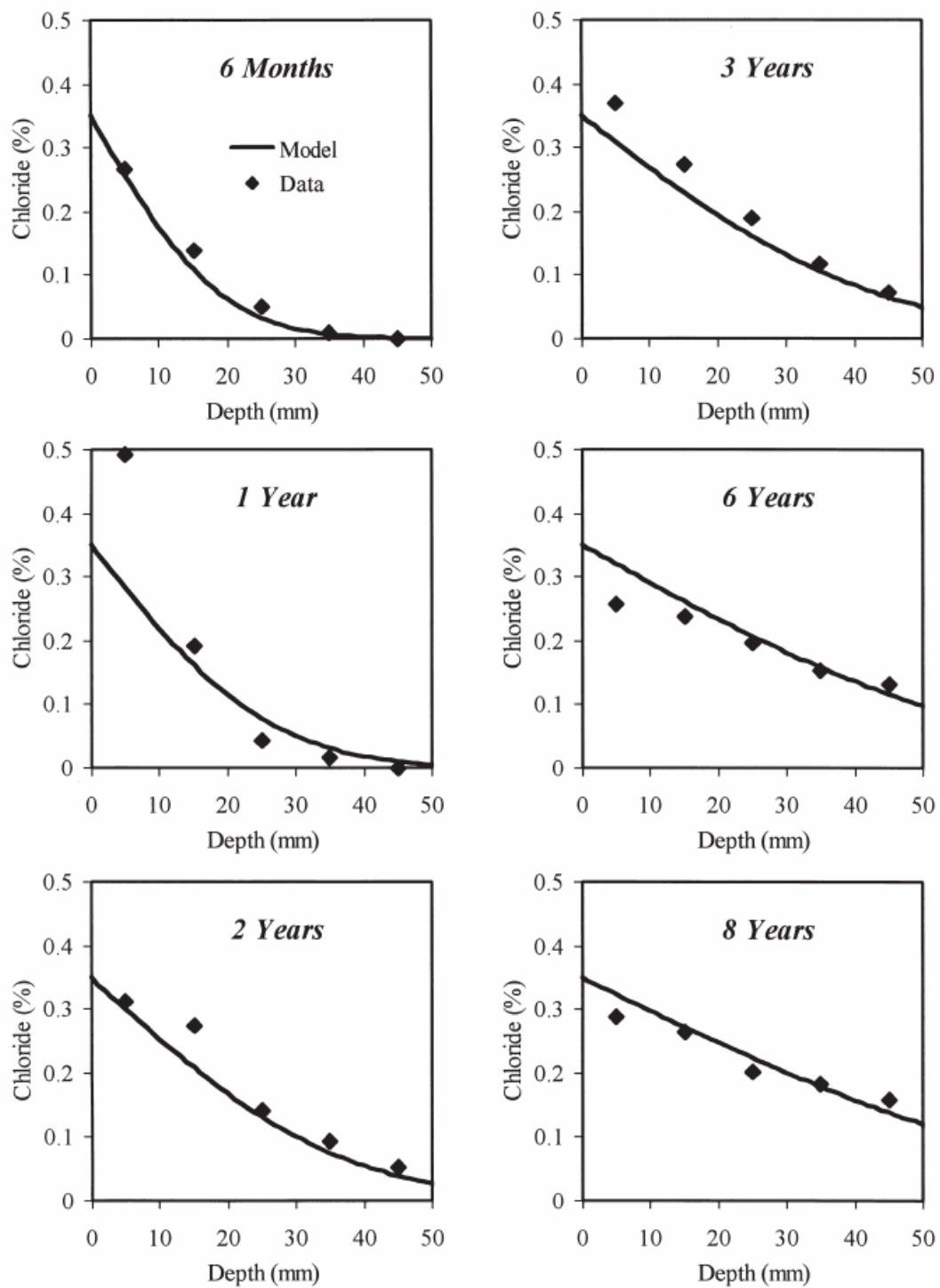


Figura No. 5 Perfiles obtenidos para la mezcla que contiene ceniza volante (P/PFA)

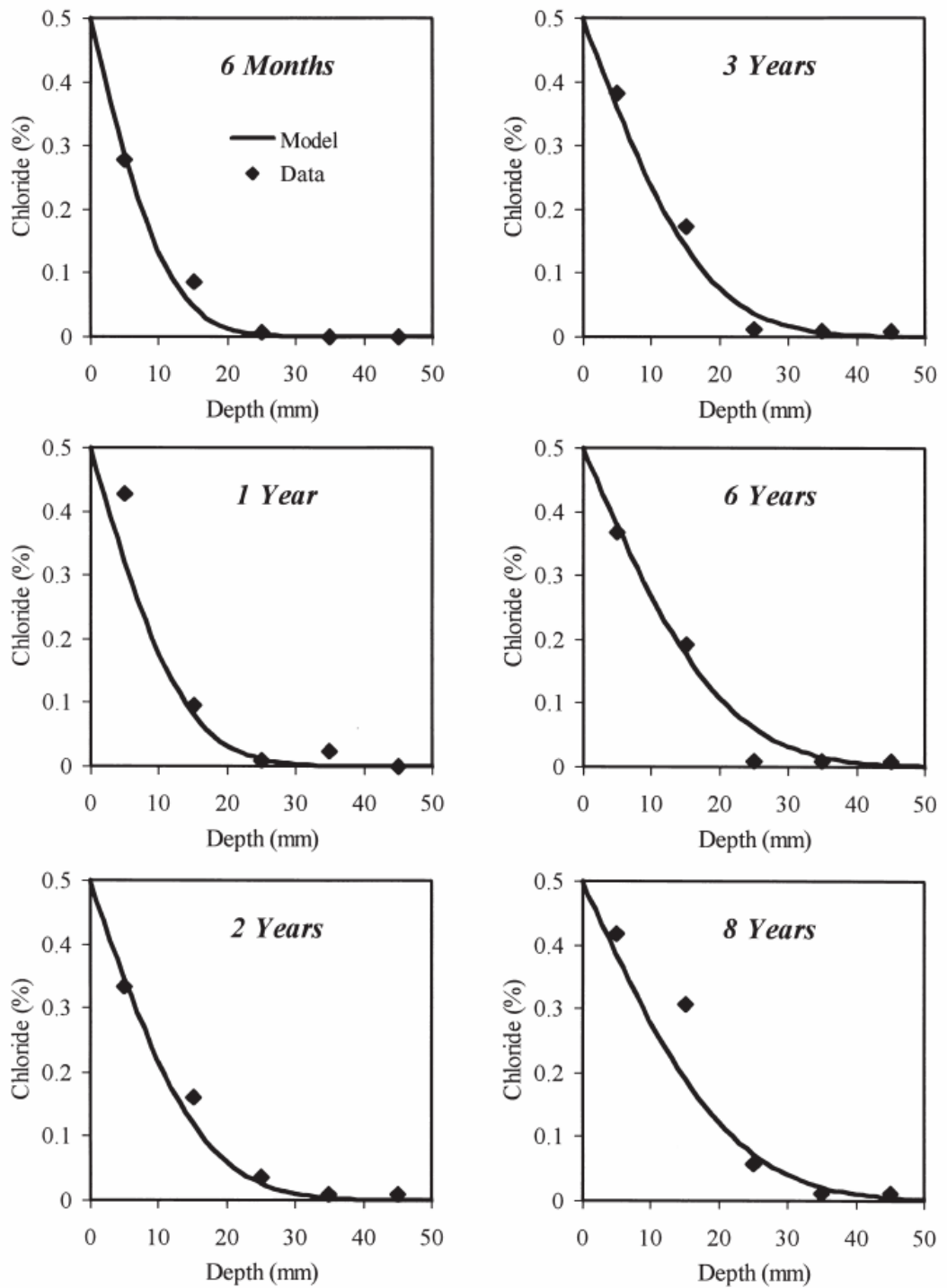
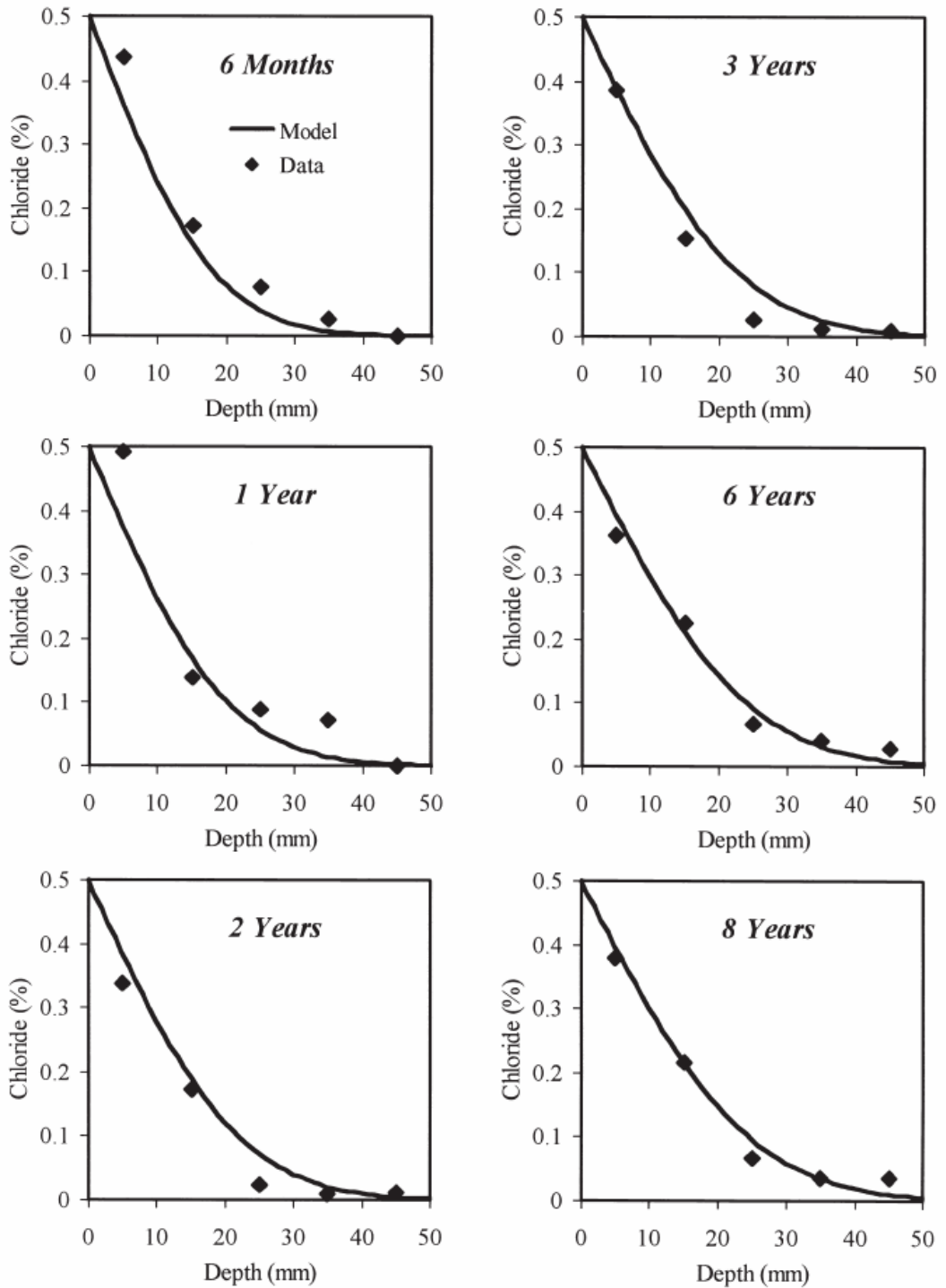


Figura No. 6 Perfiles obtenidos para la mezcla con contenido de escoria (P/GBS)

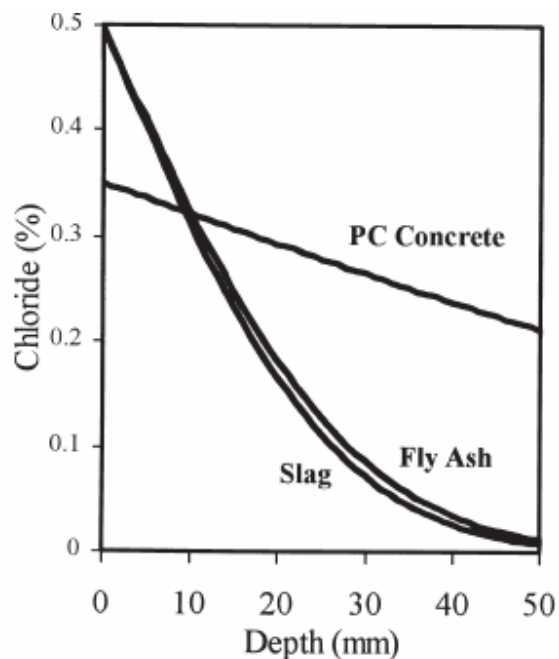


Es evidente que la difusividad del concreto con cualquier contenido de ceniza volante ó escoria es considerablemente más sensitiva al envejecimiento que en concretos con solo cemento Portland. Los datos aquí presentados muestran que para edades tempranas (p. ej. 1 mes), la difusividad del concreto con 25 a 30% de ceniza volante puede ser similar a la difusividad del ión cloruro para concreto de cemento Portland. Sin embargo, después de aproximadamente 2 años la difusividad del concreto con ceniza volante puede tener un orden de magnitud mas baja que el cemento Portland y decrece dos ordenes de magnitud después de 100 años. Esto tiene un impacto significativo en el desempeño del concreto a largo tiempo en ambiente de cloruros. Los resultados para concreto con escoria indican un coeficiente de difusión más alto a edades muy tempranas, comparado con los otros dos concretos, pero la difusividad decrece rápidamente con el tiempo. Este comportamiento dramático es atribuido al alto contenido de escoria (70%) en el concreto, y es de esperar que concretos con niveles mas moderados de escoria (p. ej. 50%) se comporten similar al concreto con ceniza volante.

El efecto benéfico de la ceniza volante y la escoria en la vida de servicio de estructuras de concreto reforzado es adecuadamente demostrado por los perfiles predecidos en la figura No.7. Los niveles de cloruros a una profundidad de 50 mm son insignificantes en concretos con ceniza volante ó escoria después de 30 años a exposición marina.

Otra aproximación para examinar la influencia en la vida de servicio es determinar la rata de penetración de el “umbral crítico de cloruros” en el concreto. Para este análisis un contenido de cloruros de 0.05% (por masa de concreto) ha sido asumido como la cantidad umbral requerida para iniciar la corrosión.

Figura No. 7 Perfiles de cloruros a 30 años.



Según lo reportado por Thomas y Bamforth [18], la concentración umbral crítica penetra rápidamente al concreto de cemento Portland y alcanza los 50 mm solo en 3 años. Para concretos con 30% de ceniza volante, la penetración inicial es también rápida, pero disminuye con el tiempo. Se ha estimado que aproximadamente 10 años serán requeridos para que el valor umbral comprometa los 30 mm exteriores de recubrimiento para el concreto con ceniza volante, pero para este tiempo la rata de penetración ha decrecido a un valor extremadamente bajo.

### 3.2. MODELO DE TORRES Y MARTINEZ

El modelo de Torres y Martinez [23] se basa en la ecuación empírica (4), obtenida mediante un análisis estadístico por regresión múltiple en función de algunas propiedades físicas del concreto como cantidad de material cementante,  $C_f$ , ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ), relación agua/cemento (en fracción de peso), cantidad de ceniza volante,  $fa$  (en fracción de peso) en el caso de cementos puzolánicos, y tiempo  $t$  (en años) en el cual la estructura ha estado en servicio.

$$D_{EF} = \frac{0.68 * (a/c)^{0.73}}{(C_f)^{2.8} * (t)^{0.4} * (1 + fa)^{2.6}} \quad (4)$$

Esta ecuación fue obtenida para concretos sanos no contaminados, establece una comparación empírica entre  $D_{EF}$ , las propiedades del diseño de mezcla y el tiempo  $t$ .  $D_{EF}$  es proporcional a la relación agua/cemento, e inversamente proporcional a  $C_f$ ,  $t$  y  $fa$ . Esta ecuación es válida para datos experimentales de diferentes autores, usados en su obtención [28,33], aunque necesitará ser probada con un mayor número de datos para su aplicación.

### 3.3. MODELO DE BERKE Y HICKS

En 1992, Berke y Hicks [37], realizando pruebas de difusión en laboratorio para placas de concreto reforzado y pilas marinas, proponen la ecuación (5) para la evaluación del coeficiente de difusión basados en datos experimentales, obteniéndose una correlación entre este y la permeabilidad rápida del concreto:

$$D_{EF} = 0.0103 * 10^{-8} * (RapidPerm.)^{0.84} \quad (5)$$

Donde  $D_{EF}$  es expresado en  $\text{cm}^2/\text{s}$  y RapidPerm (permeabilidad rápida de cloruros) en coulombs.

Para la obtención de la permeabilidad rápida se aplica la norma ASSHTO-277 (ASTM-C1202), donde se evalúa la penetración del ión cloruro, con el uso de un voltaje que acelera su transporte (ver Anexo 2).

## **CAPITULO IV. MODELO DE SIMULACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB 7.0**

A partir de los modelos establecidos en el capítulo 3 es posible simular la difusión de los iones cloruro en el concreto. En este proyecto se ha propuesto un modelo de simulación basado en diferencias finitas utilizando como herramienta computacional el software MATLAB 7.0. Con el fin de validar este modelo se realizaron análisis con el modelo propuesto por Thomas y Bamforth; de igual forma, se validaron los modelos de Torres y Martínez y Berke y Hicks. Con el producto de estos análisis se buscará que el modelo en diferencias finitas represente adecuadamente el fenómeno, permitiendo obtener diversas aplicaciones.

### **4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO**

#### **4.1.1. Validación del modelo de difusión por diferencias finitas con los datos de Thomas y Bamforth.**

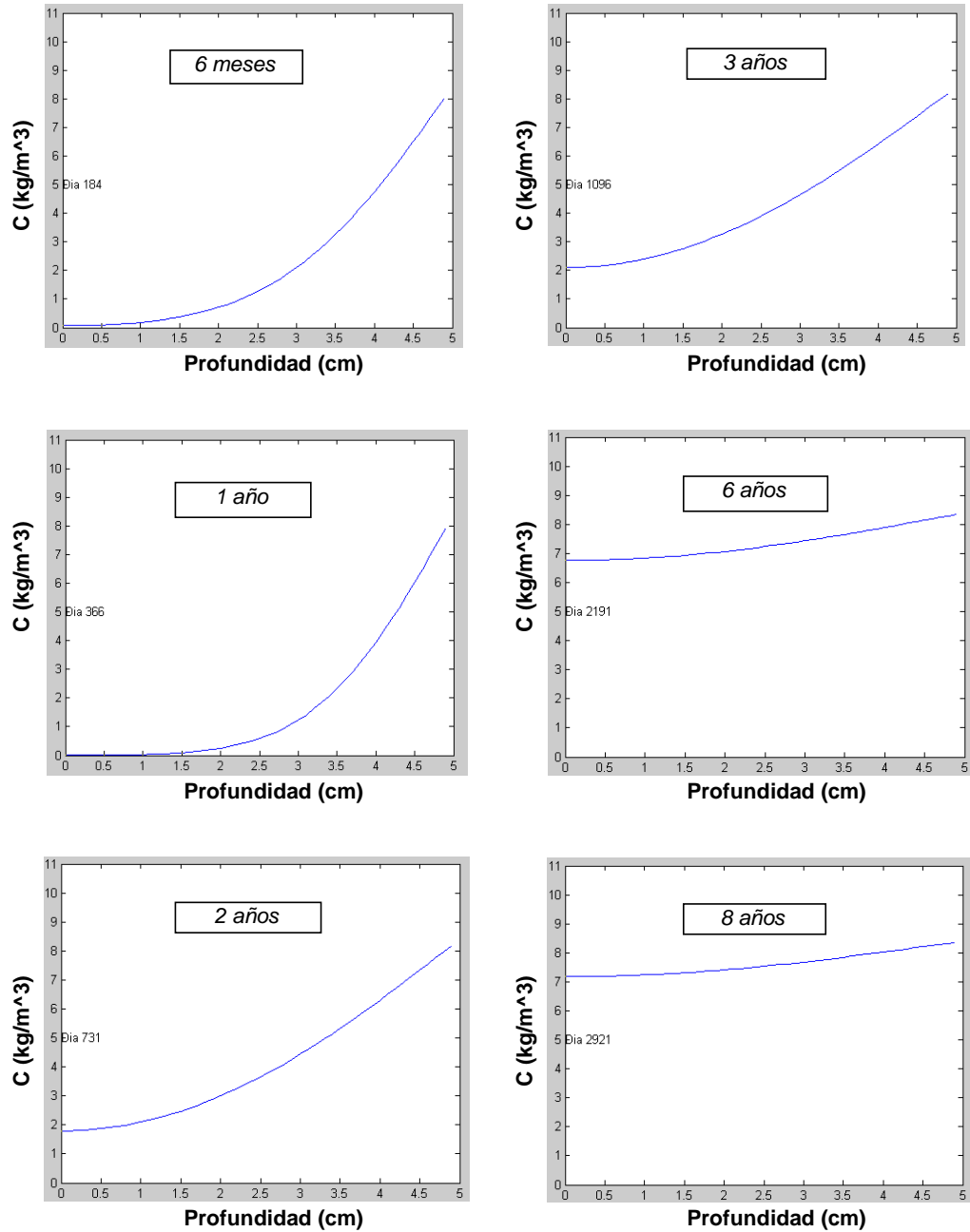
Para este proyecto se han construido los perfiles concentración vs profundidad de penetración utilizando el software MATLAB 7.0, a través de la herramienta "pdetool" (Partial Differential Equation toolbox) que trabaja la ecuación de difusión (ver Anexo 1). Los resultados obtenidos con el software se comparan con los obtenidos por Thomas y Bamforth [18]. Aquí se han modificado las unidades trabajadas por ellos para adaptarlas a las condiciones del software, como se muestra en la tabla No. 5.

**Tabla No. 5 Ajustes de los coeficientes de difusión y las concentraciones superficiales de cloruros.**

<b>concreto</b>	<b>T (días)</b>	<b>D<sub>EF</sub> (cm<sup>2</sup>/día)</b>	<b>Cs (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>PC control</b>	183	8.21E-03	8.400
	365	2.59E-03	8.400
	730	6.57E-03	8.400
	1095	4.84E-03	8.400
	2190	8.64E-03	8.400
	2920	7.52E-03	8.400
<b>P/PFA</b>	183	3.72E-03	11.760
	365	1.73E-03	11.760
	730	1.64E-03	11.760
	1095	9.50E-04	11.760
	2190	7.00E-04	11.760
	2920	5.10E-04	11.760
<b>P/GBS</b>	183	6.48E-03	12.720
	365	2.51E-03	12.720
	730	1.64E-03	12.720
	1095	8.55E-04	12.720
	2190	8.64E-04	12.720
	2920	5.44E-04	12.720

Los valores obtenidos representan el promedio de la difusividad del concreto durante el período desde el inicio de la exposición al tiempo de muestreo y la concentración final en la superficie a dicho tiempo. Se obtuvo el promedio de las concentraciones en la superficie para cada tipo de concreto, convirtiendo el porcentaje en peso de concreto. Los perfiles obtenidos con el software se presentan en las figuras 8, 9 y 10.

**Figura No. 8 Perfiles de concentración obtenidos en este proyecto para datos de campo de la mezcla de solo cemento Portland**



**Figura No. 9** Perfiles de concentración obtenidos en este proyecto para datos de campo de la mezcla con ceniza volante.

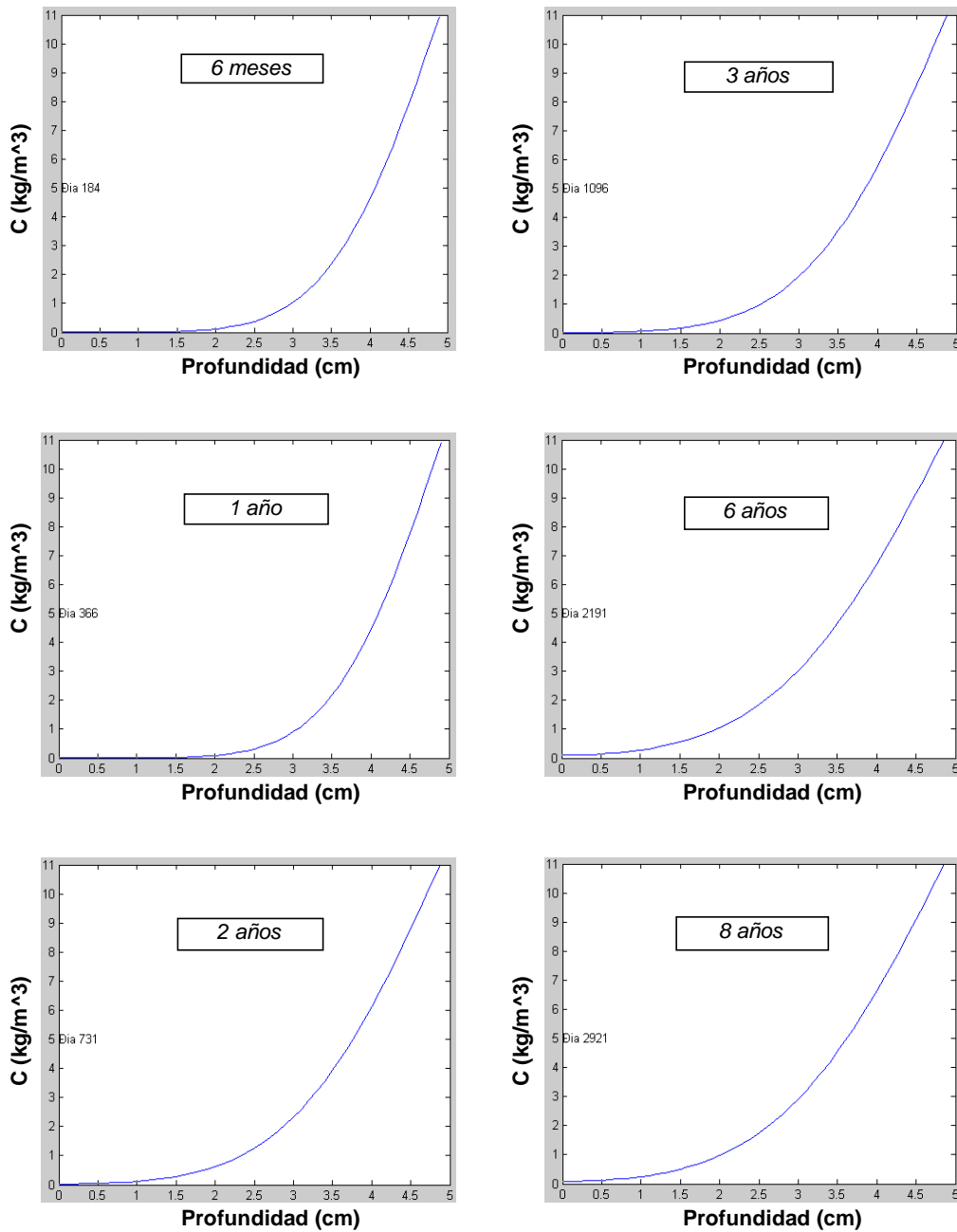
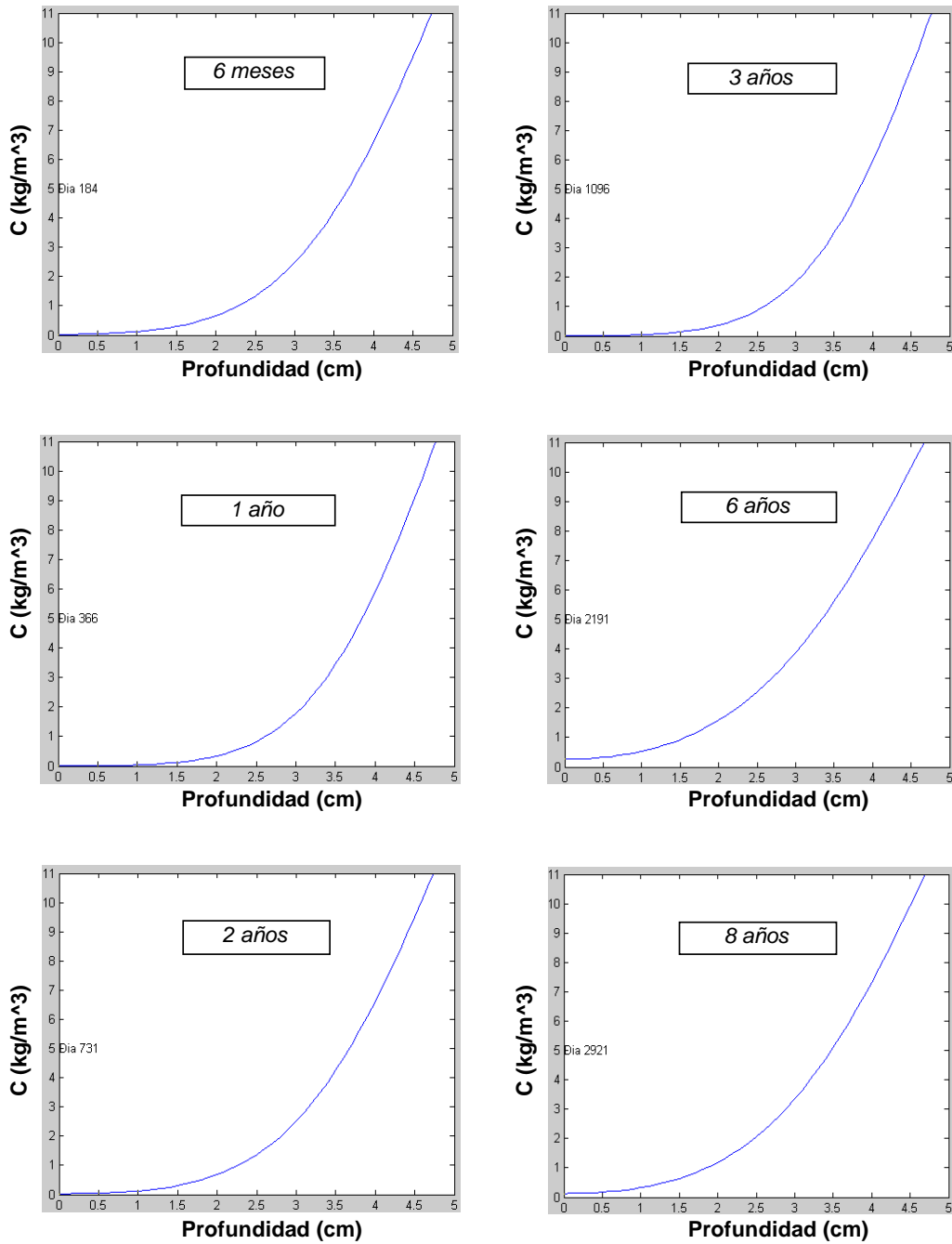
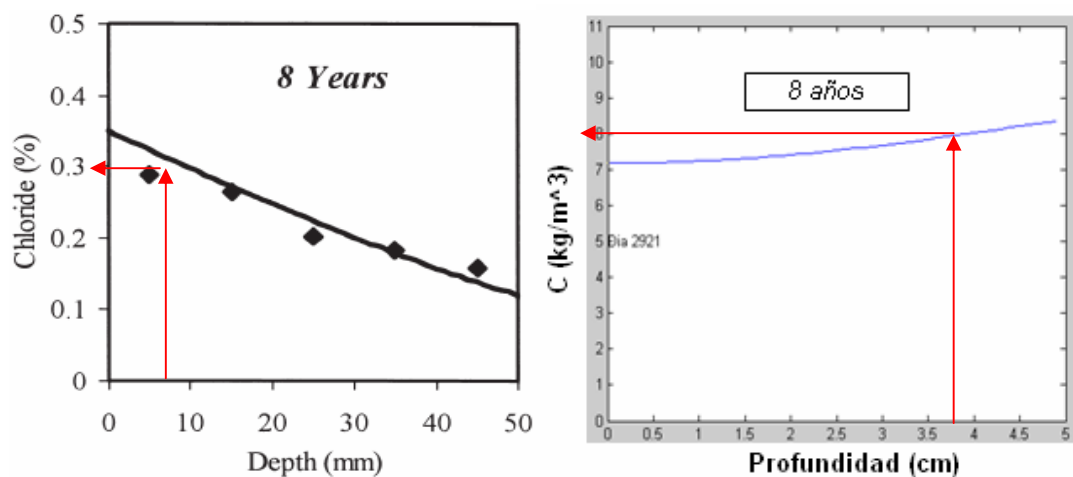


Figura No. 10 Perfiles de concentración obtenidos en este proyecto para datos de campo de la mezcla con escoria.



Con los perfiles de concentración vs profundidad de penetración obtenidos por Thomas y Bamforth a los 8 años para concreto normal, concreto con adición de ceniza volante y concreto con adición de escoria y los obtenidos en MATLAB 7.0 se hizo la validación del modelo. Esta validación se realizó tomando de los perfiles lecturas de concentración a diferentes profundidades, como se muestra en la Figura No. 11:

**Figura No. 11 Validación del modelo en MATLAB**



Las lecturas aquí tomadas se presentan en una tabla de comparación (tabla No.6). Con base en esta comparación se puede afirmar que el modelo propuesto representa el comportamiento del fenómeno evaluado por Thomas y Bamforth. Las diferencias que se presentan entre los modelos pueden ser debidas a errores que se cometen en el momento de hacer lectura de datos, errores en las pruebas de campo, conversión de unidades y otros parámetros como humedad y temperatura.

Tabla No. 6 Lecturas de comparación

	Profundidad desde la superficie	Concentración Thomas y Bamforth		Concentración MATLAB 7.0
	mm	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
PC	25	0,2	4,80	7,5
	35	0,18	4,32	7,3
	45	0,15	3,60	7,1
P/PFA	25	0,06	1,44	1,8
	35	0,02	0,48	0,6
	45	0,01	0,24	0,2
P/GBS	25	0,06	1,44	2,1
	35	0,04	0,96	0,7
	45	0,02	0,48	0,2

La diferencia más marcada se presenta en los datos de la muestra PC (Tabla No. 6), esto puede ser debido a que el modelo en MATLAB 7.0 no tiene en cuenta factores como humedad y temperatura que pueden estar afectando más al concreto sin adiciones.

#### 4.1.2. Validación del modelo con la ecuación de Torres y Martínez

Se han elaborado además los perfiles de concentración vs profundidad de penetración según la siguiente ecuación empírica (4) obtenida por Torres y Martínez [23],

$$D_{EF} = \frac{0.68 * (a/c)^{0.73}}{(Cf)^{2.8} * (t)^{0.4} * (1 + fa)^{2.6}} \quad (4)$$

Tomando datos de diversos tipos de material reportados por Byung y Seung [36], se calcularon las respectivas difusividades a diferentes tiempos con la ecuación (4). La Tabla No. 7 reporta estos datos.

**Tabla No. 7 Coeficientes de difusividad obtenidos de la ecuación empírica propuesta por Torres y Martínez.**

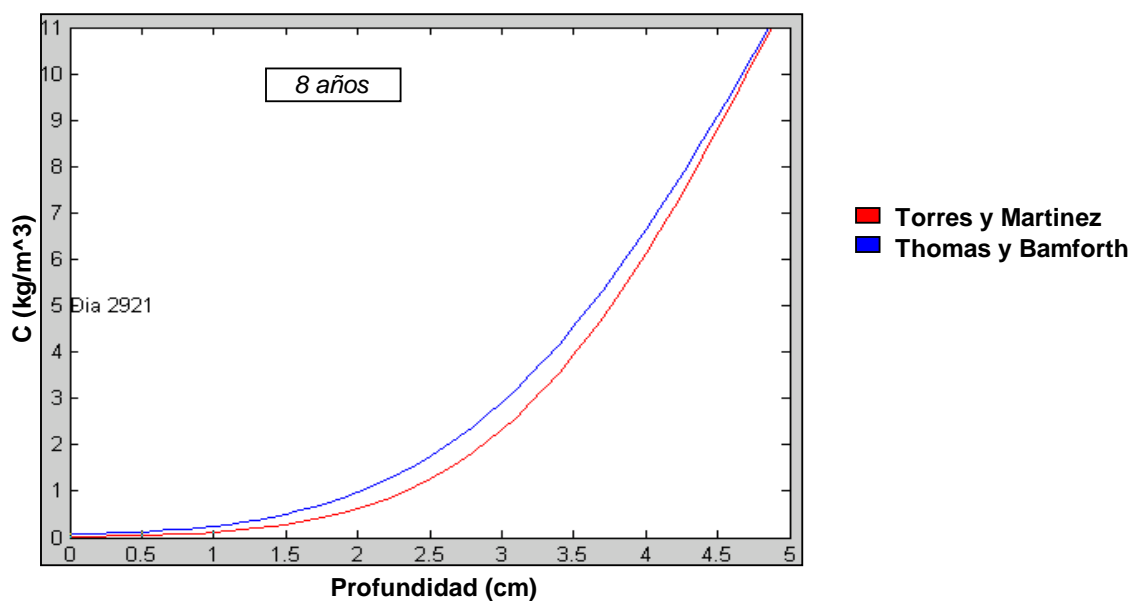
TIPO CONCRETO	W/C	CEMENTO (Kg/m <sup>3</sup> )	CENIZA VOLANTE		TIEMPO años	Def cm <sup>2</sup> /día
			%	Kg/m <sup>3</sup>		
NI-0	0.45	387	0	0	0.5	0.002458607
					1	0.001863276
					2	0.001412099
					3	0.001200684
					6	0.000909948
					8	0.000811038
NI-PFA30	0.45	387	30	116.1	0.5	0.001242901
					1	0.000941942
					2	0.000713859
					3	0.000606982
					6	0.000460006
					8	0.000410004
LI-0	0.55	316	0	0	0.5	0.005020831
					1	0.003805078
					2	0.00288371
					3	0.00245197
					6	0.001858245
					8	0.001656256
HI-0	0.35	497	0	0	0.5	0.001015796
					1	0.000769829
					2	0.000583422
					3	0.000496073
					6	0.000375953
					8	0.000335088
HI-PFA30	0.35	497	30	149.1	0.5	0.000513516
					1	0.000389172
					2	0.000294937
					3	0.00025078
					6	0.000190056
					8	0.000169397

Donde el tipo NI-0 hace referencia a un concreto con cemento Portland ordinario (ASTM Tipo I) con relación agua/cemento igual a 0.45; el tipo NI-PFA30 a un concreto con cemento Portland ordinario (ASTM Tipo I), relación agua/cemento

igual a 0.45 y 30% de ceniza volante; el tipo LI-0 a un concreto con cemento ASTM Tipo I y relación agua/cemento igual a 0.55; el tipo HI-0 a un concreto con cemento ASTM Tipo I y relación agua/cemento igual a 0.35; el tipo HI-PFA30 a un concreto con cemento ASTM Tipo I, relación agua/cemento igual a 0.35 y 30% de ceniza volante.

Con los datos presentados en la tabla No. 7, se ha validado la ecuación (4) obteniendo el perfil de penetración de cloruros comparándolo con el perfil de penetración de Thomas y Bamforth [18], en un lapso de tiempo de 8 años.

**Figura No. 12 Perfiles de concentración de cloruros a los 8 años**



Como puede observarse en la Figura No. 12, la tendencia de la curva con los datos de campo de Thomas y Bamforth es muy similar a la tendencia de la curva obtenida con la ecuación empírica de Torres y Martínez, para un concreto con el 30% de ceniza volante y concentración superficial de 11.76 Kg/m<sup>3</sup>; esto demuestra que la ecuación (4) proporciona datos confiables del coeficiente de difusividad en la obtención de perfiles de concentración vs profundidad.

La diferencia entre las dos curvas puede deberse en primer lugar a que Thomas y Bamforth tomaron una relación agua/cemento de 0.54 mientras que los datos tomados de Byung y Seung [36] muestran una relación agua/cemento de 0.45; ó en segundo lugar a la diferencia en las cantidades de material cementante utilizado en las mezclas.

#### 4.1.3. Validación del modelo mediante el método de Berke y Hicks

Con la ecuación (5) se calculan los valores de  $D_{EF}$ , empleando datos de permeabilidad rápida reportados por la ASTM C1202 (Tabla No. 8), con el fin de graficar los perfiles concentración vs. profundidad de penetración.

**Tabla No. 8 Clasificación de la permeabilidad al ión cloruro, ASTM C1202.**

<b>CARGA (coulombs)</b>	<b>PERMEABILIDAD A CLORUROS</b>	<b>TIPICO DE:</b>
≥ 4000	alta	Alta relación a/c (> 0.6) Hormigón de Cemento Pórtland Convencional
2000 - 4000	moderada	Moderada relación a/c (0.4 – 0.5) Hormigón de Cemento Pórtland Convencional
1000 - 2000	baja	Baja relación a/c (< 0.4) Hormigón de Cemento Pórtland Convencional
100 - 1000	muy baja	Hormigón modificado con Látex
≤ 100	despreciable	Hormigón impregnado con polímero

A manera de comparación con los perfiles obtenidos utilizando la ecuación de Torres y Martínez (4), se escogieron algunos datos de la tabla No. 8 y se calcularon los respectivos  $D_{EF}$ :

- Permeabilidad Alta (a/c > 0.6) mayor a 4000 coulombs  
 $D_{EF} = 0.0103 \cdot 10^{-8} \cdot (4000)^{0.84} = 1.09e-7 \text{ cm}^2/\text{s}$

$$D_{EF} = 9.41e-3 \text{ cm}^2/\text{día}$$

- Permeabilidad Moderada (a/c entre 0.4 y 0.5) entre 2000 - 4000 coulombs

$$D_{EF} = 0.0103 \cdot 10^{-8} \cdot (3000)^{0.84} = 8.58e-8 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{EF} = 7.41e-3 \text{ cm}^2/\text{día}$$

- Permeabilidad Baja (a/c < 0.4) entre 1000 - 2000 coulombs

$$D_{EF} = 0.0103 \cdot 10^{-8} \cdot (1500)^{0.84} = 4.79e-8 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{EF} = 4.13e-3 \text{ cm}^2/\text{día}$$

Con estos coeficientes de difusión,  $D_{EF}$ , se obtuvieron los perfiles concentración vs. profundidad de penetración (Figuras No. 13, 14 y 15).

Figura No. 13 Perfil de concentración de cloruros a un año para una zona de salpicadura

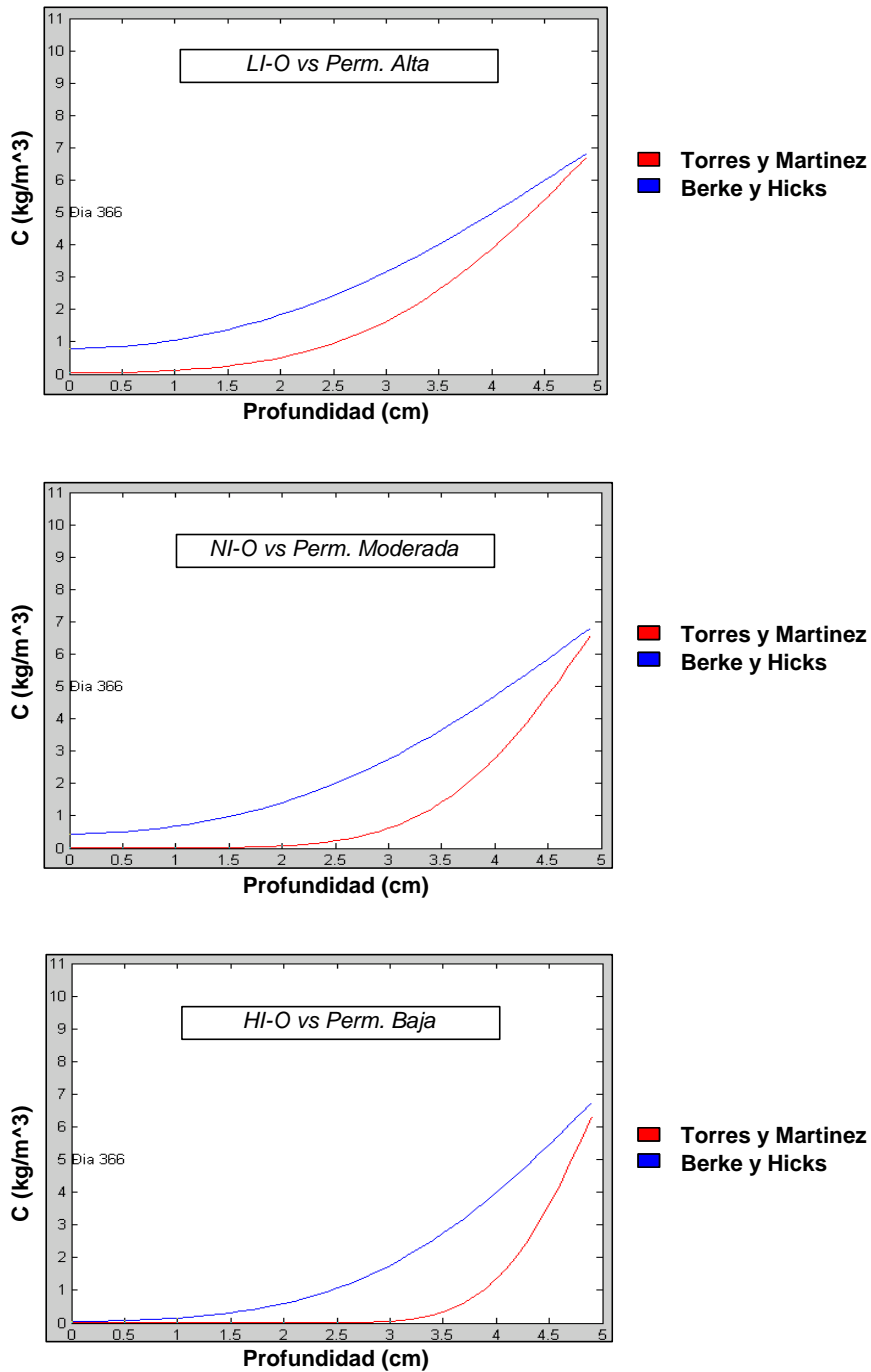


Figura No. 14 Perfil de concentración de cloruros a un año para ambiente marino

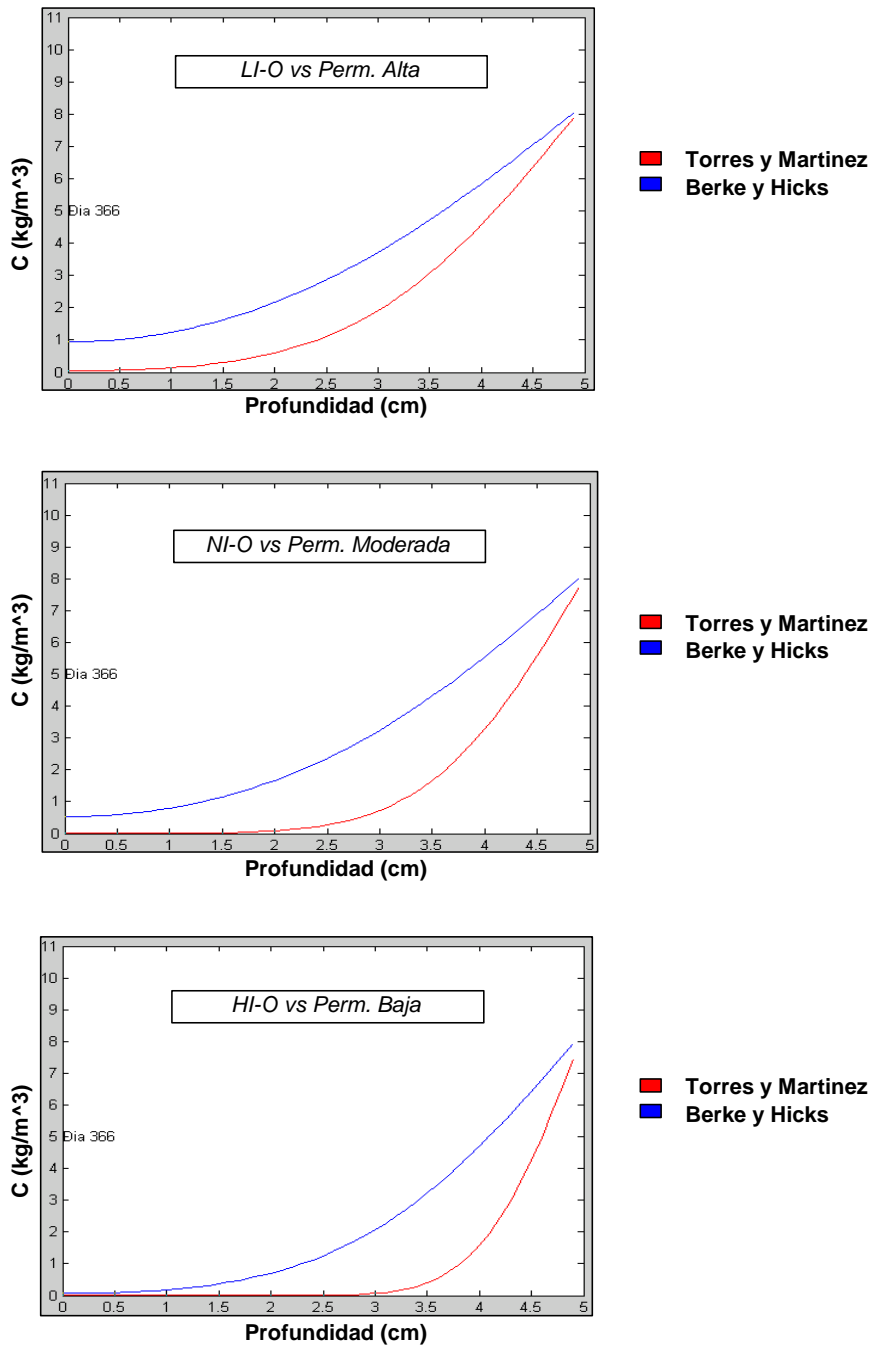
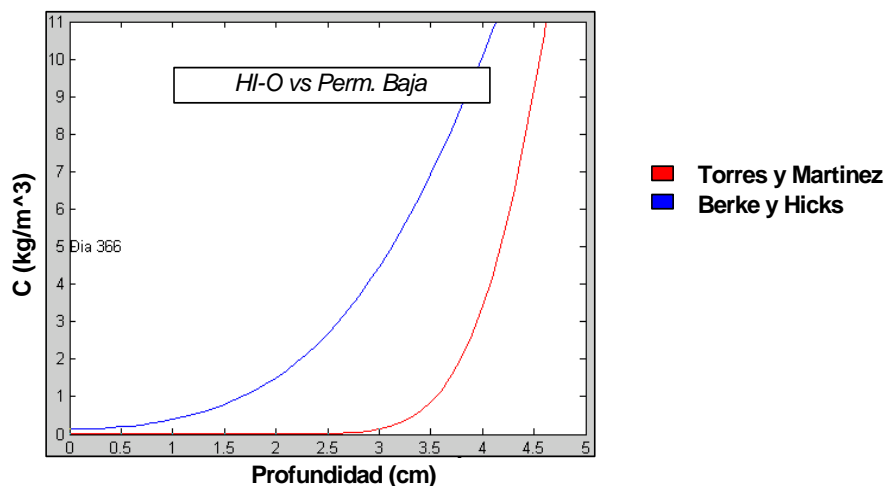
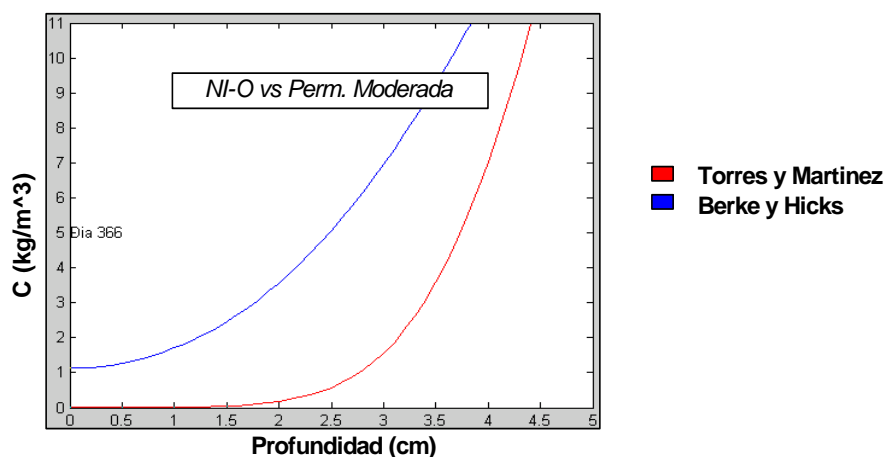
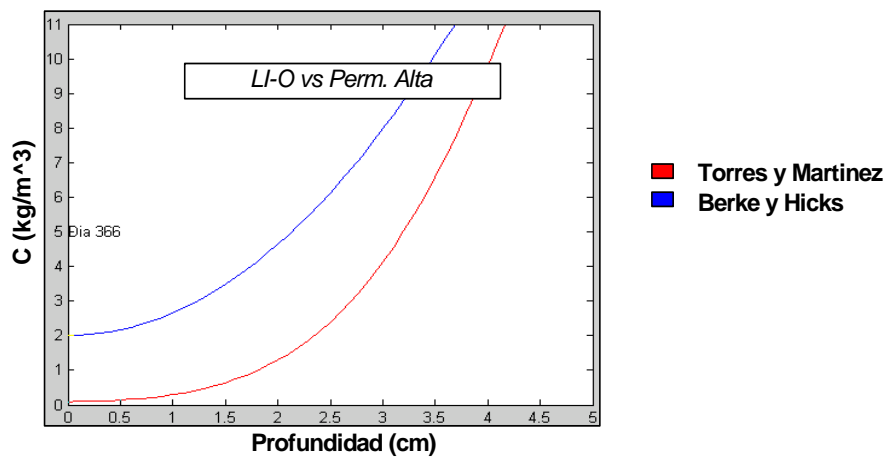


Figura No. 15 Perfil de concentración de cloruros a un año para zona de marea



El ensayo de permeabilidad rápida permite obtener valores de difusividad que tienen en cuenta ciertas características del diseño de mezcla como lo es la relación  $a/c$ , pero son datos que no varían con el tiempo; caso contrario a lo que se obtiene de la ecuación propuesta por Torres y Martínez (4) que considera la relación  $a/c$  así como el tiempo en el que la estructura ha estado sometida a un ambiente de cloruros. Por tal razón los perfiles presentando la misma tendencia se encuentran desfasados notoriamente. No es lo mismo comparar datos obtenidos de un ensayo de campo en el que la probeta ha estado expuesta continuamente al ataque de cloruros durante un lapso de tiempo, con datos que se obtienen en un ensayo de 6 horas de duración y que no toma en cuenta el cambio del coeficiente de difusividad con el tiempo.

## **4.2. APLICACIÓN DEL MODELO**

### **4.2.1. Evaluación del comportamiento del concreto sometido a diferentes ambientes de cloruros.**

Con los coeficientes de difusividad,  $D_{EF}$ , calculados en la ecuación (4) y tomando concentraciones superficiales de cloruros de  $17.8 \text{ Kg/m}^3$  para zona de marea,  $8.3 \text{ Kg/m}^3$  para zona de ambiente marino y  $7.05 \text{ Kg/m}^3$  para zona de salpicaduras, se realizaron los perfiles respectivos de concentración vs. profundidad para un tiempo de 8 años, con el fin de comparar el comportamiento del hormigón para varias características en el diseño de mezcla sometido al ataque de cloruros en estos ambientes.

Figura No. 16 Influencia de la relación a/c sobre la difusividad de los iones cloruro en zona de marea.

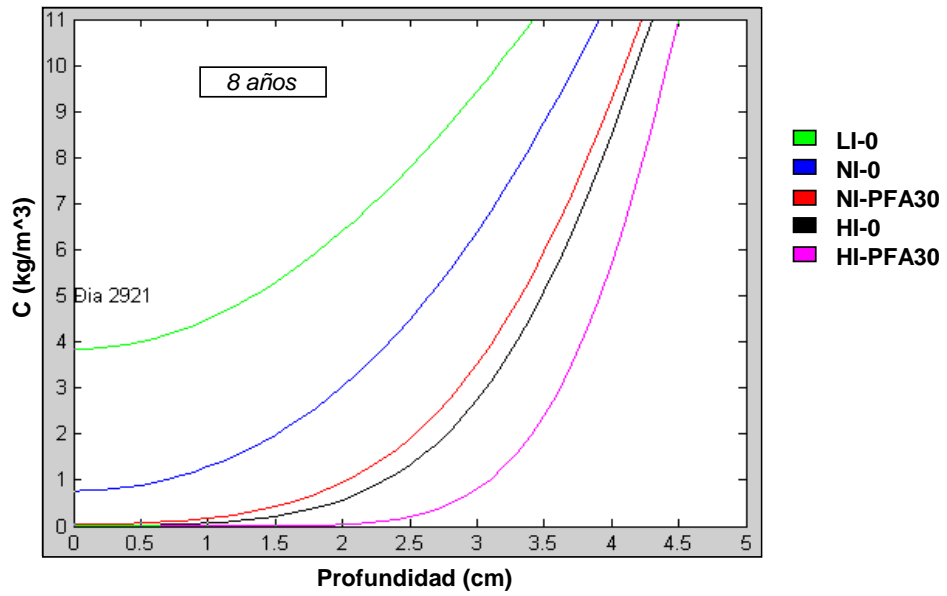


Figura No. 17 Influencia de la relación a/c sobre la difusividad de los iones cloruro en zona de salpicadura.

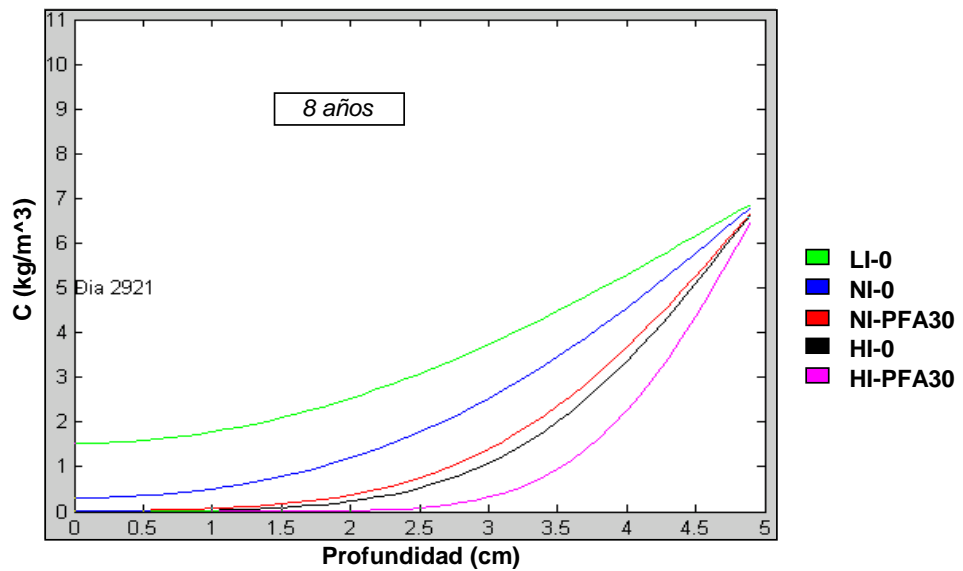
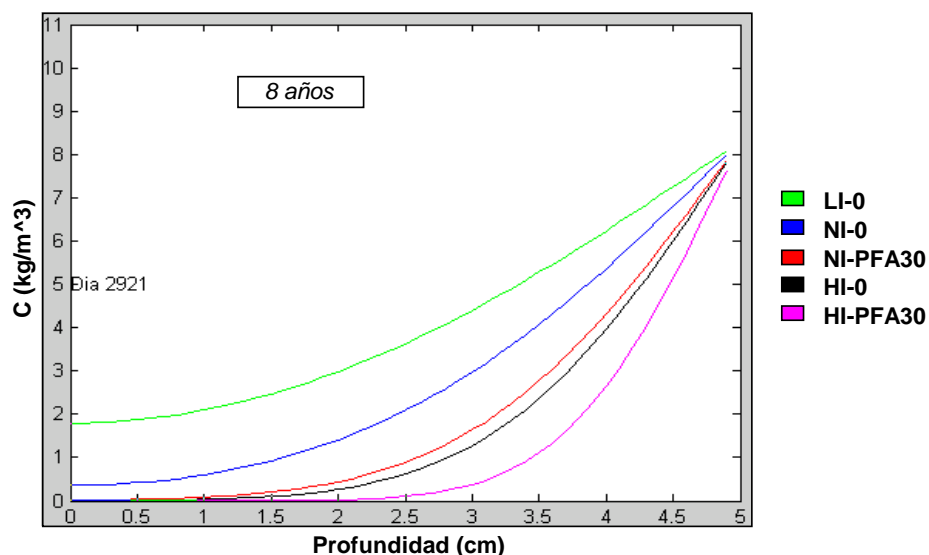


Figura No. 18 Influencia de la relación a/c sobre la difusividad de los

### iones cloruro en zona de ambiente marino.



Tomando la figura No. 16 donde se representa el ambiente mas crítico de exposición a iones cloruro, se observa como las diferentes relaciones agua/cemento influyen en la concentración de los iones cloruro a nivel del acero de refuerzo. Para un concreto LI-0 con relación a/c de 0.55 la concentración en el acero de refuerzo alcanza un valor de  $3.8 \text{ Kg/m}^3$ , en un concreto NI-0 con relación a/c de 0.45 dicha concentración es de  $0.7 \text{ Kg/m}^3$ , mientras que en un concreto HI-0 con relación a/c de 0.35 esta concentración alcanza un valor por debajo de  $0.1 \text{ Kg/m}^3$ ; por otra parte, en concretos con adiciones puzolánicas como el NI-PFA30 de relación a/c 0.45 y 30% de ceniza volante la concentración en el acero de refuerzo alcanza un valor de  $0.1 \text{ Kg/m}^3$  y en el HI-PFA30 de relación a/c 0.35 con 30% de ceniza volante la concentración de iones cloruro en el refuerzo es cero.

Como se muestra en las Figuras No. 16, 17 y 18, independientemente de la concentración en la superficie, entre menor sea la calidad del concreto (mayor relación a/c) la difusión de los iones cloruro será mayor, lo que conlleva a alcanzar el nivel umbral de cloruros reportado en la Tabla No. 9 en corto tiempo.

**Tabla No. 9 Nivel umbral de cloruros para los diferentes tipos de mezcla**

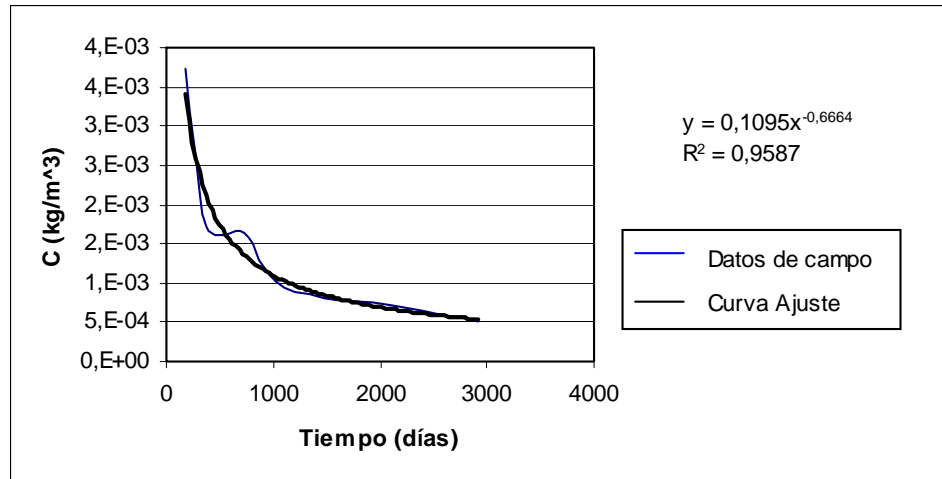
	Umbral Cl- (% peso cemento)	Peso cemento (kg)	Umbral Cl- (kg/m <sup>3</sup> )
NI-0	0,4	387	1,55
NI-PFA30	0,4	387	1,55
LI-0	0,4	316	1,26
HI-0	0,4	497	1,99
HI-PFA30	0,4	497	1,99

Cabe resaltar cómo la adición de puzolanas retarda el avance de los iones cloruro a través de la matriz de concreto incrementando la vida de servicio de las estructuras.

#### **4.2.2. Estimación de la vida útil de las estructuras de concreto.**

Graficando en Microsoft Excel difusividades vs tiempo con los datos de la tabla No. 5 y obteniendo las curvas del mejor ajuste (Figuras No. 19 y 20) representadas como  $D_{EF} = K \cdot t^m$ , se obtuvieron los valores de los coeficientes de difusividad,  $D_{EF}$ , para 20, 50 y 100 años en concretos con ceniza volante y escoria respectivamente (Tabla No. 10).

**Figura No. 19 Mejor ajuste de los datos de campo para un concreto con ceniza volante**



**Figura No. 20 Mejor ajuste de los datos de campo para un Concreto con escoria**

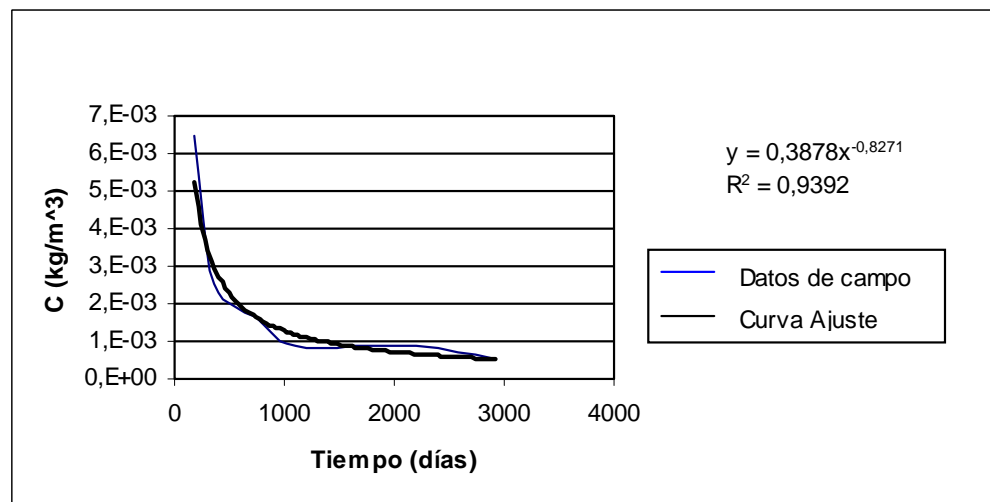


Tabla No. 10 Coeficientes de difusividad obtenidos con la curva de mejor ajuste

	Tiempo		Def (cm <sup>2</sup> d/a)
	Años	Días	
P/PFA	20	7300	2,91E-04
	50	18250	1,58E-04
	100	36500	9,98E-05
P/GBS	20	7300	2,47E-04
	50	18250	1,16E-04
	100	36500	6,53E-05

Con los coeficientes de la tabla No. 10, se graficaron los perfiles de las Figuras No. 21 y 22, para un concreto con recubrimiento de 6 cm, donde se estima que tomará alrededor de 200 años en este ambiente para que el contenido umbral de cloruros (0.05% en peso de concreto equivalente a 1.2 Kg/m<sup>3</sup>) alcance el acero a una profundidad de 60 mm en concretos con adiciones de ceniza volante y aproximadamente 250 años en concretos con escoria.

Figura No. 21 Perfiles de predicción para un concreto con ceniza volante

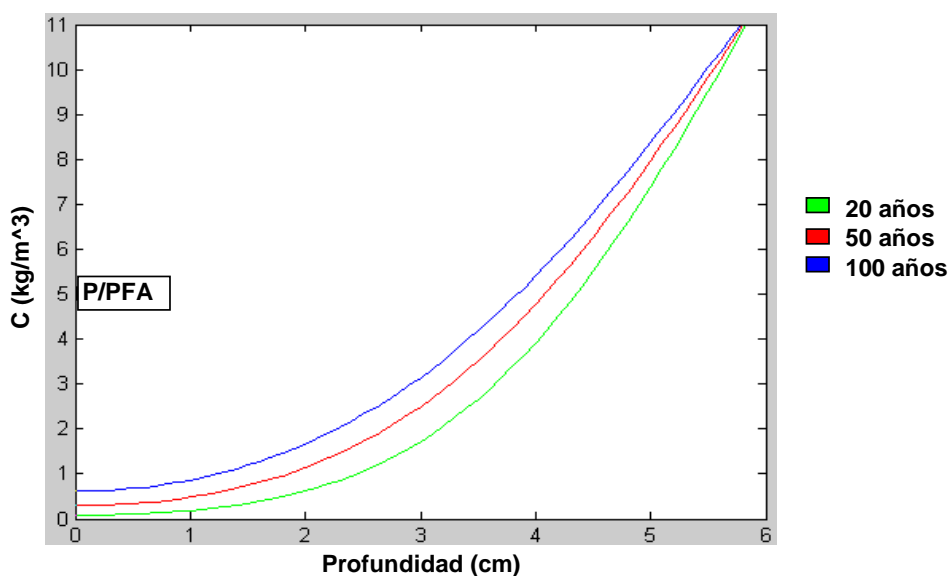
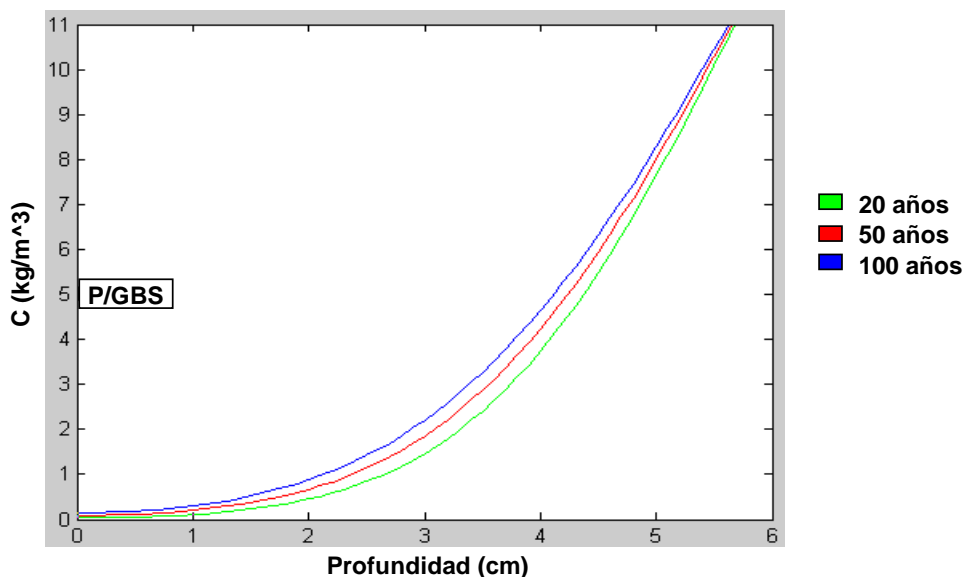


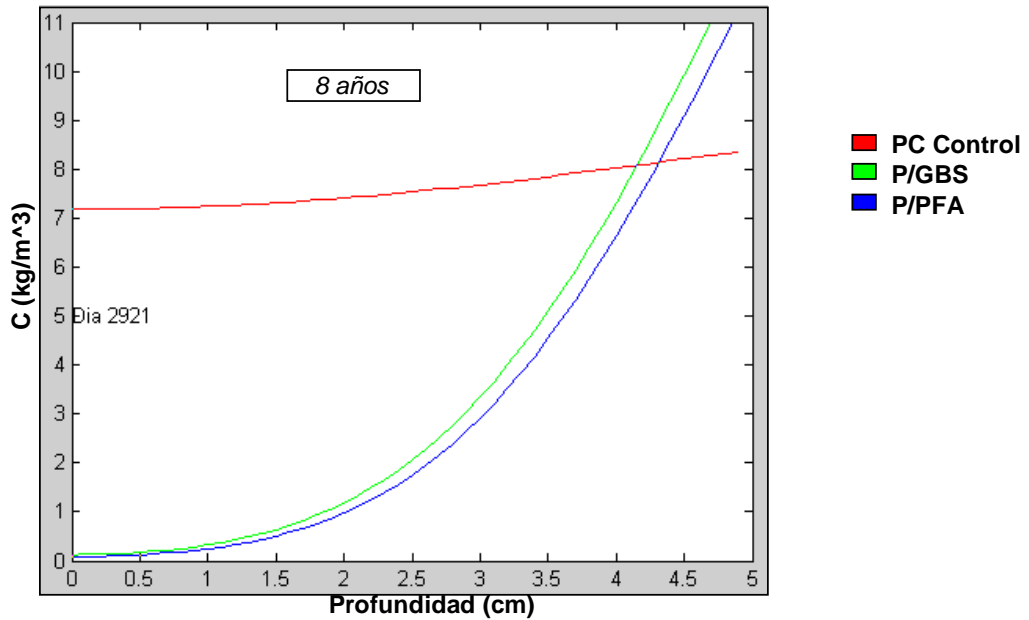
Figura No. 22 Perfiles de predicción para un concreto con escoria



#### 4.2.3. Determinación de la influencia de las adiciones al concreto.

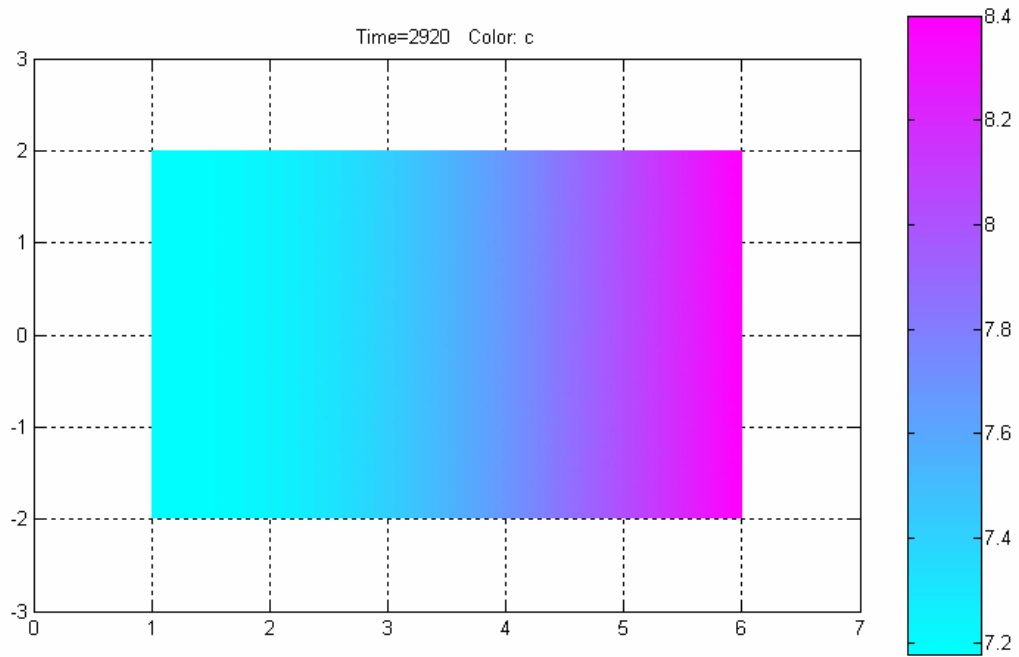
Graficando los perfiles en el software con los datos de la Tabla No. 5, se nota una diferencia entre el nivel de concentración de cloruros a los 8 años para la mezcla de control (PC), respecto a las mezclas P/PFA y P/GBS que presentan concentraciones similares entre ellas, las cuales están muy por debajo del valor de concentración de la mezcla PC, como se ve en la Figura No. 23.

Figura No. 23 Perfiles de concentración obtenidos para datos de campo a los 8 años de exposición.

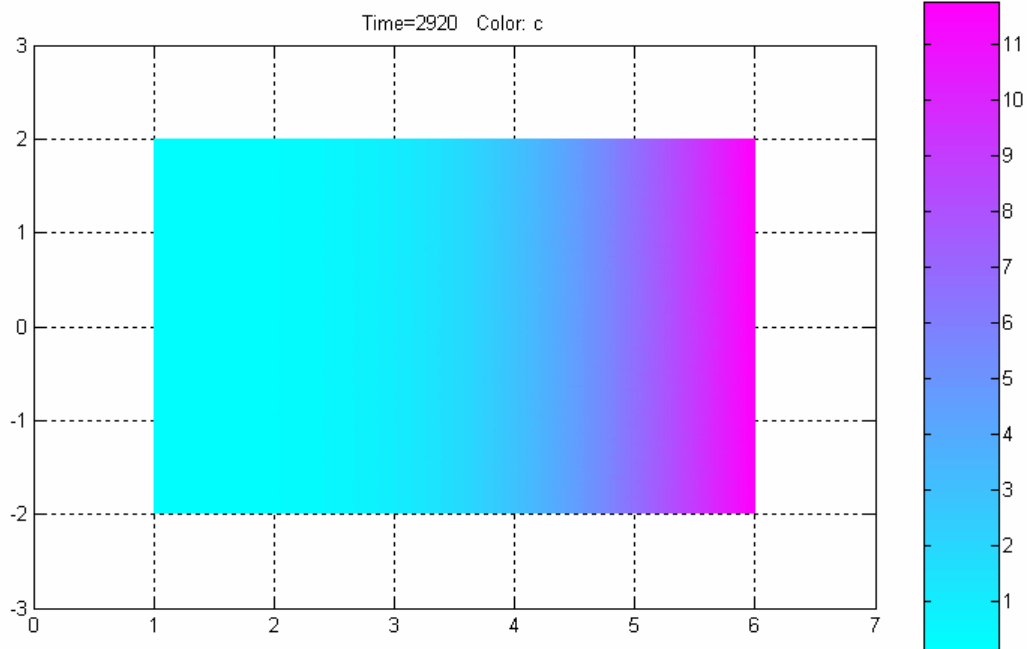


Lo anterior también puede visualizarse en una gama de colores que cambia según sea la concentración de los iones cloruros a través de la profundidad, de mayor intensidad a menor intensidad, como lo muestra el resultado que arroja el pdeool de MATLAB 7.0 (Figuras No. 24, 25 y 26).

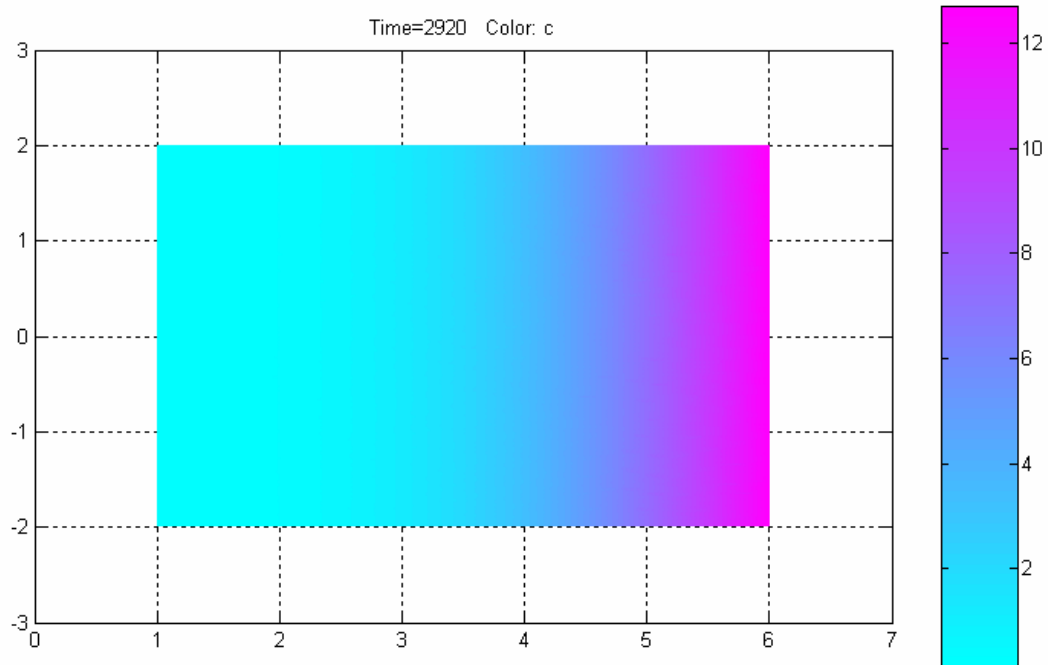
**Figura No. 24 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo de la mezcla PC control**



**Figura No. 25 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo de la mezcla P/PFA**

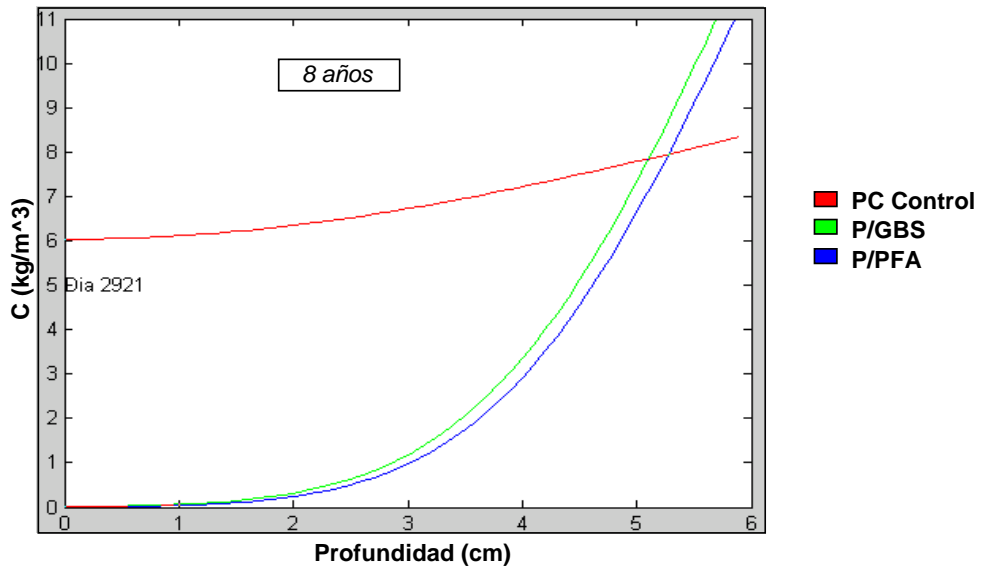


**Figura No. 26 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo de la mezcla P/GBS**

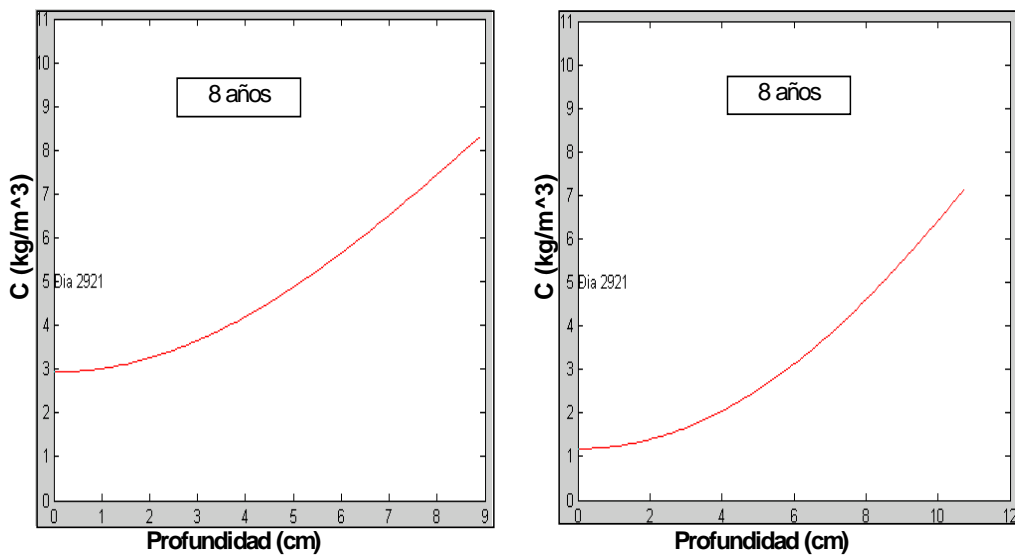


Como puede notarse en la Figura No. 24, la concentración de cloruros a nivel del acero de refuerzo es muy alta y sobrepasa el valor umbral de cloruros ( $1.2 \text{ Kg/m}^3$ ), mientras que en las Figuras No. 25 y 26 la concentración al nivel del acero de refuerzo está muy por debajo del valor umbral y las profundidades con gran concentración comprometen aproximadamente los 25 mm exteriores. Este análisis enfatiza la importancia de proveer un buen recubrimiento para el acero de refuerzo.

**Figura No. 27 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo  
Con un recubrimiento de 6 cm**



**Figura No. 28 Avance de cloruros a los 8 años para datos de campo  
con un recubrimiento de 9 y 12 cm para concreto normal (PC)**



De la figura No. 23 se observa para un concreto normal (sólo PC) con recubrimiento de 5 cm que la concentración de cloruros a los 8 años al nivel del

acero de refuerzo alcanza un valor de  $7.2 \text{ kg/m}^3$ , sobrepasando el valor umbral de cloruros ( $1.2 \text{ kg/m}^3$ ); mientras que en la Figura No. 27 para un recubrimiento de 6 cm dicha concentración es de  $6.1 \text{ kg/m}^3$ , y en la Figura No. 28 para un recubrimiento de 9 cm la concentración alcanza un valor de  $2.9 \text{ kg/m}^3$ , esto indica que por cada centímetro adicional de recubrimiento la concentración disminuye en promedio  $0.8 \text{ kg/m}^3$ , afirmación que se valida nuevamente con la Figura No. 28 en la cual se muestra que el valor umbral al nivel del acero de refuerzo se alcanza para un recubrimiento de 12 cm. Sin embargo, no es viable económica ni funcionalmente proveer un recubrimiento tan grande a una estructura que alcanzará el umbral de cloruros en 8 años, por esto no es recomendable el uso de un concreto normal únicamente sino el uso de un concreto con adiciones puzolánicas; además, se debe tener en cuenta que cualquier estructura se diseña para una vida de servicio no menor a 50 años.

## CONCLUSIONES

- El modelo en diferencias finitas permite simular satisfactoriamente la penetración de iones a través de un material poroso, lo cual se comprobó con las pruebas realizadas con los datos de Thomas y Bamforth, Torres y Martínez y Berke y Hicks
- De los análisis realizados en MATLAB 7.0 se deduce que el coeficiente de difusividad presenta gran dependencia con el tiempo; por lo tanto, no es siempre satisfactorio usar el ensayo de permeabilidad rápida en la obtención del coeficiente de difusividad.
- La magnitud del coeficiente de difusión que varía según los diferentes ambientes de exposición, depende de la concentración de cloruros en la superficie de las estructuras de hormigón.
- Debe proporcionarse un óptimo diseño de mezcla que contemple la selección del cemento más adecuado, la adición de puzolanas y una relación (A/C) menor a 0.4 para obtener valores de difusividad bajos, disminuir la penetración de los iones cloruro, desarrollar una buena resistencia y asegurar el buen comportamiento del concreto frente a la corrosión.
- La vida de servicio de las estructuras expuestas a ambientes con cloruros puede incrementarse aún más si se proporciona un adecuado recubrimiento al acero de refuerzo.

- La adición de materiales puzolánicos al concreto normal disminuye la permeabilidad de cloruros en las estructuras a través del tiempo, garantizando mejores resultados en la vida útil y una reducción de costos en materiales.
- El modelo de **Simulación por Diferencias Finitas** puede aplicarse en la rehabilitación de estructuras sometidas al ataque de iones cloruro.
- Este proyecto proporciona una herramienta útil para evaluar la resistencia a la penetración de cloruros en concretos con otras adiciones que han sido estudiadas por el grupo INME.

## RECOMENDACIONES

- Debido a que la difusividad de un material poroso como el hormigón depende de la microestructura y la interconectividad del sistema de poros, se recomienda extender este estudio al análisis de difusión de cloruros en dos dimensiones.
- Se considera necesario realizar pruebas de campo que lleven a determinar el coeficiente de difusión en una zona de ambiente marino colombiano a fin de comparar estos resultados con los presentados en este trabajo.
- Estudiar el fenómeno de difusión de iones cloruro en el concreto normal, realizando pruebas de campo para un periodo de tiempo mayor a 8 años.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Evaluación de Estructuras: Técnicas y materiales para su reparación, F. García, 2002
2. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED.
3. La corrosión ataca desde adentro, publicación de la Revista *Ciencia hoy en línea*, página de Internet.
4. Tecnología del concreto y el mortero, D. Sánchez, 1996.
5. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón, P. Helene, F. Pereira, 2003.
6. Steel Corrosion of Concrete: How does it occur? D.A. Haussmann, Journal of Material Protection, 1967.
7. Chloride thresholds levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete: Proceedings International RILEM Workshop, K. Glass, N.R. Buenfeld, 1995.
8. Relationship between the free and total chloride diffusivity in concrete, Xinying Lu, Cuiling Li, Haixia Zhang, Journal Cement and Concrete Research, 2002.
9. Corrosion of steel in concrete, k. Tuutti, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
10. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures: Theory, Z. P. Bazant, ASCE, 1979.
11. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures: Application, Z. P. Bazant, ASCE, 1979.
12. Mechanism of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection and repair of offshore and coastal structures, R.D. Browne, ACI, 1980.

13. Cracking, cover and corrosion of reinforcement, A.W. Beeby, Conc Intel, 1983.
14. Predicting Chloride Profiles in concrete, N.S. Berke, M.C. Hicks, Journal Corrosion Engineering, NACE International, 1994,
15. Determinación interferométrica del Coeficiente de Difusión de NaCl-H<sub>2</sub>O, a distintas concentraciones y temperaturas, C. Martínez, E. Alanis, G. Romero, Energías renovables y medio ambiente, 2002.
16. Modelling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures, P. Thoft-Christensen, Denmark.
17. Numerical Prediction of early-age cracking and corrosion in High Performance concrete bridges- case study, L. Daigle, Z. Lounis, D. Cusson, Paper Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2004.
18. Modelling Chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag, M.D.A. Thomas, P.B. Bamforth, Journal Cement and Concrete Research, 1999.
19. Note on chloride – Induced corrosion of reinforced concrete bridges decks, P. Phurkhao, M.K. Kassir, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2005
20. Predicting the risk of reinforcement corrosion in marine structures, P.B. Bamforth, Journal Cement and Concrete Research, 1996
21. Chloride penetration and service life, P.B. Bamforth, publicación presentada en Corrosion and protection of metals in contact with concrete, 1995.
22. Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments, P.B. Bamforth, publicación presentada en SCI 4<sup>th</sup> International Symposium on corrosion of reinforcement in concrete construction, 1996.
23. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. A. Torres, M. Martínez, Publicación técnica del Instituto Mexicano de Transporte, 2001.
24. El umbral de cloruros para despasivar el acero de refuerzo: criterios y resultados en el mundo, P. Castro Borges, publicación Revista *Construcción y Tecnología*, Instituto Mexicano del cemento y el concreto, 2001.
25. Proceedings Institute of civil Engineers, Part I, P. Vassie, 1984.

26. Durability of Building Materials, R.D. Browne, Elsevier Scientific Publication, 1982.
27. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar, C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote, P. Castro, Cement and Concrete Research, 2000.
28. Factors influencing chloride ingress into marine structures, P. Bamforth, publicación presentada en *Economic and durable construction through excellence*, Dundee, 1993.
29. Corrosion of epoxy coated rebar in Florida bridges, A. Sagués, reporte final al FDOT, 1994.
30. Corrosion forecasting for 75-year durability design of reinforced concrete – Update on assessment of chloride penetration of sound concrete in FDOT bridge structures, reporte parcial, 1999.
31. Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate, C. Jaegerman, ACI Mats., Journal 87, 1990.
32. Diffusivity of chlorides from seawater into high-strength lightweight concrete, ACI Mats., Journal 91, 1994.
33. Atmospheric chloride penetration into concrete in semi-tropical marine environment, ACI Struct., Journal 24, 1994.
34. CEN (European Committee for Standardization), “ENV 1991. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1: Basis of design”, Brussels, Belgium, 1994.
35. BSI, “BS 7543 Guide to durability of buildings and building elements, products and components”, London, UK: British Standards Institution, 1992.
36. Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations; Byung Hwan Oh, Seung Yup Jang, Journal of Cement and Concrete Research, 2004.
37. Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data, Corrosion forms and control for

- infrastructure; N.S Berke, M.C Hicks; ASTM STP 1137, Edit. V, Philadelphia,1992.
38. AASHTO. Standar Specification for Transportation Materials and Methods f sampling and testing. Fourteenth Edition, American Association od state Highway and transportation Officials, 1986.
  39. Examination of three methods for studing ion diffuision en cement pastes, mortars and concrete; N.R Buenfeld, J.B Newman, Journal Materials and Structures, 1987.
  40. Rapid Estimation of chloride diffusion coefficient in concrete; R.K Dhir, Magazine of Concrete Research, 1990.
  41. ASTM C-1202, Standard test method for electrical indication of Concrete's ability to resist chloride ion penetration, 1991.
  42. Rapid determination of the chloride permeability of concrete; D. Whiting, Final Report, Federal Highway Administration,1981.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1. MODELO EN MATLAB**

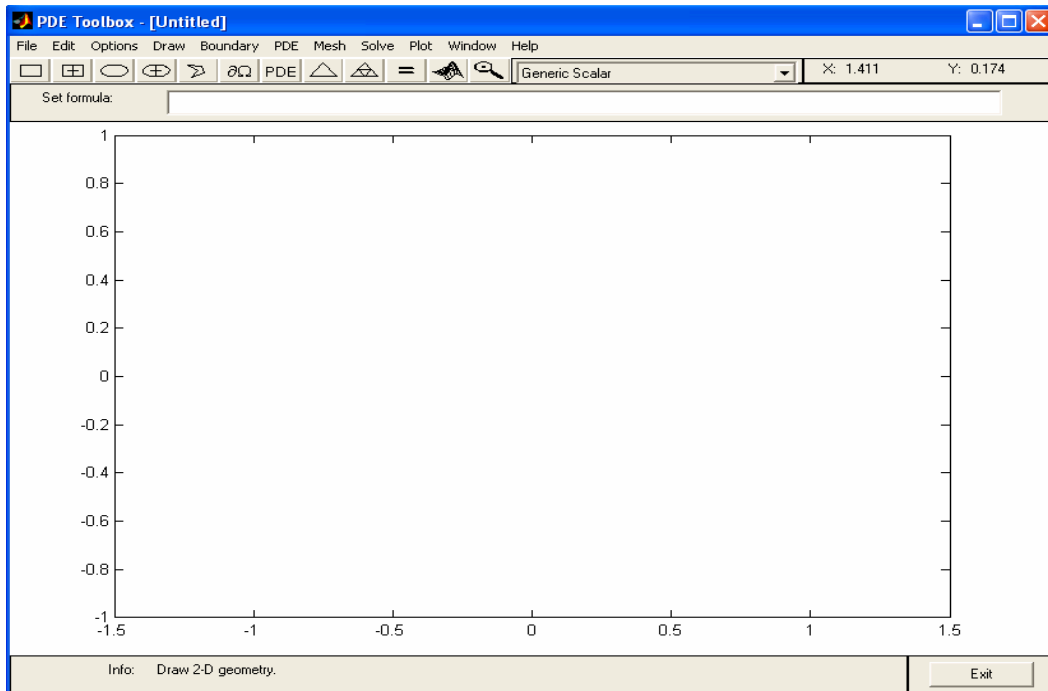
La construcción de los perfiles Concentración vs Profundidad de penetración se hizo a través de la herramienta PDETOOL (Partial Differential Equation Toolbox) del software MATLAB, la cual resuelve la ecuación diferencial parcial a través de elementos finitos.

Esta herramienta provee un ambiente poderoso y flexible para el estudio y solución de ecuaciones diferenciales parciales en dos dimensiones y tiempo.

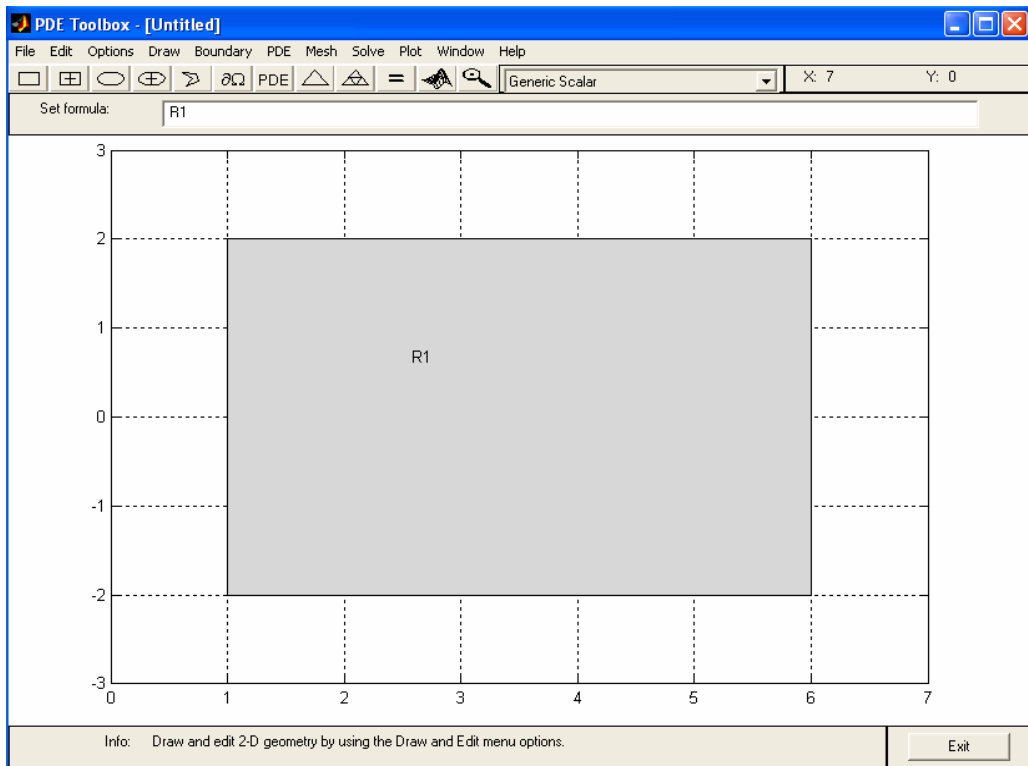
Los objetivos del PDE Toolbox son proveer herramientas que:

- Definir un problema PDE, es decir, definir una región 2-D, condiciones de borde y coeficientes PDE.
- Resolver el problema PDE numéricamente, es decir, generar una malla estructurada, discretizar las ecuaciones, y producir una solución aproximada.
- Visualizar los resultados.

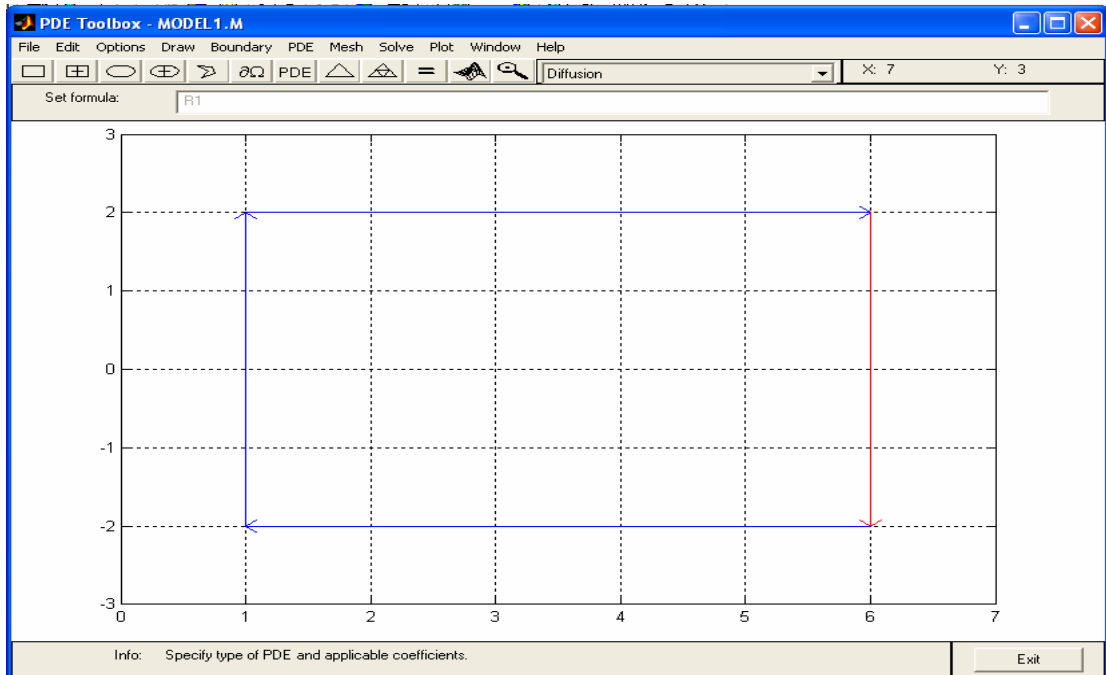
La elaboración de los perfiles sigue un procedimiento no tan complejo en el software; el cual se explica a continuación. El camino mas simple para definir un problema PDE es usar la interfaz gráfica de usuario (GUI) implementada en el pde tool.



Seleccionando el menú *options* se define la escala de los ejes y una grilla; con el menú *draw* se crea la geometría (rectangular, circular, elíptica ó poligonal).



En el sub-menú *aplication* se escoge el modo Diffusion entre los 10 modos disponibles.

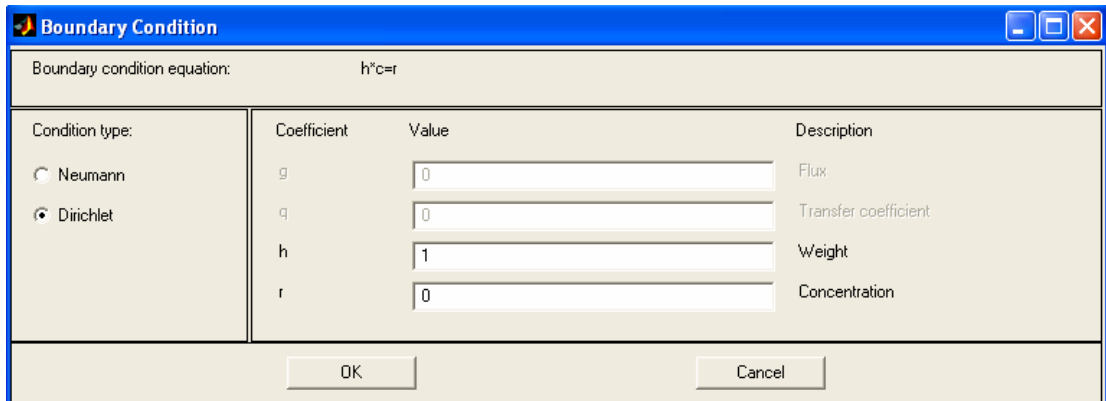


Al seleccionar la aplicación de *Diffusion*, la ecuación genérica que relaciona este fenómeno se presenta así:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) = Q \quad (6)$$

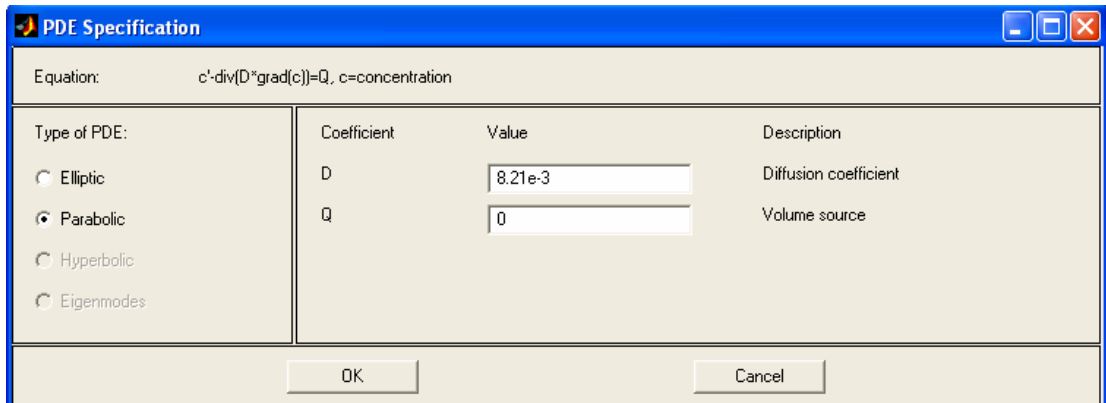
Donde C es la concentración, D es el coeficiente de difusión y Q es una fuente interna de cloruros. El proceso de difusión puede ser anisotrópico, en este caso D es una matriz de 2 X 2.

Posteriormente se especifican las condiciones de borde a la geometría.



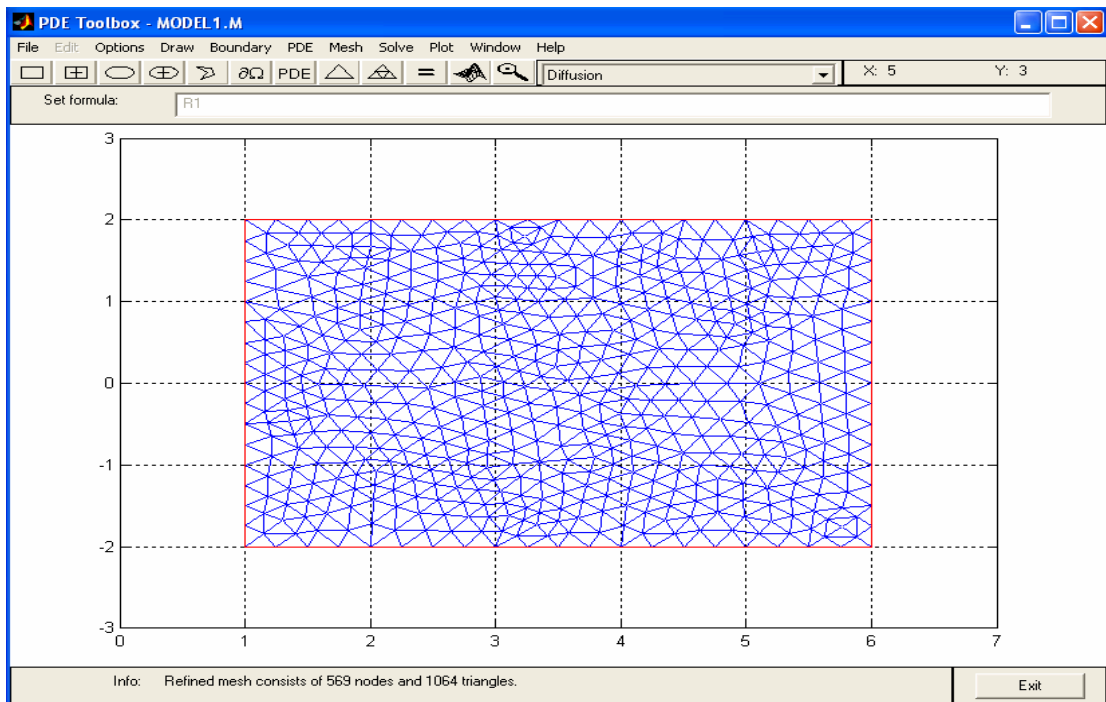
Las condiciones de borde pueden ser de tipo Dirichlet,  $h*c=r$ , donde la concentración,  $r$ , en la frontera es especificada; ó de tipo Neumann donde el flujo,  $n*D\nabla c$ , es especificado.

Del menú *PDE* se escoge el tipo de PDE y se asignan los correspondientes valores.



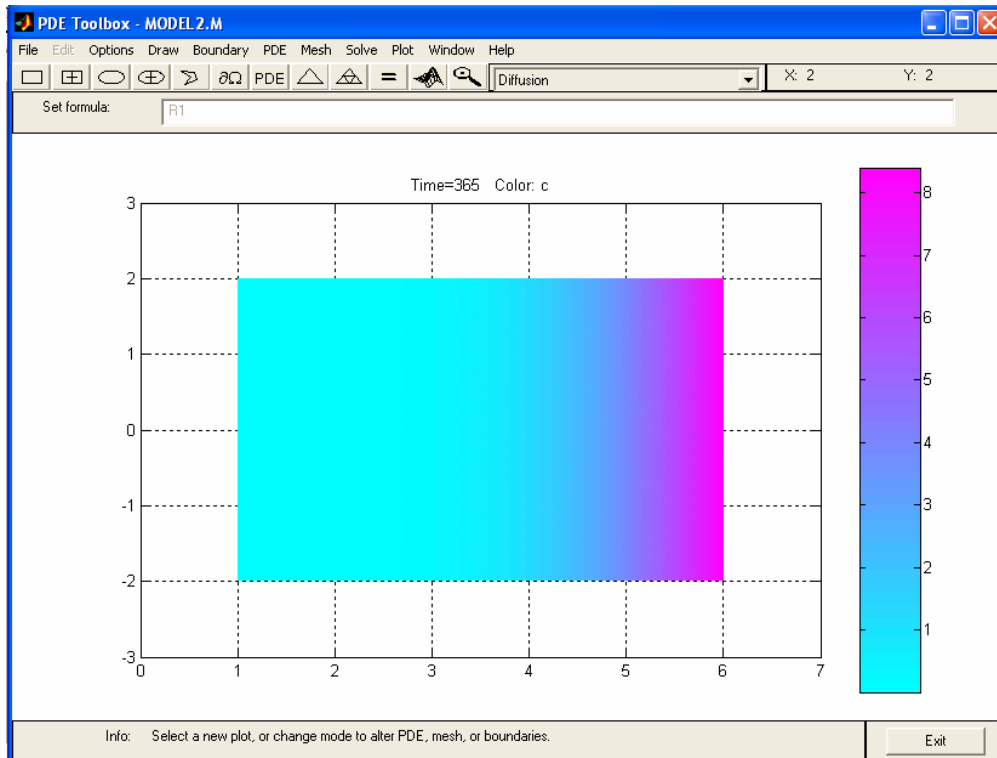
Se selecciona *PDE specification* definiendo el tipo de PDE como parabólico (ecuación que corresponde a un análisis de difusión) y se define el coeficiente de difusión; en cuanto al valor de  $Q$ , este es cero dado que no hay una fuente interna de cloruros.

Se enmalla y refina la geometría.



Del menú *solve* se definen parámetros como tiempo de análisis, concentración adicional y tolerancias y se resuelve el PDE.

La visualización de resultados puede hacerse a través de la interfaz gráfica, del menú *plot - parámetros* seleccionando el tipo de ploteo deseado (por defecto, la solución siempre aparece en gamma de colores).



Para la construcción de los perfiles concentración vs profundidad de penetración, se programó en MATLAB una función que grafica la información que se presenta en el pde tool, de la siguiente manera:

```

function Perfiles1()

load model1_information

s = size(Conc);
for i = 1:s(2)
    u = Conc(:,i); % Concentración por día
    ya = 0;
    xa = 1:5/50:6;
    xa = xa(1:50)'; % Coordenadas a las cuales se desea hallar las concentraciones
    za = tri2grid(p,t,u,xa,ya); % Función de interpolación para mallas discretizadas
    xx = 0:5/50:5;
    xx = xx(1:50); % Normalización de la coordenada x para iniciar en cero(0)
    if (i == 1) % Dibujar la grafica inicialmente
        f = plot(xx,za,'erasemode','xor');
        st = ['Dia ', num2str(i)];
        tx = text(0,5,st)
        axis([0 5 0 11]);
    else % Ajustar la grafica con los días posteriores a 1
        set(f,'ydata',za);
        st = ['Dia ', num2str(i)];
        set(tx,'string',st);
    end
    end
    pause(0.05); % Pausar la ejecución para mostrar la animación
end

```

## ANEXO 2. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA OBTENCIÓN DEL $D_{EF}$

Existen diversos métodos para evaluar la penetración del ión cloruro en el hormigón, algunos desarrollados a escala de investigación y otros normalizados, tales como:

Perfil de concentración: Este método tiene la ventaja de poder ser utilizado para la evaluación de estructuras de hormigón, mediante la toma de muestras o núcleos a diferentes profundidades, para posterior análisis de la concentración del ión cloruro. Con base en la curva de perfil (concentración – profundidad) puede determinarse el Coeficiente de difusión,  $D_{EF}$ , mediante la relación:

$$C(x,t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{X}{2 * \sqrt{D_{EF} * t}} \right) \right]$$

Donde  $C(x,t)$  es medida;  $C_0$  se conoce por extrapolación a  $X=0$  y  $D_{EF}$  se calcula mediante tratamiento matemático. Generalmente se pueden presentar fallos en el cálculo debido a que, además de la difusión, se presenta reacción del ión cloruro con los componentes del cemento y /o de las adiciones presentes y al determinar el ión cloruro total, se incluye en éste el ión cloruro enlazado.

Método AASHTO – T259 [38]: Consiste en colocar probetas de hormigón sumergidas en NaCl al 3% durante 90 días, al final de los cuales se determina el contenido del ión cloruro a diferentes profundidades. El análisis se hace de manera similar al caso anterior.

Técnica de conductividad eléctrica [39]: Consiste en el montaje de una celda de conductividad en la cual se registra en función del tiempo, la resistencia de un

núcleo de hormigón de 100 mm de diámetro durante su exposición a una disolución del ión cloruro.

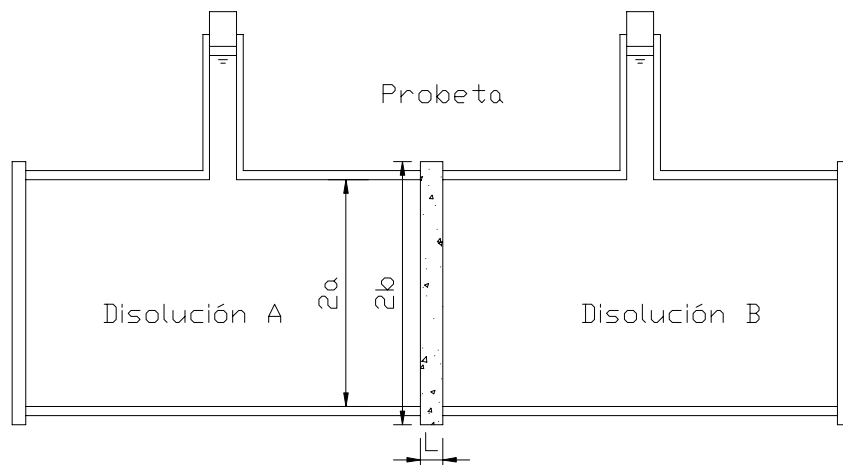
Celda de difusión manual: Consiste en colocar un disco del material entre dos disoluciones, una fuente de iones (A) y otra neutra (B). Esta técnica ha sido empleada con bastante éxito para evaluar el coeficiente de difusión del ión cloruro,  $D_{EF}$ , en morteros y hormigones, aplicando la primera ley de Fick,

$$J = -D^* \frac{dC}{dX} \quad (7)$$

$$J = -D^*(C_A - C_B) \quad (8)$$

donde J representa el flujo del ión que penetra en la solución B; L el espesor de la probeta y  $C_A$ ,  $C_B$  las concentraciones respectivas de cada una de las disoluciones.

**Figura No. 29 Celda de Difusión**



Teniendo en cuenta la cinética de transporte del cloruro, J puede expresarse como:

$$J = -\frac{V}{A} * \frac{dC_B}{dt} \quad (9)$$

siendo A el área de la probeta en contacto con la disolución y v el volumen de la disolución B.

Igualando las dos ecuaciones e integrando entre el tiempo inicial,  $t_o$ , y un tiempo t, se tiene:

$$\ln(C_A - C_B) = -\frac{DA}{VL} * (t - t_o) + \ln(C_A) \quad (10)$$

la cual corresponde a la ecuación de una línea recta [40] cuya intercepción con el eje y es  $\ln C_A$  y la pendiente es  $DA/VL$ . Si en las ecuaciones de flujo se considera  $C_B \ll C_A$  puede aproximarse a:

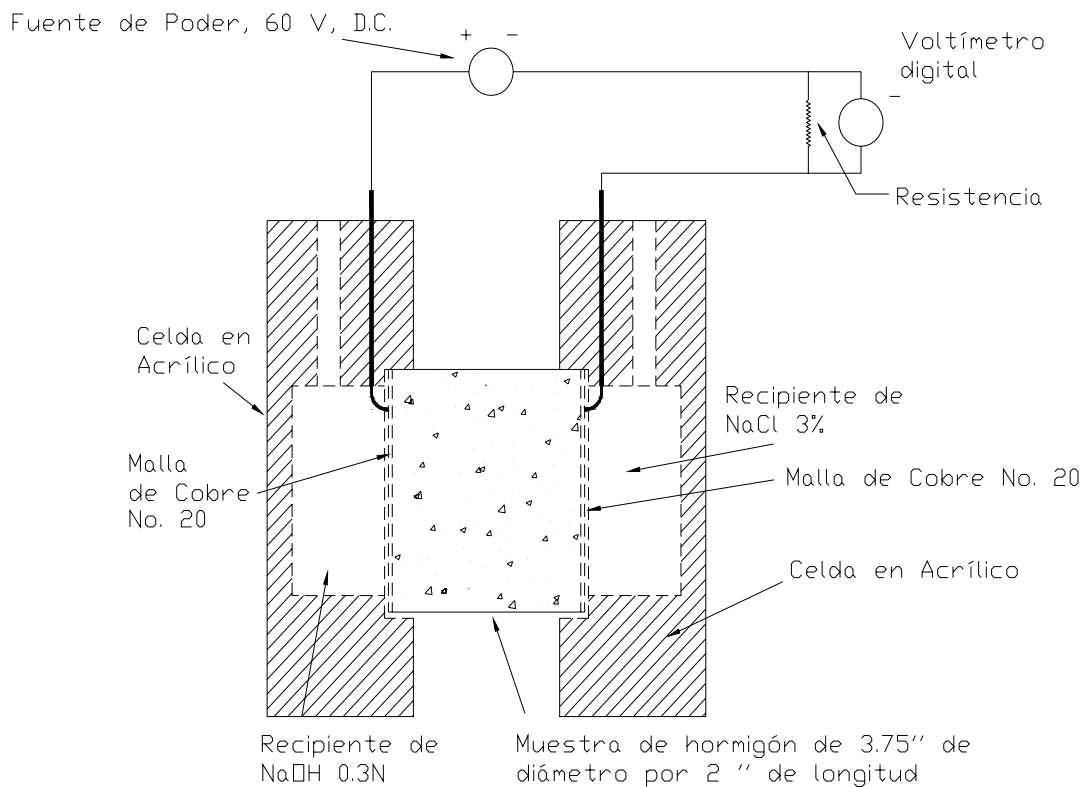
$$C_B = \frac{DA}{VL} * C_A * (t - t_o) \quad (11)$$

El coeficiente D puede calcularse [39] de la pendiente de la zona lineal del gráfico  $C_B$  en función de t. Para este caso  $C_A$  se considera aproximadamente constante. Esta técnica se considera como el método de laboratorio más apropiado, aunque presenta poca sensibilidad a materiales impermeables o bajas temperaturas. Una desventaja del método es el tiempo de ensayo, que dependiendo de la muestra puede tardar meses.

Norma AASHTO – 277: Adoptada en 1983 para evaluar la penetración del ión cloruro, incluye el uso de voltaje para acelerar su transporte. Debido a la buena

correlación con el método T259 de la misma norma y a su rapidez, fue aceptado como Norma ASTM (C1202) [41]. Utiliza probetas de 95 mm de diámetro y 51 mm de espesor. Las condiciones de trabajo en la celda son: disoluciones de NaOH 0.3N y NaCl 3%; y voltaje de 60 V. La carga total pasada, correspondiente a la integral de la corriente respecto al tiempo, durante un período de 6 horas, se considera una medida de la permeabilidad al ión cloruro. Los resultados obtenidos por esta técnica pueden interpretarse según la tabla No. 7 [42]

**Figura No. 30 Esquema del Equipo de Permeabilidad Rápida de Cloruros**



### **ANEXO 3. COMO PREVENIR LA CORROSIÓN?**

#### ***Selección del Cemento Apropriado***

Si solamente se tomara en consideración la corrosión de la armadura por los cloruros, con olvido de la carbonatación y la acción de los sulfatos, se podría pensar que el cemento más adecuado para un elemento estructural en exposición marina, sería el Tipo I y no el resistente a los sulfatos. En efecto, su pasta tiene un pH elevado, sustentado por una gran reserva alcalina, que mantiene la pasividad del acero y además, es rico en aluminatos de calcio al no contener adiciones. De esta manera, los aluminatos se combinarían con los cloruros que penetran del entorno, impidiendo la corrosión.

Sin embargo, los cementos adicionados son favorables para minimizar la permeabilidad a los cloruros debido a su capacidad para entrar en combinación, con los agentes agresivos.

El Comité del ACI 357 que trata de las estructuras offshore de concreto, acepta en obras marinas los cementos Portland tipos I, II ó III y los cementos Portland adicionados. También indica que el contenido de  $C_3A$  del cemento debe ser mayor que 4%, para la protección al acero y menor del 10% para garantizar la resistencia a los sulfatos.

Si se toma en cuenta los elementos de concreto ubicados entre la zona de alta y baja marea y aquella expuesta a las salpicaduras, podría adoptarse criterios más exigentes, indicando el empleo de un cemento Portland tipo V para estos elementos sujetos a mayor riesgo.

### **Control de calidad – Prácticas del concreto**

La primera defensa contra la corrosión del acero en el concreto es la calidad del concreto y un recubrimiento suficiente alrededor de las barras de refuerzo.

La relación agua cemento es el factor más importante en la protección de las armaduras, gobierna el volumen de vacíos capilares y su interrelación en el interior del concreto, siendo éste el vehículo para la penetración de las sales agresivas. Se ha establecido que el mínimo de vacíos se obtiene con relaciones a/c de 0,37.

El Comité del ACI 318 prescribe una relación a/c de 0,40 para los concretos expuestos al agua de mar o “spray” marino. El Comité 352 recomienda este mismo valor para la zona de salpicadura y para las construcciones aéreas, asumiendo un valor de 0,45 para los concretos sumergidos.

Un concreto de alta calidad tiene una relación (A/C) que es lo suficientemente baja para disminuir la penetración de las sales de cloruro y el desarrollo de la carbonatación. La relación (A/C) debe ser menor de 0,5 para reducir el ritmo de carbonatación y menor de 0,4 para minimizar la penetración de los cloruros.

Los concretos con bajas relaciones (A/C) pueden ser producidos mediante:

1. El incremento del contenido de cemento.
2. La reducción del contenido de agua utilizando aditivos reductores de agua y superplastificantes.
3. El uso de mayores cantidades de cenizas volantes, escorias u otros materiales cementantes.

Es conveniente considerar el contenido mínimo de cemento, como garantía de la formación de productos de hidratación, que aseguren el buen comportamiento del

concreto frente a la corrosión. Esta práctica generalizada en el continente europeo, ha sido adoptada por el comité 357 del ACI que recomienda un mínimo de  $356 \text{ kg/m}^3$ , para proteger el acero de la corrosión y un contenido máximo de  $415 \text{ kg/m}^3$  a efecto de evitar las fisuras por deformación térmica. Estos rangos se pueden utilizar en el país debido a que no existe una norma tal para ambiente marino en Colombia.

Adicionalmente a las condiciones establecidas en los párrafos anteriores, los Comités del ACI 357 y 318 estipulan una resistencia mínima, de 35 Mpa y de 42 Mpa respectivamente para los elementos de concreto expuestos a ataques severos (valores también aplicables a Colombia). Esta prescripción es conveniente debido a que el ensayo de resistencia está generalizado y es de fácil ejecución, por lo que resulta útil en el control de calidad, a diferencia de los mecanismos de control que es necesario asegurar para verificar el contenido de cemento y la relación agua cemento que se aplica en obra.

Otro ingrediente para la buena calidad del concreto es el aire incorporado que reduce la exudación (sangrado) y el incremento de la permeabilidad debido a los canales del agua de exudación. El descascamiento de la superficie del concreto puede acelerar los daños por corrosión de las barras de refuerzo embebidas. Una planificación apropiada de las operaciones de acabado es necesaria para asegurar que el concreto no se descascare, o se fisure excesivamente.

Una correcta cantidad de acero ayudará a mantener una fisuración escasa. El manual de ACI 224 es una ayuda para minimizar la formación de grietas que podrían ser dañinas para el acero embebido. En general, el ancho máximo de fisura permisible es de 0.2 mm en un ambiente con sales de deshielo y de 0.15 mm en un ambiente marino.

Un adecuado recubrimiento del acero de refuerzo es también un factor importante. La penetración de cloruros y la carbonatación ocurrirán, inclusive, en la superficie exterior de los concretos de baja permeabilidad. Si se incrementa el recubrimiento se demorará el comienzo de la corrosión. Por ejemplo, el tiempo necesario para que los iones cloruro alcancen una barra de acero a 5 cm (2 pulgadas) de la superficie es 4 veces el tiempo necesario para un recubrimiento de 2.54 cm (1 pulgada). El manual ACI 318 recomienda un mínimo de 1½ pulgadas (aprox. 4 cm) de recubrimiento para la mayoría de las estructuras y lo incrementa a 2 pulgadas (aprox. 5 cm) de recubrimiento para la protección contra las sales de deshielo. El manual ACI 357 recomienda 2½ pulgadas (aprox. 6 cm) de recubrimiento mínimo en ambientes marinos. Si se utilizan agregados más grandes, se requiere un mayor recubrimiento. Para agregados mayores de ¾" (20 mm), una regla sencilla es añadirle al tamaño máximo nominal del agregado, la magnitud de ¾" adicionales de recubrimiento para la exposición a sales de deshielo, o de 1¾" (45 mm) de recubrimiento para la exposición a ambiente marino. Por ejemplo, un concreto con tamaño de agregado de 1" en exposición marina deberá tener un recubrimiento mínimo de 2 ¾" .

El concreto debe estar adecuadamente compactado y curado. Se necesita un curado húmedo mínimo de 7 días a 21°C para el concreto con relación A/C de 0.4, mientras que serían necesarios 6 meses para uno de relación A/C de 0.6 para obtener un desempeño equivalente. Numerosos estudios muestran que la porosidad del concreto se reduce significativamente con el incremento del tiempo de curado y por ende se mejora la resistencia a la corrosión.

Un factor adicional que facilita la corrosión lo constituye las fisuras producidas por asentamiento plástico y contracción, ocasionadas por deficiencia del diseño de mezcla o por curado inadecuado del concreto. También contribuyen a la corrosión las fisuras por deformación térmica, que se presenta tardíamente y son

ocasionadas por exceso en la dosificación de cemento, por encima de los 400 kg/m<sup>3</sup>. En todo caso todas las fisuras son peligrosas cuando exceden los 0,4 mm.

### ***Concretos modificados y sistemas de protección contra la corrosión***

Se puede lograr una mayor resistencia a la corrosión mediante la utilización de aditivos para el concreto. La microsílíce (humo de sílice), las cenizas volantes y las escorias de alto horno, reducen la permeabilidad del concreto a la penetración de los iones cloruro. Los inhibidores de la corrosión, tales como el nitrito de calcio, actúan para prevenir la corrosión en presencia de los iones cloruro. En todos los casos estos se añaden a un concreto de alta calidad con relación (A/C) menor o igual a 0,45.

Los repelentes al agua (hidrófugos) pueden reducir el ingreso de humedad y de cloruros en una cantidad notable. Sin embargo el manual ACI 222 indica que no son efectivos para lograr una protección a largo plazo. Partiendo de que un concreto de buena calidad ya posee una baja permeabilidad, los beneficios adicionales de los repelentes de agua no son tan significativos.

Otras técnicas de protección incluyen las membranas protectoras, la protección catódica, las barras de refuerzo recubiertas con resinas epóxicas y los selladores para concreto (si son reaplicados cada 4 o 5 años).