



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA
EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR OAXACA

DURABILIDAD DE CONCRETO
EXPUESTO A UN AMBIENTE MARINO

Tesis que presenta
Lidia Argelia Juárez Ruiz

para obtener el grado de
Doctor en Ciencias

en la Especialidad de
Conservación y Aprovechamiento de los Recursos Naturales

Directores de Tesis
Dr. Pedro Castro Borges
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Oaxaca, Oax., México.

Julio 2010



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca, Oax., el día 26 del mes julio del año 2010, el (la) que suscribe Juárez Ruiz Lidia Argelia alumno (a) del Programa de Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de los Recursos Naturales con número de registro B051333, adscrito a CIIDIR Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Doctores Pedro Castro Borges y Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y cede los derechos del trabajo intitulado Durabilidad de concreto expuesto a un ambiente marino, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección lidiargelia@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Lidia Argelia Juárez Ruiz

Nombre y firma



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

Dedicatoria

A mis hijos

A mis padres y familiares

A mis amigas y amigos

Por su apoyo incondicional y afecto sincero

Índice

Índice general.....	I
Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	VIII
Lista de Figuras	XI
Lista de Tablas	XV

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Problemática sobre durabilidad del concreto	2
1.2 Antecedentes sobre predicción de durabilidad	4
1.3 Objetivos	9
1.4 Hipótesis	10
1.5 Delimitación del problema	10
Capítulo 2. Marco Teórico	11
2.1 Conceptos Básicos	12
2.1.1 Durabilidad del concreto	14
2.1.2 Vida útil	15
2.1.3 Penetración de cloruros	19
2.2 Absorción capilar	21
2.2.1 Método de Göran Fagerlund	22
2.2.2 Sortividad	23
2.3 Difusividad hidráulica	23
2.3.1 Teoría de flujo insaturado en materiales porosos	24
2.3.2 Sortividad y Difusividad Hidráulica	25

2.4 Modelos de predicción de vida útil de servicio	26
2.4.1 Difusión de cloruros	27
2.4.2 Contribuciones de los modelos de predicción	28
Capítulo 3. Experimentación	34
3.1 Materiales y métodos	35
3.1.1 Materiales para la fabricación de especímenes (vigas DURACON)	35
3.1.2 Materiales y métodos empleados en el estudio de absorción capilar y difusividad hidráulica de los especímenes de concreto OPC, HSC Y SCC (Cano,2003)	36
3.1.3 Métodos empleados en el estudio de los especímenes de concreto OPC (vigas DURACON)	38
Capítulo 4. Resultados	41
4.1 Determinación de parámetros de absorción capilar y su relación con la durabilidad del concreto	42
4.1.1 Relación de los parámetros de Fagerlund con la sortividad	43
4.2 Determinación de la difusividad hidráulica	45
4.2.1 Determinación de la difusividad hidráulica a partir de los perfiles de penetración.	45
4.2.2 Determinación de la difusividad hidráulica a partir de la sortividad.	47
4.2.3 Difusividad hidráulica en concretos DURACON	50
4.2.4 Relación con la durabilidad del concreto	52
4.3 Análisis de parámetros ambientales y clasificación de microclimas en función de su corrosividad	54
4.3.1 Parámetros ambientales	54
4.3.2 Clasificación de microclimas	60
4.4 Difusión de cloruros	62
4.4.1 Determinación de los perfiles concentración de cloruros	62
4.4.2 Determinación de los coeficientes de difusión	67
4.4.3 Evaluación de modelos de difusión de cloruros	68

4.5 Modelo de predicción de vida útil	73
4.5.1 Concentración superficial de cloruros	73
4.5.1.1 Modelo de concentración superficial de cloruros	74
4.5.2 Coeficiente de Difusión de cloruros variable, $D_e(t)$.	76
4.5.2.1 Validación del modelo de difusión de cloruros	77
4.5.3 Programas con Modelos de predicción de vida útil	79
4.5.3.1 Life-365 Service Life Prediction Model™	79
4.5.4 Adecuación de Modelo de predicción	81
4.5.4.1 Coeficiente de difusión y Concentración superficial constantes	81
4.5.4.2 Coeficiente de difusión y Concentración superficial variables	84
Capítulo 5. Discusión de resultados	88
5.1 Parámetros de absorción capilar	89
5.2 Difusividad Hidráulica	90
5.3 Parámetros ambientales	91
5.4 Difusión de cloruros y modelos de predicción	92
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones	96
Bibliografía	100
Anexos	
A. Modelos de predicción de Vida útil, variables y parámetros considerados	108
B. Estudio de Sortividad	112
C. Estimación del grado de corrosividad de la atmósfera de acuerdo a la ISO 9223:1992	116
D. Validación del modelo de concentración superficial de cloruros	121

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional,

Al CIIDIR Unidad Oaxaca,

Al Programa de Becas de Movilidad Nacional Santander-Universia,

Al CINVESTAV Unidad Mérida,

A la SIP-IPN por el apoyo a los proyectos con claves SIP 20060430, 20070154 y 20080213,

Al CONACYT por el apoyo a los proyectos Ciencia Básica 57420 y CIAM 54826,

A los Doctores Pedro Castro Borges y Prisciliano F. de Jesús Cano Barrita por su Dirección de tesis,

Al Doctor Celerino Robles Pérez por su orientación y apoyo durante mi preparación académica.

A los miembros del Comité Tutorial y Comisión Revisora de Tesis por sus valiosas aportaciones y apoyo para la redacción de esta tesis.

A la Ing. Mercedes Balancán Zapata, auxiliar de investigación del CINVESTAV, por su apoyo en la facilitación de información de datos y capacitación en pruebas de laboratorio.

RESUMEN

La durabilidad de concreto expuesto a un ambiente marino es uno de los temas poco abordados en la actualidad a nivel nacional y de gran importancia por el número de estructuras que se construyen en este ambiente. México posee un amplio litoral sobre el Golfo de México y el Océano Pacífico cuyo ambiente ha sido poco estudiado a través de parámetros que lo definan y relacionen con la durabilidad de las estructuras de concreto.

En este ámbito, es de interés en esta tesis el aportar conocimientos -utilizando como modelo de estudio una zona del Golfo de México- del comportamiento de concreto expuesto a un ambiente marino, particularmente en el Puerto de Progreso en Yucatán, México.

El objetivo principal consistió en evaluar la durabilidad de vigas de concreto ordinario (OPC) expuestas a ambiente marino, mediante la determinación del nivel de agresividad del ambiente de exposición, de los parámetros de absorción capilar y del Coeficiente de Difusión de cloruros, para obtener un modelo de predicción de vida útil de servicio del concreto. Las vigas correspondieron a dos diseños de mezclas con relación agua/cemento de 0.45 y 0.65, elegidos por su alta representatividad en las construcciones que se realizan en el país y forman parte de un proyecto nacional sobre la "Durabilidad de las estructuras de concreto" en México (DURACON), que a su vez forma parte de un proyecto Iberoamericano para conocer el nivel de corrosividad y la durabilidad del concreto en países de América Latina, Portugal y España.

Desde el inicio y durante el desarrollo de este trabajo se ha realizado una investigación bibliográfica y revisión de literatura sobre los temas de durabilidad del concreto, vida útil de servicio, absorción capilar, difusividad hidráulica, proceso de penetración de cloruros en el concreto, modelos de predicción de vida útil (etapa de iniciación) que se resume en el marco teórico de la tesis.

El proceso metodológico a seguir para lograr el objetivo consistió en la realización del monitoreo y análisis de parámetros ambientales durante un periodo de cinco años y la clasificación del microclima en función de su grado de corrosividad, basándose en los criterios dados por la norma ISO 9223:1992 en el ambiente marino de exposición de las vigas de concreto. Paralelamente se realizó la determinación de los parámetros de absorción capilar por el método de Fagerlund y de la sortividad (ASTM C 125), así como de la difusividad hidráulica (Método de Lockington), encontrando la correlación existente de estos parámetros con respecto a la relación agua/cemento.

Se encontró una relación altamente significativa entre la sortividad y los parámetros de Fagerlund analizados en concreto dentro de un rango de porosidad efectiva de 7 a 12%. La tasa de cambio entre sortividad y sorción fue de 0,982. Los valores de sortividad están dentro del rango aceptable de penetración de agua, establecido en la literatura como criterio de durabilidad del concreto. Con el fin de darle validez a los resultados, estas determinaciones se efectuaron ampliando la base de datos del proyecto DURACON con datos de absorción capilar de otros proyectos de investigación, información presentada en los anexos de la tesis.

Se realizaron ensayos centrados principalmente en la caracterización del proceso de penetración de cloruros en el concreto; se obtuvieron trozos de las vigas de concreto expuestas, se disgregaron y pulverizaron. La determinación de cloruros se realizó por medio del método del ión selectivo ó potenciométrico. Mediante la técnica de perfiles de concentración de cloruros se obtuvieron los coeficientes de difusión efectivos del cloruro a diferentes tiempos de exposición, aplicando la solución de Crank a la 2ª. Ley de Fick.

Se determinó la correlación que existe entre las características del ambiente estudiado y el fenómeno de penetración de cloruros. Se evaluaron modelos de predicción de vida útil existentes, dados por otros autores en la literatura, con los datos de esta investigación y se discutió su validez y aplicabilidad para este microclima.

La principal aportación de este trabajo consiste en el desarrollo de un modelo que describe la dinámica de la concentración superficial de cloruros, validado con datos de otro proyecto de investigación realizado en el mismo ambiente de exposición, en el cual se estudiaron cilindros de concreto elaborados a partir de cinco diferentes mezclas de concreto ordinario (OPC), ubicados a diferentes distancias del mar. El modelo es oscilatorio de tipo sinusoidal y responde a un patrón de comportamiento cíclico anual relacionado estrechamente con los parámetros climáticos del sitio de exposición. Este modelo es fundamental para explicar el comportamiento de la concentración superficial de cloruros y, en consecuencia, el tipo de los perfiles de penetración de cloruros, en los que se basa la determinación del coeficiente de difusión. De ahí la conclusión de que un modelo de predicción de vida útil para este microclima debe considerar una concentración superficial y un coeficiente de difusión variables, parámetros fundamentales utilizados en los modelos de predicción revisados y en los que se consideran constantes generalmente. El modelo desarrollado para analizar la concentración superficial de cloruros permite conocer que el contenido crítico de cloruros para lograr la despasivación del acero de refuerzo no es un

valor único y permanente, sino que es dependiente del tiempo y la concentración superficial de cloruros.

Finalmente, se propone la adecuación de un modelo de difusión variable, basado en las tendencias encontradas.

Es importante hacer notar que con los resultados de este trabajo se da otro enfoque en la consideración para la inclusión de parámetros para el desarrollo de un modelo de predicción de vida útil, al relacionar el efecto climático en ciclos anuales y multianuales en el proceso de difusión de cloruros.

Este comportamiento cíclico de los parámetros ambientales estudiados y su influencia en las variables incluidas en los modelos de predicción muestran la necesidad de hacer más investigaciones de largo término que se apeguen a las características del lugar de exposición y del tipo de materiales empleados, así como la definición del nivel de corrosividad por áreas geográficas para su eventual clasificación. Aunque son importantes los estudios a nivel de laboratorio para reproducir ciertas condiciones requeridas, es fundamental el estudio *in situ* de las estructuras de concreto armado, pues son las que están expuestas al ambiente, bajo diferentes niveles de agresividad.

ABSTRACT

Durability of concrete exposed to marine environment is one of the subjects that are not currently addressed in Mexico and of great importance by the number of structures that are built in this environment. Mexico has an extensive coastline on the Gulf of Mexico and the Pacific Ocean, whose environments has been little studied by parameters that define and relate to the durability of concrete structures.

In this context, it is of interest in this thesis the provision of knowledge, using a specific area of the Gulf of Mexico as model, about the behavior of concrete exposed to marine environment, particularly in the port of Progreso, Yucatan, Mexico.

The main objective was to evaluate the durability of ordinary concrete beams (OPC) exposed to marine environment by determining the level of aggressiveness of the environment, the capillary absorption parameters and chloride diffusion coefficient, to obtain a concrete service life predictive model. The beams were made with two mixture designs, with water-cement ratio of 0.45 and 0.65. They were chosen for their high representation in the Mexican construction industry. This work is part of a national project on the durability of concrete structures in Mexico country (DURACON). Mexico has an extensive coastline on the Gulf of Mexico and the Pacific Ocean whose environment has been low studied by parameters that define and relate to the durability of concrete structures.

From the beginning and during the course of this work was carried out a bibliographic and literature review on the subject of concrete durability, service life, capillary absorption, hydraulic diffusivity, chlorides penetration process into the concrete, predictive models of service life (initiation stage), which is summarized in the background chapter and theoretical framework of this thesis.

The methodology followed to achieve the objective was the monitoring and analysis of environmental parameters during a period of five years, and the microclimate classification in terms of their corrosivity degree, based on the criteria given by ISO 9223: 1992 in the marine environment. Parallely was made the determination and analysis of capillary absorption parameters by Fagerlund method and sorptivity (ASTM C 125), and hydraulic diffusivity (Lockington method), finding their correlation with the water/cement ratio.

In a range of effective porosity of 7-12%, there was a highly significant relationship between the sorptivity and Fagerlund parameters. The change rate between sorptivity and sorption was 0.982. Sorptivity values are within the acceptable range of water penetration, bibliographically given as a criterion for concrete durability. In order to give validity to the

results, these determinations were made to expand the database project DURACON with capillary absorption data of other research projects. This database is presented in the annexes.

Assays mainly focused on the characterization of chloride penetration in concrete were performed. It was obtained slices of concrete beams exposed, and they were disintegrated and pulverized. Chloride determination was conducted by potentiometric or ion selective method. The chloride concentration profiles technique was used to obtain the effective diffusion coefficients at different times of exposure. This was made applying the Crank's solution to the 2nd. Fick's Law.

Correlation between environmental characteristics and the phenomenon of chloride penetration was analyzed. Service Life Prediction models given by other authors in the literature were evaluated with research data of this thesis and their validity and applicability for this microclimate were discussed.

The main contribution of this work was the development of a model to describe the dynamics of chloride surface concentration in concrete. This model was tested with data from another research project developed in the same environment of exposure. Last project considered concrete cylinders made from five different mixtures of ordinary concrete (OPC), located at different distances from the sea. The surface concentration model is sinusoidal oscillatory type. It responds to an annual cyclic behavior closely related to climatic parameters of the exposure site. This model is crucial to explain the behavior of the chloride surface concentration and hence the rate of chloride penetration profiles in which is based the diffusion coefficient determination. Hence the conclusion that a life prediction model useful for this microclimate should be considered a surface concentration and diffusion coefficient variables, key parameters that are considered generally constant in the predictive models reviewed. This surface concentration model of chloride allow us know that the chloride critical content to achieve the reinforcement depassivation is not a unique and permanent value. This value is dependent on time and the chloride surface concentration.

Finally, we introduce the suitability of a variable diffusion model, based on trends found.

It is important to note that the results of this work provides another approach in the consideration of parameters for a predictive life model. It does relate to the climate and multi-annual cycles in the chloride diffusion process. The cyclic behavior of the environmental parameters studied and their influence on the model prediction variables show the need for more long term research according to the exposure characteristics and the type of materials used. Also the corrosivity level definition by geographical areas for a future

classification. Although the studies in laboratory are important to reproduce controlled conditions, the studies of reinforced concrete structures *in situ* are fundamental, because are those who are exposed to the environment under different levels of aggressiveness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2.I. Modelo holístico de deterioro del concreto (Mehta, 1997)

Figura 2.1.I Modelo conceptual de la durabilidad de estructuras de concreto, partiendo de la interrelación entre el concreto y el ambiente de exposición, hasta el desarrollo de modelos matemáticos basados en la caracterización física, química y/o mecánica del concreto armado

Figura 2.1.2.I. Esquema de vida útil de estructuras, desempeño en función del tiempo (Helene, 2003)

Figura 2.1.2.II. Modelo de dos etapas de daño ocasionado por la interacción estructura ambiente (Mehta, 1997)

Figura 2.1.2.III. Determinación de la vida de servicio y estados límite con respecto a la corrosión del acero de refuerzo (Siemes & Cowi, 1999)

Figura 2.1.2.IV. Principales procesos de deterioro del concreto que inducen la corrosión y están asociados a fenómenos de transporte

Figura 3.1.3.I Vigas de concreto DURACON, indicando la colocación del refuerzo y los cortes efectuados, cara principal expuesta a vientos dominantes y vista de la estación climatológica de CONAGUA en Progreso, Yucatán, Mex.

Figura 3.1.3.II Diagrama de vigas de concreto DURACON, indicando su colocación respecto a los vientos dominantes y los cortes efectuados.

Figura 3.1.3.III Técnica para obtención de polvo y Método de ión selectivo para determinación de cloruros

Figura 4.1.1.I. Correlación entre sortividad, s y resistencia a la penetración del agua, m

Figura 4.1.1.II. Correlación entre sortividad, s y Porosidad específica, ϵ_e

Figura 4.2.1.I(a) Datos de perfiles transformados de Boltzmann (PTB); (b) Difusividad en función del contenido de humedad; (c) Perfiles de penetración de agua originales comparados con los perfiles obtenidos a partir de la difusividad (perfiles simulados).

Figura 4.2.1.II. Difusividad hidráulica, D ($\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$), calculada a partir de los perfiles de penetración originales, para especímenes de cuatro mezclas de concreto con régimen de curado HMC28D

Figura 4.2.1.III. Comparación de los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) originales que corresponden a una función polinomial obtenidos para las mezclas OPC, HSC, SCC30 y SCC50, para cada régimen de curado, contra la serie de datos originales graficados en función de Φ . (El símbolo \blacklozenge corresponde a los datos de PTB originales y ---- corresponde a la función polinomial.)

Figura 4.2.2.I. Valores de sortividad para las cuatro mezclas de concreto (OPC, SC, CC30 y SCC50) y los seis regímenes de curado correspondientes.

Figura 4.2.2.II. Comparación de la Difusividad hidráulica y perfiles transformados de Boltzmann (PTB), obtenidos mediante los perfiles de penetración y a partir del valor de sortividad, aplicando el método de Lockington para una función exponencial y una función potencial.

Figura 4.2.2.III. Comparación de los perfiles transformados de Boltzmann obtenidos para las mezclas OPC, HSC, SCC30 y SCC50 mediante la aplicación de la función exponencial, contra los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) originales que corresponden a una función polinomial, para cada régimen de curado. El símbolo \blacklozenge corresponde a los datos de PTB originales y — corresponde a la función exponencial del método de Lockington

Figura 4.2.3.I. Modelo de difusividad tipo exponencial $D=D_0e^{6\theta}$ para la relación $a/c=0.45$ con $D_0=0.0082$ y relación $a/c=0.65$ con $D_0=0.0102$

Figura 4.2.3.II. Perfiles de penetración de humedad obtenidos para la rel a/c 0.45 (a) y rel a/c 0.65 (b), concretos DURACON

Figura 4.2.3.III. Perfiles de Boltzmann simulados con $n=6$, obtenidos aplicando el Método de Lockington.

Figura 4.2.4.I Comparación de difusividad hidráulica del concreto de las mezclas DURACON contra concreto OPC y HSC ($n=6$) hidráulica

Figura 4.2.4.II. Modelo de correlación entre sortividad y Difusividad

Figura 4.3.1.I. Variación anual de la temperatura (T) media en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.II. Patrón de comportamiento cíclico multianual de la temperatura, periodo 2003-2007, en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.III. Variación de la Humedad Relativa, HR. (a) Anual (b) Multianual. Valores de la media en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex., de enero 2003 a diciembre 2007.

Figura 4.3.1.IV. Patrón de comportamiento cíclico multianual de humedad relativa y temperatura (T), promedio mensual. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.V. Variación de la Precipitación pluvial (Pp), Periodo 2003-2007 destacando el periodo de lluvias extraordinarias. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.VI. Variación de la Precipitación pluvial (Pp), Periodo 2003-2007 destacando el periodo de lluvias extraordinarias. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.VII. Variación de la Precipitación pluvial (Pp), Periodo 2005-2007. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.VIII. Variación del FTDH, promedio mensual y promedio anual, periodo 2003-2007. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.IX. Variación del FTDH, patrón de comportamiento multianual, periodo 2003-2007, en el Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.X Contenido de cloruros en la atmósfera ($Cl/mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.1.XI. Contenido de cloruros en la atmósfera ($Cl/mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) comparado con la precipitación pluvial (mm), (a) periodo 2003-2007 y (b) periodo May/05-Dic/07, en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

Figura 4.3.2.I. Factor de humectación (FTDH), promedio mensual, en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex.

Figura 4.3.2.II. Concentración de sulfatos ambientales, promedio mensual, en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex.

Figura 4.4.1.I. Perfiles de penetración de cloruros de las 3 vigas "DURACON" relación $a/c=0.45$ a tres edades de exposición (a) 480 días, (b) 942 días y (c) 1476 días

Figura 4.4.1.II. Perfiles de penetración de cloruros de las 3 vigas "DURACON" relación $a/c=0.65$ a tres edades de exposición (a) 480 días, (b) 942 días y (c) 1476 días

Figura 4.4.1.III. Perfiles de penetración de cloruros libres con respecto al tiempo, valores promedio de tres vigas, para la relación a/c de 0.45 (a) y 0.65 (b)

Figura 4.4.1.IV. Perfiles de penetración de cloruros libres con dos frentes de penetración, — cara expuesta a vientos dominantes y ---- cara no expuesta, para tres tiempos de exposición. Los valores corresponden al promedio de tres vigas.

Figura 4.4.3.I Difusión modelada con base en la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick a partir de los datos originales de los perfiles promedio de concentración de cloruros libres, $C(x,t)$, relación $a/c=0.45$

Figura 4.4.3.II Difusión modelada con base en la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick a partir de los datos originales de los perfiles promedio de concentración de cloruros libres, $C(x,t)$, relación $a/c=0.65$

Figura 4.4.3.III Modelado de los coeficientes de difusión efectivos D_e constante con base en el modelo de Crank, a partir de datos originales de concentración de cloruros en función del tiempo $C(x,t)$, para dos relaciones agua/cemento (a) 0.45 y (b) 0.65. Se aprecian los dos frentes de penetración.

Figura 4.5.1.I Tendencia de la Concentración superficial, C_s , con respecto al tiempo

Figura 4.5.1.1.I Desarrollo del modelo de concentración superficial en función del tiempo, $C_s(t)$, y ubicación de la C_s correspondiente a las dos relaciones a/c de 0.45 y 0.65 de acuerdo a la fecha de muestreo de especímenes.

Figura 4.5.1.1.II. Comparación entre cloruros ambientales y el modelo de concentración superficial

Figura 4.5.2.I Modelo potencial de difusión de cloruros para relación $a/c=0.45$

Figura 4.5.2.II Modelo exponencial de difusión de cloruros para relación $a/c=0.65$

Figura 4.5.2.1.I Modelado del coeficiente de difusión efectivo respecto al tiempo

Figura 4.5.2.1.II Modelo II para determinar Coeficientes de difusión en función de la relación a/c

Figura 4.5.2.1.III Comparación de los Modelos I y II del Coeficiente de difusión de cloruros en función de la relación a/c y el tiempo

Figura 4.5.2.1.IV. Comportamiento de D_e con variación cíclica en función de C_s

Figura 4.5.3.1.I Variabilidad del coeficiente de difusión de cloruros con relación al tiempo, C_s y D_e constantes, en el modelo LIFE-365TM

Figura 4.5.3.1.II Variabilidad de la concentración superficial con respecto al tiempo en el modelo LIFE-365TM

Figura 4.5.4.1.I Determinación de T_i en función de dc , para las dos relaciones a/c 0.45 y 0.65

Figura 4.5.4.2.I Perfiles de concentración de cloruros a partir de una concentración superficial variable y coeficiente de difusión variable, respecto al tiempo dado en meses, relación $a/c = 0.45$

Figura 4.5.4.2.II Perfiles de concentración de cloruros a partir de una concentración superficial variable y coeficiente de difusión variable, respecto al tiempo dado en meses, relación $a/c = 0.45$

Figura 4.5.4.2.III Perfil de concentración de cloruros en la zona de recubrimiento de concreto, 1.5, 2 y 3 cm, con C_s y D_e variables, relación $a/c 0.45$

Figura 4.5.4.2.IV Perfil de concentración de cloruros en la zona de recubrimiento de concreto, 1.5, 2 y 3 cm, con C_s y D_e variables, relación $a/c 0.65$

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.2.I. Estudios en concreto expuesto a ambiente marino, natural y simulado
- Tabla 1.2.II. Modelos de predicción, con capacidad y limitaciones de predicción (etapa de iniciación)
- Tabla 2.1.2.I Vida de Proyecto de estructuras de concreto armado (Mena, 2005).
- Tabla 2.1.3.I Tabla de Pullar-Strecker,1987 (Baker,1992), que indica el riesgo de corrosión en función del contenido de cloruros y las condiciones del concreto adyacente al refuerzo.
- Tabla 3.1.1.I. Características de las mezclas de concreto OPC, de las vigas DURACON.
- Tabla 3.1.2.I. Características de las mezclas de concreto OPC, HSC y SCC (Cano,2003).
- Tabla 3.1.2.II. Regímenes de Curado de los especímenes (Cano,2003).
- Tabla 3.1.3.I. Fechas y edades de especímenes analizados (vigas DURACON).
- Tabla 4.1.I. Parámetros de absorción capilar de dos mezclas de concreto (DURACON).
- Tabla 4.1.II. Especificación de valor de sortividad por Durabilidad (Ho & Lewis,1987)
- Tabla 4.1.III. Valores de Porosidad efectiva ϵ_e recomendados por Durabilidad en el Manual DURAR (1998)
- Tabla 4.1.1.I. Modelo de correlación entre sortividad (s) y resistencia a la penetración del agua (m) y entre sortividad (s) y Porosidad específica (ϵ_e)
- Tabla 4.2.3.I. Modelo de Difusividad Hidráulica ($\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$) para concretos DURACON.
- Tabla 4.2.4.I Relación entre sortividad y Difusividad Hidráulica, mezclas OPC y HSC.
- Tabla 4.2.4.II Parámetros de durabilidad del concreto con relaciones a/c de 0.45 y 0.65
- Tabla 4.3.2.I. Concentración de cloruros y sulfatos ambientales, promedio anual, en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex.
- Tabla 4.3.2.II. Determinación de categoría de corrosividad de la atmósfera en Progreso, Yucatán, Mex
- Tabla 4.4.2.I. Coeficiente de difusión D_e ($\text{m}^2 \text{seg}$) para dos relaciones a/c y tres tiempos de exposición.
- Tabla 4.4.2.II. Concentración superficial C_s (%ppconcreto) para dos relaciones a/c y tres tiempos de exposición
- Tabla 4.4.3.I Coeficientes de Difusión calculados a partir de modelos de la literatura.
- Tabla 4.5.1.1.I Concentración superficial de cloruros C_s (% Cl libres ppconcreto)
- Tabla 4.5.2.I Modelo I de difusión de cloruros en función del tiempo $D_e(t)$ para relaciones a/c de 0.45 y 0.65
- Tabla 4.5.3.1.I. Resultados aplicando el programa Service Life 365 a los datos de las vigas DURACON.
- Tabla 4.5.4.1.I Determinación del tiempo para inicio de corrosión (T_i) mediante la Ecuación [55]
- Tabla 4.5.4.1.II Resultados del Análisis de sensibilidad para $T_i(d_c)$, dando solución a la Ecuación [51]

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA SOBRE DURABILIDAD DEL CONCRETO

El incremento en la proporción de infraestructura de concreto armado que muestra signos de deterioro ocasionados por el ambiente al que está expuesta, ha llamado la atención de diversas autoridades gubernamentales e instituciones de México, como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), entre otras, que han planteado la necesidad de predecir la disminución de resistencia y su probabilidad de falla asociada a esta degradación. Muchos de los colapsos de estructuras en servicio reportados en países industrializados como los Estados Unidos, Japón y algunos de Europa, se atribuyeron a la degradación de la resistencia de diseño de la estructura, producida por agentes ambientales (Castro,2004).

La corrosión del acero de refuerzo está convirtiéndose rápidamente en el mayor problema a través del mundo. Puentes, estructuras marinas, edificios y otras estructuras de concreto están siendo dañadas seriamente por la corrosión. Esta patología es consecuencia de la despasivación por carbonatación y/o de una elevada concentración de iones cloruro. Origina altos costos de reparación y mantenimiento, además de que las edificaciones sufren deterioros prematuros y constituyen un factor de inseguridad para los usuarios (Uller,2000; Qui Jianhai,2002).

El costo por corrosión en la economía de los E.U.A. es de US\$276 billones por año y en países como México, los gastos por problemas de corrosión se encuentran alrededor del 4 o 5% del PIB, pudiéndose ahorrar el 1% del PIB si se atendieran en forma preventiva (Heidersbach,2002; Castro,2004). Se han realizado investigaciones para determinar las causas de la corrosión en el acero de refuerzo en países de Europa (Steen,2003; Nilsson,1996), en Asia (Burm,2002), Canadá (Basheer,1996; Zhang,2006), así como en Estados Unidos (Hartt,2004), encontrando que el ambiente es un factor de gran influencia. Un ambiente agresivo lleva a la corrosión de armaduras y al desgaste o deterioro del concreto, lo cual implica un envejecimiento precoz (Steen,2003).

Los materiales suelen estar sometidos a ambientes que son diferentes a las condiciones inertes ideales de diseño. Las influencias ambientales pueden afectar sus propiedades mecánicas, lo cual ocasiona que no cumplan con los requisitos de servicio. Estos agentes y/o factores ambientales son relativos al agua, la atmósfera y la temperatura ambiente y son sustancias agresivas que pueden estar presentes en la humedad, como cloruros, sulfatos, oxígeno, reducción de pH, presencia de amonio NH_4^+ , magnesio y álcalis; en la atmósfera, sulfuros y dióxido de carbono y la propia temperatura, factores que llevan al deterioro

paulatino de las estructuras si no son intervenidas a tiempo. Se puede decir que la agresividad del ambiente se determina en función del clima donde está expuesta la estructura y de la concentración de sustancias agresivas. Las predicciones de corrosión o agresividad de las atmósferas pueden servir como orientación respecto a las medidas protectoras que deben adoptarse para la conservación de una estructura. De ahí deriva el interés que tienen los *mapas de corrosividad* de países y áreas geográficas, que informen directamente acerca de los riesgos de corrosión (Genescá, 1995).

La corrosión originada por cloruros es una de las causas más comunes de degradación del concreto, se han revisado artículos (Angst *et al.*, 2009) que reportan estudios desde 1959 sobre el contenido crítico de cloruros (C_{th}) necesario para iniciar el proceso de corrosión del acero en el concreto, sobre todo en ambientes marinos. Para el diseño de nuevas estructuras y evaluación de estructuras existentes, es importante conocer el valor de C_{th} , ya que la predicción de vida útil de servicio de las estructuras está asociada al tiempo requerido para que el valor del contenido crítico de cloruros o C_{th} llegue a la profundidad a que se encuentra el acero de refuerzo. El contenido crítico de cloruros es un parámetro importante a considerar en los modelos de predicción de vida útil de las estructuras de concreto armado.

Según reportan Angst *et al.* (2009), se han realizado numerosos estudios para conocer los parámetros que influyen en los modelos de predicción de la vida de servicio, en ellos se ha visto que el valor C_{th} no es un valor único, debido no solo a las diferentes técnicas empleadas para su determinación y condiciones de prueba, sino también a la naturaleza intrínseca del fenómeno, que implica un proceso estocástico y complejo del inicio de corrosión.

Recientemente se planteó en México la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras, a través de modelos de predicción (Castro, 2004). El ambiente marino es considerado el de mayor riesgo de promover corrosividad severa, debido a los factores ambientales a los que está sujeto en el país como, altas temperatura y humedad relativa, presencia de sales por su cercanía a la zona marina, y ciclos de humedecimiento y secado principalmente.

La durabilidad de las estructuras de concreto en general y las expuestas a ambiente marino particularmente, es tema de gran importancia por el número de estructuras que se construyen en México, tanto de inversión pública como privada. Sin embargo, no existe un conocimiento actual cuantificado y regional de la agresividad de los distintos ambientes costeros ni del interior del país que permitan poder normalizar el tipo de concreto o refuerzo en la construcción de infraestructura para que las patologías y por lo tanto las acciones de recuperación y mantenimiento se minimicen (Castro, 2004). Hay información en cuanto a

cómo clasificar un microclima en función de los agentes ambientales, ISO 9223, pero falta precisar dichos parámetros ambientales para cada región o zona del país, lo cual nos llevaría a tener un Mapa de Zonificación en función del riesgo de corrosividad atmosférica.

En México los estudios que se han realizado al respecto son muy recientes y escasos, existe información limitada sobre concreto expuesto tanto a ambientes urbanos como a ambientes marinos, principalmente de las zonas Centro y Golfo de México. En Campeche se encuentra el Centro de Investigaciones en Corrosión del Golfo de México, faltando información de la zona del Océano Pacífico. En el año 2003 inició el proyecto DURACON¹ que forma parte de un Proyecto Latinoamericano con financiamiento internacional (Uller,2000), con la finalidad de determinar la influencia del ambiente en la durabilidad del concreto, bajo la coordinación de investigadores del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en Querétaro y del CINVESTAV Unidad Mérida, quienes formaron una red nacional de investigación con el fin de generar conocimiento sobre este tema. A la fecha existen 13 estaciones de monitoreo en la república mexicana bajo ambientes marino y urbano, donde se encuentran expuestas una serie de vigas de concreto simple y armado, fabricadas con el mismo tipo de concreto.

Por lo anterior expuesto, es importante definir la clasificación de microclimas en cuanto al nivel de agresividad ambiental y evaluar la durabilidad de las vigas expuestas a ambiente marino, mediante la determinación y análisis de los parámetros climáticos del ambiente de exposición, de los parámetros de absorción capilar y del Coeficiente de Difusión de cloruros, para proponer o adecuar un modelo de predicción de vida útil de servicio de concreto.

El presente trabajo define una metodología para abordar el estudio y determinación de la durabilidad de concreto expuesto a un ambiente marino, mediante el estudio de vigas de concreto y su correspondiente caracterización física, mecánica y química, para determinar los parámetros principales que influyen en la determinación de su vida útil de servicio y en consecuencia, asociados a la determinación de un modelo de predicción acorde al microclima de estudio.

1.2. ANTECEDENTES

La durabilidad del concreto implica tener resistencia mecánica y seguridad estructural, lo cual lleva a garantizar la resistencia propia del concreto y del refuerzo. Su estudio lleva a una clasificación para la resistencia del concreto frente a los riesgos de corrosión, considerando el ambiente al que está o estará expuesta la estructura.

¹ Proyecto "Durabilidad del Concreto" (DURACON) Programa CyTED XV.3

El ambiente marino implica mayor riesgo en la corrosión de estructuras de concreto debido a que el agua de mar origina un deterioro prematuro de las estructuras por su reacción con los productos de hidratación. También el contenido de cloruros atmosférico es importante y la combinación de altos niveles de cloruro, altas temperaturas, ciclos de humedad y secado y alta permeabilidad del concreto produce condiciones altamente agresivas (Mustafa,1994), que llevan a la degradación paulatina de las estructuras y probable colapso.

La trascendencia del fenómeno de corrosión justifica la búsqueda continua de relaciones, empíricas o teóricas, entre velocidad de penetración de agentes agresivos al interior del concreto y los factores atmosféricos, meteorológicos y químicos del ambiente de exposición (Genesca,1995). En el informe del comité del ACI-201 (1982), se menciona que la permeabilidad del concreto es un factor importante que interviene en el proceso de corrosión de los materiales ahogados en él, y es un factor determinante en la vida útil del mismo concreto. Un concreto de baja permeabilidad tiene una conductividad eléctrica menor, se opone a la absorción de sales y proporciona una barrera contra la entrada de oxígeno.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a la compresión, al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ion cloruro.

La porosidad del concreto es sin duda un factor de gran importancia en este fenómeno, ya que la penetración será tanto más rápida cuanto mayor sea la porosidad del recubrimiento. De esta forma, las bajas relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, significaran cierta garantía de lenta difusividad de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso (Torres,1995).

Todos estos factores son de gran importancia en el desarrollo de estudios específicos para evaluar la durabilidad de concreto en ambiente marino. Al respecto, se han realizado diversos estudios en ambientes simulados y naturales, en los que se han encontrado diferentes valores tanto en el contenido crítico de cloruros para iniciar la despasivación del acero, como en el comportamiento de la concentración superficial. En uno de estos estudios el valor de contenido de cloruros en probetas de concreto expuestas durante un año en un ambiente marino no excedió de 0.376 kg m^{-3} ppconcreto² lo cual fue mucho menor que los umbrales de cloruros reportados previamente para inicio de corrosión (Mustafa &

² Peso por metro cúbico de concreto

Yusof,1994). También se detectó que cuanto más largo era el tiempo de exposición, era mayor el contenido de cloruros superficial y más pequeño el coeficiente de difusión, concluyendo que un coeficiente de difusión junto con una concentración superficial constante no pueden usarse confiablemente para estimar el movimiento de cloruros en el concreto a diferentes tiempos o edades.

En la tabla siguiente (1.2.1) se muestran algunos de estos estudios realizados en ambiente marino, natural y simulado, donde se dan las características principales de cada uno, con el fin de hacer notar la variabilidad que existe en los parámetros que rigen la vida útil de las estructuras de concreto armado.

Tabla 1.2.1. Estudios en concreto expuesto a ambiente marino, natural y simulado

Año	1er Autor	Tipo de estudio	Datos	C_s (Concentración superficial)	C_{th} (Contenido crítico de Cl ⁻)	D (Coeficiente de difusión)
1994	Mustafa	Exposición Natural OPC (Prisma cúbico)	Cont Cl<0.376 kg m ⁻³ concreto T-exp max:1año	variable	1.3 kg m ⁻³ =0.4% ppcemento	variable
1996	Basheer	Laboratorio (Vigas)	T-exp max: 2 años	0.0008 mol cm ⁻³ 2.8kg m ⁻³ conc	0.7 kg m ⁻³ concreto	variable D=f(w/c,t)
1996	Thomas	Exposición Natural (Prisma rectangular)	T-exp max: 4 años Influencia FA	ND	0.7% FA=0, 0.5% FA=30, 0.2% FA=50 %Cl tot ppcem	ND
2001	Castro	Natural OPC (Cilindros)	T-exp max: 2 años	variable	ND	variable
	De Rincón	Natural OPC (Corazones)	Edad: 33 años	interpretación	de perfiles	de cloruros
	Pazzini	Natural OPC (Corazones)	Edad: 10 años	interpretación	de perfiles	de cloruros
2002	Mohammed	Natural (Cilindros) OPC,SCA,SCB,SCC,FACB	Edad: 15 años	2.5%Cl tot ppcem(OPC)	0.4% ppcem	75mm ² año ⁻¹ (OPC). D Constante
2002	Burm	Laboratorio OPC (Prismas)	Modelado de Cl ⁻ a 20 años. Fases sólida y acuosa	Incrementa con el tiempo	0.05% ppconcreto	De=2x10 ⁻¹² m ² s ⁻¹
2006	Hastie	Natural (Blocks) Aditivo Microsilica 600	Edad: 5 y 8 años	constante	0.4 – 0.5% ppcemento	Variable

Notaciones: T-exp=tiempo de exposición; FA=Fly Ash; ppcem=por masa de cementante; ND= No determinado; max=máximo; %Cl tot ppcem =% cloruros totales por peso de cemento

La durabilidad o vida útil de servicio de las estructuras de concreto armado puede estimarse a partir de modelos matemáticos. Estos modelos se basan en estudios de laboratorio y de campo para conocer principalmente el comportamiento del concreto en

función del tiempo y determinar la influencia de agentes agresivos, mediante su caracterización físico-química y mecánica. Están basados principalmente en el modelo de Tutti (1982) que distingue la vida útil del concreto en dos periodos, el de iniciación y el de propagación de la corrosión. Recientemente Mehta (1997) propone un modelo holístico de la vida útil del concreto, en el cual se basan algunos de los modelos matemáticos para su planteamiento. En la figura 1.2.I se muestra el modelo holístico de deterioro del concreto, considerando los efectos ambientales.

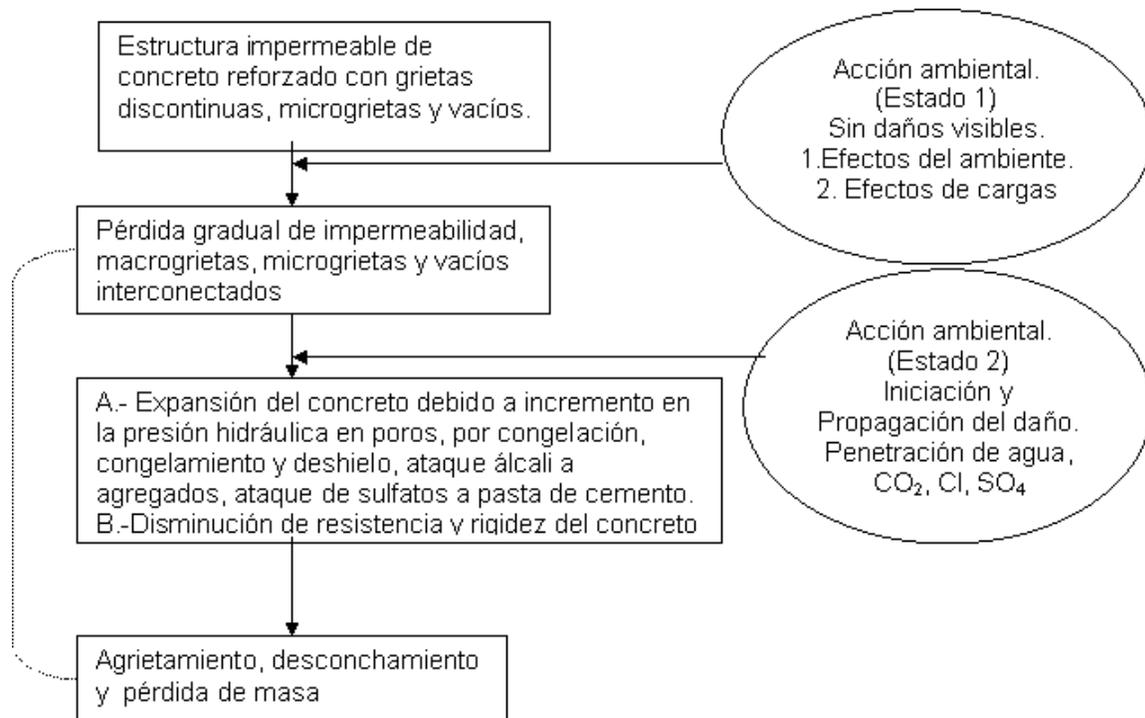


Figura 1.2.I. Modelo holístico de deterioro del concreto (Mehta, 1997).

La importancia de un modelo de predicción de vida útil de servicio del concreto, reside en poder determinar el tiempo para inicio de la corrosión bajo ciertas condiciones de riesgo, lo cual permitirá diseñar adecuadamente y prevenir daños en las estructuras. Por otro lado, estos estudios pueden conducir también a hacer reformas a los actuales reglamentos para poder construir edificaciones durables y no solo resistentes.

En la tabla 1.2.II se presenta un resumen de modelos de predicción de vida útil, con capacidad y limitaciones de predicción (etapa de iniciación), seleccionados por la posible aplicación que tuviesen con el estudio objeto de esta tesis. Con el fin de verificar la aplicabilidad de estos modelos a los datos de las vigas expuestas al ambiente marino o, en su caso, poder considerar una adecuación o el planteamiento de un nuevo modelo.

Tabla 1.2.II. Modelos de predicción, con capacidad y limitaciones de predicción (etapa de iniciación):

AÑO	MODELO	AUTORES	VARIABLES	CARACTERÍSTICAS MODELO	CONDICIONES /LIMITACIONES	VALORES APROXIM.
1994	Perfiles de Cl	Berke & Hicks	Permeabilidad ASTM C 1202			
1997	Difusión de cloruros	Castañeda, Castro, González, Genescá	Cs (t), no lineal	D (días de curado), D (t). Aplica 2a Ley de Fick Determinístico	Modelo probado favorablemente solo a 2 años. Rel a/c= 0.40, 0.70,0.76	D variable, disminuye con el tiempo de $1.0E^{-06}$ a $1.0E^{-08}$, disminuye en función de los días de curado.
1998	Difusión de cloruros	Bentz, Garbozi & Lagergren	W/C grado de hidratación fracción de volumen de agregados	Diseño Estadístico Predicción de D	Rel w/c 0.3-0.6; D constante. Es conveniente medir el grado de hidratación cuando se mida la difusividad de cloruros	$E-10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ rel w/c=0.7 $E-12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ rel w/c=0.32
1999	Difusión de cloruros	Hansen & Sauoma	Rel w/c, Temp, tiempo	D (constante), D (t), D (T) Aplica 2a Ley de Fick	Análisis de elementos finitos usando ABAQUS. -Difusión de Cl, Apl. Ecuación de Mangat y Molloy D(t). Tang y Nilsson D(T) y $D=D f(t)f(T)$	$Di=1.36-9.46 \text{ cm}^2 \text{ año}^{-1}$ $Cs=4.31-11.9 \text{ E-06 kg m}^{-3}$
1999	CDC	Luciano & Miltenberger	w/c, mat cem (peso y tipo), tiempo de curado, temperatura, tipo de agregado	Estadístico D predictivo	Modelo empírico base de datos disponible permite evaluar los efectos de la rel a/c, tipo de cementantes y curado	CDC estimado de $74 \text{ a } 106 \text{ mm}^2 \text{ año}^{-1}$
2001	STADIUM	Marchand	Difusión ionica, transporte de humedad, reacción química y daño químico	Datos iniciales: D, θ , Ψ , ϵ , temperatura.	Es utilizado para analizar resultados de pruebas de migración iónica	Cl^- : w/c=0.4 $D=3E-12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ w/c= 0.45 $D= 5E-12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
2005	Ingreso de Cl	Meijers, Bijen, Borst & Fraaij	temperatura, humedad ambiental, enlace de Cl, difusión y convección	Acumulación de cloruros por secado		
2006	Inicio de la corrosión	Zhang & Lounis	Cs, Cth, dc, D	Determinación de T_i , 2a Ley de Fick D y Cs constantes	$C(dc,t) < C_{th}$ para $0 \leq t < T_i$ $C(dc,t) = C_{th}$ para $t = T_i$ Rango $0 < C_s < 8.9 \text{ kg m}^{-3}$	D varia de 10^{-12} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
2006	Estadístico	Hastie	w/c, t, Cth, dc	Concreto marino con puzolanas naturales, 2a Ley de Fick. D var (factor edad)	8% Microsilica 600 , blocks Cs constante (prom de 5 años), Cth= 0.4-0.5% ppcemento	$E-13 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
2007	Perfiles de Cl	Hwang & Yup	Cs, T, HR,	OPC, FA, rel w/c 0.38 Aplica 2a Ley de Fick D constante, Cs var	Curado 28d 23°C Cl sol acido CILINDROS r=10 cm,20cm L Solución de Cranck $C(x,0)=0, C(0,t)=Cs$	$E-12 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Notaciones: Rel a/c= relación agua/cemento; Rel w/c=relación agua/materiales cementantes; D=coeficiente de difusión; C=concentración; Cs=concentración superficial; Cth=contenido crítico; T=temperatura; t=tiempo; T_i =tiempo para inicio de corrosión; dc=espesor del recubrimiento; H.R.=humedad relativa; var=variable

1.3. OBJETIVOS

General

El objetivo de este trabajo es generar información sobre la absorción capilar de agua y la difusión de cloruros, en concretos expuestos a un ambiente marino en el Puerto de Progreso, Yucatán, México, enfocada a evaluar la durabilidad del concreto y a la adecuación de un modelo para la predicción de vida útil en función del nivel de agresividad del ambiente de exposición.

Específicos

- Realizar el análisis de parámetros de absorción capilar y de difusividad hidráulica en especímenes de concreto con diferentes tiempos de exposición a un ambiente marino.
- Realizar el análisis de parámetros ambientales y clasificación de microclimas en función de su corrosividad.
- Obtener perfiles de concentración de cloruros a diferentes tiempos de exposición.
- Determinar coeficientes de difusión efectivos del cloruro en el concreto expuesto.
- Determinar la relación entre la sortividad y la resistencia a la compresión y de ambas variables con el coeficiente de difusión de cloruros.
- Compilar los modelos existentes en la literatura, de penetración de cloruros y analizar su validez con los datos experimentales obtenidos.
- Proponer un modelo de predicción de vida útil, o una adecuación de alguno de los existentes, en función de las tendencias observadas durante la fase experimental.

1.4 HIPÓTESIS

- **Hipótesis principal**

Es posible evaluar la durabilidad de estructuras de concreto armado, en ambiente marino de la República Mexicana, mediante modelos que caracterizan al concreto en función del ambiente de exposición.

- **Hipótesis secundaria**

El parámetro sortividad tiene relación directa con la determinación de vida útil del concreto armado, al ser un factor determinante de la calidad del concreto.

1.5 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El trabajo de investigación parte del estudio de vigas de concreto de dos relaciones agua-cemento de uso común en México, expuestas a un ambiente marino y consistió en determinar la correlación de factores ambientales con el coeficiente de difusión de cloruros, estudiando las variables climático-ambientales y determinando el coeficiente de difusión efectivo de cloruros libres en función del tiempo, así como su relación con parámetros de calidad del concreto utilizado como son la resistencia a la compresión y la sortividad.

Se analizaron en la literatura modelos existentes de penetración de cloruros, para determinar su validez con los datos obtenidos y finalmente se propone un modelo para predecir la durabilidad o vida útil de servicio del concreto en función de las condiciones ambientales de exposición.

Acotaciones del trabajo desarrollado

- Se considera únicamente el periodo de Vida útil de servicio que corresponde al periodo de iniciación.
- Datos disponibles a partir de 2003 hasta 2007 en la estación de Progreso, Yuc., Méx.
- Se analizaron en la literatura los modelos de predicción para cloruros y las variables que intervienen.
- Se utilizaron las variables de mayor peso.
- Se analizaron cloruros y absorción capilar más el factor ambiental.
- Las variables $f'c$, f_y , no intervienen directamente en el modelo.
- Se trabajó con 2 relaciones a/c : 0.45, 0.65, se eligieron estas relaciones agua/cemento por ser las más representativas del tipo de concreto empleado en las construcciones en las regiones de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

La definición de algunos conceptos básicos es importante para situar el contexto de este trabajo, así como el planteamiento de un modelo conceptual que muestre las relaciones entre los principales componentes que influyen en la durabilidad de las estructuras de concreto.



Figura 2.1.I Modelo conceptual de la durabilidad de estructuras de concreto, partiendo de la interrelación entre el concreto y el ambiente de exposición, hasta el desarrollo de modelos matemáticos basados en la caracterización física, química y/o mecánica del concreto armado.

En la figura 2.1.I se presenta en modelo conceptual de la durabilidad de estructuras de concreto, partiendo de la interrelación que surge del concreto con el ambiente de exposición, hasta llegar al planteamiento de modelos matemáticos basados en el estudio de las reacciones internas del concreto o también denominada caracterización física, química y mecánica del concreto.

Definiciones

- Durabilidad del concreto se refiere a su capacidad de resistir el deterioro o degradación causados por su exposición a un determinado ambiente durante la vida de servicio, por lo cual se deriva la importancia de definir parámetros de calidad del concreto para poder incrementar y/o garantizar esta vida útil.
- Vida útil de servicio es el lapso de tiempo durante el cual se mantienen las características de proyecto de una estructura, sin necesidad de exigir medidas extraordinarias de mantenimiento o reparación; también puede considerarse como el lapso de tiempo en el cual una estructura es capaz de desempeñar bien las funciones para las que fue proyectada (Helene,2003).
- Agentes nocivos son aquellos que pueden producir degradación y llegar a afectar la durabilidad de estructuras de concreto. Estos agentes pueden ser físicos, químicos e inclusive biológicos.
- Absorción es el proceso en el cual un líquido es atraído hacia los vacíos de un cuerpo sólido poroso y trata de llenarlos; ó, el aumento en la masa de un cuerpo sólido poroso como resultado de la penetración de un líquido dentro de sus vacíos permeables (ACI,2002).
- Absorción o succión capilar en sólidos porosos, es el transporte de líquidos debido a la tensión superficial que actúa en los poros capilares y depende de las propiedades características del líquido como son la viscosidad, densidad y tensión superficial, y de las características del sólido o sea la microestructura porosa (Claisse,1997)
- Adsorción es la retención de un líquido o gas sobre la superficie de un sólido.
- Sortividad es un parámetro definido como la capacidad de absorción capilar y se determina en función del tiempo, peso y área del espécimen.
- Difusión es un mecanismo de transporte de masa originado por un gradiente de concentración.
- Corrosión es el deterioro y pérdida del material debidos al ataque químico. Es un fenómeno irreversible.
- Factor de humectación (FTDH) es número promedio de horas en las que, en un ambiente determinado, la humedad relativa es superior a 80%.

2.1.1 Durabilidad del concreto

La durabilidad del concreto ha sido definida por el ACI³ como su resistencia a la acción del clima, ataque químico, abrasión y otros procesos de degradación. Los mecanismos importantes de degradación del concreto son los siguientes:

1. Daño por congelamiento y secado
2. Reacción álcali-agregado
3. Ataque de sulfatos
4. Ataque microbiológico
5. Corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto, por:
 - a) carbonatación del concreto
 - b) penetración de cloruros
6. Abrasión
7. Cargas mecánicas

El término durabilidad es usado para caracterizar en forma extensa la resistencia de un concreto a una variedad de ataques físicos o químicos que pueden variar en intensidad, dependiendo del mecanismo involucrado. Estudios recientes muestran que las mezclas de concreto para usar en ambientes severos no pueden ser impermeables al aire, agua e iones cloruro si no poseen una resistencia mínima a compresión de 50 MPa a 28 días. La relación agua-cemento es el factor principal que controla la impermeabilidad de un concreto y por lo tanto su durabilidad (Aitcin, 1993).

La durabilidad de un concreto es función de la severidad de las condiciones ambientales a las cuales está expuesto durante su vida de servicio. Esta situación aún no ha recibido atención suficiente en la mayoría de reglamentos y normas durante las últimas décadas. Las predicciones de corrosión o agresividad de las atmósferas pueden servir como orientación respecto a las medidas protectoras que deben adoptarse para la conservación de una estructura. De ahí deriva el interés que tienen los *mapas de corrosividad* de países y áreas geográficas, que informen directamente acerca de los riesgos de corrosión (Genescá, 1995).

Tradicionalmente, el primer paso para dar durabilidad al concreto ha sido usar una baja relación agua-materiales cementantes y dar un recubrimiento considerable al acero de refuerzo, empleando en algunos casos ceniza volante, humo de sílice o escoria granulada de alto horno. También se han utilizado inhibidores de corrosión que son sustancias químicas

³ American Concrete Institute

que reducen la corrosión del acero sin reducir la concentración de los agentes corrosivos (Berke *et al.*,2005).

La durabilidad de los concretos, y por lo tanto su vida útil de servicio, dependerá tanto de las características del concreto y del acero, como del ambiente de exposición y las interrelaciones entre estas. Así también, la estructura porosa resultante y la fase acuosa contenida en los poros influirán de forma decisiva sobre la accesibilidad de agentes agresivos externos hasta la armadura, ya que el contenido de fase líquida en los poros influye enormemente en la velocidad de difusión de gases e iones, a la vez que dicha fase acuosa actúa como medio electrolítico en los procesos de corrosión del acero (Sanjuán y Castro,2001).

Respecto a la durabilidad del concreto, lo importante es la duración de las estructuras, cuya vida útil puede ser afectada por factores o agentes internos y externos. Los internos se relacionan con la falta de calidad, idoneidad y capacidad de desempeño del concreto terminado, mientras que los externos dependen de las condiciones de exposición de las estructuras (Mena,2005).

Históricamente existe la percepción de una relación directa entre la resistencia del concreto y su durabilidad, y que concretos de 35 a 40 MPa de resistencia a compresión a 28 días, hechos con materiales adecuados y una buena práctica de construcción, presentan baja permeabilidad y comportamiento adecuado bajo la mayoría de las condiciones ambientales. Sin embargo, esto necesita una evaluación crítica, tomando en cuenta las causas principales del deterioro de las estructuras de concreto como son la corrosión del acero de refuerzo, exposición a ciclos de congelamiento y deshielo, reacción álcali-agregado y ataque de sulfatos. En cada uno de estos casos el agua está implicada en el mecanismo de expansión y agrietamiento; también es el medio principal para la difusión de iones agresivos (Mehta,1997).

2.1.2 Vida útil

La vida útil de un elemento estructural debe considerarse desde el momento del término de su construcción, incluyendo el periodo de iniciación y el de propagación de la corrosión. Una separación no es necesaria, pues el periodo de iniciación está relacionado con la difusión de cloruros y la carbonatación, o sea, ligados directa y exclusivamente a la calidad del concreto de recubrimiento y a la agresividad del ambiente. En el periodo de propagación los fenómenos son esencialmente de corrosión electroquímica (Helene,2003). En la figura

2.1.2.I se presenta un esquema de vida útil de las estructuras y en la tabla 2.1.2.I una consideración de vida de proyecto de estructuras de concreto armado.

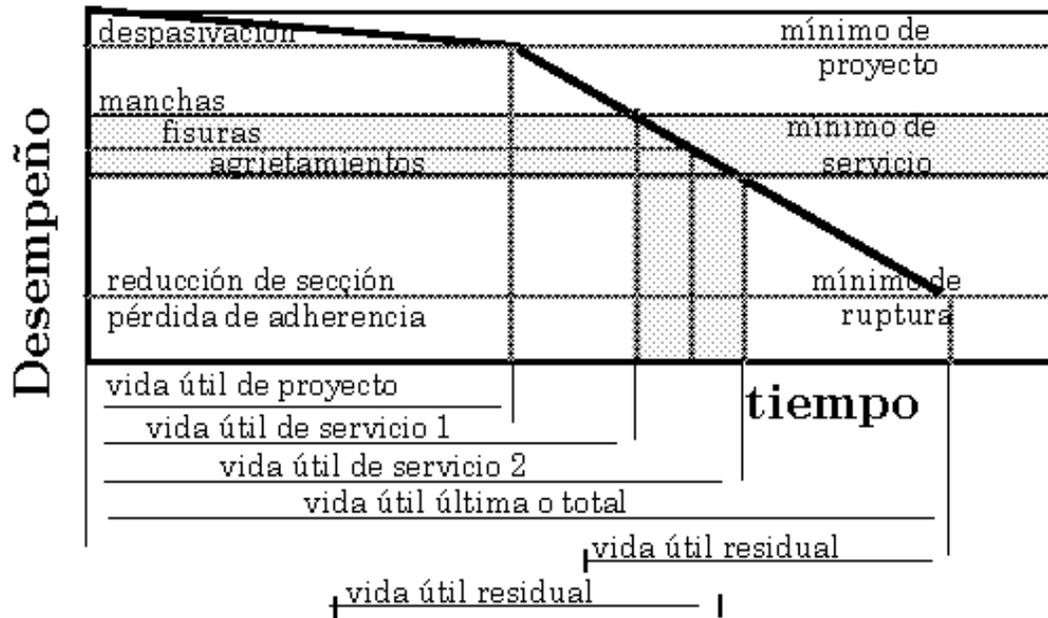


Figura 2.1.2.I. Esquema de vida útil de estructuras, desempeño en función del tiempo (Helene,2003).

Tabla 2.1.2.I Vida de proyecto de estructuras de concreto armado (Mena,2005).

Tipo de estructura	Vida de proyecto (años)
Pistas de aeropuertos	30-50
Puentes	120
Presas	50-100
Edificios residenciales	60
Obras portuarias	80
Fábricas	25-50
Oficinas, tiendas	50-100

Vida útil de servicio

En la figura 2.1.2.II. se muestra el modelo de daño en dos etapas, presentado por Mehta para predicción de vida útil de servicio, basado en el modelo de Tutti (1982), primer propuesta que se tiene de referencia sobre este tema, quien consideró dos periodos en la vida de servicio, el periodo de iniciación y el de propagación. En el modelo de Mehta la etapa o estado 1 corresponde a un periodo sin daño visible y el estado 2 a un periodo de propagación que culmina con el fin de vida de servicio de la estructura.

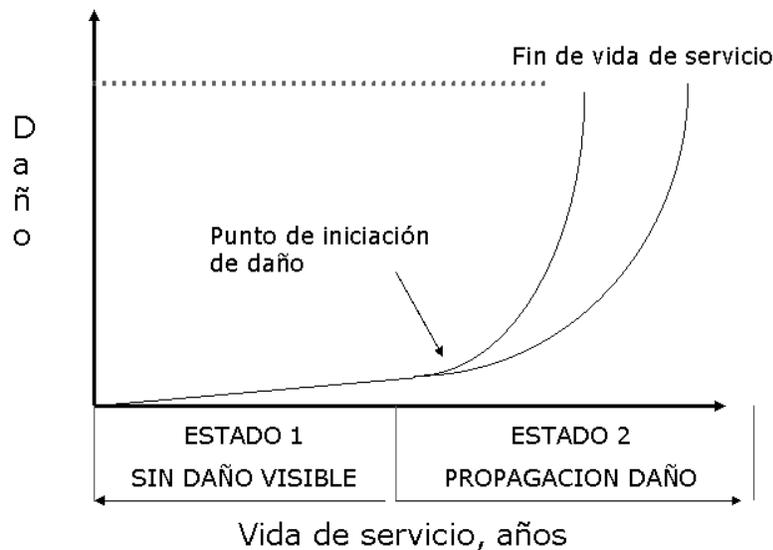


Figura 2.1.2.II. Modelo de dos etapas de daño ocasionado por la interacción estructura ambiente (Mehta,1997).

Sanjuán y Castro (2001) definen la vida útil como el periodo de tiempo en que la estructura conserva sus características geométricas, de funcionalidad y de seguridad para las cuales fue proyectado sin costos inesperados de reparación o mantenimiento. Se consideran los periodos de iniciación y propagación.

El periodo de iniciación es aquel en el que el concreto permanece inalterado, mientras que penetran los agentes agresivos provenientes del entorno. El periodo de propagación comienza en el momento en que los agentes agresivos en contacto con el concreto inducen su deterioro y comienza la reacción degradante hasta un estado límite en el que la integridad estructural o la funcionalidad de la estructura deja de ser aceptable. Los efectos principales son la fisuración y la disgregación finalmente que lleva al colapso de la estructura.

Los mecanismos de transporte de agentes agresivos pueden ser la difusión y/o la absorción capilar principalmente y también es posible tener cloruros como adición durante la fabricación del concreto a través de aditivos (acelerante basado en CaCl_2) o por el uso de materiales contaminados.

En el proyecto DuraCrete (Siemes & Cowi,1999), que es una metodología para la determinación de vida útil, se han identificado los siguientes estados límites de durabilidad con relación a la vida de servicio y en la figura 2.1.2.III (DuraCrete Proyect) se muestra gráficamente estas etapas, haciendo notar que el periodo de iniciación es importante porque abarca el 80% de la vida útil de una estructura:

- Despasivación del refuerzo
- Agrietamiento del recubrimiento de concreto
- Desprendimiento del recubrimiento
- Colapso

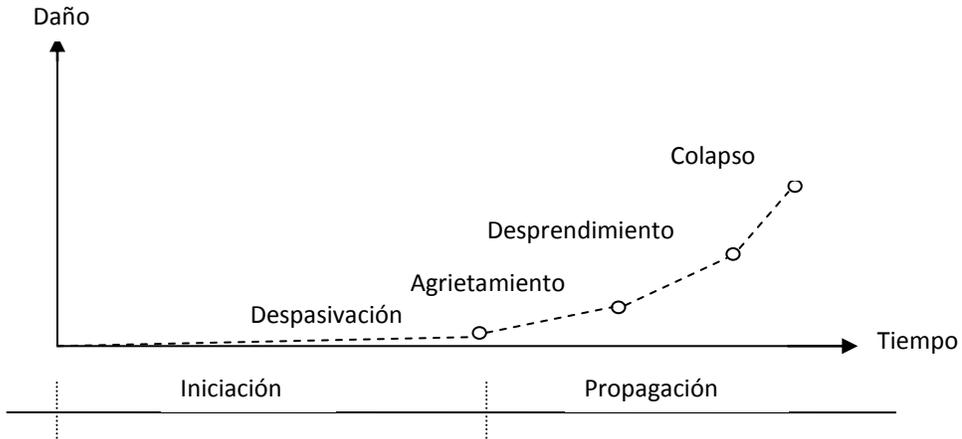


Figura 2.1.2.III Determinación de la vida de servicio y estados límite con respecto a la corrosión del acero de refuerzo (Siemes & Cowi, 1999).

En la figura 2.1.2.IV se describen de manera gráfica los principales procesos de deterioro del concreto que provocan la corrosión del acero de refuerzo y que están asociados a fenómenos de transporte.

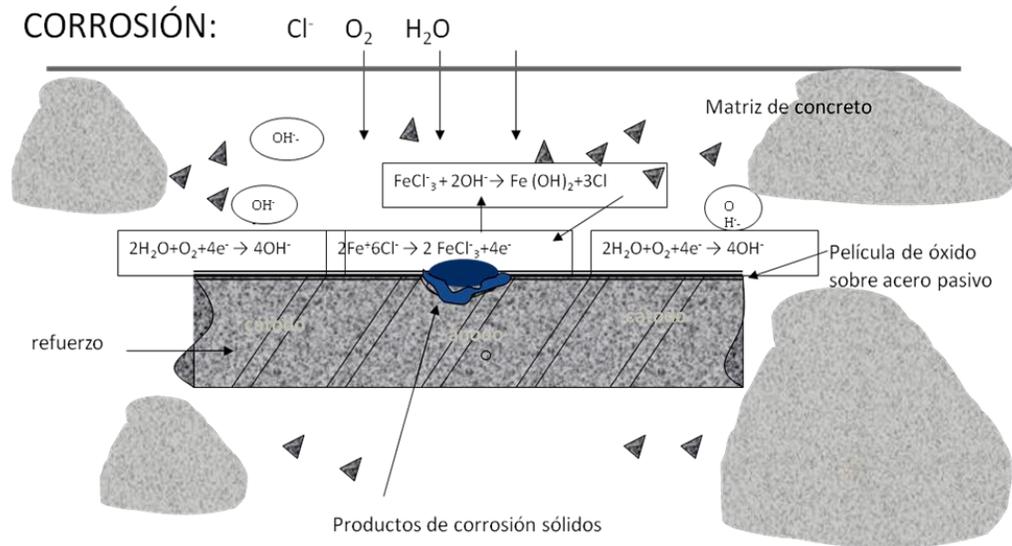


Figura 2.1.2.IV. Principales procesos de deterioro del concreto que inducen la corrosión y están asociados a fenómenos de transporte.

2.1.3. Penetración de cloruros

La penetración de cloruros en el concreto es el proceso mas importante y complejo que afecta la durabilidad de las estructuras, mediante el cual inicia la corrosión del acero de refuerzo. La profundidad de penetración de cloruros es un parámetro significativo para predecir el inicio de corrosión, el cual está en función de la concentración de cloruros requerida para despasivar el refuerzo. Esta cantidad se llama umbral de cloruros.

El estudio de este proceso se basa en la determinación de perfiles de penetración. La determinación de perfiles de cloruros implica tomar muestras de concreto a varias profundidades y graficar el contenido de cloruros contra la profundidad. Las muestras de concreto para el análisis se pueden obtener por varias técnicas (Mc Polin,2005):

- Corazones
- Colección de polvo
- Trozos de concreto

Posteriormente, las muestras pueden ser analizadas mediante numerosas técnicas químicas divididas en 3 categorías:

- Cualitativas (Colorimétrica)
- Semicuantitativas
- Cuantitativas (Espectrofotometría, Titulación Potenciométrica)

Los procedimientos para evaluar el contenido de cloruros en muestras de concreto se encuentra normalizado, siendo algunas de las pruebas principales las siguientes:

- BS 1881-124 Methods for analysis of hardened concrete
- ASTM D 1820 Titulación potenciométrica
- ASTM C 42 corazones
- ASTM C 1218
- ASTM C 114

Investigaciones de laboratorios FHWA⁴ estimaron el umbral de corrosión en 0,33% de cloruros totales por peso de concreto. Aunque es ampliamente aceptado que solo los cloruros solubles en agua contribuyen a la corrosión, es más común en la práctica determinar el contenido de cloruros totales en las muestras de puentes, porque los métodos analíticos para cloruros solubles (AASHTO T-260 y ASTM C-1218) son mas laboriosos y no tan precisos como para cloruros totales solubles al ácido (AASHTO T-260 y ASTM C-1152). Además es común expresar el contenido de cloruros en términos de porcentaje de peso de

⁴ Federal Highway Administration

concreto. Hay indicios de que el umbral de cloruros puede variar entre concretos en diferentes puentes, dependiendo del tipo de cemento y diseño de mezcla utilizadas, lo cual puede variar la concentración de aluminato tricálcico (C_3A) y del ión hidróxido en el concreto. En realidad, se ha sugerido, por el papel que los iones hidróxido juegan en la protección del acero contra la corrosión, que es más apropiado expresar el umbral de cloruros en términos del índice de contenido de cloruros por contenido de hidróxidos, Cl^-/OH^- (Thomas, 1996).

Tradicionalmente la primera consideración para la durabilidad de un concreto reforzado ha sido usar concreto de baja relación a/c y dar un recubrimiento considerable al acero de refuerzo. Adicionalmente se ha considerado la inclusión del uso de materiales cementantes como ceniza volante, humo de sílice y escoria granulada de alto horno. (Berke, 2005). De hecho, cuando el ingreso de cloruros es modelado en función de la relación agua/materiales cementantes y el ambiente de exposición, es difícil encontrar umbrales de corrosión que excedan los 25 años. En la tabla 2.1.3.I. se presentan los riesgos de corrosión en concreto conteniendo cloruros (Baker, 1992).

Como referencia, también existen otros métodos que se utilizan para evaluar el contenido de cloruros, como la prueba de migración o electromigración AASHTO T277 que consiste básicamente en crear un campo eléctrico externo alrededor de un medio poroso para acelerar el transporte iones y medir la carga que pasa, y la prueba rápida de permeabilidad ASTM C 1202, método que determina la conductividad eléctrica de la solución de poro.

Tabla 2.1.3.I Tabla de Pullar-Strecker (1987), que indica el riesgo de corrosión en función del contenido de cloruros y las condiciones del concreto adyacente al refuerzo (Baker, 1992).

Cloruros (% por peso de cemento)	Condiciones del concreto adyacente al refuerzo	Riesgo de corrosión
< 0.4%	1. Carbonatado	Alto
	2. No carbonatado, uso de cemento conteniendo <8% aluminato tricálcico	Moderado
	3. No carbonatado, uso de cemento conteniendo >8% de aluminato tricálcico en total de materiales cementantes.	Bajo
0.4%-1%	1. igual al anterior	Alto
	2. igual al anterior	Alto
	3. igual al anterior	Moderado
> 1.0%	Todos los casos	alto

2.2 ABSORCIÓN CAPILAR

El ingreso de especies iónicas en materiales porosos basados en cemento se debe a procesos como la convección, la succión o absorción capilar y la difusión (Mc Polin, 2005). La penetración de iones en solución como Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{+2} , OH^- entre otros, aunada a la penetración de O_2 y CO_2 del ambiente, puede afectar adversamente la vida útil del concreto armado.

Las propiedades de absorción capilar del concreto están relacionadas directamente con la calidad del recubrimiento del concreto y esta a su vez con la durabilidad o vida útil de una estructura (Hall, 1989; Ho, 1996). La absorción capilar aunada al fenómeno de difusión, contribuye al transporte de iones cloruro y otras sustancias al interior del concreto.

La capilaridad del concreto se ha estudiado para comprender el fenómeno de movimiento de agua en materiales de construcción porosos como tabiques, bloques de cemento, morteros y concreto (Hall, 1989; Ho, 1996), teniendo como base la Teoría de Flujo a partir de la cual se define la sortividad como un parámetro empleado para evaluar la calidad del recubrimiento de concreto y su resistencia a la penetración de fluidos (Hall, 1989).

El modelo más simple para calcular el transporte capilar es considerando la región húmeda como un frente húmedo rectangular totalmente saturado. La profundidad de penetración x de un frente húmedo definido puede ser calculada por (Janz, 2000):

$$x = B\sqrt{t} \quad [1]$$

donde B ($\text{m s}^{-1/2}$) es el coeficiente de penetración, determinado experimentalmente y t es el tiempo. Si se asume que la penetración de humedad es un frente húmedo definido, la cantidad total de líquido absorbido W (kg m^{-2}) puede ser expresado por:

$$W = A\sqrt{t} \quad [2]$$

donde el coeficiente de sorción A ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1/2}$) está dado por:

$$A = \rho P_a B \quad [3]$$

ρ es la densidad del líquido (kg m^{-3})

P_a es la porosidad disponible para transporte capilar ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Por otra parte, la cinética de absorción de agua en el concreto también ha sido descrita por G. Fagerlund (1982, 1993) por medio de tres coeficientes que denomina: m , k y ε_e , resistencia a la penetración de agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva respectivamente, mismos que se relacionan con el modelo anteriormente descrito, ec. [1] y que se explicará en el siguiente apartado.

Esta relación tiene las equivalencias de nomenclatura siguientes: $P_a = \varepsilon_e$; $A = k$

2.2.1 Método de Göran Fagerlund

Es un método incluido en la normatividad sueca (Fagerlund, 1993) basado en una prueba de absorción capilar para describir el proceso de absorción capilar, esto es, la absorción de agua en el sistema aire-poro. Dicho proceso es dependiente del tiempo y se mide experimentalmente por peso sucesivo de especímenes que son expuestos a un frente de penetración de agua por un tiempo mayor a cinco días. El método consiste en realizar una prueba experimental de cambio de masa por absorción de agua por un tiempo limitado y entonces extrapolar la función cambio de masa por absorción de agua hasta que se alcance el valor constante de masa o valor crítico (S_{CR}), lo que ocurre en el punto de saturación. La relación entre la profundidad de penetración (z) y el tiempo contado a partir del inicio de la succión hasta masa constante, está definido por:

$$t = m * z^2 \quad [4]$$

donde m , es "la resistencia a la penetración del agua" ($s \text{ m}^{-2}$) y es función solamente de la estructura de poros y no de la porosidad total.

La cinética de absorción de agua en el concreto puede ser descrita aproximadamente por los coeficientes; m , k y ε_e . Resultados experimentales reportados por el mismo autor indican relaciones bien definidas entre la porosidad capilar y los coeficientes m y k . Bajo esta teoría, la cantidad total de agua absorbida por unidad de succión después del tiempo t es:

$$Wa = 1000 * \varepsilon_e * z \quad (\text{kg m}^2) \quad [5]$$

donde: 1000 es la densidad del agua (kg m^{-3}) y ε_e es la porosidad efectiva ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Combinando las ec [4] y [5] tenemos:

$$W = \frac{1000 * \varepsilon_e}{\sqrt{m}} \sqrt{t} \quad [6]$$

ó

$$Wa = k * \sqrt{t} \quad [7]$$

donde:

$$k = \frac{1000 * \varepsilon_e}{\sqrt{m}} \quad [8]$$

Los parámetros m , k , ε_e y S (sorci3n capilar) se determinan de la forma siguiente: A partir de la ec.[4] se obtiene el parámetro de resistencia a la penetraci3n del agua, m :

$$m = t/z^2 \quad [9]$$

a partir de la ec. [7] se obtiene el coeficiente de absorci3n capilar, k :

$$k = [(Wt - W_0)/A_d] / \sqrt{t} \quad [10]$$

a partir de la ec [8] se obtiene la porosidad espec3fica:

$$\varepsilon_e = k \sqrt{m} / 1000 \quad (\%) \quad [11]$$

de la ecuación [1] siendo $x=z$, se tiene que $B=x/\sqrt{t}$ y de la ecuación [4] $z=\sqrt{t}/\sqrt{m}$, entonces el Coeficiente de penetración B , queda definido como el inverso de la resistencia a la penetración de agua:

$$B = 1 / \sqrt{m} \quad [12]$$

2.2.2 Sortividad

La sortividad al agua es un parámetro que mide las propiedades de absorción de materiales de construcción porosos (Hall,1989), determinado fácilmente por el cambio de masa del material poroso debido a la absorción de agua o también conocido como el método gravimétrico (Claisse,1997; ASTM C 1585). Este proceso es descrito por una ecuación de difusión no lineal:

$$i = t^{1/2} \int_{\theta_0}^{\theta_s} \phi d\theta \quad [13]$$

donde θ_0 y θ_s son las fracciones de volumen de agua contenidas en el sólido en estados seco y saturado. θ , es función de la variable $\Phi = xt^{1/2}$ (Hall,1989)

Hall (1989) definió la sortividad como la pendiente de la recta que relaciona el volumen acumulado de agua absorbida por unidad de área contra la raíz cuadrada del tiempo, ec. [14] y determinó valores de sortividad y porosidad para un rango extenso de cementos y concretos (Hall,1989). La sortividad se calcula de acuerdo a la siguiente relación, donde i es el volumen de líquido absorbido por unidad de área en el tiempo t :

$$i = s \sqrt{t} \quad [14]$$

2.3 DIFUSIVIDAD HIDRÁULICA

El ingreso de agua al interior del concreto es estudiado desde el punto de vista general por medio de la Teoría de Flujo insaturado en medios porosos, en particular por la Ley de Darcy modificada para flujo insaturado. La Difusividad Hidráulica es el coeficiente de material que modela el ingreso de agua en un medio poroso, por tanto, es una propiedad de los materiales y es empleada para modelar el transporte de humedad en el concreto y puede determinarse por tres métodos. El primero a partir de la relación entre el coeficiente de absorción y el contenido inicial de agua (Hall,1989); el segundo a partir de perfiles de humedad en estado estacionario, que tiene la desventaja del tiempo que tarda el espécimen para alcanzar la saturación capilar; el tercero a partir de perfiles de humedad transitorios, empleando el método de Boltzmann (Janz,2000; Hall,1989).

La Teoría de Flujo insaturado en materiales porosos relaciona la difusividad hidráulica con el contenido de agua, asumiendo una dependencia exponencial o potencial del contenido de humedad.

2.3.1 Teoría de Flujo Insaturado en Materiales Porosos

La Teoría de flujo insaturado presenta una buena descripción del proceso de flujo capilar en materiales cementantes porosos. Las propiedades fundamentales del material son la difusividad hidráulica D , el potencial de humedad Ψ y la conductividad hidráulica o permeabilidad K . La sortividad hidráulica (S) es un valor derivado de la teoría, determinado mediante una prueba de absorción capilar y está relacionada matemáticamente con la difusividad hidráulica (D).

Aplicando la ecuación de Darcy (Hall,1989) modificada para flujo capilar en materiales no saturados se relaciona la difusividad con el contenido de agua (Hall,1989; Leech,2003), donde $D(\theta)$ es la difusividad hidráulica:

$$q = -D(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad [15]$$

$$D(\theta) = -K(\theta) \frac{d\Psi}{d\theta} \quad [16]$$

La penetración de agua en el concreto como flujo unidimensional puede definirse como (Hall,1989; Lockington,1999):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad [17]$$

bajo las condiciones de frontera: $\theta = \theta_s$ cuando $x=0, t \geq 0$ y $\theta = \theta_0$ para $x > 0, t=0$, θ_0 y θ_s , son las fracciones de volumen de agua contenidas en el sólido en estados seco y saturado. Introduciendo la variable de Boltzmann, $\phi = x t^{1/2}$, la ecuación [17] queda:

$$-\frac{1}{2} \phi \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{d}{d\phi} D(\theta) \frac{d\theta}{d\phi} \quad [18]$$

donde:

$$D_\theta = -\frac{1}{2} \frac{d\theta}{d\phi} \int_{\theta_0}^{\theta_s} \phi(\theta) d\theta \quad [19]$$

Con $\theta=1$ para $\phi=0$ y $\theta=0$ cuando $\phi \rightarrow \infty$. La solución a la ecuación es por tanto (Hall,2007; Wilson,1999):

$$x(\theta, t) = \phi(\theta) t^{1/2} \quad [20]$$

2.3.2 Sortividad y Difusividad hidráulica

De acuerdo a la ecuación [20] el volumen total de agua absorbido de manera unidimensional se incrementa en $t^{\frac{1}{2}}$.

Esta ecuación es la base de la sortividad S , parámetro introducido por Hall (1989) y puede determinarse fácilmente por el cambio de masa del material poroso debido a la absorción de agua en función del tiempo (Claisse, 1997; ASTM, 2004). Hall (1989) definió la sortividad (S), como la pendiente de la recta que relaciona el volumen acumulado de agua absorbida por unidad de área (i) y la raíz cuadrada del tiempo (t), $i = St^{1/2}$, (ec. [14]).

S se relaciona con D matemáticamente, por ejemplo, mediante la solución de Philip (1989) a la ecuación [15], dando $\theta(x,t)$. Para este caso unidimensional, donde θ es una función de la variable $\phi = xt^{-1/2}$, la absorción acumulada en cualquier tiempo t , está dada por:

$$i = \int_{\theta_0}^{\theta_1} x d\theta = t^{1/2} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \phi d\theta \quad [21]$$

por lo tanto:
$$S = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \phi d\theta = (\theta_1 - \theta_0) \int_0^1 \phi d\theta_t \quad [22]$$

donde $\theta_t = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0}$ es el contenido normalizado de agua y S es la sortividad.

Cuando se conoce la difusividad, D , existen tanto soluciones analíticas, como soluciones numéricas para condiciones generales de la solución de la ecuación [15]. Desafortunadamente no es una función fácil de determinar (Hall, 2007) y normalmente se requiere información sobre perfiles de penetración de agua. Lockington *et al.* (1999) plantean que la difusividad puede estimarse a partir de medidas de sortividad y porosidad, asumiendo una dependencia exponencial o potencial de la difusividad del contenido de agua (Hall, 1989; Lockington, 1999). La relación entre D y θ está dada por las ecuaciones [23] y [24], que son de amplio conocimiento y aplicación en materiales porosos:

$$D = D_0 e^{n\theta} \quad [23]$$

$$D = D_0 \theta^n \quad [24]$$

donde θ es el contenido reducido o normalizado de agua y D_0 y n son constantes ajustadas empíricamente. Lockington (1999) encontró que la difusividad de morteros ensayados por Hall (1989), asumiendo una dependencia exponencial, correspondía a un valor $n=6.55$ y de otros materiales base cemento era $n=5.97$ y 4.9 , por tanto, considera apropiado dar valores de n entre 6 y 8 para materiales de construcción y sugiere tomar el valor $n=6$ como valor

estándar para concretos (Lockington,1999; Leech,2003). Aplicando el método de Lockington (1999), a partir de la solución aproximada al problema no lineal de la ecuación [18] planteada como:

$$2 \int_{\theta}^1 \frac{D(a)}{a} da = s\Phi + \frac{A}{2} \Phi^2 \quad [25]$$

Conocida la sortividad S y el valor n , es posible estimar el parámetro D_0 y así determinar la difusividad hidráulica D (Lockington,1999; Leech,2003) mediante las siguientes ecuaciones para una dependencia exponencial [23] o potencial [24] del contenido de agua:

exponencial
$$D_0 = \frac{n^2 s^2}{e^n (2n-1) - n + 1} \quad [26]$$

potencial
$$D_0 = s^2 \frac{(1+n)(2+n)}{(3+n)} \quad [27]$$

donde s es la sortividad reducida [28], determinada a partir de la sortividad (S) en función del contenido de agua en el espécimen saturado, θ_s es el contenido de agua en estado húmedo y θ_0 es el contenido de agua en estado seco, esto es:

$$s = S / (\theta_s - \theta_0) \quad [28]$$

2.4 MODELOS DE PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL DE SERVICIO

El transporte combinado de humedad e iones puede acelerar los mecanismos de degradación física y química del concreto y, en consecuencia, reducir su vida útil de servicio. La predicción de vida útil es necesaria para poder diseñar adecuadamente las estructuras en función no solo de los requerimientos de servicio, sino también del ambiente al que estarán expuestas; su determinación involucra la calidad del concreto, del acero y las condiciones ambientales del sitio. Las predicciones permiten tener un programa adecuado, en tiempo y forma, de mantenimiento y conservación de las estructuras y, en caso necesario de rehabilitación. Sin embargo, es difícil incluir todos estos factores o variables en un solo modelo para la predicción del comportamiento de una estructura, debido a la heterogeneidad del material y de las características de los ambientes de exposición. La predicción de tasas o velocidades de deterioro debe basarse en los factores dominantes, como la permeabilidad y resistencia a la fractura que son variables principales en la evaluación de durabilidad (Basheer,1996).

La concepción generalizada ha sido considerar dos etapas principales en la vida útil de una estructura, la etapa de iniciación y la etapa de propagación, Sin embargo, la durabilidad y vida de servicio de las estructuras de concreto depende mucho del periodo o etapa de iniciación (Zhang,2006; Castro,2007). Esta etapa inicia cuando la estructura es expuesta al ambiente y es sujeta del ataque o penetración de agentes ambientales que la pueden llevar al deterioro o degradación paulatina, siendo los cloruros el principal agente agresivo en un ambiente marino.

La difusión de cloruros como principal transporte de masa, en la etapa de iniciación, depende de los siguientes factores y/o variables (Mendoza,2009):

- Espesor de la cobertura o recubrimiento de concreto (distancia de transporte)
- Permeabilidad del concreto (características de absorción capilar)
- Concentración de cloruros (gradiente)
- Las condiciones límite o de frontera para el inicio de corrosión

2.4.1 Difusión de cloruros

En el modelado del tiempo como una función de probabilidad del fin de la vida de servicio de una estructura expuesta a un ambiente de cloruros, la concentración de cloruros superficial y el coeficiente de difusión son elementos clave, así como el umbral de cloruros necesario para iniciar la corrosión del acero de refuerzo (Holder,1999).

La penetración de cloruros en el concreto es un proceso que conduce al deterioro y eventual destrucción de las estructuras de concreto, por tanto, una de las propiedades críticas que controlan la vida de servicio de estructuras de concreto es la resistencia del concreto al ingreso por difusión de especies como iones cloruro y sulfato (Bentz,1998).

En general, si hay un movimiento de cloruros dentro del concreto, este puede representarse como un frente de cloruros que, si se monitorea con relación a la posición del acero de refuerzo, podría indicar la durabilidad de una estructura. Para despasivar el refuerzo se requiere cierta cantidad de iones cloruro, conocida como el umbral de cloruros.

En el desarrollo de modelos es indispensable conocer los coeficientes de difusión y difusividad de los distintos agentes agresivos, así como también es deseable tener descripciones matemáticas de los fenómenos de transporte lo más simples posible, siendo la teoría de difusión basada en la 2ª. Ley de Fick la más utilizada con este propósito.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial (D \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} \quad [29]$$

donde C es la concentración de cloruros a la profundidad x en el tiempo t , y D el coeficiente de difusión. A menudo la medición de estos mecanismos de transporte se usa para definir la durabilidad entre concretos, aunque es una combinación de estos mecanismos lo que guía al movimiento iónico. Por lo tanto, es más realista definir un coeficiente de difusión aparente que incluya todos los fenómenos de transporte basado en los perfiles obtenidos, en vez de difusión pura.

La ecuación [29] se resuelve considerando un coeficiente de difusión constante y las siguientes condiciones iniciales y de frontera:

$$\begin{aligned} C(x,0) &= 0 & x > 0 & \quad t = 0 \\ C(0,t) &= C_s & x = 0 & \quad t \geq 0 \end{aligned}$$

obteniendo la siguiente ecuación, que es usada para calcular el coeficiente de difusión efectivo de iones cloruro a través de la muestra. Esta técnica es conocida como la técnica de perfiles de concentración.

$$\frac{(C_s - C_x)}{(C_s - C_o)} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad [30]$$

donde:

C_s = concentración superficial de cloruros

C_x = concentración de cloruros en la profundidad x

C_o = concentración inicial de cloruros

x = profundidad

D = coeficiente de difusión de cloruros

t = tiempo

erf = función error

2.4.2 Contribuciones principales de los modelos de predicción

Los modelos matemáticos determinan el tiempo en función del proceso de degradación y la resistencia a la penetración de los materiales; permiten al diseñador evaluar los cambios con relación al tiempo, dependiendo del material y las condiciones ambientales específicas. Una de las finalidades de los modelos de predicción es estimar el tiempo que transcurrirá antes de que inicie la corrosión del acero, esto es, investigan el fenómeno de transporte de agua y especies iónicas en el concreto reforzado en la etapa de iniciación. Se han utilizado diferentes métodos y/o técnicas para evaluar los parámetros involucrados en los mecanismos de penetración de agua e iones agresivos en el concreto armado, y aunque algunas de ellas son pruebas de laboratorio rápidas y bajo condiciones artificiales, permiten reproducir condiciones de exposición aproximadas a las reales (Castañeda,1997; Hansen,1999; Luciano,1999; Shin,2002). Algunos autores han correlacionado los resultados dados por los modelos en estructuras reales, obteniendo una buena aproximación que les

permite validar el modelo (Berke,1994; Tang,1994; Zemajtis,1998; Liu,1998; Liang,2005; Hwan,2007).

En la literatura sobre este tema publicada entre 1994 y 2008, se encontró que aproximadamente el 50% de las investigaciones han sido desarrolladas por investigadores de Estados Unidos y Canadá. La mayoría de ellas consideran el tiempo de exposición, la concentración de iones, la relación agua/cemento y/o materiales cementantes y la composición de la mezcla como parámetros principales que influyen en la determinación de la vida útil en la etapa de iniciación. En el anexo A se presentan dos tablas, A y B, donde se muestran los resultados de la revisión de literatura sobre las principales variables y parámetros físicos, químicos y electroquímicos considerados en los modelos de predicción de vida útil.

Con el fin de puntualizar las principales contribuciones de los modelos sobre predicción de vida útil desarrollados en las últimas dos décadas, se han seleccionado aquellos que se basan en interpretaciones fisicoquímicas y matemáticas del proceso de penetración de cloruros, aunque todas son importantes por la descripción del proceso de difusión de cloruros y la influencia de las variables que son consideradas.

- Tuutti (1982) bajo un nuevo enfoque sobre la vida de servicio de las estructuras, desarrolló un Modelo esquemático que considera dos periodos en la vida útil, el periodo de iniciación y el periodo de propagación. En esta conceptualización se basan los modelos de predicción de vida útil.
- Tang y Nilsson (1994) desarrollaron un Método numérico, basado en elementos finitos para predecir la penetración de cloruros en concreto. El cálculo del Coeficiente de difusión de cloruros D , se realiza en función de la temperatura (T), basados en la Ley de Arrhenius. El modelo considera un comportamiento de la difusión de tipo exponencial, en función de la temperatura. Los datos se obtienen a partir de pruebas de migración iónica.

$$D=(D_0)e^b \quad b=(E/R)((1/T_0)-(1/T)) \quad [31]$$

- Castañeda y col. (1997) desarrollaron un Modelo de difusión de cloruros para estructuras de concreto armado expuestas en la Península de Yucatán que considera la variación de la concentración superficial de cloruros (máxima y mínima) con respecto al tiempo y el efecto climático (θ) sobre la difusión de cloruros. Este modelo solo fue validado para un periodo de dos años.

$$C_s(t) = C_{min} + (C_{max}-C_{min}) * \text{sen } \theta \quad [32]$$

- Najesh y Bishwajit (1998) modelaron la difusión de cloruros en concreto saturado y no saturado y determinaron D_e en función de C . Este modelo considera el enlace físico y químico de los iones en el concreto y los fenómenos de adsorción, difusión y absorción. La solución está dada por medio de diferencias finitas.
- Liu y Weyers (1998) desarrollaron un Modelo de regresión no lineal (empírico) del proceso dinámico de corrosión en estructuras contaminadas con cloruros. Por medio de un análisis estadístico que demuestra que la velocidad de corrosión del acero (i) está en función del contenido de cloruros (Cl), temperatura (T), resistencia óhmica (R_c) y tiempo de corrosión activa (t).

$$\ln 1.08 i = 8.37 + 0.618 \ln 1.69 Cl - 3034/T - 0.000105 R_c + 2.32 t^{0.215} \quad [33]$$

- Bentz y col. (1998) desarrollaron un Modelo de computo micro-estructural multiescala, en el cual las variables estudiadas para medir la difusividad de Cl de concretos fueron: la relación a/c (w/c), el grado de hidratación (α), el volumen de agregados (V_{agg}), la distribución de partículas de agregado grueso y fino, el espesor de la zona de transición interfacial y el contenido de aire. Finalmente se eligieron las variables de mayor influencia quedando el modelo de difusión de cloruros, D (m^2/s), como:

$$D = 10^{(-10.22 + 8.58(w/c) - 4.99\alpha - 3.04V_{agg} + 5.09\alpha(w/c) - 0.91(w/c)V_{agg} + 1.6\alpha V_{agg} - 6.58(w/c)^2 - 0.92\alpha^2 + 0.53V_{2agg})} \quad [34]$$

- Hansen y Saouma (1999) aplicaron los principios de algunos modelos numéricos, como los propuestos por Tang y Nilsson (1994) y Mangat y Molloy (1994) mediante un análisis de elemento finito usando el programa comercial ABAQUS, para difusión de Cloruros realizando predicciones de tiempo para alcanzar la concentración crítica de cloruros, la Difusión dependiente del tiempo y la incorporación de la dependencia de la temperatura considerada por Tang y Nilsson (1994).
- Luciano y Miltenberg (1999) determinaron un Modelo empírico para determinar un coeficiente de predicción D_p en función de las proporciones de la mezcla de concreto. El resultado fue una ecuación, diseñada por análisis estadístico, de una base de datos que incluye como variables la relación a/c (x_1), el contenido de materiales cementantes (x_2 a x_5), el tiempo de curado (x_6), la temperatura (x_7) y el tipo de agregados (x_8 ó x_9).

$$D_p = (5.760 + 5.810x_1 - 0.567x_2 - 1.323x_3 + 0.740x_4 - 2.117x_5 - 2.780x_6 + 0.254x_7 - 0.368x_8 + 1.071x_1x_4 - 2.891x_1x_6 - 1.503x_4x_6)^2 \quad [35]$$

- Hooton y col. (2002) estudiaron el efecto del tiempo de curado en la determinación de vida de servicio y la obtención del coeficiente de difusión D a partir de pruebas de migración (RMT).

$$D_{nssm} = \frac{0.239 (273+T)L}{(U-2)t} \quad [36]$$

donde:

U = potencial aplicado, v

T = temperatura de la solución, °C

t = duración de la prueba, h

L = Espesor del espécimen, mm

- Zhang y Lounis (2006) realizaron el análisis de sensibilidad de un modelo de iniciación de la corrosión basado en el mecanismo de difusión en estructuras de concreto expuestas a cloruros. Se determinó la sensibilidad del tiempo para inicio de la corrosión (T_i), gobernado por cuatro parámetros que incluyen la difusividad de cloruros en el concreto (D), el umbral de cloruros (C_{th}), la profundidad del recubrimiento de concreto (d_c) y la concentración superficial de cloruros (C_s), erf^{-1} es la inversa de la función error de Gauss:

$$T_i = f(C_s, C_{th}, D, d_c) = \frac{d_c^2}{4D[erf^{-1}(1-C_{th}/C_s)]^2} \quad [37]$$

- Hwan y Yup (2007) proponen un modelo que considera los efectos del material y parámetros ambientales en la difusión de cloruros. Se modela la penetración de cloruros considerando su dependencia del tiempo (t), humedad relativa (HR), temperatura (T), enlace de cloruros y el transporte de humedad. Realizaron un análisis de sensibilidad para determinar la influencia de estos parámetros en el proceso de penetración de cloruros.

$$D_c = D_c^R f_T(T) * f_t(t) * f_h(h) \quad [38]$$

donde:

D_c^R = Coeficiente de difusión para algunas condiciones de referencia definidas como: D_c (m^2/s); temperatura, $T_0 = 23$ °C; humedad relativa, $h = 100$ % y grado de hidratación del cemento, 28 días.

$f_T(T)$, $f_t(t)$ y $f_h(h)$ son los factores que representan la dependencia de D_c sobre la temperatura, la edad y la humedad relativa.

Todos estos modelos parten de la determinación de un coeficiente de difusión efectivo o aparente que puede estar relacionado a diversas variables, obtenido por diversos experimentos, principalmente mediante la técnica de perfiles de concentración de cloruros.

Sin embargo, existen diferencias en la interpretación de estos perfiles, pues su forma se ve afectada por la influencia de las diferentes variables consideradas en algunos modelos.

Por otra parte, algunos estudios parten de pruebas aceleradas que no siempre reflejan las condiciones reales de exposición del concreto armado, por lo cual es necesario hacer el monitoreo correspondiente para verificar los resultados en campo. Aunado a esto, la mayoría de los modelos se han desarrollado para condiciones específicas y es importante tratar de unificar las condiciones y parámetros de referencia para ir definiendo un rango de difusividad en concreto armado acorde a las condiciones reales de trabajo y de exposición.

También se han desarrollado programas de cómputo para modelos de predicción con el fin de determinar el tiempo de vida útil de las estructuras de concreto, sujetas a diferentes condiciones de exposición, como los Programas LIFE 365TM y DuraCrete Project:

- LIFE-365 SERVICE LIFE PREDICTION MODELTM and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides (Bentz,2008): Es una guía para la planeación y diseño de estructuras de concreto expuestas a cloruros durante su vida de servicio, los análisis que realiza son,
 - ✓ predicción del tiempo para inicio de corrosión o periodo de iniciación, T_i
 - ✓ Predicción del tiempo para que la corrosión llegue a un nivel inaceptable o periodo de propagación, T_p
 - ✓ Determinar el calendario de reparación
 - ✓ Estimar costos del ciclo de vida basado en los costos del concreto inicial y gastos futuros de reparación.

El modelo para predecir el tiempo para inicio de corrosión se basa en la 2ª Ley de Fick (Ec.29) y el coeficiente de difusión de cloruros es función del tiempo y temperatura, usando la siguiente relación para considerar los cambios en la difusión dependiente del tiempo.

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad [39]$$

donde $D(t)$ = Coeficiente de difusión a un tiempo t
 D_{ref} = Coeficiente de difusión a un tiempo de referencia t_{ref} (28 días en Life-365)
 m = constante que depende de las proporciones de la mezcla

y para los cambios en función de la temperatura, se utiliza la siguiente ecuación:

$$D(T) = D_{ref} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad [40]$$

donde $D(T)$ = Coeficiente de difusión a un tiempo t
 D_{ref} = Coeficiente de difusión a un tiempo de referencia t_{ref}
 U = Activación de energía del proceso de difusión (35000 J/mol)
 R = Constante de gas
 T = Temperatura absoluta

- DURACRETE: SERVICE LIFE DESIGN FOR CONCRETE STRUCTURES. A basis for durability of other building materials and components (Siemes & Cowi,1999): En DuraCrete Project, se analizan las acciones ambientales y se identifican los mecanismos de degradación relevantes; en este modelo matemático se describe el proceso de degradación dependiente del tiempo y la resistencia del material. Los parámetros empleados corresponden a carga y resistencia variables, tales como dimensiones estructurales, parámetros ambientales y propiedades del material:

$$x(t) = 2 k \sqrt{D_{cl,0} k_e k_c t \left(\frac{t_0}{t}\right)^n} \quad [41]$$

$$k = erf^{-1} \left(1 - \frac{C_{th}}{C_s}\right) \quad [42]$$

donde:

Carga variable:	Resistencia variable:
C_s =concentración superficial de Cl	$x(t)$ =Recubrimiento de concreto requerido
D = coeficiente de difusión de Cl	C_{th} =Concentración crítica de Cl

y los factores k_e y k_c son relativos al ambiente y periodo de curado, respectivamente, el factor de edad n considera la vida de servicio t , deseada.

3. EXPERIMENTACIÓN

El trabajo de experimentación está regido por los lineamientos del Proyecto "DURACON" INFLUENCIA DE LA ACCION DEL MEDIO AMBIENTE EN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO XV.3 para las probetas expuestas en la estación "Progreso", correspondiente a un ambiente marino, ubicada en el Puerto de Progreso, Yucatán, México. Con fecha de inicio de exposición en febrero de 2003 y datos hasta diciembre de 2007.

Para la implementación y desarrollo de este proyecto se establecieron criterios generales sobre los materiales a utilizar, probetas, ensayos y evaluación de parámetros de durabilidad y corrosión.

La metodología empleada en la investigación para las determinaciones de parámetros físicos, mecánicos, electroquímicos y ambientales se basa en las especificaciones dadas en el Manual DURAR (Trocónis y col., 1998) con apego a las normas ASTM e ISO.

En el desarrollo del trabajo fue necesaria la validación de procedimientos como la determinación de difusividad hidráulica y del modelo de concentración superficial de cloruros. Para la difusividad hidráulica se procedió al análisis de perfiles de penetración de humedad del trabajo experimental desarrollado por Cano (2003) y para el modelo de concentración superficial se analizaron perfiles de penetración de cloruros del trabajo experimental empleado por Mendoza (2009).

3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1 Materiales para la fabricación de especímenes (vigas DURACON).

Diseño de mezcla:

- Relación $a/c = 0.45$ y 0.65
- Para relación $a/c = 0.45$, mínimo de cemento 400 kg por m^3 de concreto
- Para relación $a/c = 0.65$, $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ mínimo
- TMA = 13 mm
- Tipo de cemento: Cemento Portland Ordinario
- Revenimiento = $10 \pm 1 \text{ cm}$
- Tipo de agregado: siliceo triturado de 13 mm
- Tipo de arena: cuarzosa
- Adición de plastificante: Sikament 190 CR
- Encofrado: metálico

- Curado: en cámara húmeda o en su defecto inmersión en agua de cal, según norma ASTM C 192 por 7 días.

Los componentes principales de las mezclas, según diseño, están dados en la Tabla 3.1.1.I, con valor de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, para las relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.65 respectivamente.

Tabla 3.1.1.I. Características de las mezclas de concreto OPC, de las vigas DURACON

Material (kg/m^3)	Relación 0.45 $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$	Relación 0.65 $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$
Cemento	411	285
Agua	185	185
Agregado pétreo	1010	1033
Agregado fino	731	812
Aditivo	4 cc/kg cemento	

3.1.2 Materiales y métodos empleados en el estudio de absorción capilar y difusividad hidráulica de los especímenes de concreto OPC, HSC Y SCC (Cano,2003)

- Análisis de los perfiles de penetración de humedad obtenidos en pruebas de absorción capilar de agua, realizadas en especímenes elaborados con cuatro mezclas de concreto (tabla 3.1.2.I), ordinario (OPC), alta resistencia (HSC) y autoconsolidante con adiciones de ceniza volante en un 30% (SCC30) y 50% (SCC50), preparadas de acuerdo a la norma ASTM C 192.

Tabla 3.1.2.I. Características de las mezclas de concreto OPC, HSC y SCC (Cano,2003)

Mezcla	OPC	HSC	SCC30	SCC50
Relación a/c	0.6	0.30	0.33	0.36
Dosificación de la mezcla (kg/m^3)				
Cemento	329	495	382	250
Humo de sílice	-	43	-	-
Ceniza volante	-	-	164	250
Agua	197	160	182	182
Arena	853	640	692	692
Grava	921	1040	871	871
Reductor de agua de alto rango/ HRWR (L/m^3)	-	1.8	1.8	1.8

- Los especímenes fueron cilíndricos, elaborados por triplicado, de 48 mm de diámetro y 100 mm de altura, sometidos a seis diferentes regímenes de curado (tabla 3.1.2.II). Después del curado, se acondicionaron mediante secado en horno a 105°C , hasta alcanzar una masa constante.

Tabla 3.1.2.II. Regímenes de Curado de los especímenes (Cano,2003)

Tipo		Características
1	HMC28D	Curado en húmedo 28d a 38°C
2	SMC28D	Curado estándar 28 d a 23°C
3	HMC1D	Curado 1 d a 38°C
4	HMC7D	Curado 7 d a 38°C
5	HAC	Curado en aire 28d a 38°C
6	HCC	Curado con membrana a 38°C

- Acondicionamiento. Para minimizar las microgrietas todos los especímenes se secaron a una temperatura de 38°C, previo al secado a 105°C se aplicó resina epóxica en los lados para garantizar un solo frente de penetración de agua y se sometieron a pruebas de absorción capilar con el fin de determinar la sortividad. Todos los experimentos se desarrollaron a una temperatura ambiental de 22± 2°C (Cano,2003).
- Realización de las pruebas de absorción capilar. Las probetas con peso inicial seco, se sometieron a un proceso de absorción capilar determinando el peso a diferentes intervalos de tiempo de exposición 30, 60, 120, 240 y 480 min; 24, 48 y 96 h, hasta alcanzar un peso constante en los especímenes. En cada tiempo de pesado uno de los especímenes se colocaba en un equipo de resonancia magnética para obtener los perfiles de penetración de agua (Cano,2003).
- Análisis de la información para obtener la difusividad hidráulica de cada espécimen, a partir de los perfiles de penetración de agua y de los datos gravimétricos de acuerdo al método de Hall (1989) y la solución de la ecuación [18].
- Determinación de la difusividad hidráulica a partir de la sortividad de acuerdo al método propuesto por Lockington (Lockington,1999; Leech,2003) asumiendo funciones de difusividad expresadas por las ecuaciones $D = D_0 e^{n\theta}$ y $D = D_0 \theta^n$ [ec.23 y 24].
- Los valores de "n" considerados fueron de 6 a 8, recomendados por Lockington para materiales de construcción, aunque inclusive se hicieron determinaciones en el rango de valores de $n=4$ a $n=10$. Valores altos de n indican un frente de penetración saturado con una muy rápida disminución en el contenido de humedad (Leech,2003).
- Obtención de los perfiles de penetración de agua para cada espécimen empleando el programa de computadora COMSOL Multiphysics 3.3™ para dar solución a la ec. [19], a partir de las funciones de difusividad obtenidas por ambos métodos.

3.1.3 Métodos empleados en el estudio de los especímenes de concreto OPC (vigas DURACON)

- Se colocaron seis vigas de concreto, tres con varillas y tres de concreto simple, con dimensiones 15x15x30 cm, de cada relación a/c, 0.45 y 0.65, sometidas a exposición natural en ambiente marino. La cara principal orientada hacia los vientos dominantes. Para hacer las estimaciones de penetración de cloruros se procedió al corte de las probetas de concreto simple a los 480, 942 y 1476 días de exposición. En la tabla 3.1.3.I. se muestran la fechas y edades de los especímenes muestreados y analizados. En las vigas armadas las varillas están ubicadas simulando 1.5, 2 y 3 cm de recubrimiento (Figura 3.1.3.I).

Tabla 3.1.3.I. Fechas y edades de especímenes analizados (vigas DURACON)

	Fecha	Edad (días)
Inicio de exposición	31/enero/2003	0
1er corte	25/mayo/2004	480
2º corte	2/septiembre/2005	942
3er corte	16/febrero/2007	1476



Figura 3.1.3.I Vigas de concreto DURACON, indicando la colocación del refuerzo y los cortes efectuados, cara principal expuesta a vientos dominantes y vista de la estación climatológica de CONAGUA en Progreso, Yucatán, Mex.

- Se analizaron los parámetros climático-ambientales durante todo el periodo de ensaye con base en la metodología establecida por las normas ISO para la clasificación de la agresividad atmosférica y se determinó el tipo de microclima con base en la norma ISO 9223. La estación se localiza en la estación meteorológica de CONAGUA en Progreso, Yucatán, México (Figura 3.1.3.I).
- Se analizaron los parámetros de la calidad del concreto utilizado, como son la resistencia a la compresión, absorción capilar y la sortividad, para establecer la relación entre ellos y con la corrosión en el concreto.

La caracterización físico mecánica de las probetas de concreto se realizó en apego a las normas ASTM C 39 (Resistencia a Compresión), ASTM C 496 (Resistencia a la tracción indirecta), ASTM C 469 (Módulo de elasticidad), ASTM C 642 (Absorción total y Porosidad Total, Técnica de Göran Fagerlund (Absorción capilar) y ASTM C 1585 (Determinación de la sortividad).

- Se realizaron ensayos centrados principalmente en la caracterización del proceso de penetración de cloruros en el concreto y en la determinación del contenido crítico de cloruros para el inicio de la corrosión.

Se obtuvieron trozos de las vigas de concreto expuestas, mediante cortes de 5 cm de espesor (figura 3.1.3.II), los cuales se disgregaron y pulverizaron. La determinación de cloruros se realizó por medio del método del ión selectivo ó potenciométrico, ASTM C 114, (figura 3.1.3.III.).

- La concentración de cloruros corresponde a cloruros libres en % por peso de concreto y la evaluación de las vigas es por triplicado, determinando el promedio de cada grupo.
- Se determinaron los perfiles de concentración de cloruros a diferentes tiempos de exposición, $c(x,t)$.

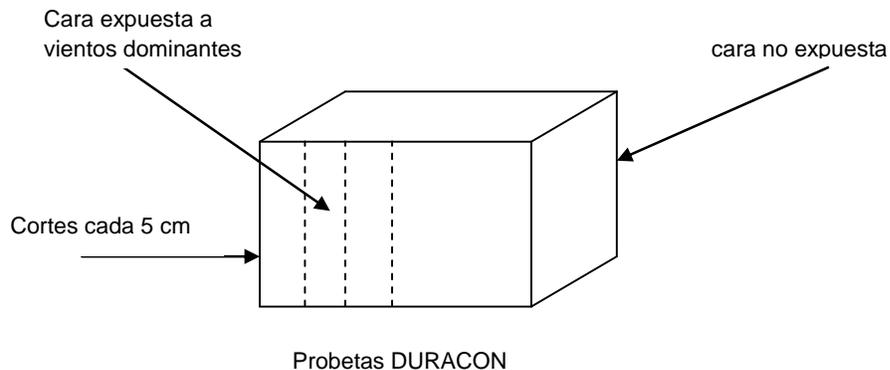


Figura 3.1.3.II Diagrama de vigas de concreto DURACON, indicando su colocación respecto a los vientos dominantes y los cortes efectuados.



Figura 3.1.3.III Técnica para obtención de polvo y Método de ión selectivo para determinación de cloruros

- Se determinaron los coeficientes de difusión de cloruros con base en la 2ª Ley de Fick, aplicando la Solución de Crank. El modelo de Crank es un procedimiento empírico para ajustar a los datos experimentales y el coeficiente de difusión efectivo, D_e , es un parámetro cinético dependiente fuertemente de las condiciones experimentales y del método matemático, donde la concentración a una profundidad x , en un tiempo t está definido por:

$$C(x,t) = C_o [1 - erf (x / 2\sqrt{Dt})] \quad [43]$$

- Se realizó el análisis e interpretación de los datos de las vigas expuestas de acuerdo a los factores ambientales involucrados.
- Se determinó la correlación que existe entre las características del ambiente estudiado y el fenómeno de penetración de cloruros.
- Se evaluaron modelos de predicción de vida útil existentes, dados por otros autores en la literatura con los datos de la investigación.
- Se determinó un modelo de concentración superficial.
- Se propone la adecuación de un modelo de difusión variable, basado en las tendencias encontradas.

4. RESULTADOS

4.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ABSORCIÓN CAPILAR Y SU RELACIÓN CON LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

Se determinaron los parámetros de Fagerlund (1993) que describen la cinética de absorción capilar y la sortividad para los dos tipos de mezclas (vigas DURACON). En la tabla 4.1.I se presentan los valores de los parámetros de absorción capilar determinados mediante las ecuaciones dadas en la sección 2.2.1 y 2.2.2. En la tabla 4.1.II se encuentran los valores dados como "Especificación de valor de sortividad para diseño por Durabilidad" de Ho & Lewis (1987), en función del tipo de ambiente de exposición y recubrimiento. En la tabla 4.1.III el rango de valores de Porosidad efectiva ϵ_e , recomendados por Durabilidad en el Manual DURAR (1998), para obtener concretos de moderada y buena calidad, así como el valor que puede indicar una durabilidad inadecuada.

Tabla 4.1.I. Parámetros de absorción capilar de dos mezclas de concreto (DURACON)

No.	Rel. a/c	sorp mm min ^{-1/2}	k kg m ⁻² s ^{-1/2}	m s m ⁻²	ϵ_e %	*S (B) m s ^{-1/2}
1	0.45	0.0890	0.01174	5.52E+07	8.72	1.35E-04
	0.45	0.0867	0.01177	5.26E+07	8.53	1.38E-04
	0.45	0.0867	0.01132	6.01E+07	8.78	1.29E-04
media	0.45	0.0875	0.01161	5.6E+07	8.68	1.34E-04
2	0.65	0.1161	0.01563	5.16E+07	11.22	1.39E-04
	0.65	0.1401	0.01883	3.82E+07	11.63	1.62E-04
	media	0.65	0.1281	0.01723	4.49E+07	11.43

Nota: *S es la sorción capilar definida en el Manual DURAR que corresponde a B definido como Coeficiente de sorción en el Capítulo 2.2.

Tabla 4.1.II. Especificación de valor de sortividad por Durabilidad (Ho & Lewis, 1987)

mm/ h ^{1/2}	mm/min ^{1/2}	Recomendación para:
3	0.387	recubrimiento 30mm ambiente severo
6	0.775	recubrimiento 30mm ambiente medio severo
6 a 12	0.77 a 1.55	recubrimiento 60mm

Tabla 4.1.III. Valores de Porosidad efectiva ϵ_e recomendados por Durabilidad en el Manual DURAR (1998)

% Porosidad Efectiva	
< 10	Concreto de buena calidad y compacidad
10-15	Concreto de moderada calidad
>15	Concreto de durabilidad inadecuada

4.1.1 Relación de los parámetros de Fagerlund con la sortividad

La sortividad es un parámetro que se determina mediante una prueba de 6 horas de duración (ASTM C 1585), mientras que los parámetros obtenidos por el Método de Fagerlund (1993,1982) requirieron pruebas de 7 días de duración. Tomando en consideración las bases teóricas del capítulo 2.2 sobre Absorción capilar, al medir ambas velocidades de absorción se determinó la correlación que existe entre los principales parámetros que definen estas pruebas. Esta correlación tiene el objetivo de poder inferir información sobre capilaridad de los concretos a partir del valor de sortividad con una prueba sencilla de corta duración.

Debido al número reducido de muestras DURACON, este estudio de correlación estadística se amplió utilizando otras bases de datos de concretos similares. En el anexo B se presentan los datos de los concretos analizados y los valores de los parámetros determinados por el Método de Fagerlund y la sortividad. Es importante hacer notar la influencia de la porosidad efectiva y que a mayor resistencia a la penetración del agua, menor sortividad. La relación entre m y s es de tipo lineal en el rango de 6.8 a 12.5 % de porosidad efectiva, debido al tamaño de los poros que se forman. Por tanto, podría decirse que para un rango de 7 a 12% de porosidad específica, la relación entre m y s es significativa.

En la figura 4.1.1.I se muestran los datos a partir de los cuales se obtuvo el modelo para la relación entre sortividad (s) y resistencia a la penetración del agua (m) y en la figura 4.1.1.II para la relación entre sortividad (s) y la porosidad específica (ϵ_e).

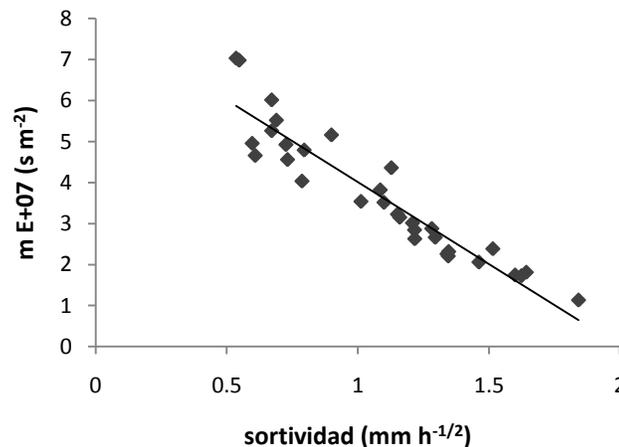


Figura 4.1.1.I. Correlación entre sortividad, s y resistencia a la penetración del agua, m

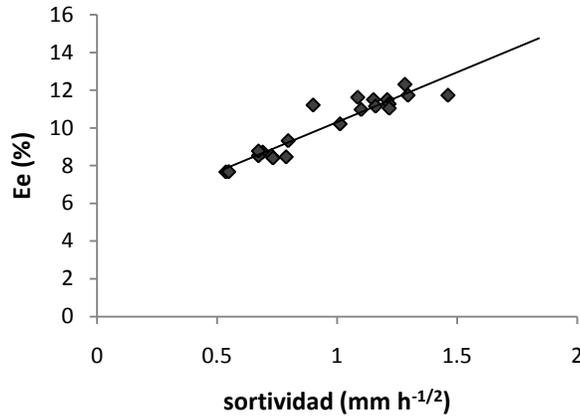


Figura 4.1.1.II. Correlación entre sortividad, s y Porosidad específica, ϵ_e

Resultados de los análisis de varianza con pruebas de comparación de medias, utilizando Diferencia Mínima Significativa (LSD) como prueba de diferencia estadística entre medias: El análisis de varianza de los modelos de regresión lineal entre las variables calculadas se realizó agrupando las mezclas en dos series, inicialmente en función del tipo de concreto. Después se analizaron dos grupos en función de la porosidad. Para cada parámetro que se determinó se analizó el efecto que tuvo la relación a/c , y finalmente se obtuvo la ecuación de regresión entre ϵ_e y s , y entre m y s . Para la mayoría de estas relaciones se registró significancia estadística, que demuestran la relación que existe entre la sortividad con los parámetros que evalúan la cinética de penetración de agua en el concreto.

Los modelos obtenidos por medio de un análisis de regresión lineal y de análisis de la varianza del modelo, para la relación de sortividad con la resistencia a la penetración del agua y la porosidad específica, son los siguientes (Tabla 4.1.1.I), donde m E+07 (s m⁻²), s (mm h^{-1/2}) y ϵ_e (%):

Tabla 4.1.1.I. Modelo de correlación entre sortividad (s) y resistencia a la penetración del agua (m) y entre sortividad (s) y Porosidad específica (ϵ_e).

Modelo	R	P
$m = -4.0036s + 8.0167$	0.941	< 0.0001
$\epsilon_e = 5.3s + 5$	0.941	< 0.0001

Con estos modelos es posible inferir el valor de resistencia a la penetración del agua a partir de la sortividad, así como hacer una estimación de la porosidad específica del concreto. El rango de valores de sortividad para el que es válido este modelo va de 0.5 a 1.8 mm h^{-1/2}.

4.2 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD HIDRÁULICA

La difusividad hidráulica permite modelar el transporte de humedad en un medio poroso a partir de perfiles de humedad transitorios, empleando el método de Boltzmann (Hall, 1989; Janz, 2000) y también se emplea en la simulación de procesos de penetración de agentes agresivos en concreto (Marchand, 2001; Conciatori, 2008). Se determinó la difusividad hidráulica de las dos mezclas de concreto OPC (vigas DURACON), con base en el Método de Lockington (1999). Por ser un método relativamente nuevo y no disponer de perfiles de penetración de humedad, ni suficientes datos de mezclas, se procedió a validar el procedimiento mediante la utilización de datos provenientes de un experimento desarrollado por Cano (2003) basado en la obtención de perfiles de penetración de agua en diferentes tipos de mezclas de concreto, tomando en consideración que la relación entre D y θ está dada por la función exponencial $D=D_0e^{n\theta}$ y un valor de $n=6$ (Lockington, 1999), recomendado para concretos.

4.2.1. Determinación de la difusividad hidráulica a partir de los perfiles de penetración.

Los perfiles típicos de penetración transformados de Boltzmann (PTB) se presentan en la figura 4.2.1.I(a). La difusividad en función del contenido de humedad se presenta en la figura 4.2.1.I(b). Estos perfiles se compararon empleando la función de difusividad, con el Programa FemLab se solucionó la ecuación [19] y se obtuvieron los perfiles mostrados en la figura 4.2.1.I(c) que se comparan con los originales. En estas figuras se observa que es posible obtener una buena predicción de los perfiles de penetración. Las funciones de difusividad hidráulica obtenidas tuvieron un coeficiente de determinación de 99.99%.

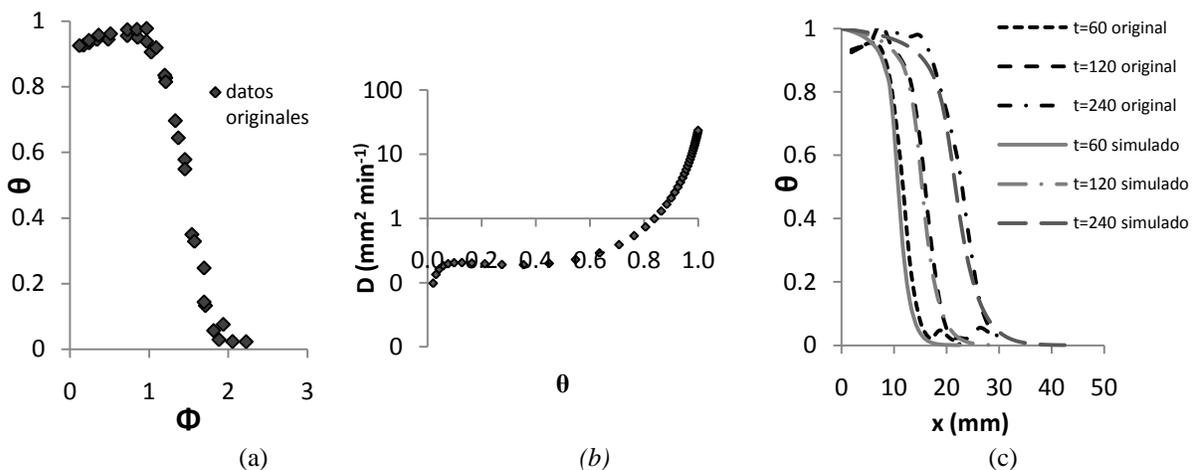


Figura 4.2.1.I(a) Datos de perfiles transformados de Boltzmann (PTB); (b) Difusividad en función del contenido de humedad; (c) Perfiles de penetración de agua originales comparados con los perfiles obtenidos a partir de la difusividad (perfiles simulados).

En la figura 4.2.1.II se muestran las funciones de difusividad, D ($\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$), calculada a partir de los perfiles de penetración originales en especímenes sometidos al mismo régimen de curado de cuatro mezclas de concreto. Es importante hacer notar la forma que toma $D(\theta)$ para las cuatro mezclas, ya que difiere de la forma obtenida con las funciones exponencial y potencial [ec.23 y 24] y es similar a la difusividad hidráulica reportada recientemente por Picandet *et al.* (2008).

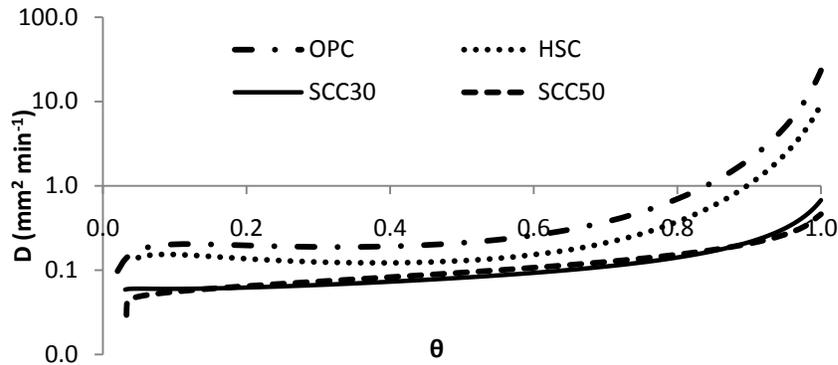


Figura 4.2.1.II. Difusividad hidráulica, D ($\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$), calculada a partir de los perfiles de penetración originales, para especímenes de cuatro mezclas de concreto con régimen de curado HMC28D.

La evaluación de la difusividad con respecto a los regímenes de curado fue similar en las 4 mezclas, la menor difusividad fue para el régimen 1(HMC28D) y 4(HMC7D), seguido del 3(HMC1D); la difusividad mayor fue para el régimen 5(HAC), seguido del 6(HCC). Esto es indicativo del grado de permeabilidad de los especímenes y concuerda con lo reportado por Cano (2003, 2006) sobre los beneficios del curado en húmedo y sobre la similitud de resultados en los curados a 28 y 7 días.

Los perfiles de penetración obtenidos mediante el programa COMSOL Multiphysics 3.3 fueron en algunos casos similares a los originales (fig.4.2.1.I(c)), sin embargo las ecuaciones de difusividad que mejor representaron los perfiles originales correspondieron a una ecuación polinomial del tipo:

$$y=(a+cx+ex^2)/(1+bx+dx^2) \quad [44]$$

donde a, b, c, d y e son valores empíricos que representan el perfil de un frente de penetración saturado con una muy rápida disminución en el contenido de humedad, lo cual corresponde según la literatura (Leech,2003) a un valor de " n " grande, mayor a 10 inclusive, pero que en este caso no se ajusta al modelo exponencial o potencial asumido por este método. Se considera posible encontrar una función matemática más precisa que defina este tipo de perfiles.

En la figura 4.2.1.III se muestra el PTB de los datos originales y los obtenidos mediante una ecuación polinomial del tipo de la ecuación [44].

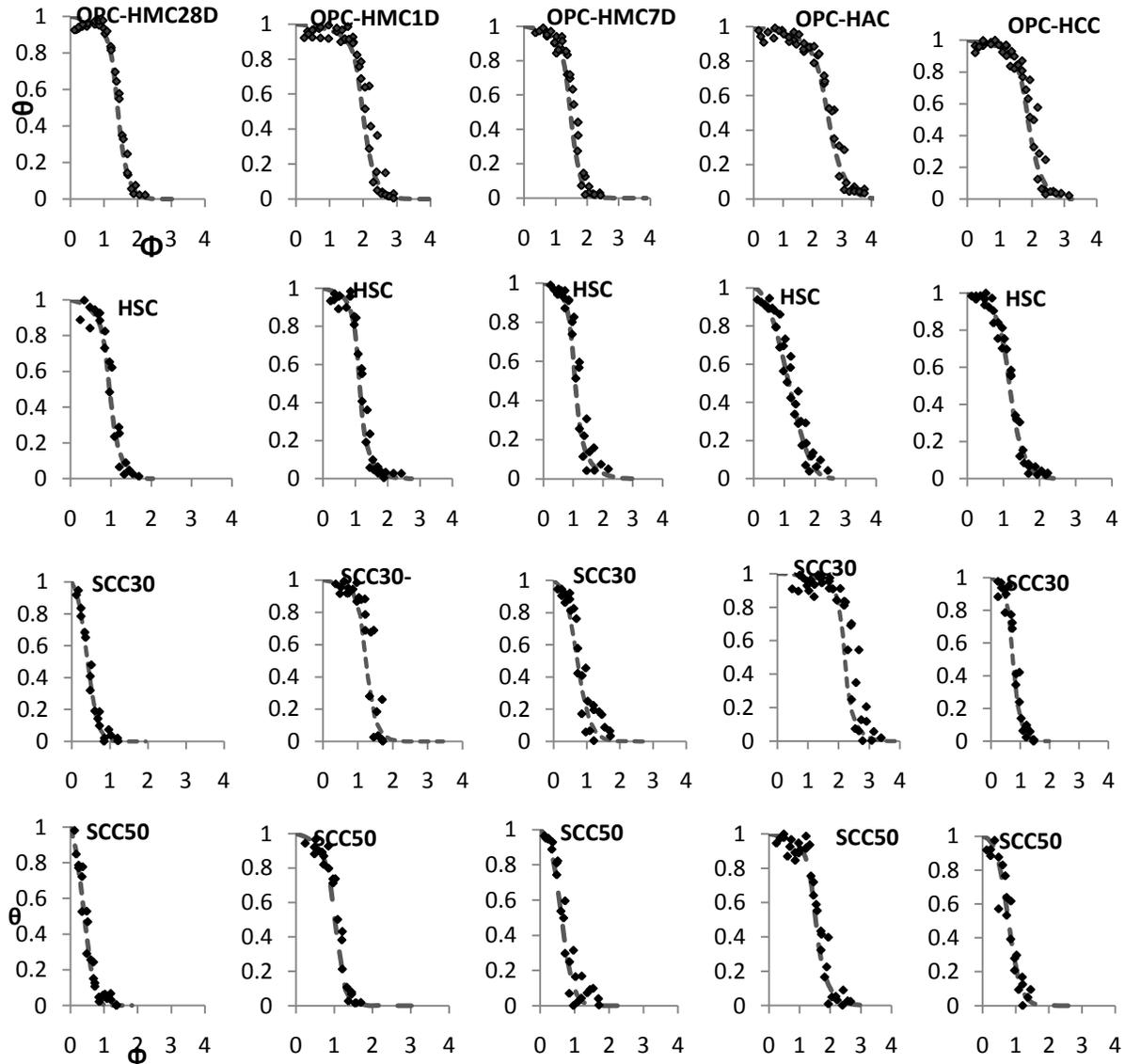


Figura 4.2.1.III. Comparación de los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) originales que corresponden a una función polinomial obtenidos para las mezclas OPC, HSC, SCC30 y SCC50, para cada régimen de curado, contra la serie de datos originales graficados en función de Φ . (El símbolo \blacklozenge corresponde a los datos de PTB originales y ----- corresponde a la función polinomial.)

4.2.2. Determinación de la difusividad hidráulica a partir de la sortividad.

El valor de la sortividad al agua determinado para cada espécimen se muestra en la figura 4.2.2.I. El valor de este parámetro fue menor para el concreto autoconsolidante (mezclas SCC30 y SCC50), especialmente para el curado en húmedo a 28 y 7 días. Los valores mayores correspondieron al concreto ordinario (OPC) y los procesos de curado con

aire y membrana (HAC y HCC). En el concreto autoconsolidante, el curado con membrana disminuye notablemente la sortividad con respecto al curado en aire y el curado en húmedo por un día, debido a que ambos contienen ceniza volante, la cual requiere mayor tiempo de curado por la reacción puzolánica lenta. Tomando en consideración investigaciones previas [Ho,1996; Chirgwin,1990; Ho,1987] que indican que a menor sortividad, mayor durabilidad, los resultados muestran claramente que el curado en húmedo a 28 y a 7 días fue el mejor y/o más efectivo, ya que produjo un concreto con alta calidad en el recubrimiento, tal y como lo concluyó Cano (2003, 2006).

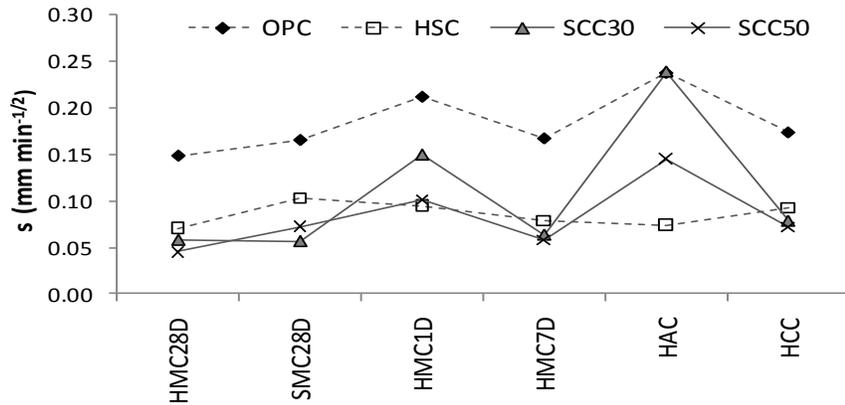


Figura 4.2.2.I. Valores de sortividad para las cuatro mezclas de concreto (OPC, HSC, SCC30 y SCC50) y los seis regímenes de curado correspondientes.

En la figura 4.2.2.II.(a) se muestra la difusividad de uno de los especímenes obtenida a partir de los perfiles de penetración y la difusividad obtenida por el procedimiento descrito por Lockington *et al.* (1999) para las funciones exponencial y potencial; en la figura 4.2.2.II. (b) los PTB de dichas funciones.

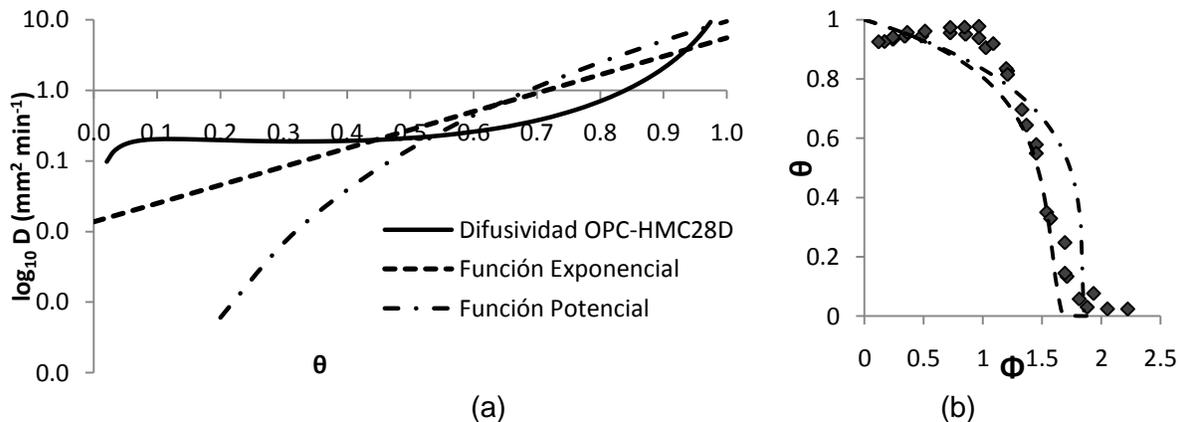


Figura 4.2.2.II. Comparación de la Difusividad hidráulica y perfiles transformados de Boltzmann (PTB), obtenidos mediante los perfiles de penetración y a partir del valor de sortividad, aplicando el método de Lockington para una función exponencial y una función potencial.

En la figura 4.2.2.III se muestran los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) originales, comparados con los PTB obtenidos por el método de Lockington et al. (1999), usando una función exponencial [ec.23]. Los PTB originales corresponden a funciones de tipo polinomial que difieren de las funciones potencial y exponencial empleadas en este método.

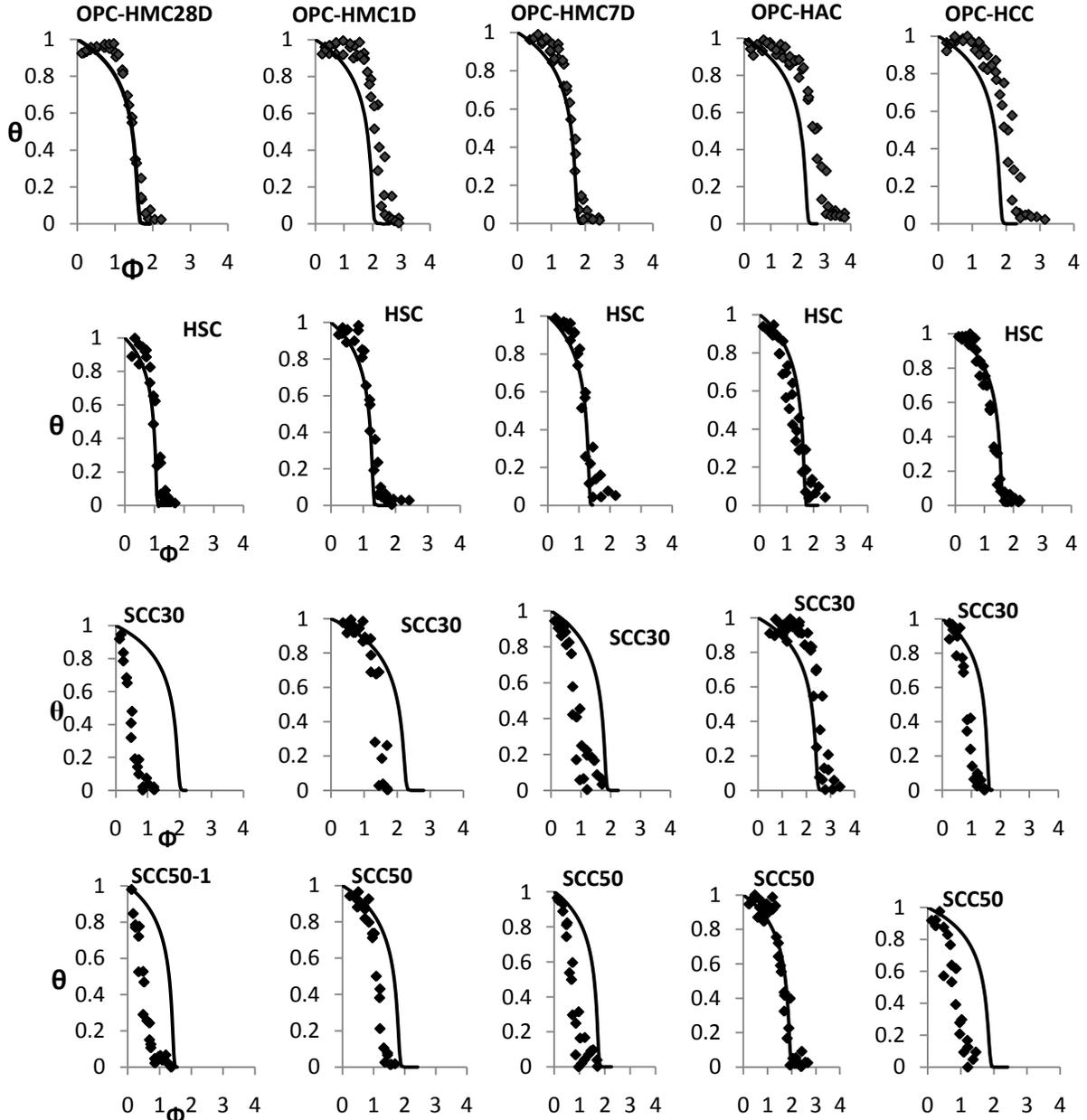


Figura 4.2.2.III. Comparación de los perfiles transformados de Boltzmann obtenidos para las mezclas OPC, HSC, SCC30 y SCC50 mediante la aplicación de la función exponencial, contra los perfiles transformados de Boltzmann (PTB) originales que corresponden a una función polinomial, para cada régimen de curado. El símbolo \blacklozenge corresponde a los datos de PTB originales y — corresponde a la función exponencial del método de Lockington.

En la comparación de los perfiles se obtuvieron perfiles típicos de penetración, para los especímenes de las mezclas OPC y HSC se logró una buena aproximación, excepto una pequeña diferencia en los especímenes de OPC con proceso de curado HAC Y HCC; para las mezclas SCC30 y SCC50 no fue posible obtener la difusividad hidráulica de los perfiles de origen, excepto en los especímenes de proceso de curado en aire, HAC (ver fig. 4.2.2.III). Esto significa que en el concreto autoconsolidante sus características, como la porosidad, influyen significativamente en los resultados. Cano (2003, 2006) comenta que el concreto autoconsolidante no solo posee una baja permeabilidad, sino que tiene una cualidad de auto-sellado cuando se presentan microgrietas, esto modifica su microestructura y en consecuencia influye en la difusividad.

4.2.3 Difusividad hidráulica en concretos DURACON

Como resultado de esta validación se encontró que aunque el Método de Lockington permite determinar la difusividad hidráulica del concreto a partir del valor de sortividad, cuando se cuenta con perfiles de penetración de humedad de mezclas de concreto es posible detectar un comportamiento en la difusividad que difiere en la forma que corresponde a una función netamente exponencial o potencial. Los valores obtenidos de D_0 para concreto OPC, relación $a/c=0.6$, sujeto a diferentes tipos de curado, se encuentran en el rango de 0.013 a 0.029, y para concreto HSC, relación $a/c=0.3$, de 0.0088 a 0.013

En el caso de los concretos DURACON, al no contar con perfiles de penetración, la difusividad Hidráulica se determinó a través de la sortividad. En la tabla 4.2.3.I se presentan los parámetros determinados por el Método de Lockington mediante los cuales se obtuvo el modelo de difusividad.

Tabla 4.2.3.I. Modelo de Difusividad Hidráulica ($\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$) para concretos DURACON

Rel a/c	sortividad $\text{mm min}^{-1/2}$	θ_s	n=6 D_0	Modelo $D=D_0e^{n\theta}$
0.45	0.0875	0.0870	0.00821	$D=0.0082e^{6\theta}$
0.65	0.1281	0.1142	0.01023	$D=0.0102e^{6\theta}$

En la figura 4.2.3.I se presenta el modelo de difusividad tipo exponencial para las dos relaciones a/c , 0.45 y 0.65, y en la figura 4.2.3.II los perfiles de penetración de humedad obtenidos para la relación a/c 0.45 (a) y relación a/c 0.65 (b), para un periodo de 8 horas.

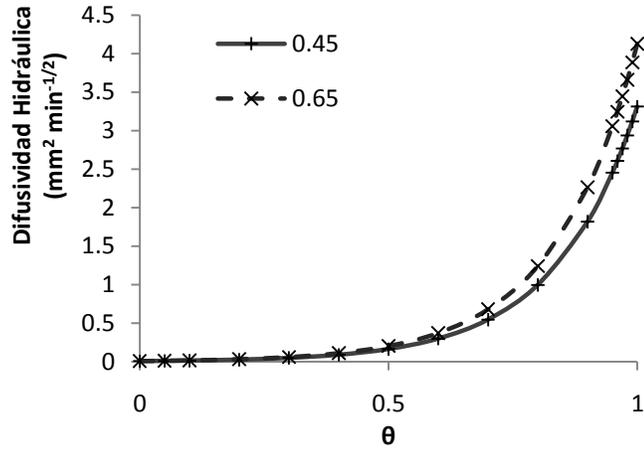


Figura 4.2.3.I. Modelo de difusividad tipo exponencial $D=D_0e^{6\theta}$ para la relación $a/c=0.45$ con $D_0=0.0082$ y relación $a/c=0.65$ con $D_0=0.0102$

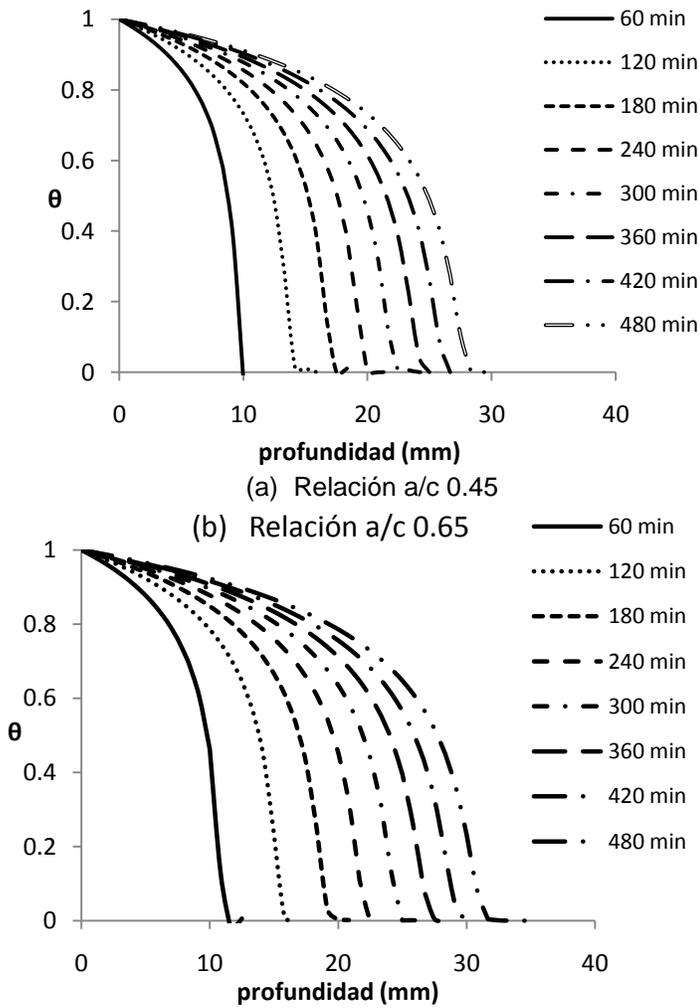


Figura 4.2.3.II. Perfiles de penetración de humedad obtenidos para la rel $a/c = 0.45$ (a) y rel $a/c = 0.65$ (b), concretos DURACON.

En la figura 4.2.3.III se muestran los Perfiles de Boltzmann obtenidos a partir del modelo (perfiles simulados) con $n=6$, aplicando el Método de Lockington.

Estos perfiles representan los perfiles típicos de penetración de agua considerando un modelo de tipo exponencial.

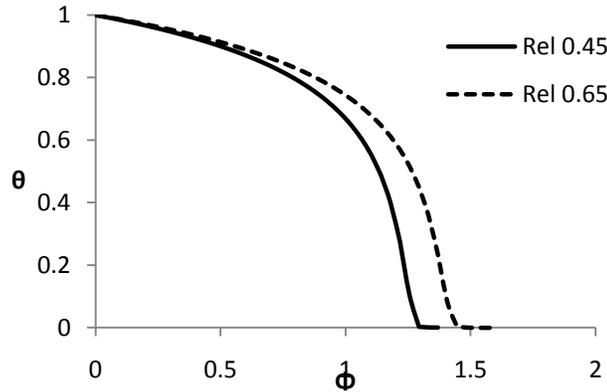


Figura 4.2.3.III. Perfiles de Boltzmann simulados con $n=6$, obtenidos aplicando el Método de Lockington.

4.2.4. Relación con la durabilidad del concreto

En la tabla 4.2.4.I se presentan los valores de D_0 que definen la difusividad del concreto para cada mezcla DURACON y los valores definidos para concreto en el experimento de validación. Estos valores corresponden a concreto sometido a curado estándar. Así también el valor de la sortividad para cada mezcla. La relación entre la sortividad y la difusividad hidráulica está definida por una tasa de 0.082 con una $R=96.5\%$. Los valores de sortividad son menores a los especificados por durabilidad por Ho y Lewis (1987), mostrados en la tabla 4.1.II, por lo cual se considera cumplen este requisito.

También en la tabla 4.2.4.I. se muestran los valores obtenidos de sortividad y difusividad hidráulica del concreto de las mezclas de referencia, concreto OPC y HSC ($n=6$) con relación a/c 0.30 y 0.60. En la figura 4.2.4.I se muestra gráficamente la comparación de difusividad hidráulica del concreto de las mezclas DURACON y las mezclas de referencia, en éstas últimas se marca claramente una diferencia de acuerdo a la relación a/c , sin embargo en los valores de las mezclas DURACON los perfiles de difusividad son muy parecidos y se apegan mas al perfil del concreto HSC de referencia. Esto puede indicar que la microestructura de las mezclas DURACON es más densa que la de las mezclas de referencia.

En la figura 4.2.4.II. se obtuvo un modelo de correlación de tipo lineal entre sortividad y Difusividad hidráulica para las mezclas DURACON, con un alto grado de significancia estadística.

Tabla 4.2.4.I Relación entre sortividad y Difusividad Hidráulica, mezclas OPC y HSC

Tipo de concreto	Sortividad $\text{mm min}^{-1/2}$	D_0 $\text{mm}^2 \text{min}^{-1}$
OPC Rel a/c=0.45	0.0875	0.00821
OPC Rel a/c=0.65	0.1281	0.01023
HSC Rel a/c=0.30	0.1022	0.00946
OPC Rel a/c=0.60	0.1613	0.01452

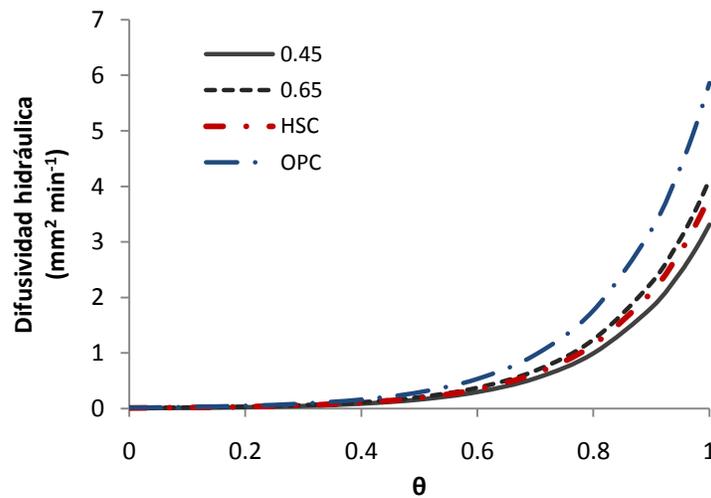


Figura 4.2.4.I Comparación de difusividad hidráulica del concreto de las mezclas DURACON contra concreto OPC y HSC (n=6)

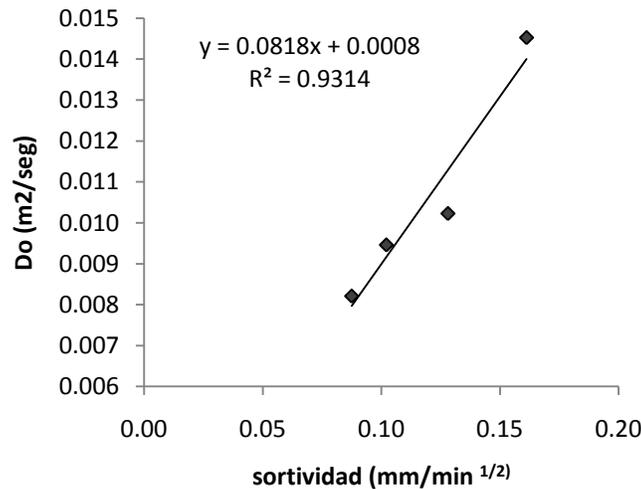


Figura 4.2.4.II. Modelo de correlación entre sortividad y Difusividad hidráulica

Los resultados analizados en este capítulo de los concretos DURACON muestran las tendencias que se presentan en la tabla 4.2.4.II en función de la relación agua/cemento. Los valores corresponden a un concreto durable evaluado por los parámetros ϵ_e , s , D_0 y $f'c$. En términos generales puede decirse que los parámetros de absorción capilar y difusividad tienen una relación directamente proporcional a la relación agua/cemento e inversamente proporcional a la resistencia a la compresión.

Tabla 4.2.4.II Parámetros de durabilidad del concreto con relaciones a/c de 0.45 y 0.65

a/c	ϵ_e %	s $\text{mm min}^{-1/2}$	Difusividad D_0	$f'c$ kg m^{-3}
0.45	0.087	0.0875	0.00821	515
0.65	0.114	0.1281	0.01023	400

4.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS AMBIENTALES Y CLASIFICACIÓN DE MICROCLIMAS EN FUNCIÓN DE SU CORROSIVIDAD

4.3.1 Parámetros ambientales

Los principales parámetros climático-ambientales que se registraron periódicamente en la estación de monitoreo corresponden a temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa HR (%), precipitación pluvial P_p (mm año^{-1}), velocidad del viento V (m s^{-1}), compuestos de azufre SO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$), cloruros Cl^- ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y dióxido de carbono CO_2 (mg L^{-1}), para un periodo de 4 años, 2003-2007. Estos datos son de una estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Adicionalmente se realizó la determinación del factor de tiempo de humectación FTDH , el cual es un factor que corresponde al número de horas en que la humedad relativa es mayor a 80% y la temperatura es mayor de 0°C . En términos generales, el TDH se refiere al periodo de tiempo en el cual las condiciones atmosféricas son favorables para la formación de una capa superficial de humedad sobre un metal. Esta capa es extremadamente importante desde el punto de vista de los mecanismos químicos del proceso de corrosión.

En la figura 4.3.1.I se muestra un comportamiento cíclico anual de la temperatura, observando una variación que va desde 29.3°C a 21.3°C , para el periodo 2003-2007. Las flechas indican los periodos en los que se realizó la toma de muestras de las vigas DURACON. Este comportamiento puede definirse como un ciclo anual que presenta ligeras variaciones año con año. Con fines de analizar este parámetro desde un punto de vista

macro, en la figura 4.3.1.II se muestra el comportamiento cíclico multianual de la temperatura para el periodo de estudio de 5 años. Es importante mencionar que se encontró una tendencia lineal de incremento en la temperatura mínima de 0.5°C anuales, lo cual significa, a corto plazo, una reducción considerable del rango actual entre la temperatura máxima promedio anual y la temperatura mínima promedio anual, detectado para este periodo de estudio y que corresponde a 8°C , misma que puede proyectarse para un periodo más largo de tiempo.

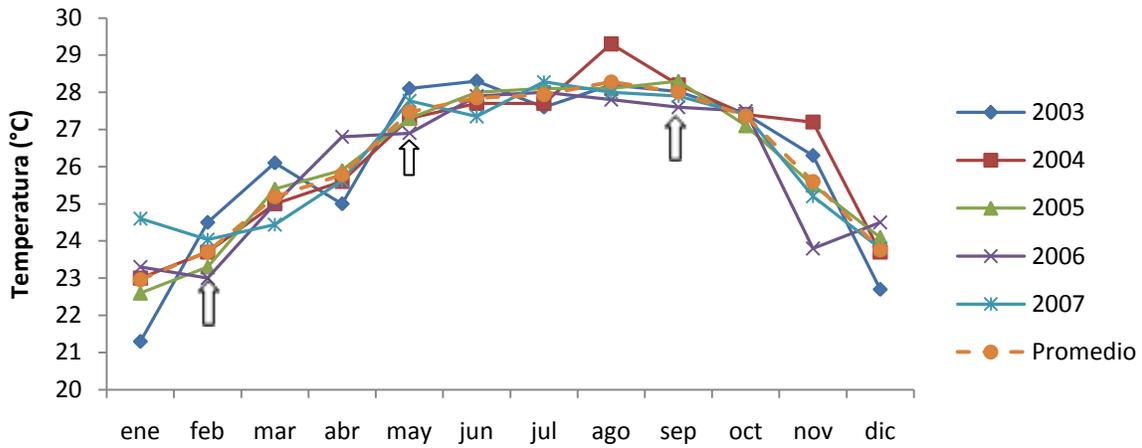


Figura 4.3.1.I. Variación anual de la temperatura (T) media en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

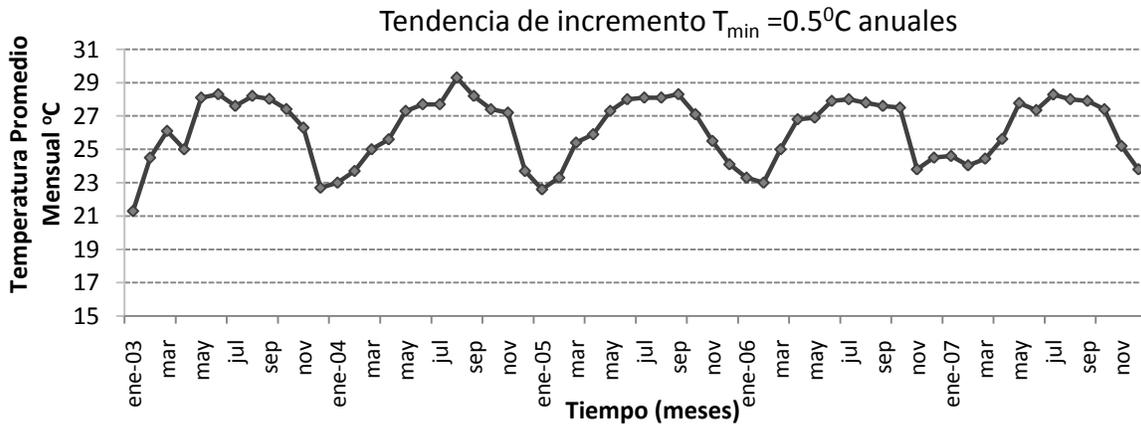
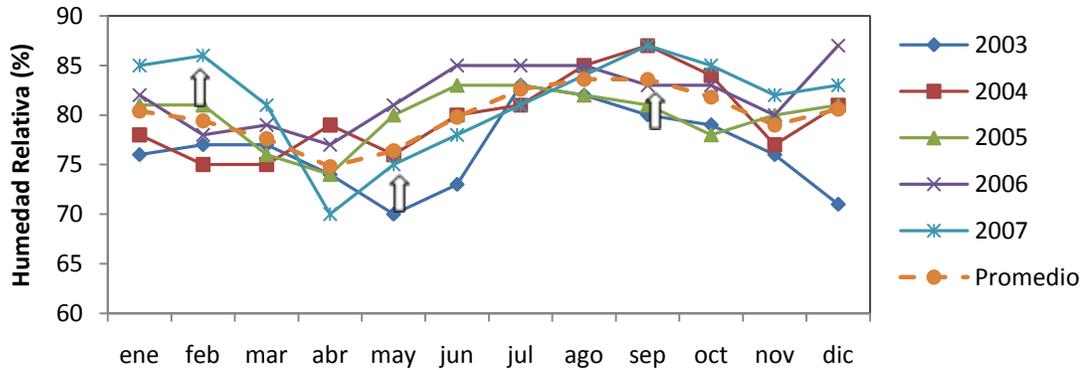


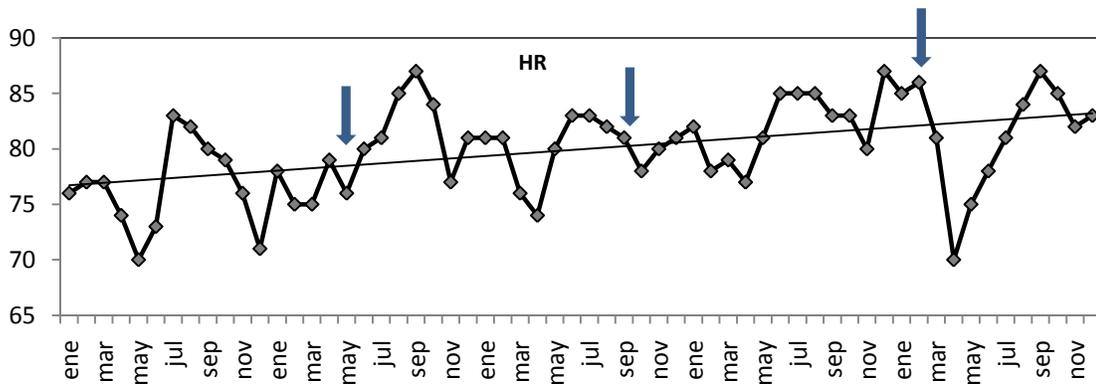
Figura 4.3.1.II. Patrón de comportamiento cíclico multianual de la temperatura media, periodo 2003-2007, en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex

La tendencia de incremento detectada es importante desde el punto de vista de ciclos macroanuales, porque se refleja directamente en los parámetros que rigen las condiciones de exposición de las estructuras de concreto.

En la figura 4.3.1.III (a) se muestra el patrón de comportamiento cíclico anual de la variación de la Humedad Relativa con valor máximo de 87% y mínimo de 70% y en la (b) las variaciones y tendencia, para el periodo 2003-2007, identificado como ciclo multianual.



(a)



(b)

Figura 4.3.1.III. Variación de la Humedad Relativa, HR, (a) anual y (b) Multianual. Valores de la media en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex., de enero 2003 a diciembre 2007.

En la figura 4.3.1.IV se presenta una gráfica que relaciona el patrón de comportamiento cíclico multianual de humedad relativa (HR) y temperatura (T), promedio mensual. Se manifiesta un periodo de HR máxima entre los meses de julio a septiembre y HR mínima en el mes de mayo generalmente, y una correspondencia gráfica entre este parámetro y la temperatura. La HR está asociada también a los periodos de precipitación pluvial que se describen enseguida.

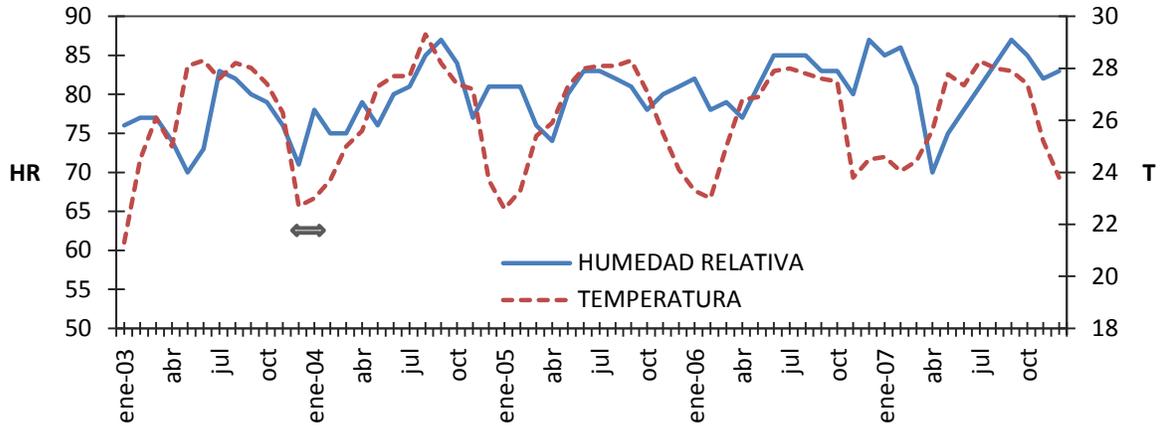


Figura 4.3.1.IV. Patrón de comportamiento cíclico multianual de humedad relativa (HR) y temperatura (T), promedio mensual. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

En la figura 4.3.1.V, se presenta el comportamiento de la precipitación pluvial promedio, haciendo notar que durante los años 2003 y 2004 se presentaron periodos de lluvias extraordinarias debido a fenómenos meteorológicos que propiciaron un incremento considerable en el volumen captado y que puede apreciarse también en la figura 4.3.1.VI

En la figura 4.3.1.VII se muestra únicamente el volumen captado para los 3 años siguientes, 2005 a 2007.

Se detectaron dos periodos en el comportamiento anual de la humedad relativa (HR) y precipitación pluvial (Pp), un periodo de sequía comprendido entre los meses de noviembre a mayo y un periodo de lluvia comprendido entre los meses de junio a octubre.

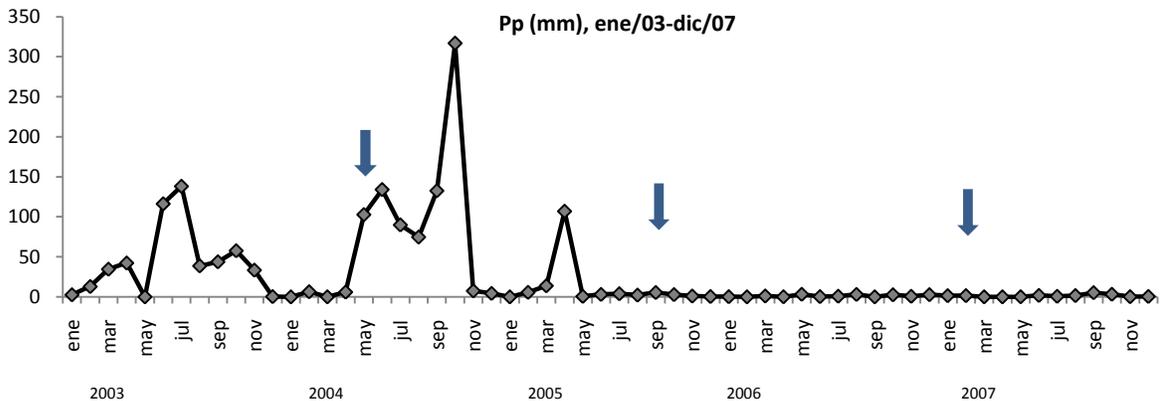


Figura 4.3.1.V. Variación de la Precipitación pluvial (Pp), periodo 2003-2007 destacando el periodo de lluvias extraordinarias. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

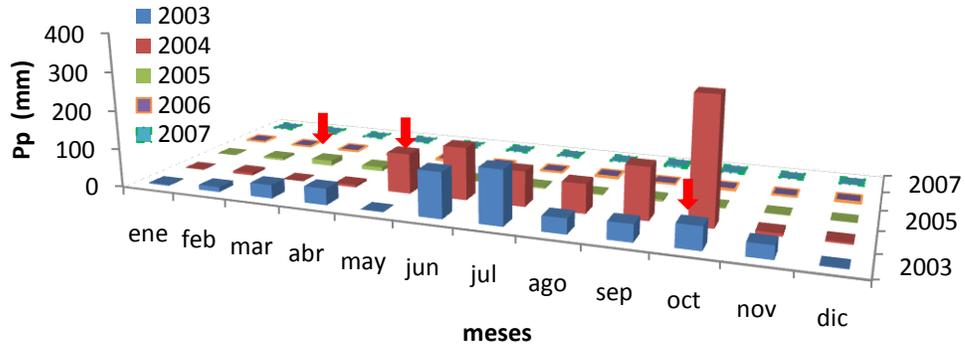


Figura 4.3.1.VI. Variación de la Precipitación pluvial (Pp), periodo 2003-2007 destacando el periodo de lluvias extraordinarias. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex

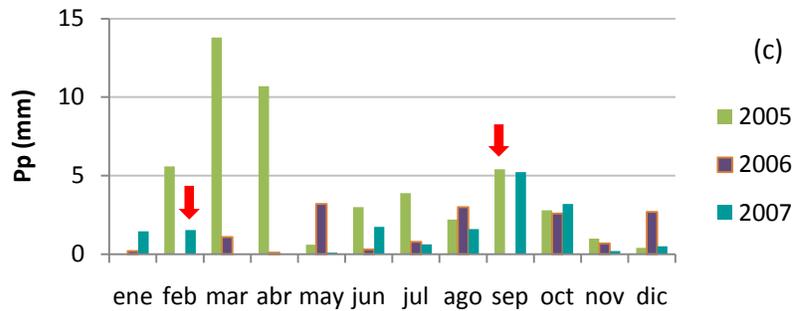


Figura 4.3.1.VII. Variación de la Precipitación pluvial (Pp), periodo 2005-2007. Estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex.

En la figura 4.3.1.VIII se presenta la variación del FTDH (factor de tiempo de humectación), promedio mensual y promedio anual y en la figura 4.3.1.IX el patrón de comportamiento cíclico multianual del periodo 2003-2007, se señala con flechas las fechas de muestreo de las vigas DURACON.

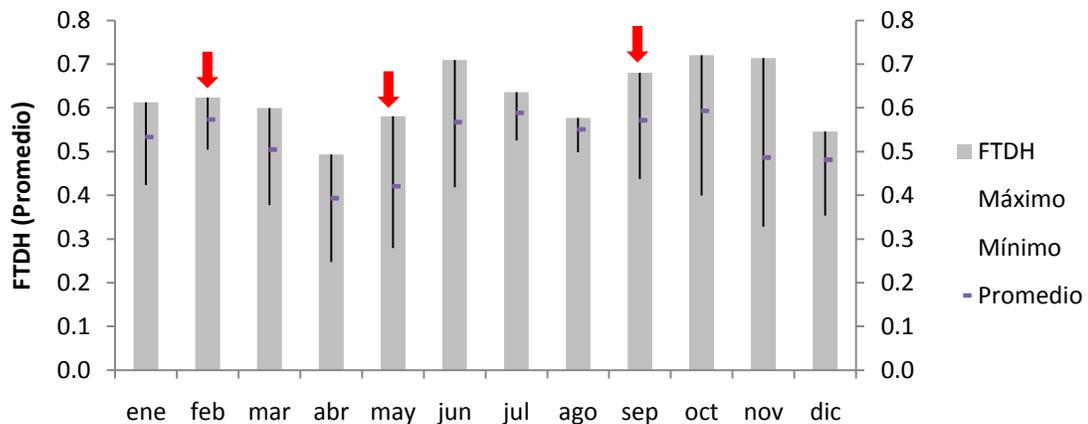


Figura 4.3.1.VIII. Variación del FTDH, promedio mensual y promedio anual, periodo 2003-2007, en el Puerto de Progreso, Yuc., Mex.

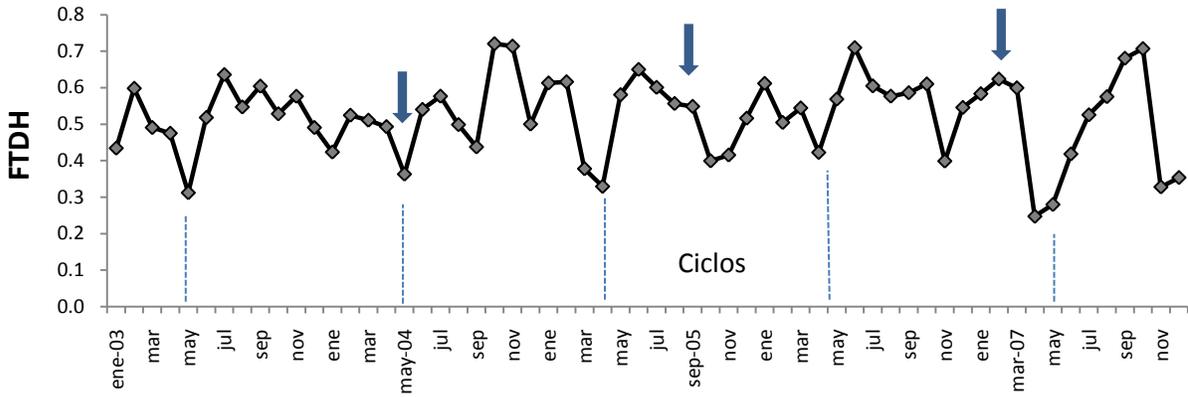


Figura 4.3.1.IX. Variación del FTDH, patrón de comportamiento multianual, periodo 2003-2007, en el Puerto de Progreso, Yuc. Mex

En la figura 4.3.1.X se muestra el patrón de comportamiento de los cloruros ambientales en la estación de Progreso, destacando que los valores de concentración son menores en los meses de agosto-septiembre y presenta los valores más altos en los meses de mayo. Los cortes y determinaciones de penetración de cloruros en las probetas expuestas se realizaron en los meses de mayo de 2004, septiembre de 2005 y febrero de 2007, indicados con flechas.

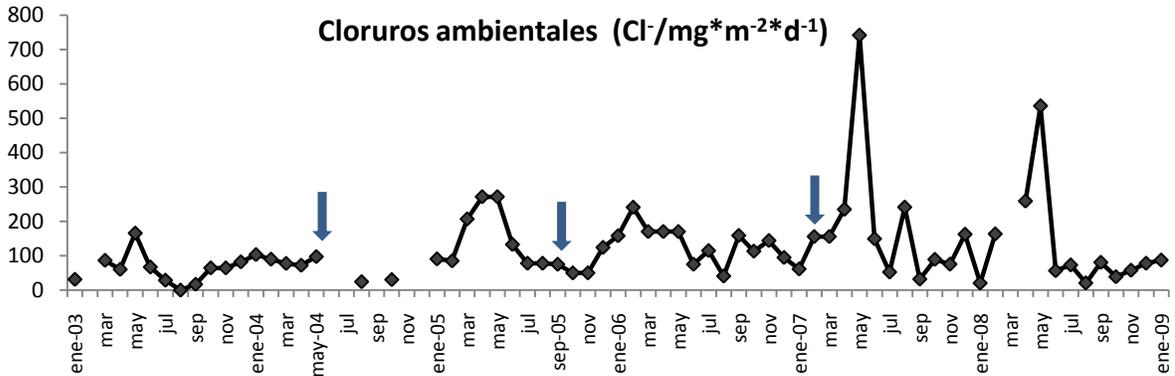


Figura 4.3.1.X. Contenido de cloruros en la atmósfera ($\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex

En la figura 4.3.1.XI se compara y analiza el comportamiento de los cloruros ambientales para el periodo 2003-2007 con relación a la precipitación pluvial, encontrando una relación significativa entre los meses de precipitación mínima anual y una concentración alta de cloruros.

El análisis combinado de estos parámetros es importante por su relación con los mecanismos de transporte, como la absorción capilar y la difusividad hidráulica del concreto.

Se tiene una concentración máxima de cloruros al inicio del periodo de lluvias y es un tiempo en el cual se produce una aceleración en el proceso de penetración con respecto al mecanismo por difusión. Y también el periodo de estiaje o secas afecta el movimiento de agua en el interior del concreto.

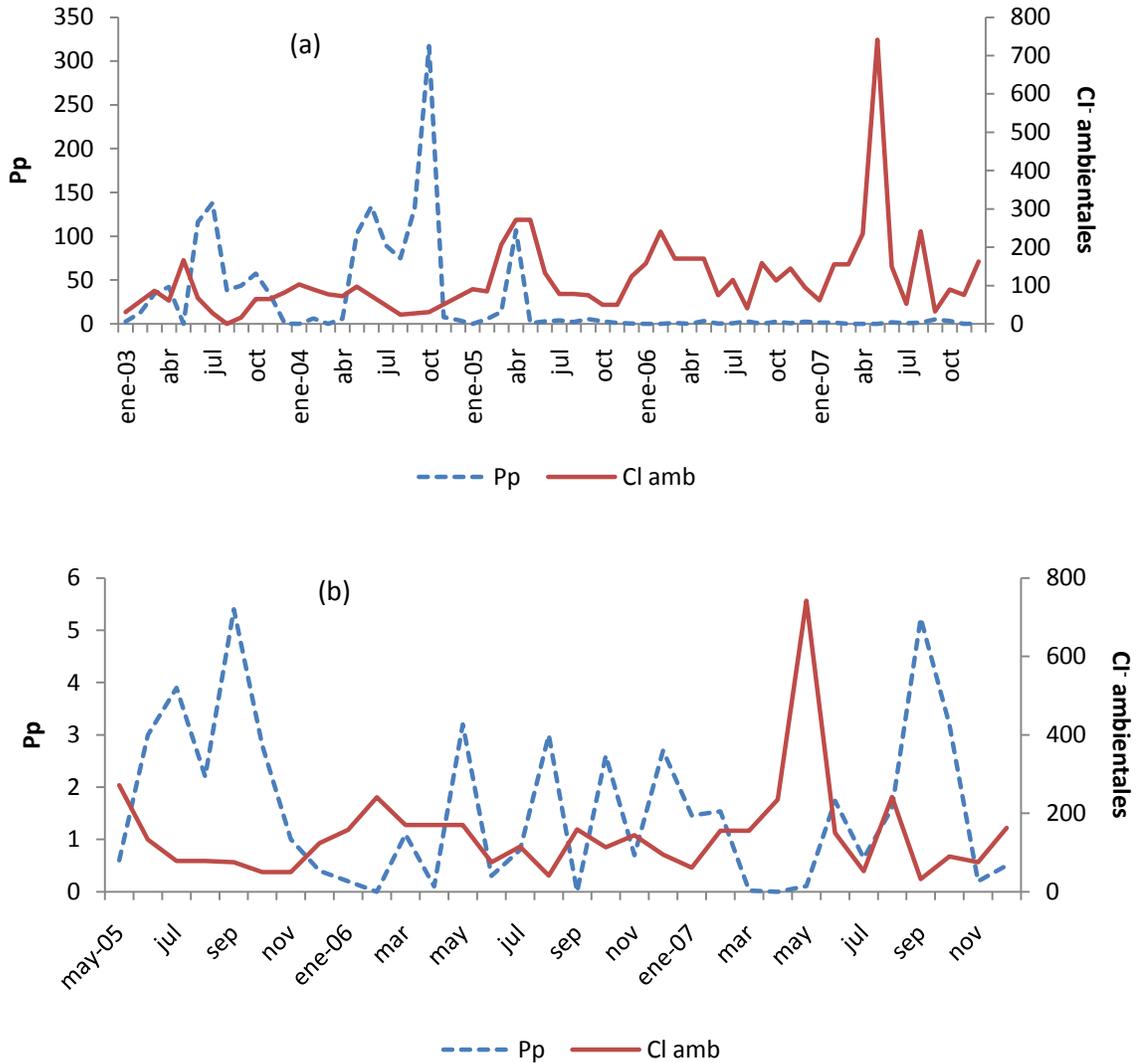


Figura 4.3.1.XI. Contenido de cloruros en la atmósfera ($\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) comparado con la precipitación pluvial (mm), (a) periodo 2003-2007 y (b) periodo May/05-Dic/07, en la estación meteorológica del Puerto de Progreso, Yuc. Mex

4.3.2 Clasificación de microclimas

El criterio de clasificación propuesto para microclimas está basado en probetas planas, de acuerdo a la ISO 9223:1992 (Genescá, 1995).

La determinación de la categoría de corrosividad de una atmósfera a partir de datos del medio ambiente se realiza de acuerdo con los efectos progresivos de la contaminación y el tiempo de humectación. A medida que aumenta la agresividad de la atmósfera, aumenta, por lo general, la velocidad de corrosión de los metales (Genescá,1995).

En las graficas siguientes, figuras 4.3.2.I y 4.3.2.II, se muestra la variación en el factor de humectación (FTDH) y la concentración de sulfatos ambientales, determinados en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex. Se determinaron los valores promedio anual de los parámetros principales, que se muestran en la tabla 4.3.2.I.

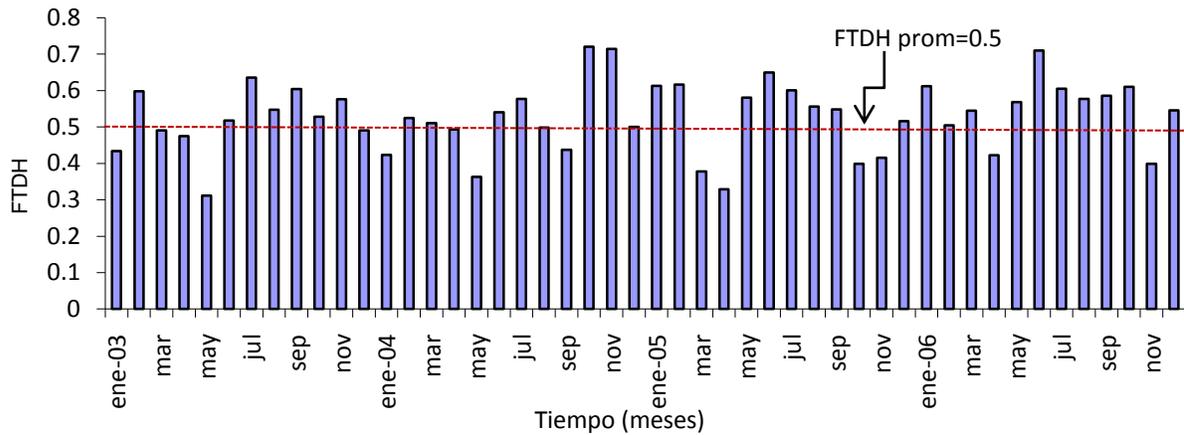


Figura 4.3.2.I. Factor de humectación (FTDH), promedio mensual, en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex.

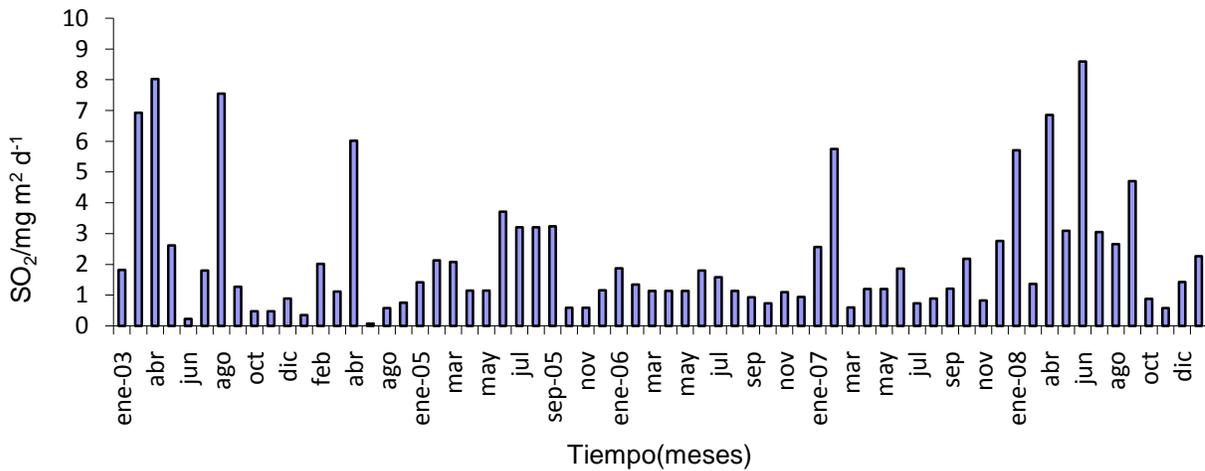


Figura 4.3.2.II. Concentración de sulfatos ambientales, promedio mensual, en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex.

Tabla 4.3.2.I. Concentración de cloruros y sulfatos ambientales, promedio anual, en la estación meteorológica de Progreso, Yuc, Mex.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Cloruros Cl ⁻ /mg m ² d ⁻¹	60.745	60.303	126.229	137.740	179.415	125.946
Sulfatos SO ₂ /mg m ² d ⁻¹	2.917	1.560	1.970	1.238	1.815	3.537

En la tabla 4.3.2.II. se presentan los valores considerados para la determinación de categoría de corrosividad de la atmósfera en Progreso, Yucatán, Mex. En el Anexo C se presentan los valores de referencia considerados para esta determinación.

Tabla 4.3.2.II Determinación de categoría de corrosividad de la atmósfera en Progreso, Yucatán, Mex.

Parámetro	Categoría (ISO 9223:1992)
Cloruros ambientales (Cl ⁻) 137.74 mg m ⁻² día ⁻¹	S ₂
Dióxido de azufre (SO ₂) 2.92 mg m ⁻² día ⁻¹	P ₀
Horas de humectación 4320	T ₄
Categoría de corrosividad	ALTA

4.4 DIFUSIÓN DE CLORUROS

4.4.1 Determinación de los perfiles concentración de cloruros

Los datos para la determinación del coeficiente de difusión de cloruros corresponden a análisis de los tres cortes efectuados a las vigas "DURACON" para tres tiempos de exposición a un ambiente marino. El inicio la exposición fue el 31 de enero de 2003.

En las figuras 4.4.1.I y 4.4.1.II se presentan los perfiles de penetración de cloruros libres de las tres vigas "DURACON" así como también el valor promedio, para las relaciones $a/c=0.45$ y $a/c=0.65$ respectivamente, a tres edades de exposición (a) 480 días, (b) 942 días y (c) 1476 días.

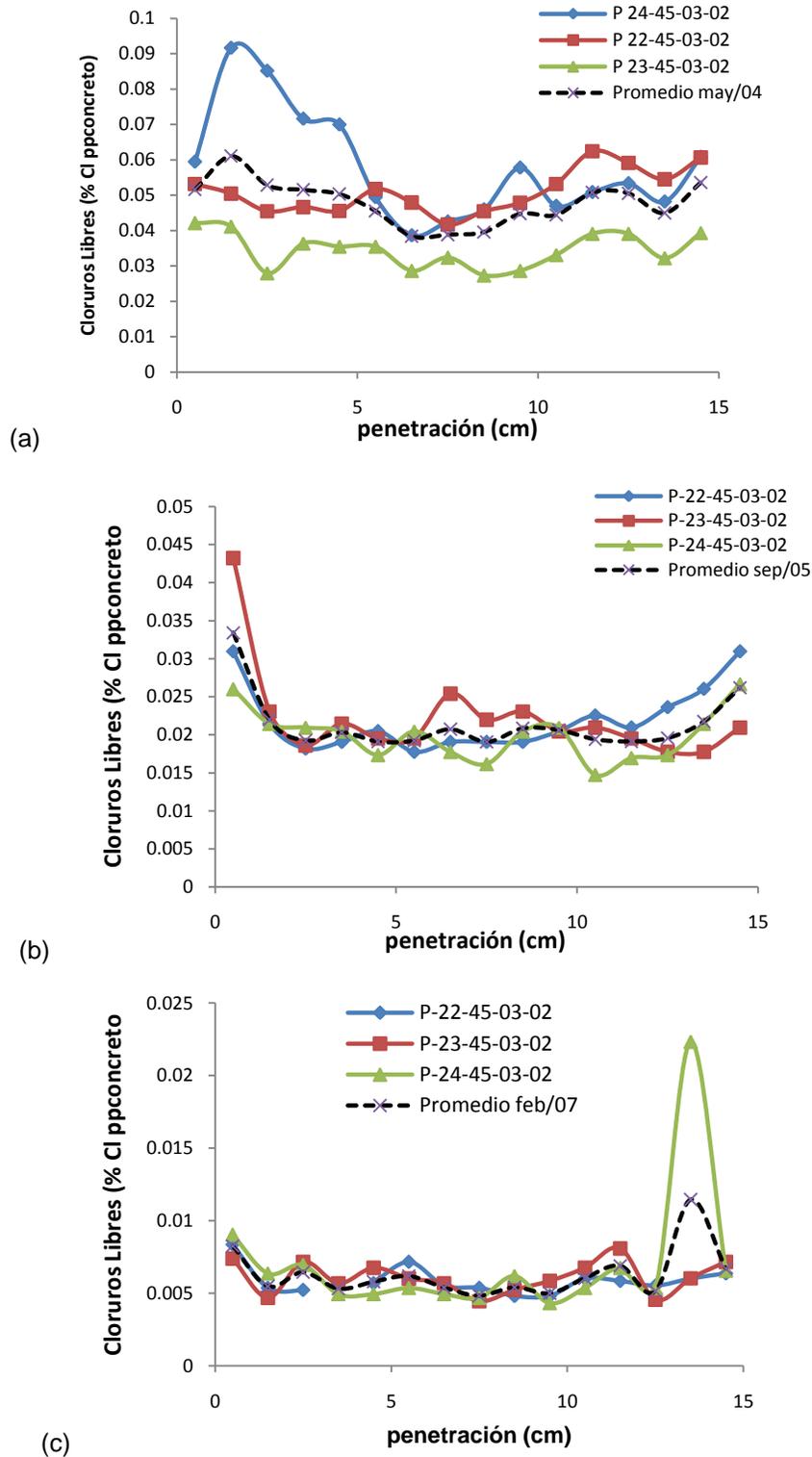


Figura 4.4.1.I. Perfiles de penetración de cloruros de las tres vigas "DURACON" relación $a/c=0.45$ a tres edades de exposición (a) 480 días, (b) 942 días y (c) 1476 días

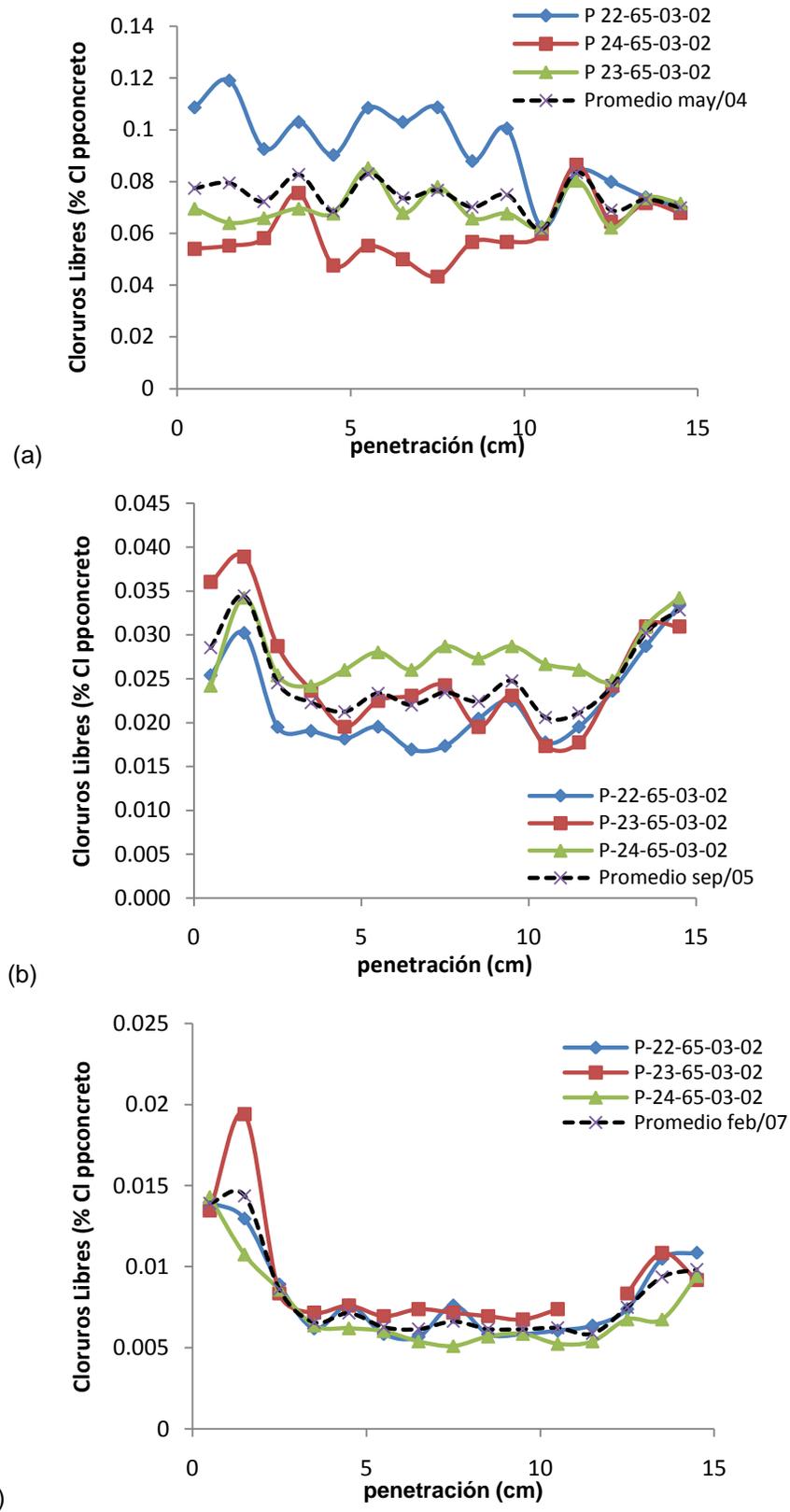


Figura 4.4.1.II. Perfiles de penetración de cloruros de las tres vigas "DURACON" relación $a/c=0.65$ a tres edades de exposición (a) 480 días, (b) 942 días y (c) 1476 días

En la figura 4.4.1.III. se observa el comportamiento de los perfiles de penetración de cloruros libres con respecto al tiempo, para la relación a/c de 0.45 (a) y 0.65 (b). Los valores corresponden al promedio de cloruros libres contenido en las vigas muestreadas y a tres tiempos de exposición, edades y época del año; este tipo de perfiles no son netamente del tipo de Fick, por estar sujetos a diferentes concentraciones superficiales de cloruros. En época de estiaje el movimiento de cloruros disminuye (febrero), en época de inicio de lluvias (mayo) el movimiento se incrementa y en época de lluvias (septiembre), derivado probablemente de un proceso de lavado, el movimiento de cloruros disminuye, tal y como puede apreciarse en las figuras (a) y (b).

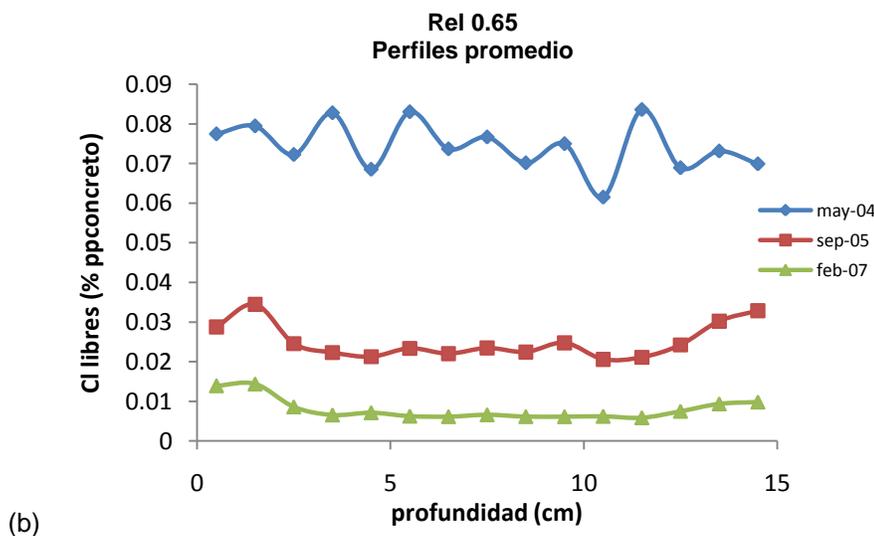
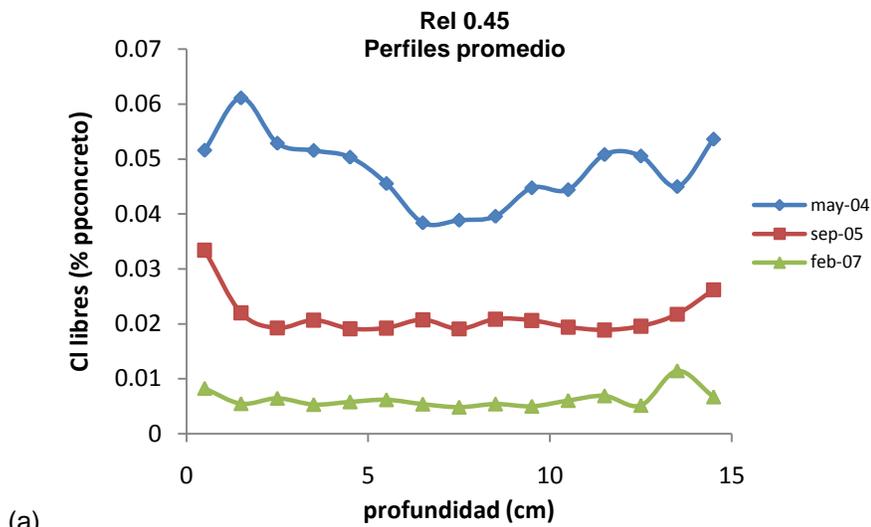


Figura 4.4.1.III. Perfiles de penetración de cloruros libres con respecto al tiempo, valores promedio de tres vigas, para la relación a/c de 0.45 (a) y 0.65 (b).

En la figura 4.4.1.IV. se muestran los perfiles de penetración de cloruros libres de las vigas DURACON expuestas a un ambiente marino que corresponden a tres periodos de tiempo, considerando dos frentes de penetración, cara expuesta a vientos dominantes y cara no expuesta. Los valores corresponden al promedio de tres vigas y a tres tiempos de exposición, edades y época del año. En esta figura puede apreciarse la similitud de perfiles entre la cara expuesta y la no expuesta a vientos dominantes, la variación es muy ligera y hace pensar en la posibilidad de dos frentes de penetración, con concentraciones superficiales de cloruro ligeramente menores en la cara no expuesta a vientos dominantes. Para fines de estudio relativo al tiempo para inicio de corrosión T_i , son importantes los primeros centímetros de la capa de recubrimiento del acero de refuerzo, en este caso, 3 cm como máximo.

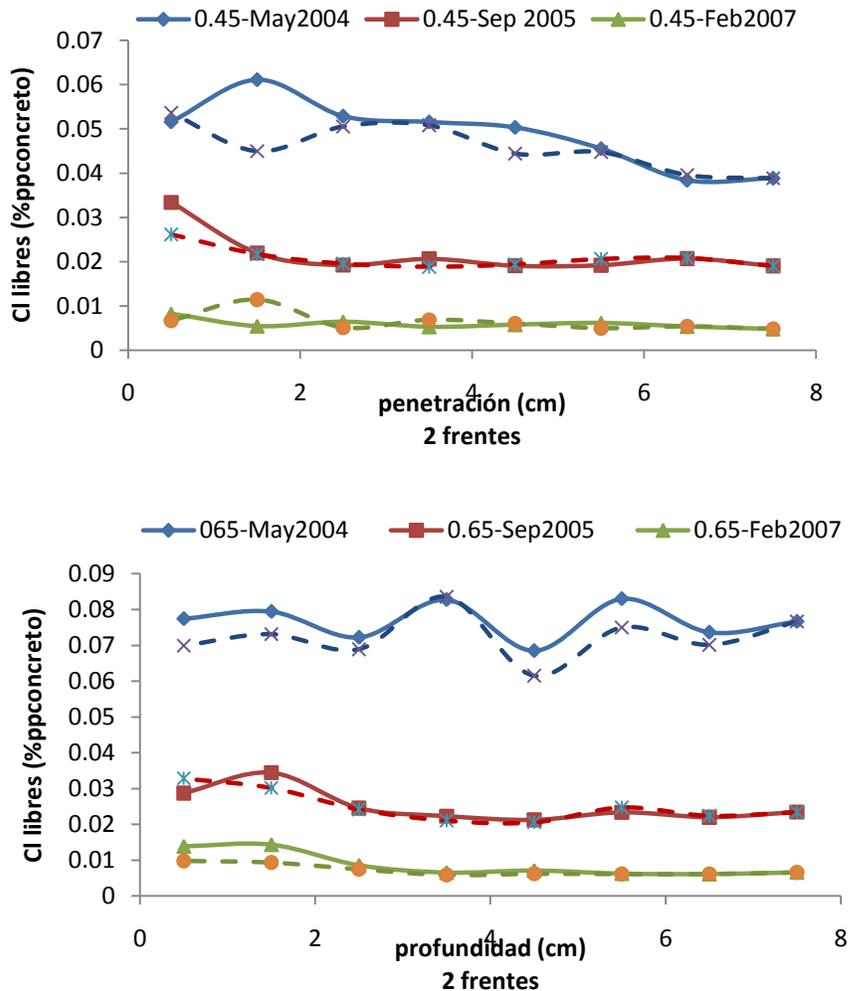


Figura 4.4.1.IV. Perfiles de penetración de cloruros libres con dos frentes de penetración, — cara expuesta a vientos dominantes y ---- cara no expuesta, para tres tiempos de exposición. Los valores corresponden al promedio de tres vigas.

4.4.2 Determinación de los coeficientes de difusión

El Modelo de Crank para determinar el coeficiente de difusión D , consiste en una solución de la 2a Ley de Difusión de Fick desarrollada por Crank y utilizada por muchos autores ya que es el modelo fenomenológico más conocido para representar el mecanismo difusional. Con este modelo se estiman la difusividad efectiva del agua y del soluto, simulando los experimentos con condiciones límite y resolviendo las ecuaciones analítica y numéricamente.

En la tabla 4.4.2.I. se presentan los valores del Coeficiente de difusión efectivo, D_e , calculados a partir de los valores promedio, mediante la ecuación [43] solución de Crank a la 2ª Ley de Fick: $C(x,t) = C_o [1 - erf (x / 2\sqrt{Dt})]$ y con apoyo del Programa de cómputo TableCurve 2D v5.0 Trial. Este programa da el mejor ajuste posible a los datos $C(x,t)$, cuyos perfiles no siempre son regulares por las características propias del proceso de penetración de cloruros en el concreto, que aunque es un medio poroso está sujeto a las interacciones fisico-químicas internas de los componentes y a procesos de rehidratación por las condiciones de exposición. Sin embargo, a partir de estos coeficientes de difusión es posible modelar la penetración de cloruros con fines de validación de los mismos.

Tabla 4.4.2.I. Coeficiente de difusión D_e ($m^2 s$) para dos relaciones a/c y tres tiempos de exposición

D_e Rel a/c	edad días)		
	480	942	1476
0.45	1.31E-09	3.09E-10	1.377E-10
0.65	3.38E-09	4.60E-10	5.549E-11

En la tabla 4.4.2.II se presentan los valores estimados de concentración superficial de cloruros, C_s , para 2 relaciones a/c y 3 tiempos de exposición obtenidos con apoyo del Programa de cómputo TableCurve 2D v5.0 Trial.

Tabla 4.4.2.II. Concentración superficial C_s (%ppconcreto) para dos relaciones a/c y tres tiempos de exposición

C_s Rel a/c	edad días)		
	480	942	1476
0.45	0.0596	0.027	0.007
0.65	0.075	0.030	0.014

4.4.3 Evaluación de modelos de difusión de cloruros

La difusión de cloruros se ha evaluado a través de modelos matemáticos de tipo estocástico y determinista. Además de la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick, se seleccionaron algunos modelos de la literatura revisada para determinar el coeficiente de difusión D_a , a partir de los datos del experimento. Estos modelos de difusión de cloruros consideran diferentes variables asociadas a su obtención, dándose las características principales de cada uno enseguida:

- Luciano y Miltenberg (1999). Modelo determinista de difusión de cloruros en función de los materiales cementantes, relación agua-cemento y tipo de agregado. Este modelo tiene una amplia base de datos de diferentes tipos de concretos.

$$D_p = (5.760 + 5.810x_1 - 0.567x_2 - 1.323x_3 + 0.740x_4 - 2.117x_5 - 2.780x_6 + 0.254x_7 - 0.368x_8 + 1.071x_1x_4 - 2.891x_1x_6 - 1.503x_4x_6)^2 \quad [45]$$

donde:

$$x_1 = (a/mc - 0.45)/0.2$$

$$x_2 = (mc, \text{ kg/m}^3 - 425)/175$$

$$x_3 = (\% \text{ masa de humo de sílice} - 5)/5$$

$$x_4 = (\% \text{ masa de ceniza volante} - 22.5)/22.5$$

$$x_5 = (\% \text{ masa de escoria} - 35)/35$$

$$x_6 = \log^{10}(\text{tiempo de curado, días} - 2)/3$$

$$x_7 = \text{temperatura del concreto, } ^\circ\text{C} - 24)/14$$

$$x_8 = 1, \text{ si el agregado grueso es angular; y}$$

$$x_9 = 0, \text{ si el agregado grueso es redondeado.}$$

$$\text{CDC conservador} = 16 + 1.24 \cdot D_p$$

- Bentz, Garboczi and Lagergren (1998). Modelo determinista de difusión de cloruros en función del volumen de agregados y la relación agua-cemento.

$$D \text{ (m}^2\text{/s)} = 10(-10.22 + 8.58(w/c) - 4.99\alpha - 3.04V_{agg} + 5.09\alpha(w/c) - 0.91(w/c)V_{agg} + 1.6\alpha V_{agg} - 6.58(w/c)^2 - 0.92\alpha^2) \quad [46]$$

$$\text{donde: } \alpha = 1.0 - \exp(-3.15 w/c)$$

- (1990) WALTON et al. Modelo determinista de difusión de cloruros en función de la relación agua-cemento

$$D \text{ (m}^2\text{/s)} = 10^{(6w/c - 13.84)} \quad [47]$$

Los coeficientes de difusión determinados a partir de estos modelos se presentan en la tabla 4.4.3.I, donde el orden es de $10E-12$, sin embargo los coeficientes calculados para las vigas DURACON mediante la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick, son del orden de $10E-09$ y $10E-10$ para los 2 primeros tiempos de exposición y de $10E-11$ para el más reciente, que corresponde a 4 años de exposición.

Tabla 4.4.3.I Coeficientes de Difusión de cloruros para dos relaciones a/c de 0.45 y 0.65, determinados a partir de modelos de la literatura

D ($m^2 s^{-1}$)		Modelo
0.45	0.65	
2.304E-12	9.281E-12	Bentz
2.902E-12	6.434E-12	Luciano
7.244E-12	1.148E-10	Walton

En las figuras 4.4.3.I y 4.4.3.II se muestra la difusión modelada con base en la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick a partir de los datos originales de los perfiles de concentración de cloruros libres, $C(x,t)$, correspondientes a la relación $a/c=0.45$ y a la relación $a/c=0.65$, respectivamente. Se muestran los datos promedio de los tres cortes analizados, que corresponden a la cara expuesta de las vigas a los vientos dominantes.

Los datos modelados corresponden a los coeficientes de difusión dados en la tabla 4.4.2.I. (D_e , $m^2 s^{-1}$) para las dos relaciones a/c y los tres tiempos de exposición.

En la figura 4.4.3.III se muestran los perfiles de penetración originales que permiten apreciar los dos frentes de penetración y la variación de D_e con respecto al tiempo.

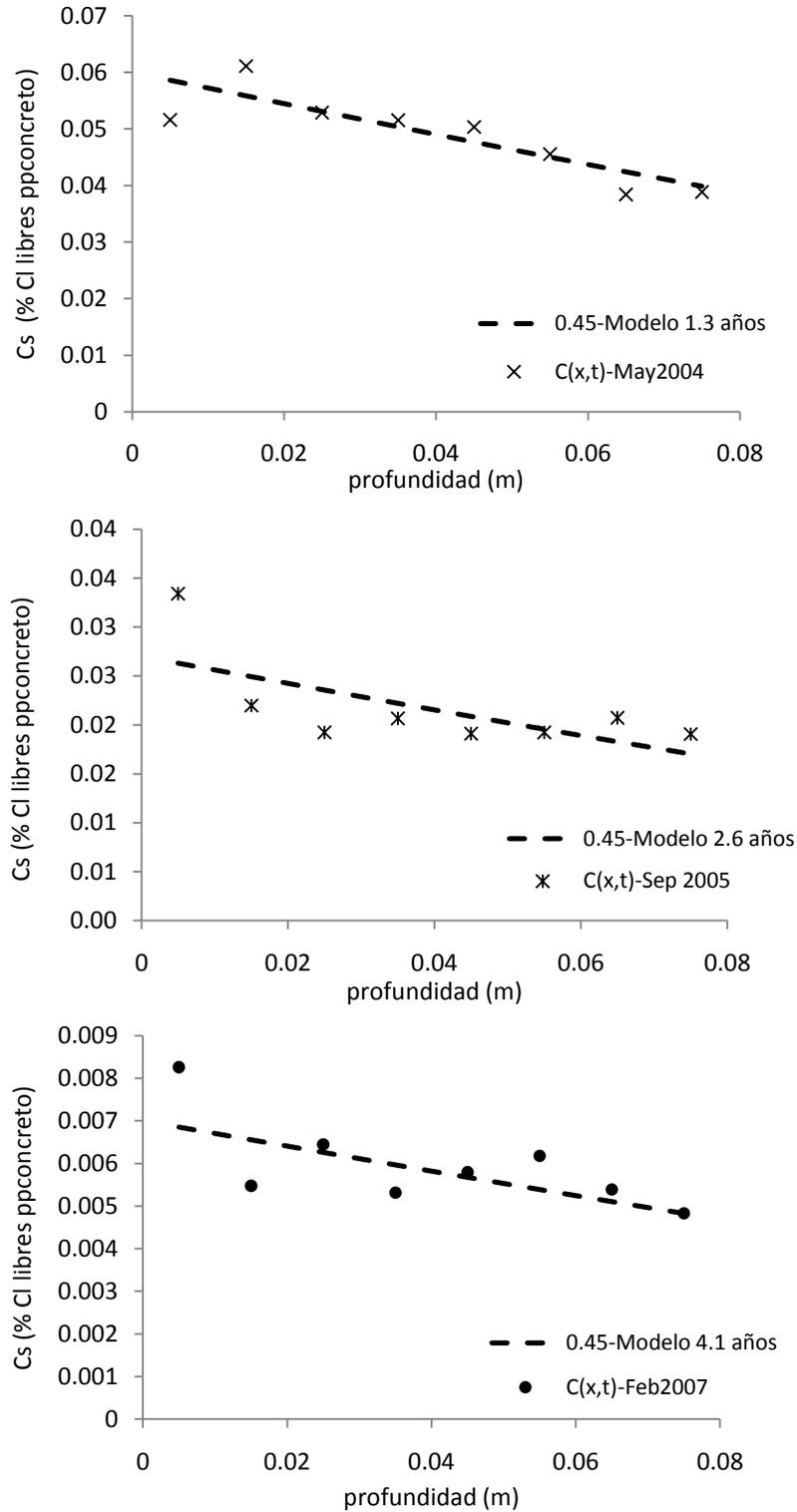


Figura 4.4.3.I Difusión modelada con base en la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick a partir de los datos originales de los perfiles promedio de concentración de cloruros libres, $C(x,t)$, relación $a/c=0.45$

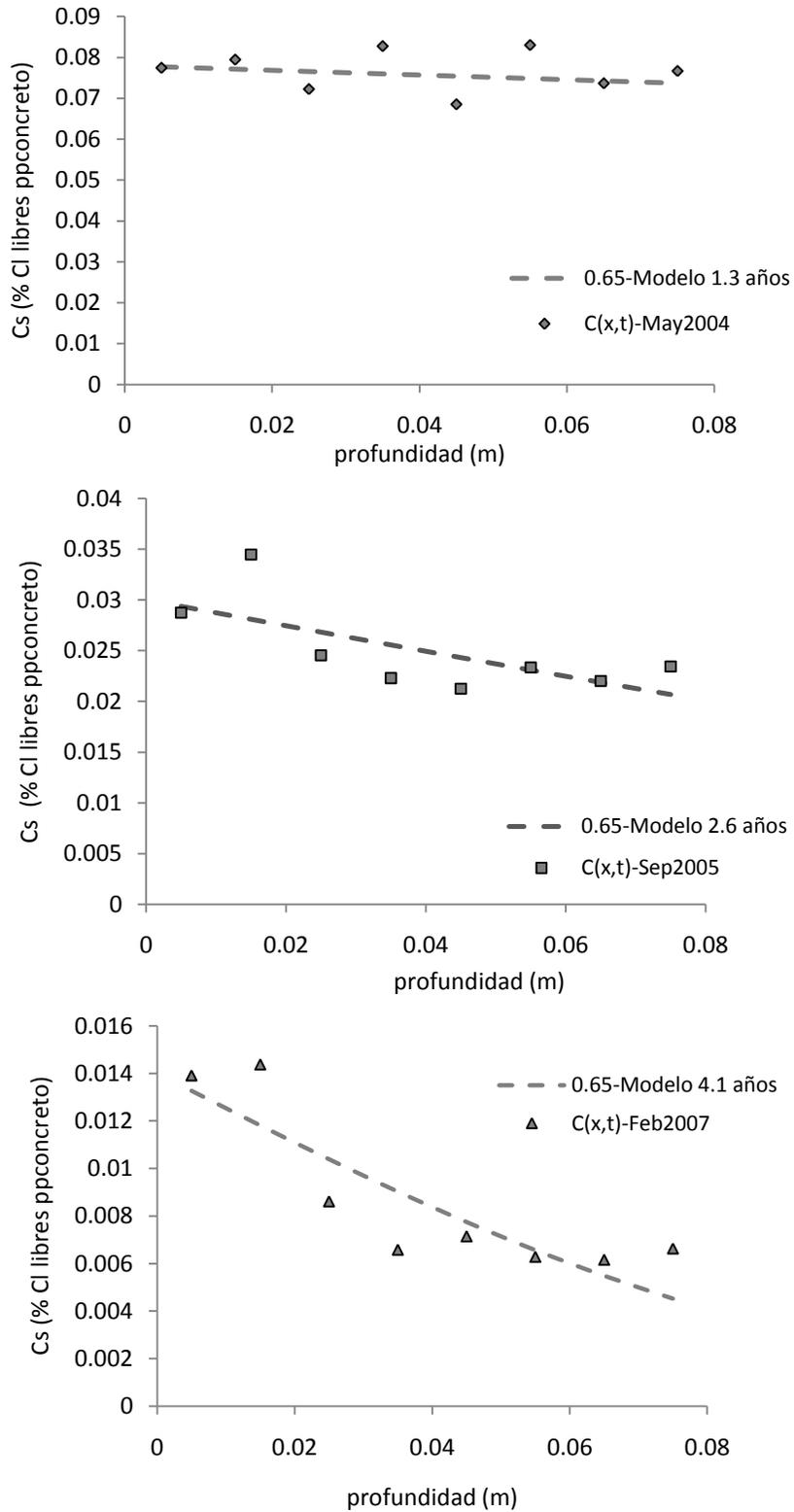


Figura 4.4.3.II Difusión modelada con base en la solución de Crank a la 2ª Ley de Fick a partir de los datos originales de los perfiles promedio de concentración de cloruros libres, $C(x,t)$, relación $a/c=0.65$

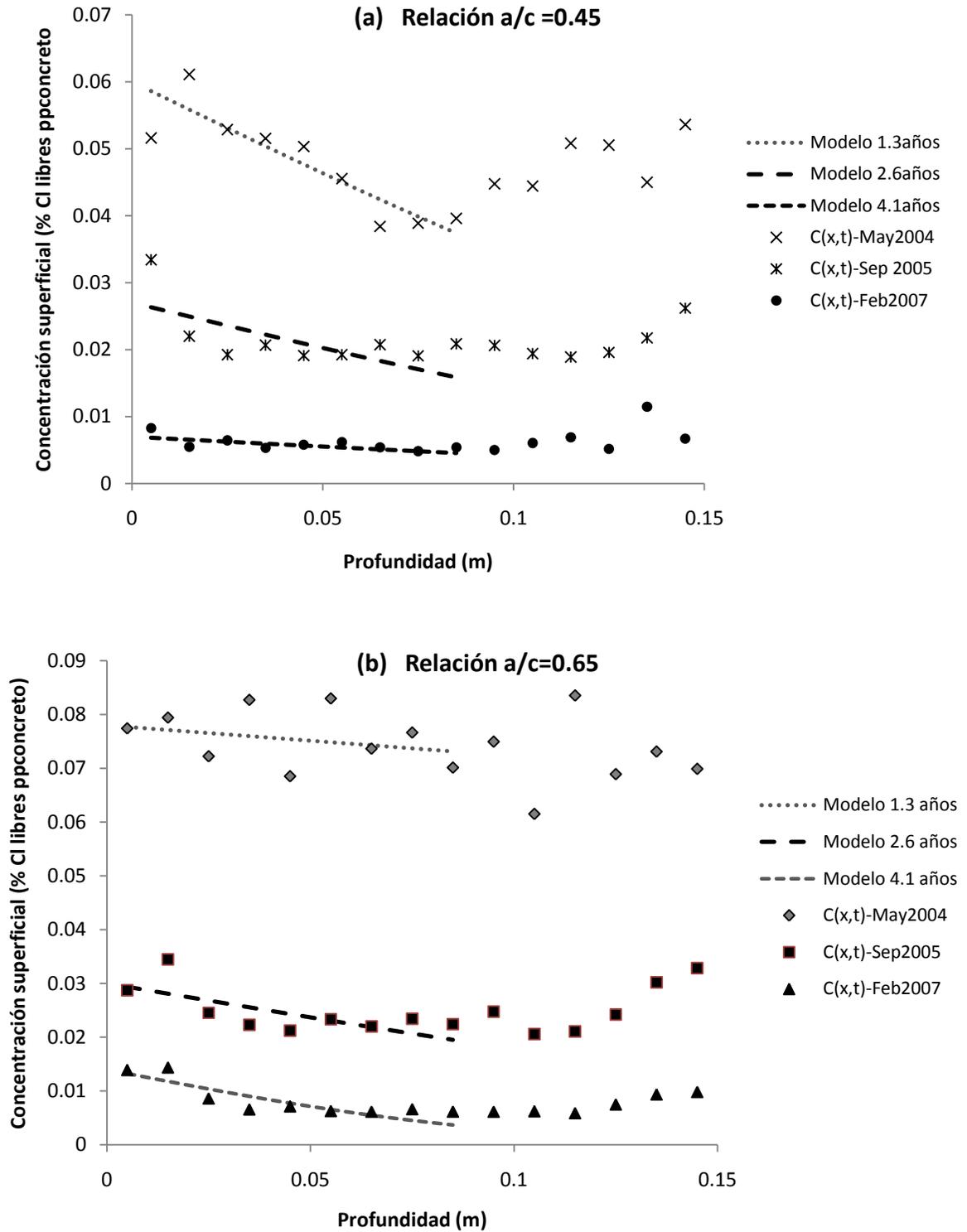


Figura 4.4.3.III Modelado de los coeficientes de difusión efectivos D_e constante con base en el modelo de Crank, a partir de datos originales de concentración de cloruros en función del tiempo $C(x,t)$, para dos relaciones agua/cemento (a) 0.45 y (b) 0.65. Se aprecian los dos frentes de penetración.

4.5 MODELO DE PREDICCIÓN DE VIDA ÚTIL

A partir de los datos hasta ahora disponibles es posible proponer y analizar una metodología de trabajo que permita avanzar en la posible predicción de la vida útil de las estructuras de concreto armado en un ambiente marino. La incertidumbre de los resultados iniciales podrá reducirse conforme se reúnan más datos y aplicaciones, de forma tal que se genere información que permita el aprovechamiento sistemático de las experiencias para futuras predicciones.

Esta metodología general está basada en la combinación de métodos analíticos y experimentales. La predicción de la vida útil del concreto armado no puede ser realizada de una forma puramente determinista, por ser un material heterogéneo y por el gran número de factores o variables que influyen en el comportamiento del material y a la interacción entre estos factores. Esta metodología se basa en la aplicación del análisis estocástico, partiendo de modelos deterministas de profundidad de penetración de cloruros y de concentración superficial. Los parámetros climáticos también tienen gran influencia en el comportamiento de las variables principales detectadas, principalmente en la concentración de cloruros superficial.

Por tanto, en este proyecto se determinó que para generar o adecuar un modelo de predicción de vida útil de servicio en un ambiente marino es importante conocer, por una parte, el comportamiento de la concentración superficial de cloruros, la cual está ligada a la concentración ambiental de Cl^- , y por otra el comportamiento de la difusión de cloruros en función del tiempo.

4.5.1 Concentración superficial de cloruros.

A partir del modelo de Castañeda *et al.* (1997), de tipo sinusoidal, que representa el comportamiento de la concentración superficial de cloruros en un ambiente marino, que corresponde al Puerto de Progreso, Yucatán, lugar de exposición de las vigas DURACON, se realizó una superposición de datos para inferir la tendencia de la concentración superficial determinada por el Método de Crank.

Aunque el modelo de Castañeda *et al.* (1997) es para dos años y relaciones agua cemento diferentes, se seleccionaron aquellas que más se apegan a las características de las mezclas DURACON, que corresponden a concreto OPC con relaciones agua/cemento de 0.46, concreto tipo A y 0.70, concreto tipo B.

En la figura 4.5.1.I se muestra la tendencia de la Concentración superficial, C_s , con relación a la época estacional del muestreo de los concretos DURACON para relaciones a/c

de 0.45 y 0.65, comparada con los valores del modelo de Castañeda *et al.* (1997) correspondientes a los concretos A y B de su estudio experimental.

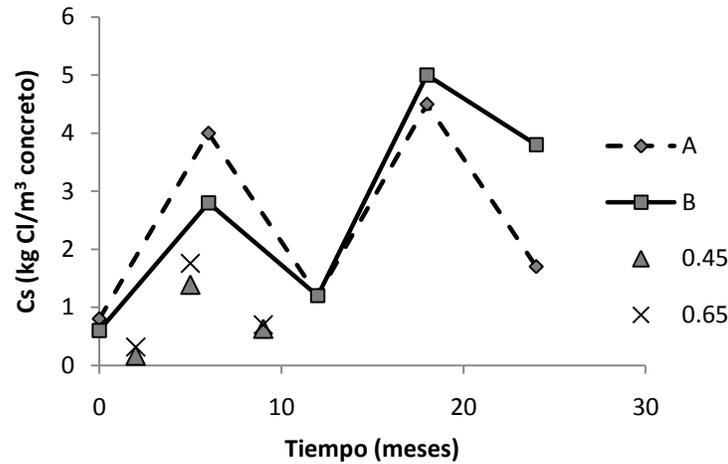


Figura 4.5.1.1 Tendencia de la Concentración superficial, C_s , con respecto al tiempo.

4.5.1.1 Modelo de concentración superficial de cloruros.

Con los datos experimentales y tomando en consideración el comportamiento cíclico anual de la temperatura y demás parámetros ambientales, explicados en el capítulo 4.3, se propuso un modelo para un lapso de tiempo T , de 12 meses. El modelo adoptado para esta tendencia es de tipo sinusoidal, con variación T anual =12, quedando de la siguiente forma:

$$C_s(t) = C_{s\text{promedio}} + C_{s\text{promedio}} * \text{sen} \frac{2\pi}{T} t \quad [48]$$

donde

$$C_{s\text{promedio}} = (C_{s\text{max}} + C_{s\text{min}}) / 2 \quad \text{y} \quad T=12$$

En la figura 4.5.1.1.1 se muestra el modelo correspondiente a la concentración superficial y los datos obtenidos de C_s con el modelo de Crank para el coeficiente de difusión de las vigas DURACON. El análisis de la concentración de cloruros en función del tiempo con un modelo de tipo sinusoidal (Fig. 4.5.1.1.1), determinó que los valores dados en la tabla 4.5.1.1.1 de C_s , obtenidos mediante la solución del Crank a los perfiles de penetración de cloruros, se ajustan adecuadamente a dicho modelo.

Tabla 4.5.1.1.1 Concentración superficial de cloruros C_s (% Cl⁻ libres ppconcreto)

Rel a/c	edad (días)		
	480	942	1476
0.45	0.060	0.027	0.007
0.65	0.075	0.030	0.014

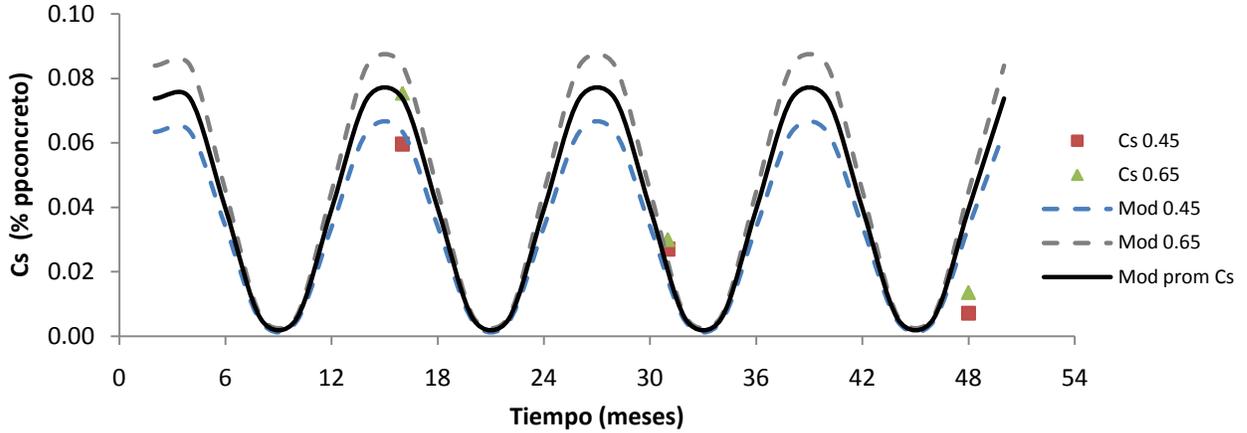


Figura 4.5.1.1.I Desarrollo del modelo de concentración superficial en función del tiempo, $C_s(t)$, y ubicación de la C_s correspondiente a las dos relaciones a/c de 0.45 y 0.65 de acuerdo a la fecha de muestreo de especímenes.

También se puede notar una relación entre la concentración superficial de cloruros y la concentración de cloruros ambientales (Figura 4.5.1.1.II); la concentración de Cl ambientales tiene un patrón de comportamiento similar al del modelo de Concentración superficial. Es importante mencionar que la concentración superficial tiene relación con la precipitación pluvial, pues en época de lluvia disminuyen las concentraciones ambiental y superficial de cloruros. Puede decirse que el patrón de comportamiento de cloruros superficiales obedece a un ciclo multianual, representado por el modelo. Los datos analizados del proyecto DURACON corresponden a un periodo de 5 años, 2003-2007.

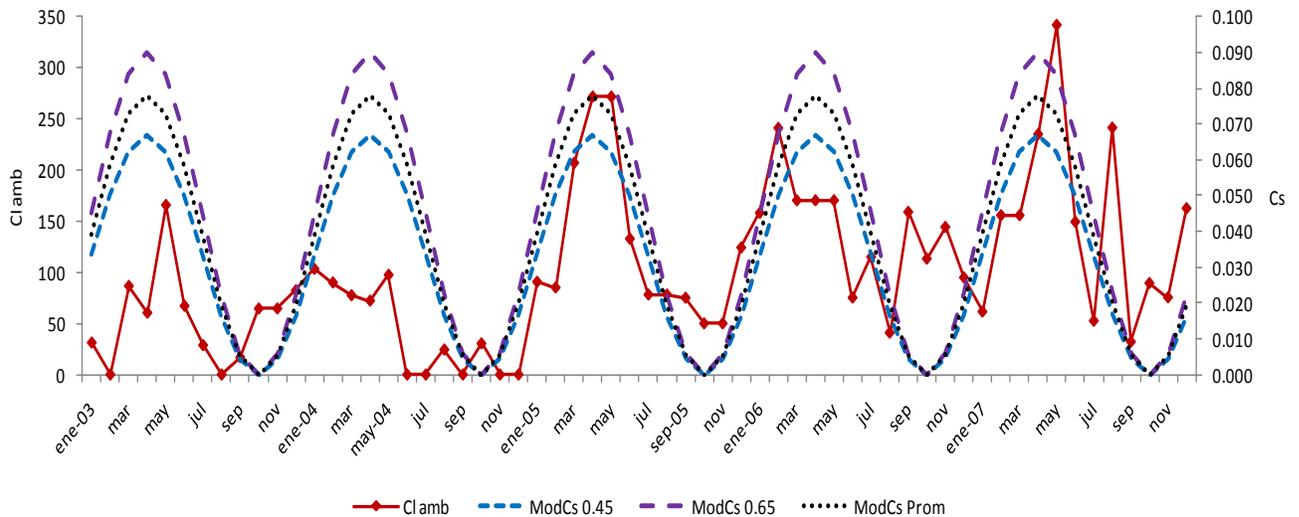


Figura 4.5.1.1.II. Comparación entre cloruros ambientales y el modelo de concentración superficial.

En la misma figura puede interpretarse que, aunque en el periodo previo al corte de probetas, efectuado en mayo/2004, hubo lluvias que propiciaron el lavado y disminución de la concentración de cloruros ambientales, la concentración superficial de cloruros en las vigas se mantuvo alta, en correspondencia con los niveles de concentración de Cl ambientales medidos en dicha época.

El modelo de concentración superficial de cloruros dado por la ecuación [41] se validó con datos de probetas cilíndricas de concreto expuestas a un ambiente similar por un periodo de hasta 10 años, ubicadas en la misma región geográfica de las vigas DURACON. Dichos periodos de exposición corresponden a diferentes tiempos estacionales, sin embargo, fue posible encontrar una concordancia en el modelo para los valores de concentración superficial determinados con el modelo de Crank, que se ajustan a un ciclo multianual. Estos datos de validación se presentan graficados en el Anexo D.

4.5.2 Coeficiente de Difusión de cloruros variable, $D_e(t)$.

Con base en los coeficientes de difusión de cloruros determinados para los tres tiempos de exposición a partir de los datos de perfiles de penetración de cloruros, se obtuvo un modelo del comportamiento del Coeficiente de difusión D_e , en función del tiempo. En las figuras 4.5.2.I y 4.5.2.II se muestran los coeficientes de difusión determinados en función del tiempo de exposición de las vigas para las dos relaciones a/c , 0.45 y 0.65 y la curva de ajuste realizada por el método de mínimos cuadrados, empleando el Programa Zigma Plot con un valor de $R=1$. El modelo de difusión de cloruros se ajusta adecuadamente a una función de tipo potencial para la relación $a/c=0.45$ y de tipo exponencial para la relación $a/c=0.65$. En la tabla 4.5.2.I se muestra el modelo de difusión de cloruros obtenido para relaciones a/c de 0.45 y 0.65.

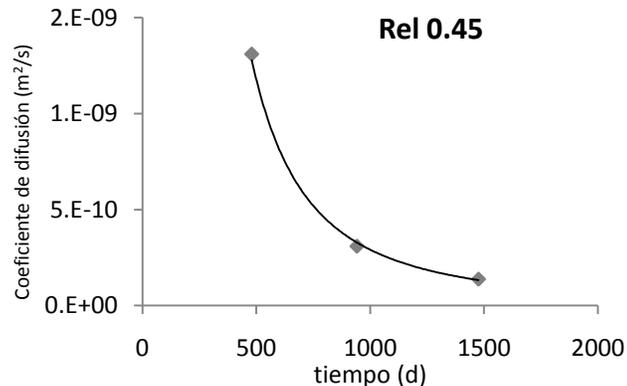


Figura 4.5.2.I Modelo potencial de difusión de cloruros para relación $a/c=0.45$

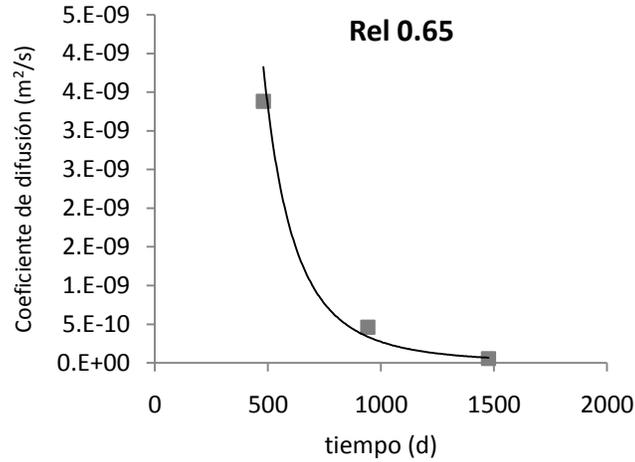


Figura 4.5.2.II Modelo exponencial de difusión de cloruros para relación a/c=0.65

Tabla 4.5.2.I Modelo I de difusión de cloruros en función del tiempo $D_e(t)$ para relaciones a/c de 0.45 y 0.65

Rel a/c	Modelo I
0.45	$D_e = 3E-04t^{2.012}$
0.65	$D_e = 2.368E-08e^{-0.004t}$

4.5.2.1 Validación del modelo de difusión de cloruros

A partir de los modelos de difusión de cloruros en función del tiempo $D_e(t)$ para relaciones a/c de 0.45 y 0.65 dados en la Tabla 4.5.2.1.I y mediante un ajuste por regresión de mínimos cuadrados para el logaritmo de $D_e(t)$, se obtuvo la tasa de variación de 0.82 para la rel a/c=0.45 y de 1.5 para la rel a/c=0.65.

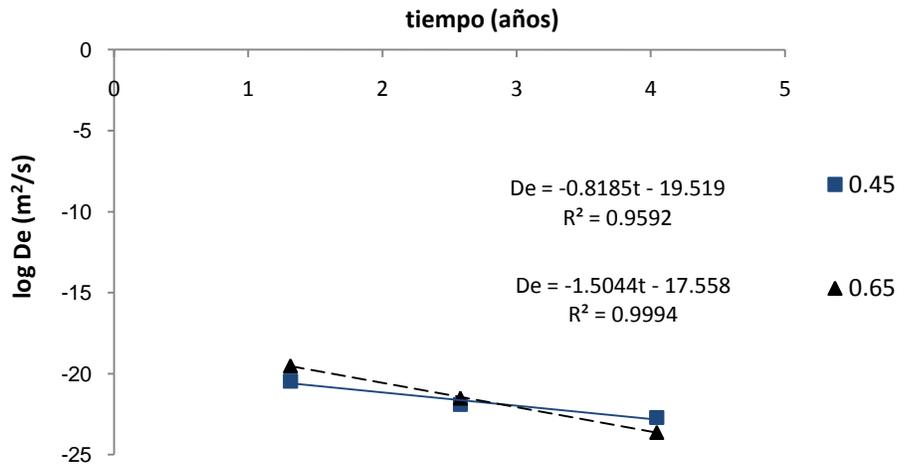


Figura 4.5.2.1.I Modelado del coeficiente de difusión efectivo respecto al tiempo,

En la predicción del tiempo para inicio de corrosión se asume que la difusión es el mecanismo de transporte dominante y que el coeficiente de difusión de cloruros está en función del tiempo. Para tomar en cuenta esta relación se parte de la siguiente ecuación, donde m es un valor determinado empíricamente:

$$\text{MODELO II: } D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad [49]$$

$$\text{donde: } m = 5 \operatorname{rel} \frac{a}{c} - 0.25 \quad [50]$$

por tanto $m=2$ para $\operatorname{rel} a/c=0.45$ y $m=3$ para $\operatorname{rel} a/c=0.65$

En las figuras 4.5.2.1.II se muestran los valores del coeficiente de difusión modelados para las dos relaciones a/c con base en la ecuación [42]

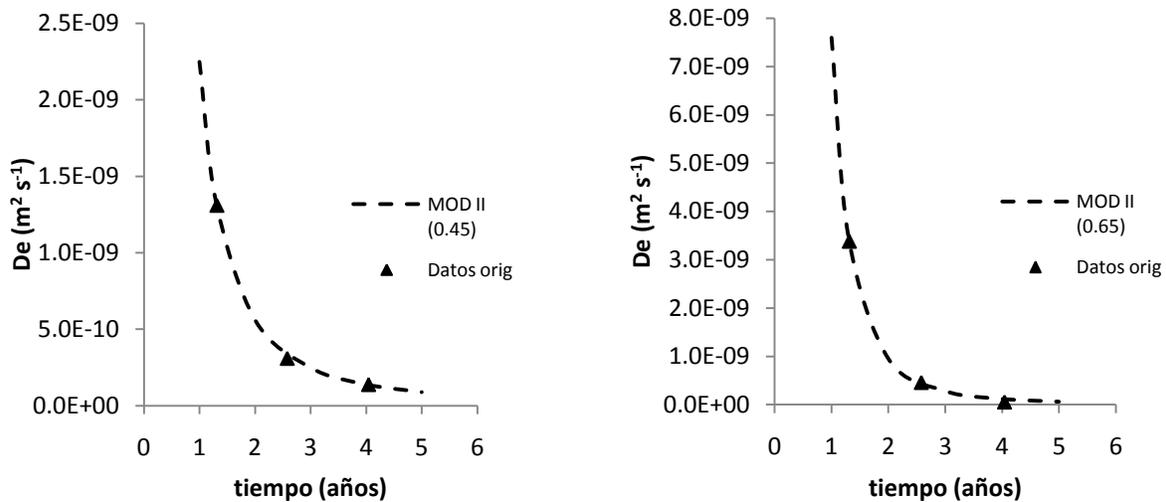


Figura 4.5.2.1.II Modelo II para determinar Coeficientes de difusión en función de la relación a/c .

En la figura 4.5.2.1.III se muestra la comparación de los valores obtenidos mediante la aplicación de los dos modelos de difusión de cloruros en vigas DURACON. Modelo I dado en tabla 4.5.2.1.I y Modelo II dado por ecuación [42].

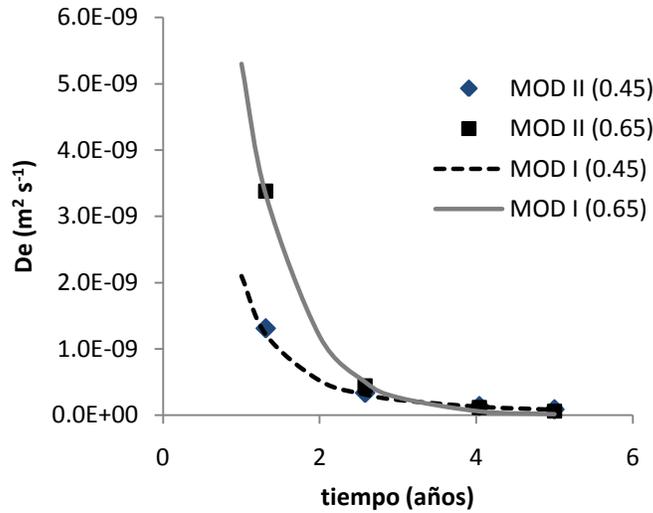


Figura 4.5.2.1.III Comparación de los Modelos I y II del Coeficiente de difusión de cloruros en función de la relación a/c y el tiempo.

En la figura 4.5.2.1.IV se muestra el comportamiento de D_e con variación cíclica y su relación con C_s , ambas variables en función del tiempo, esto es, $D_e(t)$ y $C_s(t)$. El Coeficiente de difusión disminuye con el tiempo y la concentración superficial tiene un comportamiento oscilatorio de acuerdo al modelo sinusoidal dado por la ecuación [41].

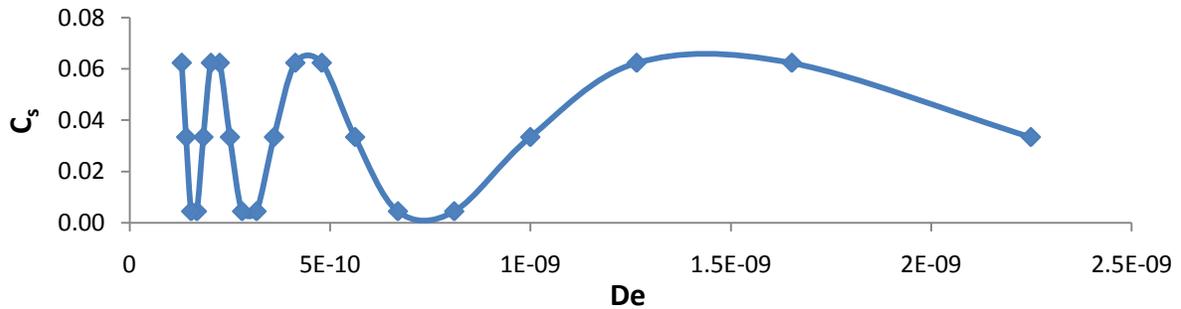


Figura 4.5.2.1.IV. Comportamiento de D_e con variación cíclica en función de C_s

4.5.3 Programas con Modelos de Predicción

4.5.3.1. Life-365™

En la evaluación de las vigas DURACON con el Programa Life-365™ para la predicción de vida útil en un ambiente similar al de Progreso, Yucatán se determinaron los siguientes valores:

Tabla 4.5.3.1.I Resultados aplicando el programa Life-365™ a los datos de las vigas DURACON.

Name	User Defined	D	m	Cs	Init. (yrs)		
0.45	<<<YES>>>	3.6100E-10	0.20	0.060	2.1	6.0	8.1
0.45 B	<<<YES>>>	3.6100E-10	0.20	0.075	2.6	6.0	8.6
0.65	<<<YES>>>	3.3860E-9	0.20	0.075	2.4	6.0	8.4
0.65 B	<<<YES>>>	3.3860E-9	0.20	0.150	4.8	6.0	

Se utilizaron como valores iniciales los del primer corte para hacer la valoración y puede verse claramente la influencia de la concentración superficial, en la predicción de vida útil. Esto demuestra que no es posible utilizar este tipo de análisis clásico, cuando se ha demostrado un comportamiento variable de la concentración superficial y del coeficiente de difusión. En las graficas siguientes se muestra esta relación de ambas variables con el tiempo de exposición en años, dadas por el Programa Life-365.

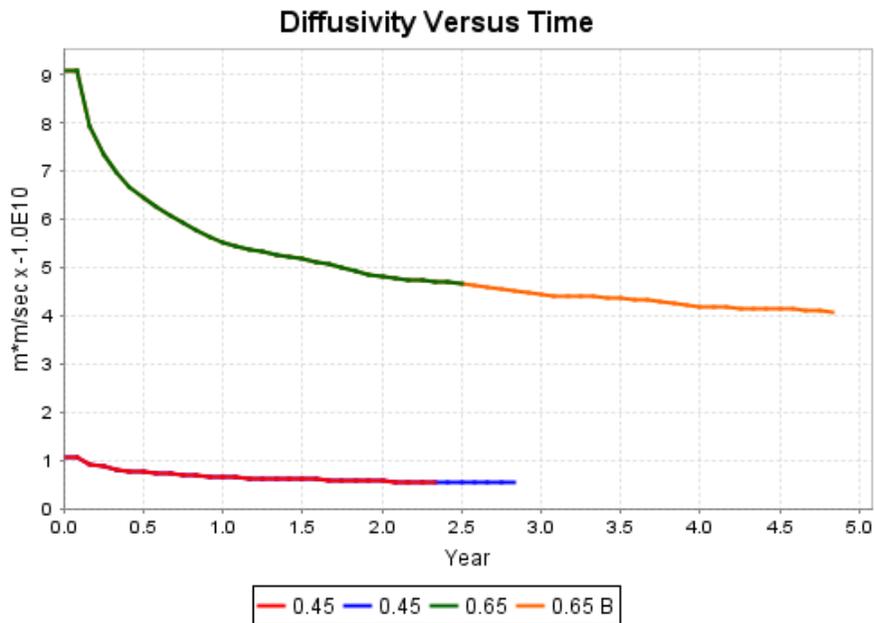


Figura 4.5.3.1.I Variabilidad del coeficiente de difusión de cloruros con relación al tiempo, C_s y D_e constantes, en el modelo Life-365™

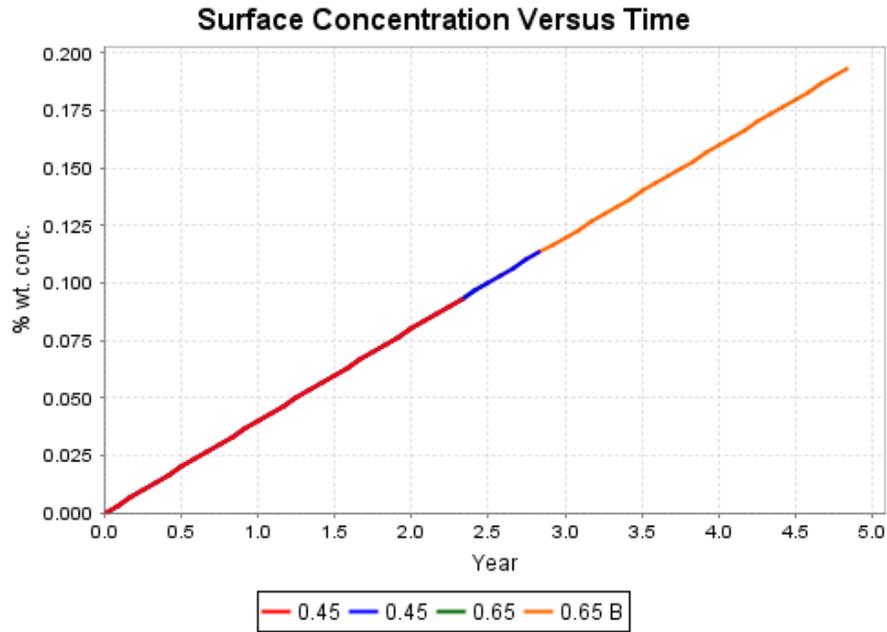


Figura 4.5.3.1.II Variabilidad de la concentración superficial con respecto al tiempo en el modelo Life-365™

Los resultados indican que es necesario hacer una nueva consideración para la predicción de vida útil del concreto armado en función del rango de variación de los parámetros ambientales, tomando en cuenta el comportamiento cíclico de las variables como la concentración superficial y su influencia en el coeficiente de difusión.

A la fecha no se encontró en la literatura un modelo de predicción del tiempo para inicio de la corrosión que tome en cuenta ambos parámetros como variables en el tiempo y mucho menos, que consideren la posibilidad de los cambios climáticos regionales como macrociclo o ciclos multianuales. Este nuevo enfoque dará una explicación mayor a lo que sucede con los perfiles de cloruros en el concreto y precisará las determinaciones de los coeficientes de difusión, para poder hacer una predicción de vida útil de servicio más adecuada a los materiales y su influencia con el ambiente.

4.5.4 Adecuación de modelo de predicción

4.5.4.1 Coeficiente de difusión y concentración superficial constantes

Con el fin de determinar el tiempo necesario para el inicio de corrosión (T_i) en el concreto armado, existen los análisis clásicos que consideran un coeficiente de difusión (D) y un contenido superficial de cloruros (C_s) constantes, y cuando la concentración de cloruros alcanza cierto valor o nivel (C_{th}) destruye la pasivación del acero de refuerzo e inicia el proceso de corrosión (Zhang, 2006). Tomando las siguientes condiciones de frontera:

Periodo de iniciación: $C(d_c, t) < C_{th}$ para $0 \leq t < T_i$

Inicio de corrosión: $C(d_c, t) = C_{th}$ para $t = T_i$

El modelo de Crank dado por la Ec. [43] se transforma en (Zhang, 2006):

$$T_i = f(C_s, C_{th}, D, d_c) = \frac{d_c^2}{4D[\text{erf}^{-1}(1 - \frac{C_{th}}{C_s})]^2} \quad [51]$$

Donde d_c es la profundidad del recubrimiento de concreto del acero de refuerzo. Debido a la complejidad de la función inversa erf, se propone la siguiente solución que puede incluirse más fácilmente en una hoja de cálculo o programa matemático, mediante la determinación de erf(z), donde :

$$z = 1 - \frac{C_{th}}{C_s} \quad [52]$$

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt = 1 - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi} z} \left(1 - \frac{1}{2z^2}\right) \quad [53]$$

$$\text{erf}^{-1}(z) = \frac{1}{1 - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi} z} \left(1 - \frac{1}{2z^2}\right)} \quad [54]$$

por tanto T_i es:

$$T_i = \frac{d_c^2}{4D \left[\frac{1}{1 - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi} z} \left(1 - \frac{1}{2z^2}\right)} \right]^2} \quad [55]$$

En este modelo la concentración superficial y el coeficiente de difusión son constantes. Al evaluar los datos de las vigas DURACON con este modelo, para cada tiempo de exposición se determina que la influencia de la concentración superficial es determinante en la predicción del tiempo y los resultados no son adecuados, pues se alejan de la realidad. Si se considera una concentración superficial promedio para todos los tiempos, y un coeficiente de difusión variable con el tiempo, la predicción del tiempo (T_i) para inicio de corrosión dada por el modelo es inadecuado, debido en parte a que los valores del coeficiente de difusión son del orden de E-10, mientras que generalmente en la literatura se reportan valores de E-12 aproximadamente (C.C.&A.A., 2009; Luciano, 1999; Berke, 1994).

En la Tabla 4.5.4.1.I se presentan los resultados del modelado para la determinación del tiempo para inicio de corrosión (T_i) mediante la ecuación [55] para las dos relaciones

agua/cemento. En la primera parte se considero el valor de la concentración superficial dado por la solución de Crank a la 2ª ley de Fick para los tres tiempos de exposición, se muestran los T_i calculados con C_s variable y D_e variable; en la parte dos, se considera un valor promedio de concentración superficial constante, los coeficientes de difusión son los obtenidos en función del tiempo de exposición $D(t)$, esto es los T_i se calcularon con una C_s promedio (constante) y D_e variable.

En este trabajo experimental aun no se ha alcanzado el contenido crítico de cloruros para ocasionar la despasivación del acero de refuerzo, por tanto el valor utilizado es el de referencia en la literatura del tema. Sin embargo, es posible considerar un valor de la difusión de cloruros constante a partir del tercer corte ya que su variación de acuerdo al modelo en función del tiempo es mínima.

Tabla 4.5.4.1.I Determinación del tiempo para inicio de corrosión (T_i) mediante la Ecuación [55]

1ª parte						
a/c	0.45	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65
dc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
C _{th}	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
C _s	1.39	0.63	0.17	1.76	0.7	0.32
z	0.489	-0.127	-3.176	0.597	-0.014	-1.219
D	1.31E-09	3.09E-10	1.38E-10	3.38E-09	4.60E-10	5.55E-11
T _i	1.16E+06	1.32E+10	2.70E+13	1.59E+05	4.58E+15	2.25E+07
años	0.04	417.65	856164.17	0.01	145147694.30	0.71
2ª parte						
a/c	0.45	0.45	0.45	0.65	0.65	0.65
dc	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
C _{th}	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
C _s	0.903	0.903	0.903	0.903	0.903	0.903
z	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214
D	1.31E-09	3.09E-10	1.38E-10	3.38E-09	4.60E-10	5.55E-11
T _i	1.39E+08	5.91E+08	1.32E+09	5.40E+07	3.97E+08	3.29E+09
años	4.42	18.73	41.93	1.71	12.58	104.27

En un análisis de sensibilidad, al aplicar el modelo de concentración superficial para la determinación del tiempo de inicio de corrosión (T_i), se observa que éste afecta dando diferentes fechas para T_i , lo cual indica el tiempo en el que se alcanza el umbral de cloruros (C_{th}) necesario para la despasivación del acero.

En cuanto a la influencia del espesor del recubrimiento del acero en la vida útil de servicio del concreto, éste presenta una relación de acuerdo con este modelo [ec.55], En la tabla 4.5.4.1.II se presentan los valores obtenidos en este análisis de sensibilidad para $T_i(d_c)$

para los tres espesores de recubrimiento de las vigas DURACON y en la figura 4.5.4.1.I el Modelo de comportamiento obtenido mediante un análisis de regresión lineal de los valores de T_i en función de d_c , (a) relación a/c 0.65 y (b) relación a/c 0.45, considerando una C_s promedio y D_e constante.

Tabla 4.5.4.1.II Resultados del Análisis de sensibilidad en la determinación de $T_i(d_c)$, Mediante la solución a la Ecuación [51].

rel a/c	d_c	T_i
0.65	0.03	12.58
	0.02	5.59
	0.015	3.15
0.45	0.03	18.73
	0.02	8.32
	0.015	4.68

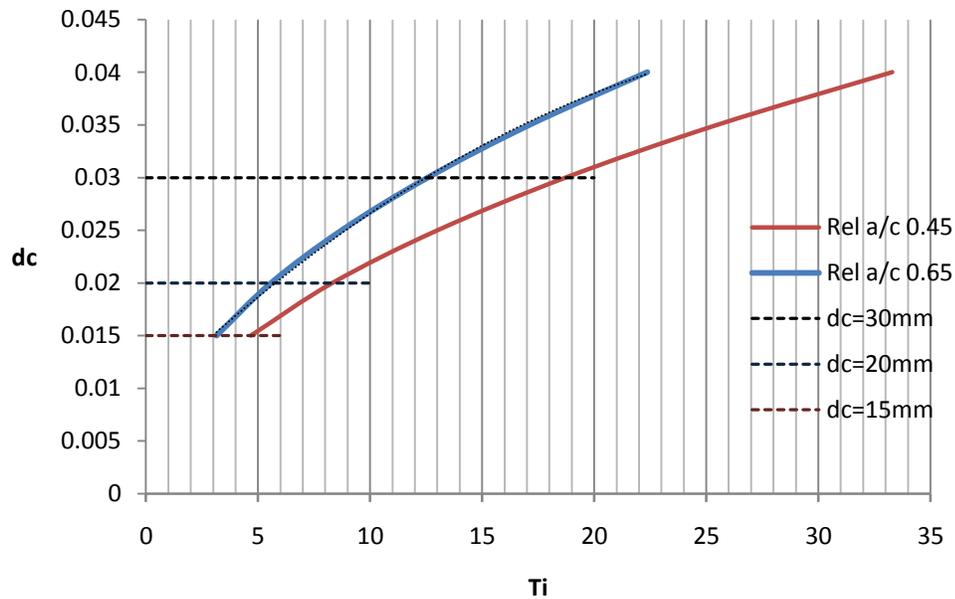


Figura 4.5.4.1.I Determinación de T_i en función de d_c , para las dos relaciones a/c 0.45 y 0.65

4.5.4.2 Coeficiente de difusión y concentración superficial variables

Se modeló la difusión de cloruros aplicando la solución de Crank para obtener los perfiles de penetración de cloruros en función del tiempo, tomando un coeficiente de difusión variable $D_e(t)$ y una concentración superficial variable $C_s(t)$. Se observa claramente en dichos perfiles (figuras 4.5.4.2.I y 4.5.4.2.II) la importancia de ambas variables en la determinación

de un posible umbral de cloruros, donde necesariamente el valor de C_s debe ser $> 0.03\%$ ppconcreto (0.71 kg m^{-3}) para que tenga influencia en el proceso de difusión. A valores menores ($C_s < 0.3\%$ ppconcreto) de C_s , teóricamente y de acuerdo a estos modelos, los cloruros no llegan a despasivar el acero, a menos que y de acuerdo a este nuevo enfoque en el comportamiento de C_s , se produzca un acumulación de cloruros en el interior de la matriz de concreto, que alcancen el valor crítico C_{th} para despasivar el acero. La concentración superficial C_s corresponde al modelo oscilatorio tipo sinusoidal, determinado para este ambiente marino en particular.

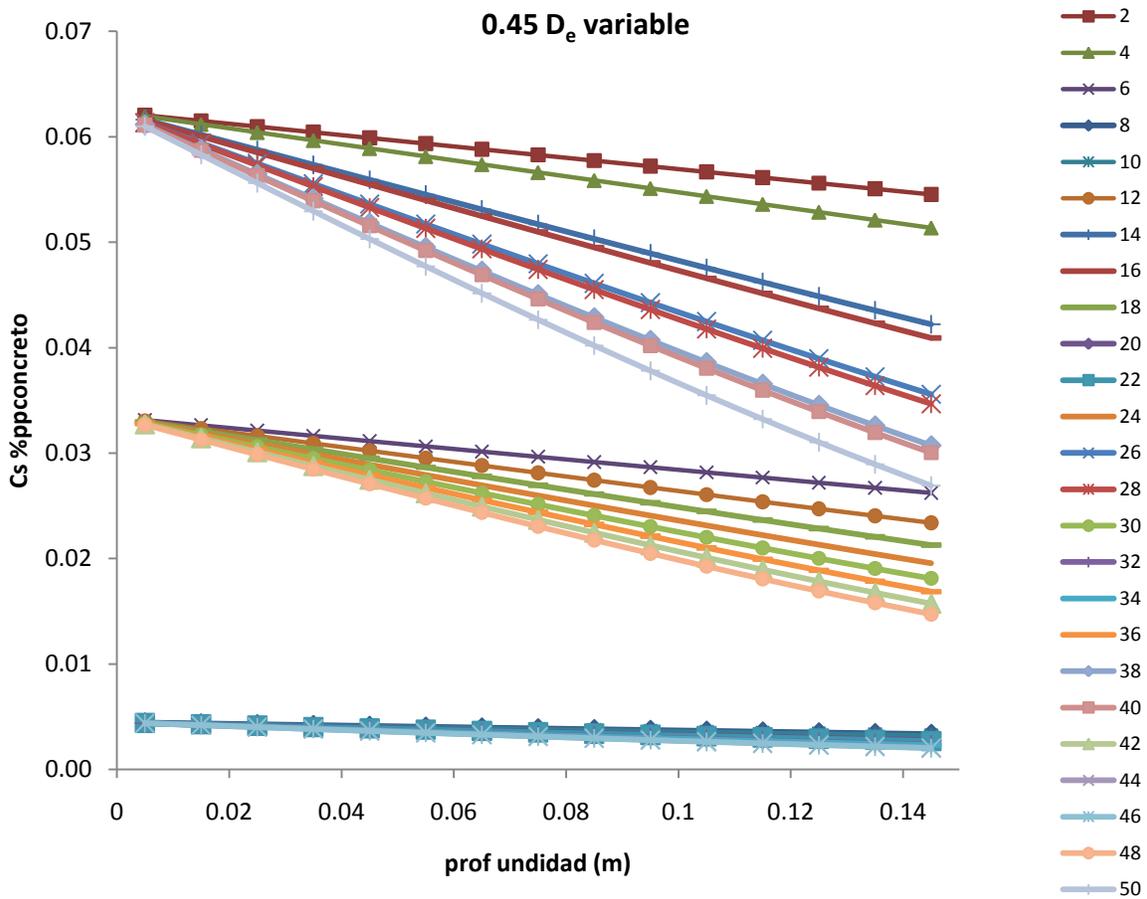


Figura 4.5.4.2.I Perfiles de concentración de cloruros a partir de una concentración superficial variable y coeficiente de difusión variable, respecto al tiempo dado en meses, relación $a/c = 0.45$

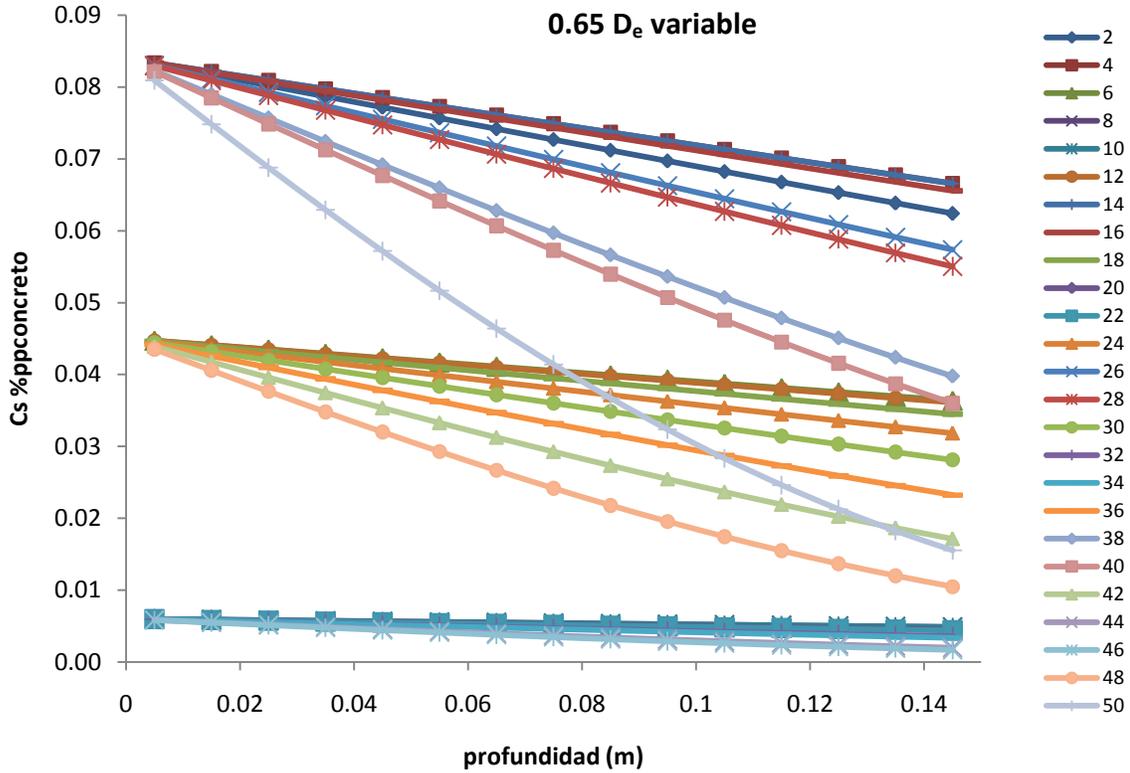


Figura 4.5.4.2.II Perfiles de concentración de cloruros a partir de una concentración superficial variable y coeficiente de difusión variable, respecto al tiempo dado en meses, relación a/c = 0.65

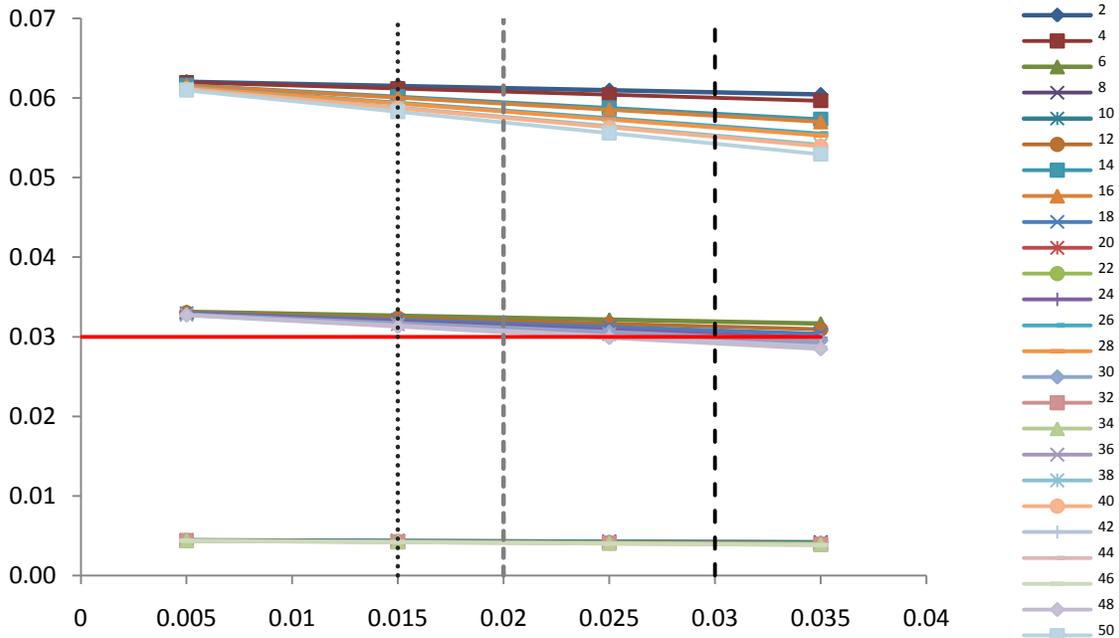


Figura 4.5.4.2.III Perfil de concentración de cloruros en la zona de recubrimiento de concreto, 1.5, 2 y 3 cm, con C_s y D_e variables, relación a/c 0.45

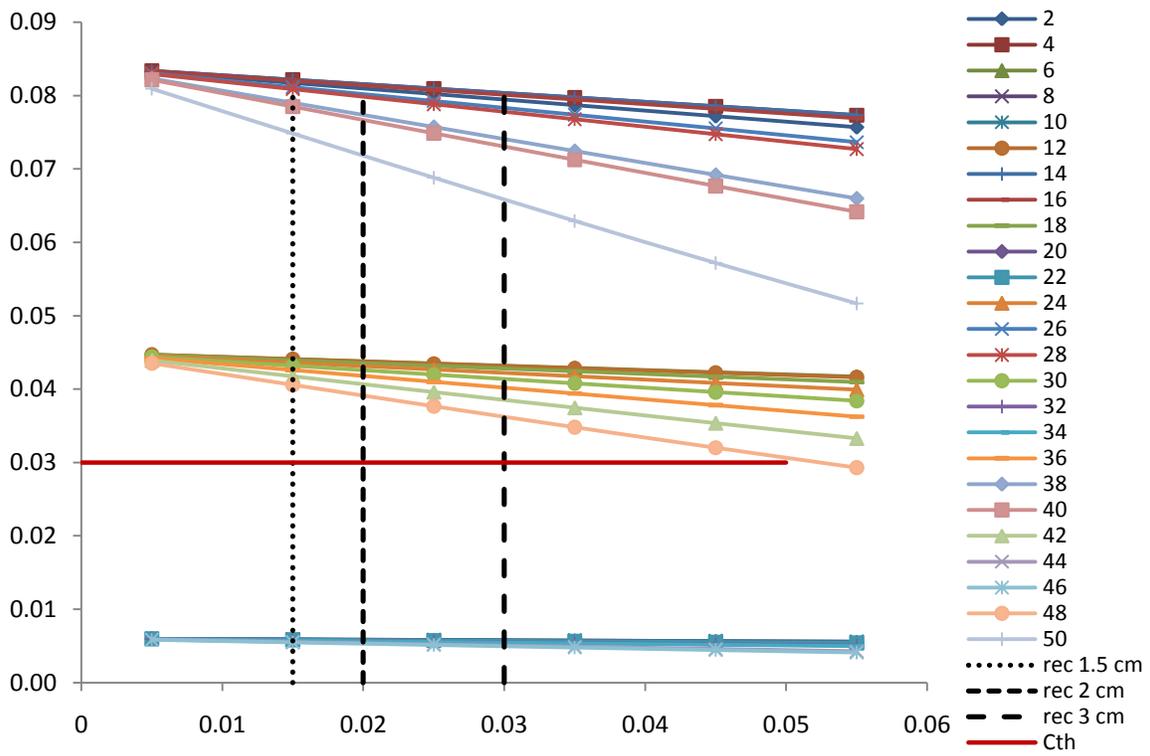


Figura 4.5.4.2 .IV Perfil de concentración de cloruros en la zona de recubrimiento de concreto, 1.5, 2 y 3 cm, con C_s y D_e variables, relación a/c 0.65

5. *DISCUSIÓN DE RESULTADOS*

5.1 Parámetros de Absorción capilar

Diversos autores (Chirgwin,1990; Ho,1996;Lockington,1999) han reportado la importancia que tiene el índice de sortividad como una medida de la calidad del concreto y como indicador de la durabilidad. Con este trabajo se aporta una ventaja más del valor de sortividad, ya que se demuestra que es posible obtener el valor de los coeficientes k , m , ϵ_e y S a partir del valor del índice de sortividad s , mediante un ensaye de menor tiempo y con un nivel de confiabilidad de alta significancia estadística. Existe una notable correlación entre los valores de resistencia a la penetración del agua (m) y sortividad (s) en todos los casos, independientemente de las condiciones de curado, edad y relación a/c , siendo notable la influencia de la porosidad efectiva. La relación es de tipo lineal en el rango de 6.8 a 12.5 % de porosidad efectiva, esto se debe al tamaño de los poros que se forman. Un rango similar fue observado por Lafhaj *et al.* (2006) con valores de porosidad dentro del rango de 8% para bajas relaciones a/c y 13.5% para altas relaciones. En bajas relaciones a/c y en concretos HS los poros no están interconectados, la tortuosidad disminuye, y a mayores relaciones a/c el tamaño de poros se incrementa también, por lo que la relación difiere fuera del rango mencionado. Se manifiesta una relación directa entre el incremento de agua absorbida, el tiempo y la relación a/c .

Los valores de sortividad determinados en este trabajo van de 0.5 a 1.8 $\text{mm h}^{-1/2}$ (0.07 a 0.237 $\text{mm min}^{-1/2}$) y se encuentran dentro del rango de los concretos analizados por Hall (1989). Pueden ser relacionados con los valores máximos permitidos para evaluar la durabilidad de concretos expuestos a ambientes agresivos de $s=3\text{mm h}^{-1/2}$ para ambientes severos y $s=6\text{mm h}^{-1/2}$ para ambientes menos severos, determinados por Ho y Lewis (1987). En cuanto a requerimientos de durabilidad del concreto, también se han dado recomendaciones sobre la penetración máxima, relacionando la sortividad con la relación a/c y con el coeficiente de difusión de cloruros (Ho & Lewis,1987; CC&AA,2009). Una baja sortividad indica una mejor resistencia a cloruros y por lo tanto un concreto mas durable.

La importancia de este parámetro puede verse en dos ejemplos de aplicación: Roads and Traffic Authority de New South Wales, Australia ha usado la sortividad como un primer paso para medir la calidad del concreto respecto a su durabilidad (Chirgwin,1990) y la Federal Highway Administration en E.U.A. apoyó un proyecto para modelar la vida de servicio de pavimentos de concreto y losas de puentes, basado en la sortividad (Bentz,2001).

5.2 Difusividad hidráulica

En la determinación de la difusividad hidráulica a partir de la sortividad, y su relación con la durabilidad del concreto, los valores de D_0 que definen la difusividad del concreto para cada mezcla DURACON se encuentran dentro del rango determinado para concretos OPC en el estudio de validación. Tomando en consideración investigaciones previas (Ho,1987; Chirgwin,1990; Ho,1996) que indican que a menor sortividad, mayor durabilidad, los resultados muestran claramente la influencia del curado, el curado en húmedo a 28 y a 7 días fue el mejor y/o más efectivo ya que produjo un concreto con alta calidad en el recubrimiento, en concordancia con Cano (2003, 2006).

En la comparación de los perfiles se obtuvieron perfiles típicos de penetración; para los especímenes de las mezclas OPC y HSC se logró una buena aproximación, excepto una pequeña diferencia en los especímenes de OPC con proceso de curado HAC Y HCC. Estas observaciones indican que el método de Lockington *et al.* (1999) para determinar la difusividad hidráulica del concreto, asumiendo una función exponencial o potencial, no es representativo para todas las condiciones en materiales basados en cemento, ya que se han observado fuertes desviaciones en este tipo de materiales. Hall (1995) definió como fenómeno de difusión anómala en flujo no saturado este comportamiento, ya que la velocidad de absorción capilar de agua en materiales basados en cemento se ve afectada por la interacción entre el agua y la matriz de cemento endurecida (Hall,2007), puede suponerse que este fenómeno es el que afecta la aplicación general del método de Lockington y, por lo tanto, las ecuaciones generales exponencial y potencial no representan adecuadamente todos los perfiles estudiados. Los resultados indican que al modelar la penetración de agua en materiales basados en cemento, asumiendo una función exponencial o potencial con el método de Lockington, la predicción de perfiles de penetración de humedad estará sobreestimada, y por lo tanto se tendrán desviaciones importantes en perfiles de penetración de cloruros con respecto a resultados experimentales cuando la difusividad hidráulica sea empleada para este tipo de predicciones (Conciatori,2008), sobre todo para concretos autoconsolidantes cuyas características de rehidratación (Lorenzo,1993) pueden afectar la microestructura y modificar la absorción de agua.

El modelo exponencial es el más usado para la difusividad hidráulica, los valores de D_0 que lo definen, de 0.0082 (rel a/c=0.45) y 0.0102 (rel a/c=0.65) muestran una relación de tipo lineal con la sortividad y el valor de $s/D_0^{1/2}$. Para concretos de baja relación a/c (0.30 y 0.45) es 1 y para concretos de mayor relación a/c (0.60 y 0.65) es 1.3

Se puede plantear la hipótesis de que las interacciones físicas y químicas en la superficie del poro influyen en el flujo de diferentes gases e iones, por lo cual es necesario realizar más pruebas para poder confirmar los resultados de este trabajo en una forma más amplia, para diferentes tipos de mezclas y condiciones de curado.

5.3 Parámetros climáticos

Nilsson (1996) comenta que la interacción entre microclima y concreto es muy complicada por el número de variables o factores a considerar, dependiendo de su intensidad, duración y frecuencia, sin embargo, es posible que descripciones simples den suficiente aproximación para predicciones de vida de servicio y es mucho mejor que solo las consideraciones generalmente empleadas actualmente. En el caso de las vigas DURACON, es posible mostrar las tendencias cíclicas estacionales, anuales y multianuales de los principales parámetros estudiados y correlacionarlos con los del concreto. En el análisis de los parámetros climáticos se demuestra la influencia del microclima en el ingreso de cloruros al concreto en la región de estudio, ya que existe una notable relación entre los cloruros ambientales y la precipitación pluvial (Figura 4.3.1.XI) y a su vez los cloruros ambientales están relacionados con la concentración superficial de cloruros (Figura 4.5.1.1.II).

También el viento influye en el ingreso de cloruros, debido a que en la cara expuesta a vientos dominantes la concentración superficial de cloruros es mayor que en la cara no expuesta (Figuras 4.4.1.I y 4.4.1.II). Esta influencia ha sido analizada en particular por Pérez *et al.* (2005) en un ambiente similar con resultados que indican que la forma del perfil de penetración de cloruros cambia según la intensidad y dirección del viento.

Castro (2009) menciona que en las estructuras de concreto se deben considerar dos aspectos, los cambios estacionales que ocurren durante un año y los cambios multianuales. Esta consideración va de acuerdo con el cambio climático global (GCC) que está ocurriendo en todas las regiones. Los parámetros climáticos de la región de estudio, como temperatura, humedad relativa, FTDH y precipitación pluvial, muestran un patrón de comportamiento cíclico anual y multianual determinante en el proceso de ingreso de cloruros al concreto (Figuras 4.3.1.II, 4.3.1.III, 4.3.1.IX y 4.3.1.XI.).

Particularmente, se ha detectado un incremento en la temperatura promedio mínima anual, en el periodo de estudio 2003-2007, que corresponde a medio grado anual (Figura 4.3.1.II). Castro (2009) reporta para esta misma región un posible incremento en la temperatura a partir del año 2010 a 2030 de 2°C. La tendencia de incremento es lineal tanto para temperatura como humedad relativa. Basheer (1996), comenta que el desempeño del

concreto a largo tiempo está regido por su interrelación con el ambiente, lo cual se hace evidente en los resultados finales de este trabajo.

Al analizar la interacción entre precipitación pluvial y concentración de cloruros, puede decirse que ésta se relaciona también con la difusividad hidráulica del concreto, debido a que al inicio del periodo de lluvias (Figura 4.3.1.XI) la concentración de cloruros es alta y la absorción capilar es mucho mayor, acelerando la penetración de cloruros a través del mecanismo de difusión. Cuando la época de lluvia termina o disminuye notablemente, el concreto tiende a secarse y se da un movimiento de agua en su interior, donde por efecto del gradiente el agua tiende a salir al exterior llevando consigo cloruros libres, que pudieran, ocasionalmente, llegar a la superficie del concreto.

Este tipo de interacciones deben analizarse con mayor precisión, para poder incluir estas condiciones en un modelo que considere los procesos de secado y absorción capilar que influyen en la capa superficial o recubrimiento de concreto y modifican los perfiles de penetración de cloruros, de tal forma que pudiera comprenderse mejor este tipo característico de perfiles, que se alejan del perfil clásico de Fick (Figuras 4.4.1.I y 4.4.1.II).

La determinación de la categoría de corrosividad ALTA (ISO 9223:1992) del ambiente en la región de estudio, se debe principalmente al número de horas de humectación anuales, y si existe una tendencia de incremento lineal de la HR (Figura 4.3.1.III) puede inferirse que aumentarían las horas de humectación. En estas condiciones es posible y deseable considerar medidas preventivas para evitar o disminuir la agresividad ambiental, tomando en consideración que a medida que la agresividad ambiental se incrementa, también aumenta la velocidad de corrosión de los metales (Genescá, 1995)

5.4 Difusión de cloruros y Modelos de predicción

Como se ha mencionado, la corrosión inducida por la penetración de cloruros es uno de los principales mecanismos de degradación de las estructuras de concreto. Esta penetración ocurre por difusión debida a un gradiente de concentración de cloruros libres (CC&AA,2009). El mecanismo de transporte de cloruros ha sido descrito ampliamente usando procedimientos matemáticos para medios porosos saturados e insaturados (Samson,2005; Nagesh,1998).

Los perfiles de penetración de cloruros libres de las vigas DURACON, indican la posibilidad de un doble frente de penetración con coeficientes efectivos de difusión de cloruros similares, D_e , en ambos frentes (Figura 4.4.1.IV). Este tipo de comportamiento ha sido reportado por Meijers (2005), quien ha analizado este tipo de perfiles en concreto

sumergido a profundidades de 5 a 100m, que se apegan al modelo de Crank, lo cual difiere de los perfiles DURACON. El tipo de perfiles de penetración de cloruros obtenido (Figura 4.4.1.I y 4.4.1.II) ha sido reportado en ambientes similares (Pérez *et al.*, 2005) al de Progreso, Yucatán y lo asocian a periodos de humedecimiento y secado que modifican la concentración de cloruros al interior de la matriz de concreto. La concentración de cloruros es menor a menor relación agua/cemento (Tabla 4.4.2.II).

El coeficiente de difusión obtenido mediante la solución de Crank [Ec.38] para los perfiles de penetración fue el mejor ajuste a dicho modelo, pues estos perfiles presentan un comportamiento de la concentración de cloruros en función de la profundidad que no se apega totalmente al modelo de Fick. Sin embargo en la reproducción de perfiles se muestra esta correlación (Figura 4.4.3.I). El ajuste, aunque parece ser de tipo lineal, corresponde a la solución de Crank para la 2ª Ley de Fick; la aparente linealidad se debe a un coeficiente de difusión grande, $1E-9$ y $1E-10$ inicial, que disminuye con el tiempo (Tabla 4.4.2.I). Este orden de valores para el coeficiente de difusión ha sido reportado para otros concretos (Nagesh, 1998; Wee *et al.*, 1997) aunque es mayor en comparación a los generalmente reportados en la literatura (C.C.&A.A., 2009; Luciano, 1999; Berke, 1994)

Los tres modelos (Luciano, Bentz y Walton) para determinar el coeficiente de difusión aparente, D_a , evaluados a partir de las características del concreto, resultaron en valores similares, en el orden de $1E-12$ m²/s (Tabla 4.4.3.I). Sin embargo, estos modelos no toman en consideración los efectos de la interacción con el ambiente de exposición, pero dan una idea de la calidad del concreto en cuanto a su resistencia a la penetración de cloruros, sobre todo en la fase de diseño (Luciano, 1999).

La variación en la concentración superficial de cloruros es un factor importante en los modelos de predicción, ya que influye en la velocidad de ingreso de cloruros (Paulsson, 2002) y se ha encontrado que está relacionada con el microclima (Castañeda, 1997; De Coss, 1998). En los modelos tradicionales se considera una concentración superficial acumulativa, sin embargo se observó que cambia durante el año, sigue un comportamiento sinusoidal que refleja el comportamiento ambiental de la región de exposición (Figuras 4.4.1.III y 4.5.1.1.I).

El modelo de concentración superficial, determinado para las vigas DURACON (Figura 4.5.1.1.I), fue validado con datos de perfiles de cloruros de 10 años expuestos en la misma región de estudio (Mendoza, 2009). Corresponde a un modelo de tipo sinusoidal en el cual se ha mostrado la influencia del microclima, los cloruros ambientales se relacionan directamente con los cloruros superficiales de las vigas (Figura 4.5.1.1.II), y además disminuyen en época

de precipitación pluvial, tal y como fue observado por Paulsson (2002), quien desarrolló un modelo de concentración superficial considerando un ciclo anual.

Los modelos de predicción de vida útil de servicio analizados consideran un coeficiente de difusión constante y parten de una concentración superficial, por lo tanto puede determinarse la vida útil si conocemos el umbral de cloruros necesario para despasivar el acero de refuerzo y la profundidad a que se encuentra éste (Nugue,2004; Zhang,2006; Life-365,2008). Sin embargo, el valor crítico para despasivar el acero de refuerzo depende de varios factores y no es un valor único, Alonso *et al.* (2000) reportan umbrales de cloruros libres para despasivación en un rango de 1.14% a 1.58% ppcemento; el Programa Life-365 considera 0.1% ppconcreto y 1% de concentración superficial. Existe una gran variación de umbrales de cloruros recopilados y reportados por Zemajtis (1998) y Alonso *et al.* (2000), debido a la variedad de métodos para determinarlos (Li,2001) y a los factores que le afectan, como contenido de C_3A , alkalis, sulfatos, entre otros (Hussain,1995). En las vigas DURACON los valores de concentración superficial de cloruros están en el rango de 0.62 a 0.04 % ppcemento (0.075 a 0.007 % ppconcreto) y varía estacionalmente, en correspondencia con ciclos de humedecimiento y secado, lo cual propicia una acumulación de cloruros en el interior del concreto que no es uniforme ni fácil de modelar, y origina perfiles de penetración atípicos, que no siempre se ajustan al modelo de Crank, similares a los reportados por Pérez *et al.* (2005). A la fecha, las vigas DURACON aún no presentan datos que indiquen la despasivación del acero de refuerzo, por tanto aún no se ha alcanzado el umbral.

Por otra parte, la consideración clásica es que la velocidad de difusión de cloruros disminuye con el tiempo (Life-365, DuraCrete). En este trabajo se determinaron dos modelos de difusión de cloruros variable, de tipo potencial y exponencial. Esta consideración ya ha sido evaluada por Nokken *et al.* (2006) quienes mencionan que el coeficiente de difusión es dependiente del tiempo y se ha observado que es una función de tipo potencial [ec.41] (Mangat,1994; Life-365TM,2008), donde m es una constante determinada empíricamente que está en función de la relación a/c .

Para los concretos DURACON se determinó un valor de m que difiere del valor empírico determinado por Mangat y Molloy (1994), asumido para la determinación del coeficiente de difusión en función del tiempo. El valor de m determinado, corresponde a los tipos de mezclas utilizadas en México para la elaboración de concreto con agregados locales, de ahí la diferencia con el valor empírico. Sin embargo, este coeficiente se empleará en las otras

determinaciones que se hagan a vigas DURACON expuestas en otros ambientes marinos de México y se hará la determinación de su valor para ambientes urbanos.

Con las limitaciones respectivas del modelo discutido en este trabajo, se anticipa un comportamiento diferente en el coeficiente de difusión (D_e) en los tipos de concreto utilizados en México y bajo las condiciones ambientales a las que estuvieron expuestos, el cual tendría una variación cíclica en función de C_s , denotando así la fuerte influencia del ambiente externo (Figura 4.5.2.1.IV).

Generales

El comportamiento potencial o exponencial reportado en la literatura para el coeficiente de difusión, que implica una disminución de éste con respecto al tiempo, tendría que modificarse/ajustarse en función del rango de variación de los parámetros ambientales.

Los modelos de predicción de vida útil tienen como base un coeficiente de difusión variable en función del tiempo; se ha reportado un comportamiento de tipo potencial (Life 365 2008, DuraCrete, Mangat y Molloy 1994) que concuerda con el resultado de esta tesis. Sin embargo, es necesario llegar a determinar, en tiempo y forma, el contenido crítico de cloruros C_{th} en las vigas DURACON que cause la despasivación del acero, para poder afinar el modelo propuesto.

Los efectos del cambio climático global (GCC) en los microclimas empieza a evidenciarse, existen pocos estudios que aborden su relación con la durabilidad del concreto. Recientemente Castro y Mendoza (2009) reportan cambios ambientales relacionados con el GCC en un microclima tropical o ambiente marino en Progreso, Yucatán, que a su vez inciden en la durabilidad del concreto. El modelo de concentración superficial presentado en esta tesis es un avance en el conocimiento sobre GCC para esta zona de estudio.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de los resultados de esta tesis, reflejan únicamente las condiciones particulares expuestas en esta investigación, por lo que su extrapolación a condiciones diferentes deberá ser cuidadosa.

- Conocida la sortividad es posible inferir los valores de los parámetros de capilaridad obtenidos mediante el Método de Fagerlund. Es de gran interés el conocimiento del parámetro que mide la resistencia a la penetración del agua m , ya que a través de él puede determinarse el valor crítico de saturación de agua y el tiempo necesario para que esto ocurra, transformándose en un tiempo estimado para la saturación crítica o vida de servicio potencial.
- Las relaciones encontradas de la sortividad con los parámetros de absorción capilar fueron altamente significativas para concretos con un rango de porosidad efectiva de 7 a 12%. La relación agua/cemento tuvo una influencia directa sobre la sortividad y esta a su vez tiene relación estrecha con los procesos de curado.
- Al relacionar la sortividad con los coeficientes de capilaridad puede llegar a establecerse el valor de un parámetro que permita evaluar la calidad del concreto en el recubrimiento en menos tiempo.
- En concretos ordinarios (OPC) y de alta resistencia (HPC) es posible obtener una aproximación aceptable de la difusividad hidráulica a partir de una prueba de sortividad, siempre y cuando el proceso de curado sea eficiente, mínimo de 7 días.
- Es necesario realizar futuras investigaciones para introducir los efectos de rehidratación y bloqueo de poros en una nueva función de difusividad del concreto.
- Los parámetros de durabilidad determinados para las vigas DURACON son indicadores para concretos mexicanos ordinarios OPC con relaciones a/c de 0.45 y 0.65 y que mediante pruebas simples de sortividad pudieran extrapolarse a otras mezclas.
- La temperatura y humedad relativa tienen una tendencia lineal de incremento considerando un ciclo multianual que influye en el proceso de deterioro del concreto, principalmente por difusión de cloruros.
- Los cloruros ambientales reflejan un patrón de comportamiento cíclico anual y multianual en función de la precipitación pluvial y están relacionados directamente con la concentración superficial de cloruros.
- La concentración superficial de cloruros es modelable en un ambiente marino.
- Aún cuando en el ambiente estudiado existan periodos de lluvia extraordinarios, aparentemente ésta no influye significativamente en el valor de la concentración

superficial de cloruros de las vigas presente en la época de estudio, de acuerdo al modelo desarrollado.

- La concentración superficial depende del momento o tiempo en que se tome la medición, por lo tanto, no se puede pensar que ésta sigue un comportamiento ascendente o descendente exclusivo, sino en función de las condiciones climáticas, lo cual se está demostrando en este modelo para concretos DURACON expuestos a un ambiente marino.
- La concentración superficial de cloruros responde a un modelo sinusoidal anual validado a 5 y 10 años pero que deberá revisarse para tiempos más largos, tomando en consideración los ciclos multianuales o macrociclos.
- Estas consideraciones permitirán disminuir el grado de incertidumbre en los modelos de predicción de vida útil del concreto, tomando en cuenta las interrelaciones con el microclima.
- El coeficiente de difusión no parece depender únicamente del tiempo, sino también de las condiciones ambientales o factores climáticos. Disminuye a corto plazo con el tiempo tal y como se ha demostrado en estudios previos, pero esta tendencia podría cambiar a mediano y largo plazo, y responder a ciclos anuales y multianuales, que pueden estar asociados al cambio climático que ocasiona cambios netos en la concentración interna de cloruro y a su vez en la forma del perfil de concentración.
- El modelo adoptado generalmente para describir el principal mecanismo de transporte de cloruros en el concreto, la difusión, se basa en la 2ª Ley de Fick, donde la concentración es una variable que está en función de la profundidad de penetración y el tiempo, sin embargo en este trabajo se demuestra que en estudios de largo término el coeficiente de difusión y la concentración superficial responden a un macrociclo definido por las condiciones ambientales del lugar de exposición. Existe una relación entre la concentración superficial de cloruros y los cloruros ambientales, que a su vez dependen de la precipitación pluvial de la zona o región.
- La concentración superficial de cloruros en el ambiente marino de la ciudad de Progreso, Yucatán, responde a un modelo oscilatorio de tipo sinusoidal, validado en dos experimentos a largo plazo, las vigas DURACON expuestas durante 4 años y probetas cilíndricas expuestas durante más de 10 años. El modelo responde a un comportamiento cíclico anual relacionado estrechamente con los parámetros climáticos del sitio de exposición.

- Este modelo es fundamental para explicar el comportamiento de la concentración superficial de cloruros y en consecuencia el tipo de los perfiles de penetración de cloruros, en los que se basa la determinación del coeficiente de difusión. Por tanto, el contenido crítico de cloruros para lograr la despasivación no es un valor único y permanente, sino que dependerá del tiempo y la concentración superficial de cloruros, además, estará en correspondencia con los ciclos multianuales de los parámetros ambientales de la región de estudio.
- Con este nuevo enfoque, los resultados muestran que los ciclos climáticos tienen una influencia en los perfiles de cloruros estudiados, lo cual tiene relación directa con la durabilidad del concreto y un modelo de predicción de vida útil de servicio para este tipo de condiciones debe considerar una difusión variable con una concentración superficial variable también.
- La conclusión general al evaluar la durabilidad de vigas DURACON expuestas a ambiente marino en la ciudad de Progreso, Yucatán, mediante la determinación del nivel de agresividad del ambiente de exposición, de los parámetros de absorción capilar y del Coeficiente de Difusión de cloruros, para obtener un modelo de predicción de vida útil de servicio del concreto, es que ambas mezclas se encuentran dentro de los valores dados por la literatura dentro del rango aceptable de durabilidad y el tiempo para inicio de corrosión T_i , es mayor a menor relación a/c y a mayor espesor del recubrimiento, aun con una concentración superficial variable.
- Aun es necesario continuar con mas investigaciones para determinar los valores límite de los parámetros de durabilidad recomendados para concretos durables.
- La generación de conocimiento de patrones de comportamiento en función del ambiente de exposición permitirá el diseño, construcción y/o rehabilitación de edificaciones durables, resistentes a fenómenos naturales.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. ACI 116R-00. (2002). TERMINOLOGÍA DEL CEMENTO Y EL CONCRETO. IMCYC. MEXICO, D.F.
2. ACI Committee 201, "Guide to durable concrete". (1982) Report ACI 201R, American Concrete Institute, Detroit, EUA.
3. Aitcin, P.C. (1993). Durable Concrete-Current Practice and Future Trends. Concrete Technology: Past, Present, and Future. SP 144-5. ACI. pp.85-104
4. Alonso C, Andrade C, Castellote, M and Castro P. (2000) Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cement and Concrete Research Vol.30, 1047-1055
5. Angst U, Elsener B, Larsen C. and Vennesland Ø. (2009) Critical chloride content in reinforced concrete- A review. Cement and Concrete Research (39) pp.1122-1138.
6. ASTM C 1585-04. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, United States.
7. ASTM C 192 / C192M - 07 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
8. Baker, A.F. (1992). STRUCTURAL INVESTIGATIONS. Durability of concrete structures. Ed. Spon Press. Great Britain. pp. 37-78
9. Basheer P.A.M., Chidiac S.E and Long A.E.(1996) Predictive models for deterioration of concrete structures. Government of Canada. Elsevier Science Ltd. Printed in Great Britain, pp. 27-37
10. Bentz E.C., Thomas M.D. & Ehlen M.A. (2008) Life-365TM. SERVICE LIFE PREDICTION MODELTM and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides. Concrete Corrosion Inhibitors Association, the National Ready Mix Concrete Association, the Slag Cement Association, and the Silica Fume Association.
11. Bentz, D. P., Ehlen, M. A., Ferraris, Ch. F. and Garboczi, E. J. (2001). Sorptivity-based service life predictions for concrete pavements. 7th International Conference on Concrete Pavements. Proceedings, Vol 1. International Society for Concrete Pavements. September 9-13, Orlando, Florida, pp. 181-193
12. Bentz, D.P., Garboczi, E. J. and Lagergren E. (1998). Multi-Scale Microstructural Modelling of Concrete Diffusivity: Identification of Significant Variables. Journal of Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 20. No. 1. pp. 129-139. June. ASTM
13. Berke N. and Hicks M. (1994) Predicting chloride profiles in concrete. Corrosion Engineering. Vol. 50 No. 3, March, 1994. pp. 234-239
14. Berke N., Hicks M., Malone J. and Rieder K. (2005) Concrete Durability. Concrete International. Agosto 2005. pp.63-68.
15. Burm C. and Kyum E. (2002) Modelling of chloride ion ingress in coastal concrete. Cement and Concrete Research Vol. 32, 757-762
16. Cano-Barrita P.F. de J. (2003) Curing of High Performance Concrete in Hot Dry Climates Studied Using Magnetic Resonance Imaging, PhD Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, Canada..
17. Cano-Barrita P.F. de J., Bremmer T.W., and Balcom B.J. (2006) Water absorption of high performance concrete. Raymundo Rivera International Symposium on Durability of Concrete. 521-543

18. Castañeda H, Castro P, González C y Genescá J. (1997) Modelo de difusión de cloruros en las estructuras de hormigón armado expuestas en la Península de Yucatán (México). *Revista de Metalurgia*, Nov-Dic (1997) CENAM
19. Castro P. y Helene P. (2007). Service life of reinforced concrete structures: New approach. A. A. Sagüés, H. Castañeda-López, P. Castro-Borges, A. A. Torres-Acosta Editors in *Corrosion of Infrastructure*, ECS Transactions, Vol 3, Issue 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 9-14.
20. Castro P., De Rincon O.T, Pazzini E.J. (2001) Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environment. *Cement and Concrete Research* 31, pp. 529-537
21. Castro, P. (2004). Proyecto "Influencia de la acción del medio ambiente en las patologías (corrosión) y durabilidad del concreto".
22. Castro-Borges, P y Mendoza-Rangel, J.M. (2009) Influence of climate change on concrete durability in Yucatan Peninsula. *Corrosion Engineering, Science and Technology*.
23. CC&AA. Cement Concrete & Aggregates Australia. (2009). Chloride Resistance of Concrete. June. Sydney, Australia.
24. Chirgwin, G.J. † and Ho, D.W.S. (1990) The RTA approach and the use of water sorptivity for comparing the durability quality of concrete. Part B80-Concrete for bridgeworks. Roads and Traffic Authority of New South Wales,
25. Claisse, P. A., Elsayad, H. I. and Shaaban, I. G. (1997) Absorption and Sorptivity of Cover Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, August 1997, pp.105-110
26. Conciatori D, Sadouki H. and Brühwiler E. (2008) Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. *Cement and Concrete Research*, 38, pp. 1401-1408
27. de Coss R., Murrieta G. and Castro P. (1998). Effect of weather cycles on chloride diffusion in porous concrete. *Rehabilitation of Corrosion Damaged Infrastructure*, Chapter IV: Modeling, methods, techniques and technologies, pp. 285-293. NACE International.
28. Fagerlund, G. (1982) On the Capillarity of concrete. *Nordic Concrete Research*. Publication No. 1 Oslo, December.
29. Fagerlund, G. (1993) The long time water absorption in the air-pore structure of concrete. Report TVBM-3051. Lund, Sweden.
30. Genescá, J. (1995). III Corrosión atmosférica. Mas allá de la herrumbre. Fondo de Cultura Económica. México, DF.
31. Hall C. (2007) Anomalous diffusion in unsaturated flow: Fact or fiction? *Cement and Concrete Research* 37, pp.378-385
32. Hall C., Hoff W.D., Taylor C, Wilson M.A., Yoon Beom-Gi, Reinhardt H.W., Sosoro M., Meredith P. and Donald A.M. Water anomaly in capillary liquid absorption by cement-based materials. *Journal of Materials Science Letters*, 14 (1995), 1178-118
33. Hall, C. (1989) Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*, 41, pp. 51-61
34. Hansen E and Saouma V. (1999) Numerical Simulation of reinforced concrete deterioration-Part I: Chloride diffusion. *ACI Materials Journal*. Vol. 96, No. 2. March-April 1999. pp. 173-180.

35. Hartt, W., Powers R., Leroux V., Lysogorski D. (2004) FHWA-RD-04-093. Critical Literature Review of High-Performance Corrosion Reinforcements in Concrete Bridge Applications. Final Report. July 2004. Center for Marine Materials, Florida.
36. Hastie G. (2006) Statistical modelling of marine concretes made with natural pozzolans. International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer. Khon Kaen, Thailand, May 24-25, pp. 133-144
- Helene P. (2003). A Nova Nb 1/2003 (Nbr 6118) e vida útil das estruturas de concreto. Brazil.
37. Heidersbach, B. (2002). Corrosion engineering. The Corrosion Journal for the Online Community. U.S.A.
38. Helene P. (2003). A Nova NB 1/2003 (NBR 6118) e vida útil das estruturas de concreto. Brazil.
39. Ho, D. W. S. and Chirgwin, G. J.† (1996) A performance specification for durable concrete. Construction and Building Materials, V 10, No. 5 pp.375-379
40. Ho, D. W. S. and Lewis, R. K. The water sorptivity of concretes: The influence of constituents under continuous curing. Durability of building materials, 4 (1987). pp. 241-252
41. Holder T., B. (1999) The Determination of Chloride Threshold Concentrations Using Different Supplementary Cementing Materials in Steel-Reinforced Concrete. Thesis, University of Toronto
42. Hooton R, Geiker M and Bentz E. (2002) Effects of curing on chloride ingress and implications on service life. ACI Materials Journal, vol. 99 No. 2, March-April 2002. pp 201-206
43. Hussain S.E, Rasheeduzzafar, Al-Musallam A. and Al-Gahtani A.S. (1995) Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete. Cement and Concrete Research. Vol.25, No.7 pp.1543-1555.
44. Hwan B y Yup S. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. Cement and Concrete Research 37 pp 47–53
45. Janz M. (2000) Moisture transport and fixation in porous materials at high moisture levels. Lund Institute of Technology. Lund, Sweden, pp.13-19
46. Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A. and Kaezmarek, M. (2006) Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. Cement and Concrete Research, 36. pp. 625–633
47. Leech C., Lockington D. and Dux P. (2003) Unsaturated diffusivity functions for concrete derived from NMR images. Materials and Structures, Vol.36, July 2003, pp. 413-418
48. Li L. and Sagüés. (2001) Chloride Corrosion Threshold of Reinforcing Steel in Alkaline Solutions-Open –Circuit Immersion Tests. Corrosion Science Section. Vol.57, No.1 pp.19-28 NACE International.
49. Liang M, Jin W, Yang R, Huang N. (2005) Predeterminate model of corrosion rate of steel in concrete. Cement and Concrete Research 35 (2005) 1827–1833
50. Liu T and Weyers R. (1998) Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures. Cement and Concrete Research Vol. 28 No. 3, 365-379

51. Lockington, D., Parlange, J.-Y. and Duxl, P. (1999) Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete. *Materials and Structures*. Vol.32, June 1999,pp.342-347
52. Lorenzo G.M.P. Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. (1993).
53. Luciano J and Miltenberg M. (1999) Predicting chloride diffusion coefficients from concrete mixture proportions. *ACI Materials Journal*. Vol. 96-M76, No. 6. November-December 1999. pp.698-702
54. Mangat P and Molloy B. (1994) Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete. *Materials and Structures*. Vol. 27, Number 6, 338-346
55. Marchand J. (2001) Modeling the behavior of unsaturated cement systems exposed to aggressive chemical environments. *Materials and Structures*, Vol.34, May, 195-200
56. Mc Polin D, Basheer P.A.M., Long A.E., Grattan K.T.V. and Sun T.(2005). Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials. *Constructions and Buildings Materials*, pp. 666-673
57. Mehta, P. (1997) Durability-Critical Issues for the Future. *Concrete International*. Julio 1997. pp. 27-33
58. Meijiers S.J.H.- Bijen J.M., de Borst R. and Fraaij A.L.A. (2005) Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles and carbonation. *Materials and Structures* 38, pp. 145-154
59. Mena F., M. (2005). Durabilidad de estructuras de concreto en México. Previsiones y recomendaciones. IMCYC. MEXICO, D.F.
60. Mendoza R., J.M. (2009) Vida de servicio de estructuras de concreto reforzado influenciadas por el cambio climático global en ambiente tropical marino. Tesis Doctoral. CINVESTAV Mérida. Mérida, Yucatán.
61. Mohammed T. U., Yamaji T. and Hamada H. (2002) Chloride diffusion, Microstructure, and Mineralogy of Concrete after 15 Years of Exposure in Tidal Environment. *ACI Materials Journal*, V. 99 No. 3, pp. 256-263
62. Mustafa M.A. and Yusof K.M. (1994) Atmospheric Chloride Penetration into Concrete in Semitropical Marine Environment. *Cement and Concrete Research* Vol.24 No. 4, pp.661-670
63. Nagesh M. and Bishwajit B. (1998) Modelling of chloride diffusion in concrete and determination of diffusion coefficients. *ACI Materials Journal*. Vol. 95, No. 2. March-April 1998. 113-120.
64. Nilsson L. (1996) Interaction between microclimate and concrete –a prerequisite for deterioration. *Construction and Building Materials*. Vol.10 No.5 pp.301-308
65. Nokken M, Boddy A, Hooton R and Thomas M. (2006) Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies. *Cement and Concrete Research* 36 pp 200-207
66. Nogue F., Lorente S., Ollivier J.P. (2004) Basis for the prediction of chloride ingress into cement-based materials. *e-Mat – Revista e Ciencia e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*. Vol.1, n.1, pp.10-21, Maio 2004.

67. Paulsson-Tralla J and Silfwerbrand J. (2002) Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using measured surface concentrations. *ACI Materials Journal*, vol. 99 No. 1, January-February 2002. pp 27-36
68. Pérez García, E.J., Castro-Borges, P., O'Reilly D, V.A., Seiglié G, Fernández E., I. (2005) Influencia de la dirección del viento en los perfiles de cloruro obtenidos en estructuras cercanas al Mar Caribe. Caso del Viaducto Turiguanó-Cayo Coco en Cuba. *Materiales y Construcción*. Vol. 55 No. 277.
69. Philip J.R. (1989) Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. *Magazine of Concrete Research*, 41, No.147, June 1989, pp.51-61
70. Picandet, V., Bastian, G. and Khelidj, A. Compared imbibitions of ordinary and high performance concrete with null or positive water pressure head. *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), 772-782
71. Qiu, J. (2002). Emerging Corrosion Control Technologies for Repair and Rehabilitation of Concrete Structures. *The Corrosion Journal for the Online Community*. E.U.A.
72. Samson E, Marchand J, Snyder K, Beaudoin J. (2005) Modelling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 141– 153
73. Sanjuán B., M.A. y Castro B., P. (2001). Acción de los agentes físicos y químicos sobre el concreto. IMCYC. México, D.F
74. SIEMES, T., TNO Building and Construction Research, The Netherlands; EDVARDSEN, COWI, C., Consulting Engineers and Planners AS, Lyngby, Denmark. (1999) DURACRETE: SERVICE LIFE DESIGN FOR CONCRETE STRUCTURES. A basis for durability of other building materials and components? 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Service Life and Asset Management: Towards Integration and Application of Service Life Prediction Methods. CIB W78 Workshop. Service Life and Asset Management: IT in Construction. Rotterdam, Netherlands.
75. Steen R. COWI A/S (2003). Service Life of Concrete Structures-a Design Approach for the Future. *Concreto Colloquia 2003*, São Carlos, SP, Brazil, May 14-16, 2003.
76. Tang L and Nilsson L. (1994). A numerical Method for prediction of chloride penetration into concrete structures. The modelling of microstructure and its potential for studying transport properties and durability, Saint-Rémy-Lés-Chevreuse, France
77. Thomas M. (1996). Chloride Thresholds in Marine Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.4, pp.513-519
78. Torres, A. (1995). Estimation of chloride diffusion into concrete elements. The influence of different parameters affecting the chloride diffusion coefficient. Tampa, Florida. E.U.A.
79. Troconis O. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado. DURAR. CYTED, Red Temática XV.B
80. Tuutti, K. (1982). Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 468 p.
81. Uller, L., Troconis, O. (2000). Proyecto "Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto". Proyecto XV.3 DURACON. CORTEC-BRASIL.

82. Walton, J., Plansky, L. and Smith R. (1990) Models for estimation of service life of concrete barriers in low-level radioactive waste disposal. NUREG/CR-5542 EGG-2597
83. Wee T.H., Wong S.F., Swaddiwudhipong S. and Lee S.L. (1997) A Prediction Method for Long- Term Chloride Concentration Profiles in Hardened Cement Matrix materials. ACI Materials Journal, V. 94 No. 6, pp. 565-576
84. Wilson M.A., Carter M.A and Hoff W.D. (1999) British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. Materials and Structures, Vol.32, October 1999, pp.571-578
85. Zemajtis J. (1998) Modelling the Time to Corrosion Initiation for Concretes with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride-Laden Environments. Thesis, University of Virginia.
86. Zhang J. and Lounis Z. (2006) Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides. Cement and Concrete Research 36 (2006) 1312–1323

ANEXOS

- A. Modelos de predicción de Vida útil, variables y parámetros considerados
- B. Estudio de Sortividad
- C. Estimación del grado de corrosividad de la atmósfera de acuerdo a la ISO 9223:1992
- D. Validación del modelo de concentración superficial de cloruros

ANEXO A

Modelos de predicción de Vida útil, variables y parámetros considerados

Modelos de predicción de Vida útil, variables y parámetros considerados

Tabla A. Variables y parámetros físicos considerados en los estudios y modelos de predicción de vida útil de las estructuras (1ª Parte)

AÑO	Composición mezcla	Relación a/mc	concentración	tiempo de exp	tiempo de curado	recubrimiento	tipo de agregado	refuerzo	grietas	Porosidad, permeabilidad
1994	1,2	1				1				1,2
1995			3	3						
1996	4		4	4	4					
1997		6	5	5	5					
1998	7,8	10	8,9							
1999	12	12		11,12	12		12			
2000			14	13,14						
2001		16	16	16					16	
2002	17,18	17	20		18					
2003	21							21	22	
2004	23	23								23
2005			24	24,26		26		26	27	
2006	28,29	28	29	28		29				
2007	30		30	30						30
SUMA	13	8	11	12	4	3	1	2	3	4

Nota: El número en la celda corresponde al número de referencia del artículo

Tabla B. Variables y parámetros físicos, químicos y electroquímicos considerados en los estudios y modelos de predicción de vida útil de las estructuras (2ª Parte)

AÑO	condiciones de exposición	Temperature	HR	enlace químico Cl-	adsorción Cl-	resistividad	parámetros electro-químicos	microestructura (agregados, ZTI, contenido de aire)
1994						1		
1995								
1996								
1997	6			6	6			
1998	7	9				9	9	10
1999		11,12						
2000							13,14	
2001	15	16	15					
2002	20			19	19			
2003								
2004								23
2005				25			24	
2006								
2007	30	30	30	30				
SUMA	5	5	2	4	2	2	4	2

Notas: El número en la celda corresponde al número de referencia del artículo.

La presentación de los parámetros no corresponde a un orden predefinido

Referencias Anexo A:

1. Berke N. and Hicks M. (1994) Predicting chloride profiles in concrete. *Corrosion Engineering*. Vol. 50 No. 3, March, 1994. pp. 234-239
2. Frey R, Balogh T, Balazs G. (1994) Kinetic method to analyse chloride diffusion in various concretes. *Cement and Concrete Research* V 24, 5, 863-873
3. Tumidajski P, Chan G, Feldman R and Strathdee G. (1995) A Boltzmann-Matano analysis of chloride diffusion.
4. Tumidajski P, Chan G. (1996) Boltzmann-Matano Analysis of Chloride Diffusion into Blended Cement Concrete. *Journal of materials in civil engineering/November 1996/* pp 195- 200
5. Castañeda H, Castro P, González C y Genescá J. (1997) Modelo de difusión de cloruros en las estructuras de hormigón armado expuestas en la Península de Yucatán (México). *Revista de Metalurgia*, Nov-Dic (1997) CENAM
6. Wee T, Wong S, Swaddiwudhipong S and Lee S. (1997) A prediction method for long-term chloride concentration profiles in hardened cement matrix materials. *ACI Materials Journal*. Vol. 94, No. 6. November-December 1997. pp. 565-576
7. Zemajtis J. (1998) Modelling the Time to Corrosion Initiation for Concretes with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride-Laden Environments. Thesis, University of Virginia.
8. Nagesh M. and Bishwajit B. (1998) Modelling of chloride diffusion in concrete and determination of diffusion coefficients. *ACI Materials Journal*. Vol. 95, No. 2. March-April 1998. 113-120.
9. Liu T and Weyers R. (1998) Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures. *Cement and Concrete Research* Vol. 28 No. 3, 365-379
10. Bentz D, Garboczi E and Lagergren E. (1998) Multi-scale Microstructural modelling of concrete diffusivity: Identification of significant variables. *Cement, concrete and aggregates*. Vol.20, No.1, 129-139
11. Hansen E and Saouma V. (1999) Numerical Simulation of reinforced concrete deterioration-Part I: Chloride diffusion. *ACI Materials Journal*. Vol. 96, No. 2. March-April 1999. pp. 173-180.
12. Luciano J y Miltenberg M. (1999) Predicting chloride diffusion coefficients from concrete mixture proportions. *ACI Materials Journal*. Vol. 96-M76, No. 6. November-December 1999. pp.698-702
13. Martín-Pérez B, Zibara H, Hooton R and Thomas M. (2000) A study of the effect of chloride binding on service life predictions. *Cement and Concrete Research* 30, 1215-1223
14. Alonso C, Andrade C, Castellote, M and Castro P. (2000) Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. *Cement and Concrete Research* Vol.30, 1047-1055
15. Castro P, de Rincon O and Pazzini E. (2001) Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments. *Cement and Concrete Research* Vol. 31, 529-537
16. Garcés O. (2001) Influence of cracks on chloride ingress into concrete. Thesis, University of Toronto.
17. Suryavanshi A, Swamy R. and Cardew G. (2002) Estimation of diffusion coefficients for chloride ion penetration into structural concrete. *ACI Materials Journal*. Vol. 99, No. 5. September-October 2002. pp. 441-449.
18. Hooton R, Geiker M and Bentz E. (2002) Effects of curing on chloride ingress and implications on service life. *ACI Materials Journal*, vol. 99 No. 2, March-April 2002. pp 201-206
19. Burm C and Kyum E. (2002) Modelling of chloride ion ingress in coastal concrete. *Cement and Concrete Research* Vol. 32, 757-762
20. Paulsson-Tralla J and Silfwerbrand J. (2002) Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using measured surface concentrations. *ACI Materials Journal*, vol. 99 No. 1, January-February 2002. pp 27-36
21. Hwan B, Seok B. (2003) Chloride diffusion analysis of concrete structures considering effects of reinforcements. *ACI Materials Journal*, vol. 100 No. 2, March-April 2003. pp 143-149
22. Boulfiza M, Sakai K, Banthia N, and Yoshida H. (2003) Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 100 No. 1, January-February 2003. pp 38-48
23. Hwan B, Yup S. (2004) Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations. *Cement and Concrete Research* 34 pp 463–480

24. Samson E, Marchand J, Snyder K, Beaudoin J. (2005) Modelling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 141– 153
25. Rigo E, Schmidt-Döhl F, Krauß M, Budelmann H. (2005) Transreac: a model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its extension to a probabilistic model. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1734–1740
26. Liang M, Jin W, Yang R, Huang N. (2005) Predeterminate model of corrosion rate of steel in concrete. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1827–1833
27. Bhargava K, Ghosh A, Mori Y, Ramanujam S. (2005) Modelling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research* 35 pp 2203–2218
28. Nokken M, Boddy A, Hooton R and Thomas M. (2006) Time dependent diffusion in concrete— three laboratory studies. *Cement and Concrete Research* 36 pp 200-207
29. Jieying Z, Zoubir L. (2006) Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1312–1323
30. Hwan B y Yup S. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research* 37 pp 47–53

ANEXO B

Estudio de Sortividad

Estudio de Sortividad

Se realizó la prueba de sortividad hidráulica siguiendo el método descrito por la ASTM C 1585-04 a cinco grupos de probetas de concreto ordinario (OPC) y uno de alta resistencia (HSC). Se realizaron pruebas de Absorción Capilar por el Método de Fagerlund a los mismos grupos de probetas, prolongando la prueba de sortividad. Las probetas provienen de 3 estudios experimentales diferentes (A, B y C), que incluyen un mínimo de dos probetas por mezcla. Las características de las mezclas se dan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las mezclas

Experimento	A		B		C	
Mezcla	1	2	3	4	5	6
Relación a/c	0.45	0.65	0.6	0.30	0.45	0.60
Curado(días)	7	7	1-7-28		0-7	0-7
Dosificación $kg m^{-3}$						
Cemento	411	285	329	495	449	337
Humo de sílice	-	-	-	43	--	--
Agua	185	185	197	160	172	203
Arena	731	812	853	640	713	786
Grava	1010	1033	921	1040	997	994
Aditivo $cm^3 kg^{-1}$ de cemento	4	4	0.6	1.0	--	--

El primer estudio experimental (A) considera dos tipos de mezclas de concreto OPC, con relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.65, curado estándar durante 7 días. El segundo estudio (B) incluye una mezcla OPC relación agua/cemento de 0.60 y una mezcla HSC relación agua/cemento 0.30, con diferentes tipos de curado. El tercer estudio experimental (C) en mezclas de concreto OPC incluye dos relaciones agua/cemento, 0.60 y 0.45, curado estándar a 7 días y 3 edades de prueba (28,56 y 120 días).

Las probetas de concreto acondicionadas (A) y de peso inicial seco (W_0) se sometieron a un proceso de absorción capilar y se determinó el peso (W_t) a intervalos de 5,10,15,30 minutos, 1,2,3,4,6,24 horas y 2,3,4,5,6 y 7 días, tiempo final en el cual el peso W_t fue constante y se dio por terminado el proceso, indicando que la profundidad de penetración (z) es igual a la altura de la probeta. Las probetas del segundo estudio (B), con peso inicial seco, se sometieron a un proceso de absorción determinando el peso a intervalos de 10, 30, 60, 120 y 240 minutos, 24, 48 y 96 horas hasta alcanzar un peso constante. Las del tercer estudio (C) a intervalos de 10, 30, 60, 100, 160, 200 y 250 min, 5, 6, 8 y 24 horas y 2, 3, 6 y 10 días.

Los valores de los parámetros s , m , k , ε_e y S determinados para las 6 mezclas se presentan en la tabla 2. Existe una notable correlación entre los valores de m y s , en todos los casos, independientemente de las condiciones de curado, edad y relación a/c.

Tabla 2. Parámetros de absorción capilar de mezclas de concreto de tres estudios experimentales (A, B y C).

Exp	No. mezcla		Rel a/c	s_{orp} mm h ^{-1/2}	k (E-02) kg m ⁻² s ^{-1/2}	m (E+07) s m ⁻²	ε_e %	S (E-04) m s ^{-1/2}	
A	1	1.1	0.45	0.6895	1.174	5.518	8.72	1.35	
			0.45	0.6715	1.177	5.260	8.53	1.38	
			0.45	0.6715	1.132	6.012	8.78	1.29	
	2	2.1	0.65	0.8994	1.563	5.158	11.22	1.39	
			0.65	1.0853	1.883	3.818	11.63	1.62	
B	3	3.1	0.60	1.2084	2.014	3.012	11.51	1.82	
			0.60	1.1511	1.946	3.224	11.51	1.76	
		3.2	0.60	1.2161	2.032	2.841	11.28	1.88	
			0.60	1.2820	2.205	2.875	12.32	1.86	
		3.3	0.60	1.4617	2.486	2.056	11.74	2.21	
			0.60	1.6421	2.806	1.809	12.43	2.35	
		3.4	0.60	1.2169	2.071	2.625	11.05	1.95	
			0.60	1.2951	2.185	2.661	11.74	1.94	
		3.5	0.60	1.5995	2.701	1.742	11.74	2.40	
			0.60	1.8412	3.187	1.131	11.17	2.97	
		3.6	0.60	1.3462	2.275	2.314	11.40	2.08	
			0.60	1.3447	2.354	2.204	11.51	2.13	
		4	4.1	0.30	0.5360	0.915	7.030	7.67	1.19
	0.30			0.5476	0.919	6.979	7.68	1.20	
			4.2	0.30	0.7870	1.333	4.032	8.47	1.57
				0.30	0.7955	1.348	4.789	9.33	1.45
			4.3	0.30	0.7258	1.216	4.922	8.53	1.43
				0.30	0.7320	1.246	4.557	8.41	1.48
			4.4	0.30	0.5972	0.974	4.953	6.85	1.42
				0.30	0.6088	0.999	4.656	6.82	1.47
		4.5	0.30	0.5957	0.991	3.097	5.52	1.80	
			0.30	0.5709	0.968	2.781	5.11	1.90	
		4.6	0.30	0.6437	1.075	3.152	6.03	1.78	
			0.30	0.7165	1.179	3.388	6.86	1.72	
C	5	5.1	0.45	1.1277	1.944	4.357	12.83	1.515	
			0.45	0.6961	1.192	7.832	10.55	1.130	
		5.2	0.45	1.1873	2.021	4.830	14.04	1.439	
			0.45	1.0963	1.850	6.973	15.45	1.198	
		5.3	0.45	1.3399	2.278	2.257	10.82	2.105	
			0.45	1.0996	1.852	3.512	10.98	1.687	
		6	6.1	0.60	1.6235	2.898	1.724	12.03	2.409
	0.60			1.1597	1.988	3.149	11.16	1.782	
			6.2	0.60	1.5146	2.563	2.382	12.51	2.049
				0.60	1.0118	1.719	3.536	10.22	1.682

NOTAS: Los datos en cursiva corresponden a $6.8\% < \varepsilon_e > 12.5\%$

Nomenclatura:

k = coeficiente de absorción capilar

m = resistencia penetración del agua

ϵ_e = porosidad efectiva

S = sorción capilar

s, sorp = sortividad

ANEXO C

**ESTIMACIÓN DEL GRADO DE CORROSIVIDAD DE LA ATMÓSFERA
DE ACUERDO A LA ISO 9223:1992**

ESTIMACIÓN DEL GRADO DE CORROSIVIDAD DE LA ATMÓSFERA DE ACUERDO A LA ISO 9223:1992

Documento de referencia: *Joan Genescá (1995). Más allá de la herrumbre. III. Corrosión y medio ambiente. D.R. ©, Fondo de Cultura Económica. México.*

- **Clasificación del tiempo de humectación.**

El Tiempo de humectación depende, como se ha visto, de la zona macro climática y del tipo de localización. La clasificación que se propone para la atmósfera se presenta en el cuadro I. Los valores clasificados están basados en características de larga duración de zonas macroclimáticas, en condiciones típicas de las categorías o tipos de localización.

CUADRO I. Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas que se corroen (ISO 9223:1992).

Categoría	Tiempo de humectación		Ejemplo
	Horas/Año	% Año	
t ₁	<10	<0.1	Atmósfera interior climatizada
t ₂	10-250	0.1-3	Atmósfera interna, excepto espacios interiores no aireados
t ₃	250-2500	3-30	Atmósfera exterior en regiones secas o muy frías
t ₄	2500-5500	3-60	Atmósferas exteriores en todas las zonas, excepto la tropical seca y las zonas frías
t ₅	<5500	<60	Lugares no ventilados en regiones muy húmedas

Observaciones:

- 1) En tiempos de humectación t₁ no se espera condensación. En t₂, la probabilidad de formación de líquido en la superficie metálica es baja. Los tiempos de humectación t₃-t₅ incluyen periodos de condensación y de precipitación.
- 2) El tiempo de humectación de determinado lugar depende del complejo-humedad de la atmósfera externa.
- 3) En atmósferas internas sin aire acondicionado, el control de la humedad mediante fuentes de vapor permite alcanzar tiempos de humectación en el intervalo t₃-t₄.

4) En tiempos de humectación t_1-t_2 , la corrosión procede de acuerdo con las leyes de probabilidad. La probabilidad de corrosión es mayor en superficies donde puede depositarse suciedad.

5) Los efectos de la corrosión en atmósferas con tiempos de humectación t_3-t_5 tienen lugar desde el primer día de exposición (si no existe un tiempo de inducción) y proceden de manera continua. El nivel y tipo de contaminante son los factores cinéticos decisivos.

- **Clasificación de las categorías de contaminación.**

Las categorías que se proponen se emplean para medir la contaminación de la atmósfera por SO_2 y aerosoles de agua de mar. Estos dos tipos de contaminantes son representativos de atmósferas como la rural, la urbana, la industrial y la marina. Los otros tipos de contaminantes se consideran añadidos (por ejemplo, NO_x en atmósferas urbanas e industriales). La clasificación de la contaminación debida al SO_2 para atmósferas exteriores estándar se presenta en el cuadro II.

CUADRO II. Clasificación de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO_2 (ISO 9223:1992).

Velocidad de depósito de SO_2 mg/m^2 día	Concentración del SO_2 mg/m_3 o ppm	Categoría
<10	<0.012	P_0
>10-35	0.012 - 0.04	P_1
>35-80	0.04 - 0.09	P_2
>80-200	0.09 - 0.25	P_3

Observaciones:

1) Las cantidades de SO_2 determinadas por depósito, P_d' o volumétricamente, P_c' son equivalentes a efectos de clasificación. La relación entre ambas magnitudes puede formularse aproximadamente como:

$$P_d = P_c \cdot 800$$

2) La velocidad de depósito de SO_2 y la concentración representan un promedio anual.

3) Cualquier concentración inferior a P_0 se considera no importante desde el punto de vista de la corrosión.

4) Una contaminación por encima de P_3 se considera extrema y es típica de determinados microclimas.

- **La clasificación de la contaminación por pulverizaciones o aerosoles salinos.**

Está representada por el nivel de NaCl, se relaciona con atmósferas exteriores en ambientes marinos, se presenta en el cuadro III.

CUADRO III. Clasificación de la contaminación por aerosoles salinos representados por NaCl. (ISO 9223:1992).

Velocidad de depósito de NaCl ₂	Categoría
< 3	S ₀
> 3-60	S ₁
> 60-300	S ₂
> 300-1500	S ₃

Observaciones:

- 1) La clasificación anterior está basada en la determinación de la velocidad de depósito de cloruros por el método de la candela húmeda (ISO 9225).
- 2) Los resultados obtenidos por la aplicación de diferentes métodos para la determinación del contenido salino de la atmósfera no son siempre directamente comparables ni convertibles.
- 3) La porción más significativa de la contaminación es la causada por el NaCl, y la restante se debe a MgCl₂, KCl y otros constituyentes del agua de mar.
- 4) La concentración de NaCl está expresada como promedio anual.
- 5) Las velocidades de depósito inferiores a S₀ se consideran como no importantes para el ataque corrosivo.
- 6) Grados de contaminación por encima de S₃ se consideran extremos.
- 7) Los aerosoles salinos dependen fuertemente de las variables que influyen en el transporte de las partículas salinas tierra adentro, como dirección del viento, velocidad, topografía local, etcétera.

La situación geográfica y las condiciones climáticas pueden hacer variar la extensión del territorio afectado por la salinidad tierra adentro.

- **Categorías de la corrosividad de la atmósfera.**

Para efectos prácticos, la corrosividad de la atmósfera se divide en cinco categorías, que se presentan en el cuadro IV.

CUADRO IV. Categorías de la corrosividad de la atmósfera. (ISO 9223:1992).

Categoría	Corrosividad
1	Muy Baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy alta

- **Determinación de la categoría de corrosividad de una atmósfera a partir de datos del medio ambiente.**

Las diferentes categorías de corrosividad se establecen de acuerdo con los efectos progresivos de la contaminación y el tiempo de humectación. A medida que aumenta la agresividad de la atmósfera, aumenta, por lo general, la velocidad de corrosión de los metales. En el cuadro V se presenta dicha clasificación.

CUADRO V. Estimación de la corrosividad de la atmósfera por categorías ISO 9223: 1992. Acero al carbón

	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5		
	S_0-S_1	S_2	S_3												
P_0-P_1	1	1	1-2	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	4	5	5
P_2	1	1	1-2	1-2	2-3	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	5	5	5
P_3	1-2	1-2	2	2	3	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5

ANEXO D

**VALIDACION DEL MODELO
DE CONCENTRACION SUPERFICIAL DE CLORUROS**

Con el fin de probar y dar validez al modelo de concentración superficial de cloruros dado por la ecuación [41] se realizó el estudio de perfiles de penetración de cloruros con datos de probetas cilíndricas de concreto expuestas a un ambiente marino natural similar por un periodo de hasta 10 años, ubicadas en la misma región geográfica de las vigas DURACON.

Dichos periodos de exposición corresponden a diferentes tiempos estacionales y sin embargo, fue posible encontrar una concordancia en el modelo para los valores de concentración superficial determinados con el modelo de Crank, que se ajustan a un ciclo multianual.

Los perfiles de concentración de cloruros determinados y analizados en función de la edad y resistencia f'_c , se muestran en las figuras I y II, además, corresponden a probetas con 7 días de curado. También se determinaron y analizaron los perfiles correspondientes a 1 y 3 días de curado.

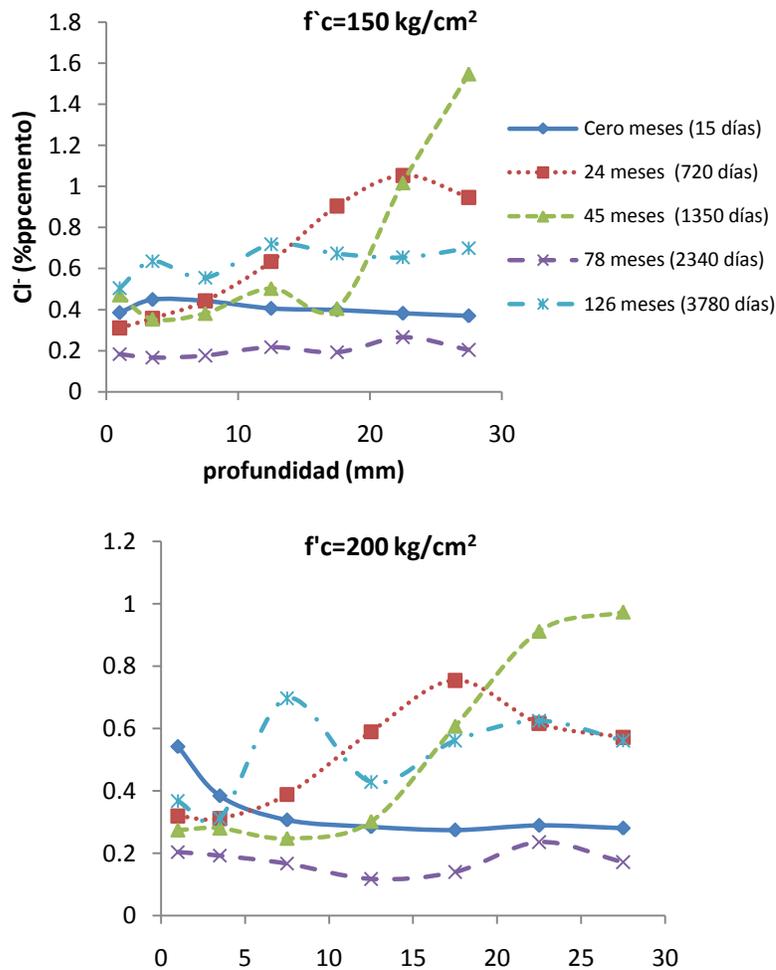


Figura I. Perfiles de penetración de cloruros $f'_c = 150$ y 200 kg/cm^2 y 7d de curado.

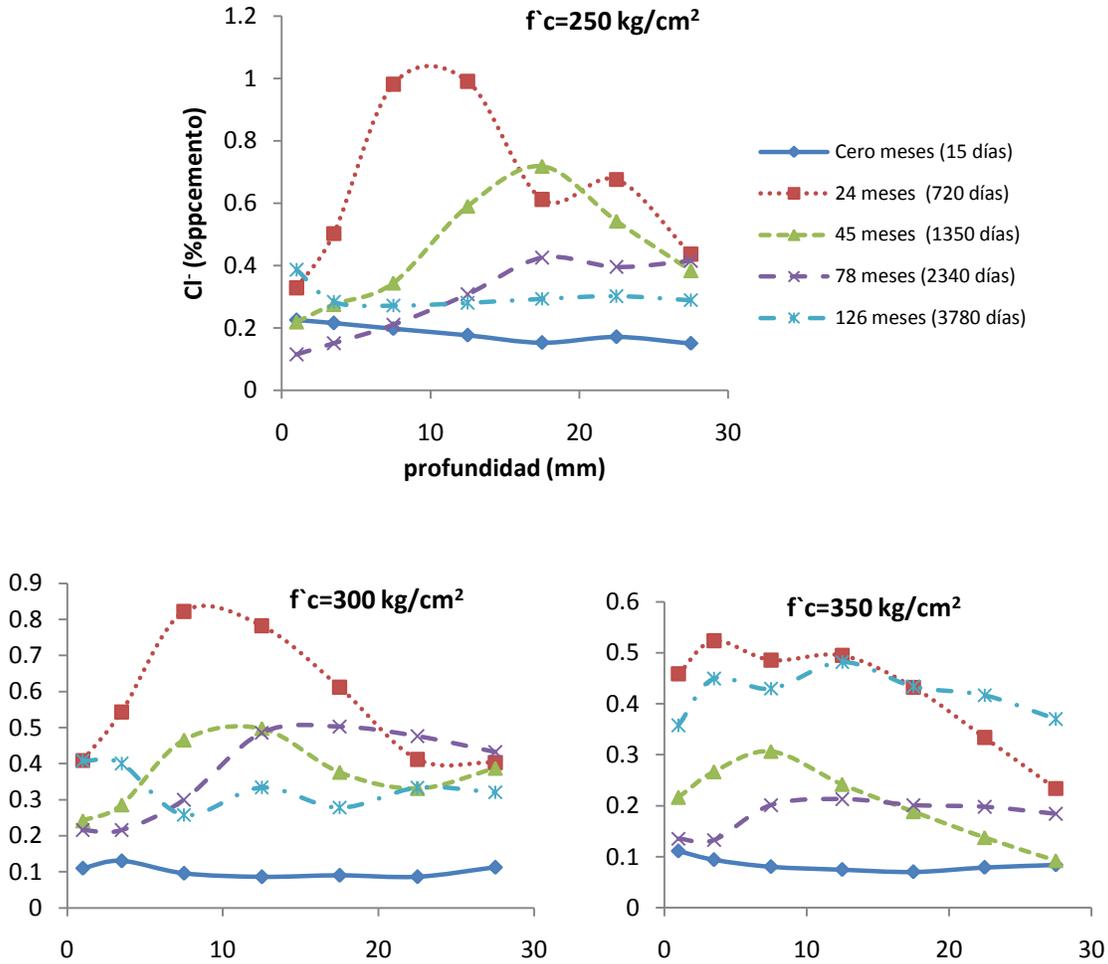


Figura II. Perfiles de penetración de cloruros $f'c = 250, 300$ y 350 kg/cm^2 y 7d de curado.

En la tabla I (a) y (b) se presentan los valores determinados con apoyo del programa TableCurve 2.0 para el coeficiente de difusión y la concentración superficial, a partir del análisis de los perfiles de penetración de cloruros estudiados y que corresponden a probetas con edades de 0.5, 24, 45, 78 y 126 meses de exposición en ambiente marino, con cinco diferentes resistencias a la compresión ($f'c$), 150, 200, 250, 300 y 350 kg/cm^2 y tres periodos de curado diferentes, 1, 3 y 7 días. Estos valores fueron los utilizados en las validación del modelo de concentración superficial de cloruros.

En la figura III se presenta el desarrollo del modelo de concentración superficial (C_s) y en las figuras IV, V y VI el Modelado de C_s para concreto OPC de 7, 3 y 1 días de curado respectivamente. Los valores de C_s se apegan razonablemente al modelo desarrollado en esta tesis.

Tabla I (a). Valores determinados del coeficiente de difusión (D_a).

D_a				
150-7d	200-7d	250-7d	300-7d	350-7d
1.17E-08	7.14E-10	1.44E-09	7.13E-09	2.83E-09
2.25E-10	1.09E-11	3.62E-11	8.08E-11	1.76E-11
9.86E-11	2.13E-11	4.26E-11	1.79E-11	5.43E-12
150-3d	200-3d	250-3d	300-3d	350-3d
1.99E-09	7.06E-09	4.21E-09	2.61E-09	1.64E-09
2.12E-10	1.95E-11		3.78E-10	1.68E-10
			1.36E-11	
150-1d	200-1d	250-1d	300-1d	350-1d
1.46E-09	2.90E-09	1.72E-08	4.18E-09	8.70E-09
4.62E-12	4.44E-12	3.58E-09	5.61E-12	9.11E-10
1.73E-10				
3.57E-11				

Tabla I (b). Valores determinados de concentración superficial (C_s) y que corresponden a los valores de D_a de la Tabla I (a).

C_s				
150-7d	200-7d	250-7d	300-7d	350-7d
0.431	0.440	0.222	0.110	0.097
0.456	0.285	0.851	0.635	0.541
0.178	0.183	0.321	0.369	0.288
150-3d	200-3d	250-3d	300-3d	350-3d
0.292	0.248	0.190	0.116	0.104
0.719	0.240		0.568	0.596
-			1.889	
150-1d	200-1d	250-1d	300-1d	350-1d
0.203	0.243	0.196	0.140	0.111
0.761	0.259	0.260	0.492	0.264
0.215				
0.795				

VALIDACION DEL MODELO DE CONCENTRACION SUPERFICIAL DE CLORUROS

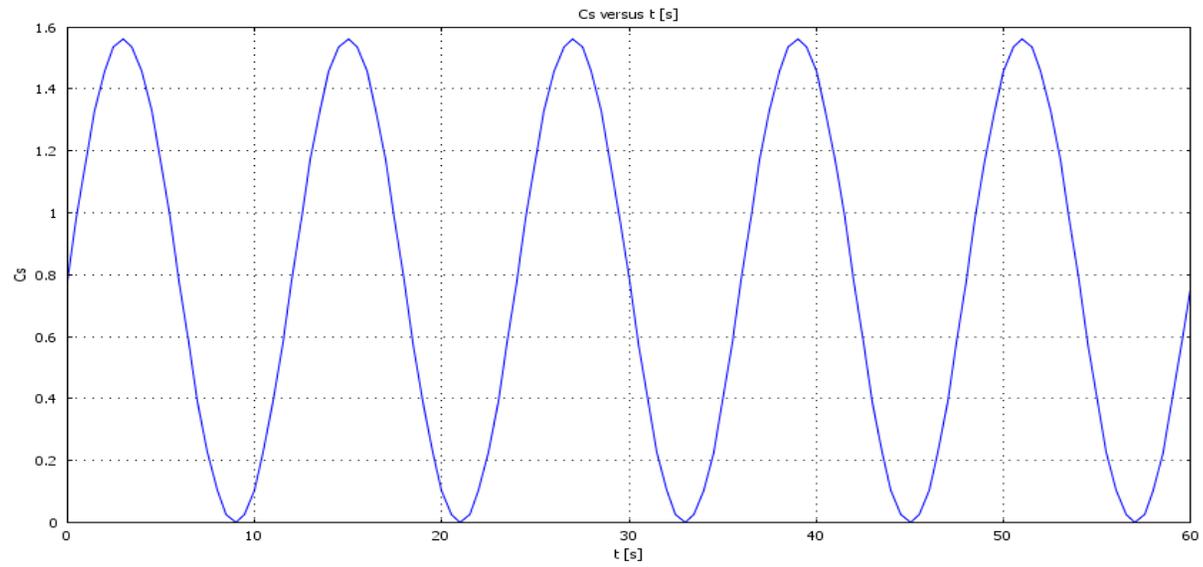


Figura III. Desarrollo del modelo de concentración superficial (C_s)

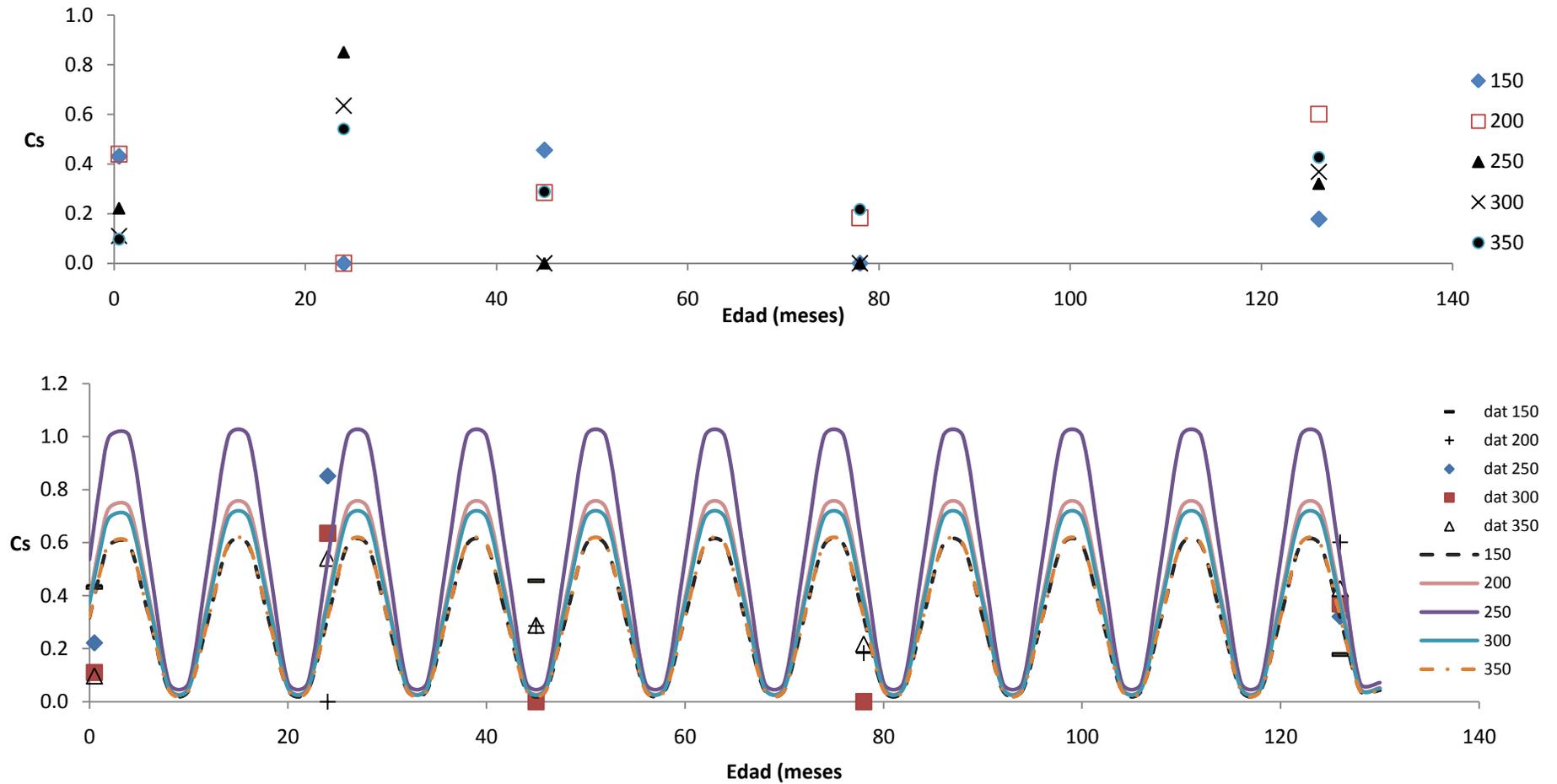


Figura IV. Modelado de Cs, concreto OPC de 7 días de curado

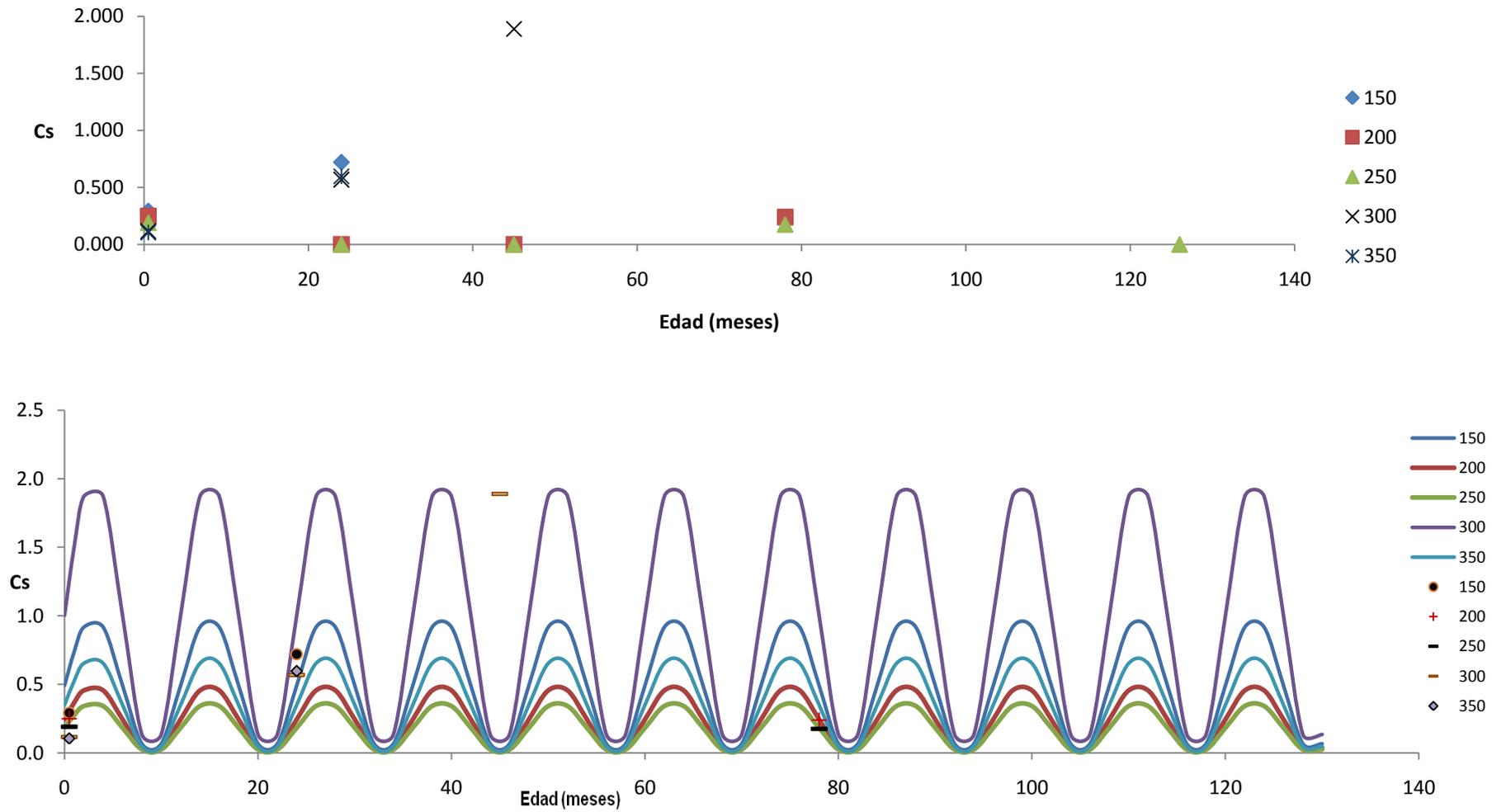


Figura V. Modelado de Cs, concreto OPC de 3 días de curado

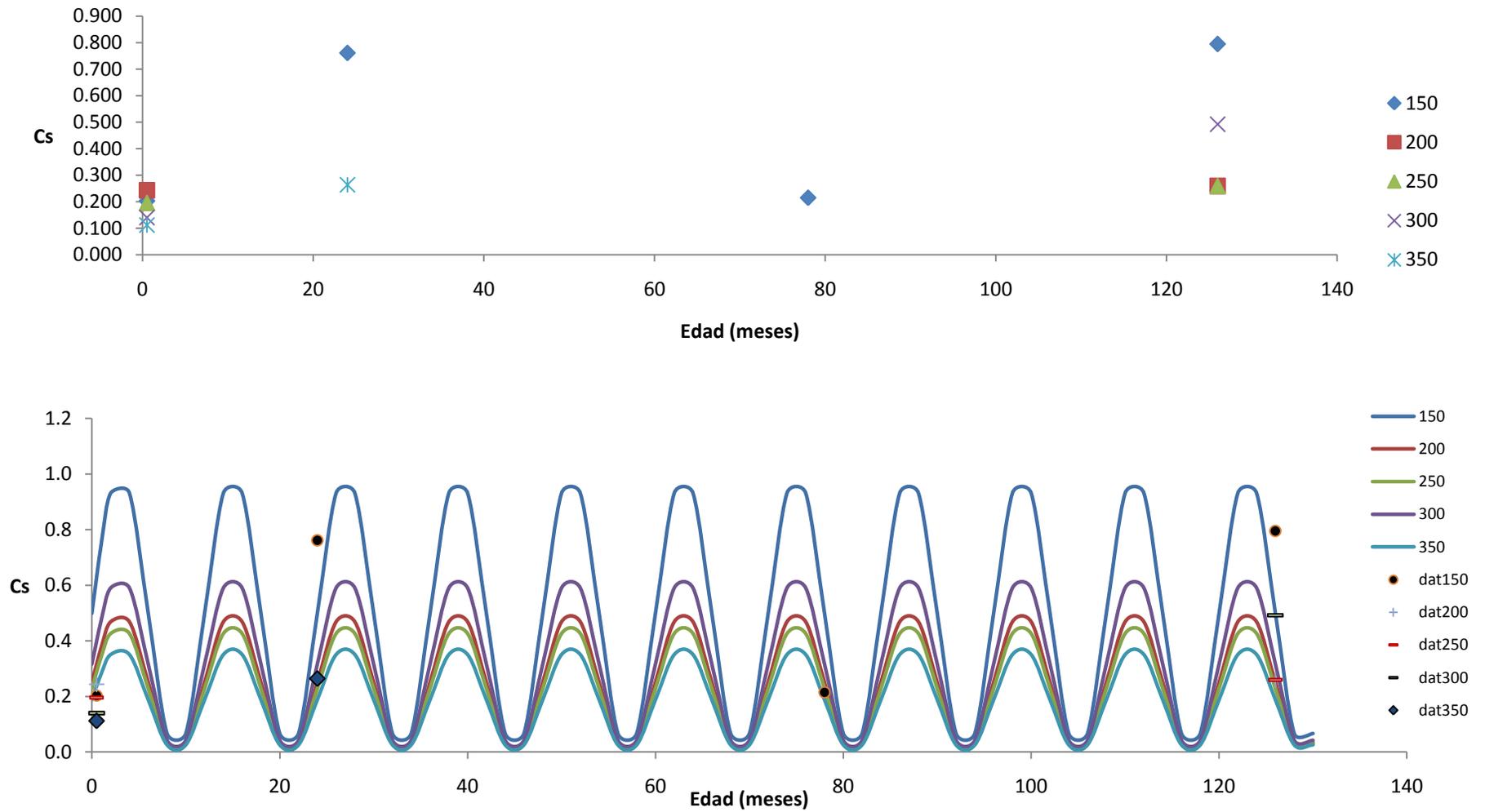


Figura VI. Modelado de C_s , concreto OPC de 1 día de curado