



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

JUÁREZ, L.; CASTRO, P.

Desarrollo y aplicación de un modelo en el comportamiento de la concentración superficial de cloruros
en concreto para un microambiente marino

Revista de la Construcción, vol. 10, núm. 3, diciembre, 2011, pp. 16-28
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127622721003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Development and
implementation of a behavior
model of the surface
concentration of chlorides
in concrete for marine
microenvironments*

Desarrollo y aplicación de un modelo en el comportamiento de la concentración superficial de cloruros en concreto para un microambiente marino



Autores

JUÁREZ, L. CIIDIR Oaxaca. Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. 71230. Tel. (52) 9515170610 Ext. 82715.
E-mail: lidiargelia@gmail.com

CASTRO, P. CINVESTAV Mérida. Km. 6 Ant. Carr. a Progreso. Mérida, Yucatán México. 97320. Tel (52) 9999429425
E-mail: pcb1963@gmail.com

Fecha de recepción 12/08/2011

Fecha de aceptación 12/11/2011

Resumen

En los modelos de predicción de vida útil de estructuras de concreto es importante conocer la concentración superficial de cloruros Cs –la cual está ligada a factores ambientales– y el comportamiento de la difusión de cloruros en función del tiempo. El objetivo de este trabajo fue obtener un modelo que representara la influencia de un microambiente marino en el comportamiento de la concentración de cloruros en la superficie (Cs) del concreto. Se tomaron como base resultados experimentales de especímenes de concreto expuestos en la península de Yucatán, México, y se analizó el comportamiento de Cs en otros estudios similares de la litera-

tura, así como el comportamiento de Cl- ambientales en otros estudios de la región del Caribe. Los datos mostraron una Cs variable en función del tiempo y por efecto climático, que sirvieron de base para el desarrollo de un modelo oscilatorio tipo sinusoidal. El modelo que se presenta en este trabajo refleja el comportamiento de la concentración superficial de cloruros en el concreto en un microambiente marino, particularmente para la zona de Puerto Progreso, Yucatán, México. Es relevante porque a partir de datos recopilados *in situ* el modelo puede ser usado en forma predictiva para conocer la difusión de cloruros en estructuras actuales.

Palabras clave: Concentración superficial de cloruros, modelo de predicción, corrosión, ambiente.

Abstract

To know the behavior of the surface chlorides concentration (Cs) and of the chloride diffusion as function of time is important in the models for predicting service life of concrete structures. It is known that the value of the variable Cs is linked to environmental factors. The aim of this study was to obtain a model representing the influence of a marine microenvironment on the surface chlorides concentration (Cs). This model was obtained from the experimental results of concrete specimens exposed in the Yucatan Peninsula, Mexico. Based on a sinusoidal model, we analyze the behavior of Cs in other similar studies

reported in specialized literature, as well as the perform of environmental chlorides in another studies in the Caribbean region. The data showed that Cs was variable in function of time and the climatic effect, which was the basis for the development of a sinusoidal oscillation model. This model reflects the behavior of the chloride concentration in the concrete surface in a marine microenvironment, particularly of the Progreso Port, Yucatan, Mexico. It is important because data can be obtained and used for predictive analysis of chloride diffusion in concrete structures in similar environments.

Keywords: Surface chlorides concentration, prediction model, corrosion, environment.

1. Introducción

El ambiente marino está asociado a un riesgo alto de corrosividad severa en las construcciones de concreto (Angst *et al.*,09). En México, debido a los factores geográficos y ambientales como altas temperatura y humedad relativa, presencia de sales y ciclos de humedecimiento y secado principalmente, la corrosión originada por cloruros es una de las causas más comunes de degradación del concreto en estructuras expuestas a ambiente marino (Castro *et al.*,92) y asociada recientemente a los efectos del cambio climático global (CCG) (Castro y Mendoza,09).

La descripción de la relación entre el ambiente y concreto es muy complicada por el número de variables o factores que intervienen, sin embargo, es posible que descripciones sencillas de cada variable den suficiente aproximación para ser utilizadas en las predicciones de vida de servicio de las construcciones (Nilsson,96).

La difusión en un medio poroso es un fenómeno de transporte de iones cloruro y es el principal mecanismo de penetración de cloruros en el concreto. Su estudio se basa en la obtención de tres parámetros principales, que son el contenido de cloruros, el coeficiente de difusión y la concentración en la superficie (C_s) del concreto. De acuerdo con la 2^a Ley de Fick de difusión, se asume un transporte unidimensional, dado por (Crank,75):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

cuya solución analítica asumiendo $C(x,0)=0$, $C(0,t)=C_s$ y coeficiente de difusión (D) constante es (Byung and Yup,07):

$$C_x = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (2)$$

donde D_a es el coeficiente de difusión aparente y se determina como el mejor ajuste a la curva dada por la ecuación (2) para el perfil de cloruros medido.

La variación en el contenido de cloruros se ha asociado a la relación agua/cemento, al tipo de agregados o materiales cementantes, cuya reducción implica un mayor tiempo para el inicio de corrosión (Gjørv and Zhang,94; Berke and Hicks,94; Berke *et al.*,05), sin embargo, su relación con el ambiente a largo plazo ha sido estudiado por pocos investigadores (Saetta *et al.*,93; Hastie,06; Pérez *et al.*,04; Castañeda *et al.*,97) y se han asociado bajas concentraciones de cloruro en la superficie del concreto a los ciclos de humedecimiento y secado en ambientes marinos (Shin and Kim,02).

Las condiciones ambientales pueden ayudar a predecir las variaciones de la concentración de cloruros en la superficie del concreto y por ende en los perfiles de cloruros y coeficientes de difusión respectivos. La concentración en la superficie del concreto (C_s) puede influir en el comportamiento del perfil de cloruros (Shin and Kim,02) y una disminución de C_s podría extender el tiempo para inicio de corrosión (Zhang and Lounis,06), pero es difícil de predecir con los modelos comúnmente utilizados debido a: 1) la dificultad de obtención de datos, ya que se requeriría un monitoreo periódico por tiempo prolongado, 2) la penetración de cloruros no se ajusta a un comportamiento neto de difusión por las condiciones cambiantes del medio insaturado, o 3) podría ser que el comportamiento de C_s , dado que hay modelos que simplemente consideran un valor constante, afecte más a las barras que estén más cercanas a la superficie del concreto o que tenga un menor recubrimiento.

Para generar o adecuar un modelo de predicción de vida útil 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^- según se apreciará en este trabajo–, y por otra, el comportamiento de la difusión de cloruros en función del tiempo (Mendoza,09).

El objetivo de este trabajo fue, primero, obtener un modelo que represente la influencia de un microambiente marino en el comportamiento de la concentración de cloruros en la superficie (C_s) del concreto tomando como base los resultados experimentales de especímenes de concreto expuestos en la península de Yucatán, México; segundo, analizar el comportamiento de C_s en otros estudios similares de la literatura y el comportamiento de cloruros ambientales en otros estudios de la misma región geográfica (región del Caribe), con base en un modelo sinusoidal.

2. Procedimiento experimental

- Análisis de los parámetros climático-ambientales durante el periodo 2003-2010 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. Los datos son de la estación meteorológica de CONAGUA en Progreso, Yucatán, México. El criterio de clasificación propuesto para microclimas está basado en probetas planas.
- Realización de ensayos centrados principalmente en la caracterización del proceso de penetración de

cloruros en el concreto, mediante vigas de concreto OPC con dimensiones 15x15x30 cm, con relaciones agua/cemento 0.45 y 0.65, sometidas a exposición natural en ambiente marino (Progreso, Yucatán, Méx.) durante el periodo 2003-2007. La cara principal orientada hacia los vientos dominantes.

- c) Para hacer las estimaciones de penetración de cloruros se procedió al corte de vigas de concreto simple OPC a los 480, 942 y 1.476 días de exposición. La metodología detallada de la construcción de especímenes, exposición y muestreo se puede revisar en Tróconis *et al.* [05]. Posteriormente se analizaron los datos de penetración de cloruros en vigas de concreto OPC.
- d) Análisis de datos de penetración de cloruros en probetas cilíndricas de concreto con dimensiones 7.5x15 cm, con cinco diferentes resistencias a la compresión (150, 200, 250, 300 y 350 kg/cm²) y tres diferentes tiempos de curado (1, 3 y 7 días), sometidos a exposición natural en ambiente marino durante un periodo de 10 años (Progreso, Yucatán, Méx.).
- e) Las estimaciones de penetración de cloruros proceden del corte de las probetas de concreto simple a 0, 24, 45, 78 y 126 meses de exposición. La metodología detallada de la construcción de especímenes, exposición y muestreo se puede revisar en Mendoza [09].
- f) En ambos casos, el ensayo de la extracción de cloruros solubles al agua se realizó por medio de la prueba ASTM C 1218-99 y la determinación de cloruros por medio del método del ión selectivo o potenciométrico (ASTM C 114).
- g) Determinación de perfiles de concentración de cloruros en función del tiempo, $C(x,t)$.
- h) Determinación de coeficientes de difusión de cloruros con base en la 2^a Ley de Fick, aplicando la Solución de Crank, ecuación (2). Esta solución es un procedimiento empírico para ajustar 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.
- i) Evaluación de la relación que existe entre las características del ambiente estudiado y el fenómeno de penetración de cloruros.
- j) Determinación de un modelo de concentración superficial de cloruros

- k) Evaluación del modelo de concentración en función de los datos experimentales de las probetas descritas en los incisos previos c) y d).
- l) Aplicación del modelo sinusoidal para el comportamiento de cloruros ambientales en ambientes marinos del Caribe, según datos de estudio experimental reportado por Corvo *et al.* (1997).
- m) Análisis de datos de Cs provenientes de estudios similares seleccionados de la literatura, y determinación y evaluación del modelo sinusoidal de Cs en función de los datos experimentales seleccionados.

3. Resultados y Discusión

Clasificación de microclimas

El análisis de los parámetros climático-ambientales durante el periodo 2003-2010, con base en la metodología establecida por las normas ISO 9223:1992 (Genescá, 1995) para la clasificación de la agresividad atmosférica, determinó el tipo de microclima. Los datos analizados corresponden a la estación meteorológica de CONAGUA en Progreso, Yucatán, Méx.

La designación 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 la tabla 1 se presentan los valores considerados para la determinación de categoría de corrosividad de la atmósfera en Progreso, Yucatán, Mex., de acuerdo a la norma ISO 9223:1992.

Tabla 1. Determinación de categoría de corrosividad de la atmósfera en Progreso, Yucatán, Méx.

Parámetro	Categoría (ISO 9223:1992)
Cloruros ambientales (Cl) 137.74 mg/m ² día	S ₂
Dióxido de azufre (SO ₂) 2.92 mg/m ² día	P ₀
Horas de humectación 4.320	T ₄
Categoría de corrosividad	ALTA

La clasificación del microclima de Progreso, considerado de alto riesgo de corrosividad, es similar al microclima reportado por Corvo *et al.* [97].

Parámetros Climatológicos

El comportamiento cíclico multianual de humedad relativa (HR) y temperatura (T), con datos del promedio mensual, se muestra en la figura 1, donde se marca claramente la correspondencia cíclica anual y estacional de estos parámetros. Se entiende por ciclo multianual el patrón de comportamiento de la variable durante el periodo de exposición de ocho años (2003-2010), considerando que está constituido por ciclos anuales con patrones de comportamiento similares.

Recientemente se ha estudiado el efecto climático en los parámetros empleados en los modelos de predicción (Castañeda *et al.*,97; Mendoza,09; Castro y Mendoza,09), el estudio del comportamiento de los parámetros ambientales durante el periodo de exposición del concreto muestra en la figura 1 una tendencia ascendente como la reportada por Mendoza [09] y ciclos anuales importantes a considerar principalmente en estudios de largo término en sitio.

La variación de humedad relativa (HR) muestra comportamiento cíclico anual con valor máximo de 87% y mínimo de 70%. 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 muestran en la figura 2,

donde se grafica y compara los valores del contenido de cloruros en la atmósfera Cl^- ($mg^*m^{-2}*d^{-1}$) y la precipitación pluvial Pp (mm) en el periodo 2003-2010, puede verse gráficamente la correspondencia entre los dos parámetros analizados, donde a mayor Pp disminuye la concentración ambiental de cloruros.

Una relación inversamente proporcional puede apreciarse gráficamente entre el contenido de cloruros en la atmósfera ($Cl^- / mg^*m^{-2}*d^{-1}$) y la precipitación pluvial Pp (mm) de la figura 2, donde además se muestra un comportamiento cíclico multianual con valores máximos de Pp en los meses de mayo-julio. El estudio sobre corrosividad atmosférica en el área del Caribe (Corvo *et al.*,97) solamente muestra la probable influencia de las condiciones climáticas (T y HR) en el contenido de cloruros en la atmósfera, pero señala una probable influencia estacional que también se observa en los datos de las figuras 1 y 2.

Penetración de cloruros

La estimación para la determinación de cloruros se realizó por medio del método del ión selectivo o potenciométrico (ASTM C 114). La concentración de cloruros corresponde a cloruros libres en % por peso de concreto y la evaluación de los especímenes fue por triplicado. En la figura 3 se presentan los perfiles de penetración de cloruros, con el valor promedio de Cl^- libres, para las relaciones $a/c=0.45$ y 0.65 a tres edades de exposición 16, 31 y 49 meses y en la figura 4 los perfiles de penetración de cloruros para las relaciones $a/c=0.46$, 0.50 , 0.65 , 0.70 y 0.76 y tiempo de exposición de 0, 24, 45, 78 y 126 meses en ambiente natural marino.

Figura 1. Comportamiento cíclico multianual de humedad relativa (HR) y temperatura (T), periodo 2003-2010

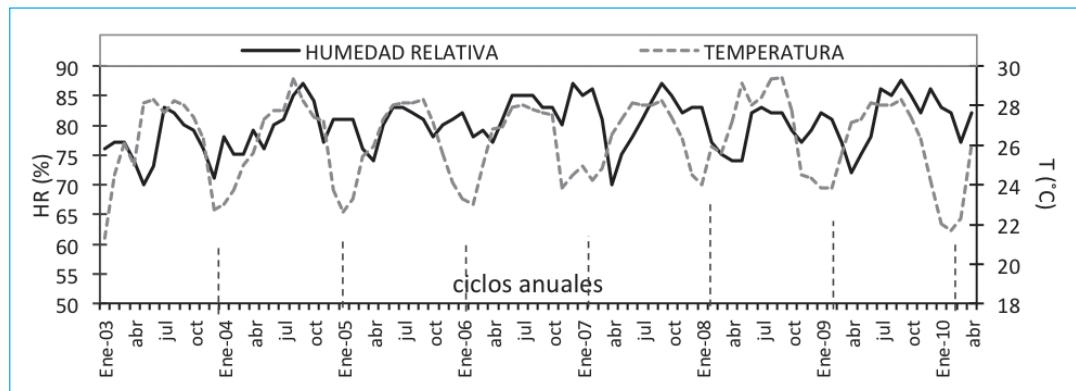


Figura 2. Comportamiento cíclico multianual del contenido de cloruros en la atmósfera ($\text{Cl}^-/\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) comparado con la precipitación pluvial P_p (mm) en el periodo 2003-2010

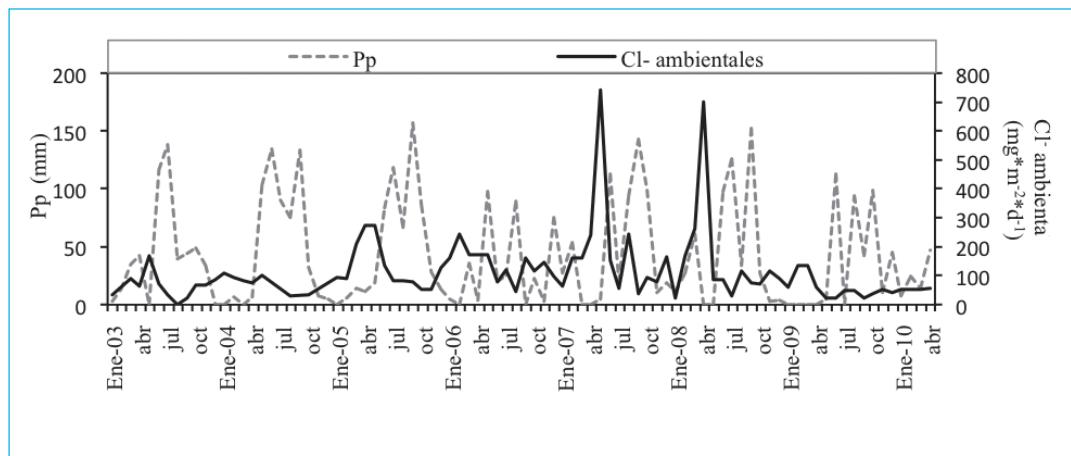
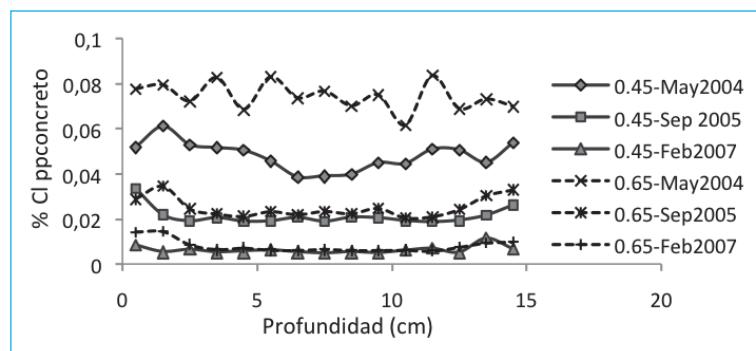


Figura 3. Perfiles de penetración de cloruros libres, valores promedio relación a/c 0.45 y 0.65



En ambos casos el tipo de perfiles no son netamente del tipo de Fick, esto probablemente se debe a que los especímenes están sujetos a diferentes concentraciones superficiales de cloruros, en función de la época estacional. 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 3 y 4. Este movimiento de cloruros se debe a la relación que existe con el grado de humedad exterior y que puede favorecer o no la difusión de cloruros al interior del

concreto. La T y HR afectan los perfiles de penetración de Cl^- , se ha reportado que altas temperaturas originan mayor penetración de Cl^- y alta HR también origina mayor acumulación de Cl^- en el concreto (Ho and Jang, 07).

Modelo de concentración superficial de cloruros

Tomando en consideración el comportamiento cíclico anual de la temperatura y con los datos experimentales determinados, se propone modelar el comportamiento de la concentración de cloruros en la superficie del

concreto (C_s) en función del tiempo, a través de un modelo oscilatorio de tipo sinusoidal para un lapso de tiempo T , de 12 meses:

$$C_s(t) = C_s \text{ promedio} + C_s \text{ promedio} * \text{sen}(2\pi/T)t \quad (3)$$

donde C_s se obtiene como el valor promedio dado las concentraciones máxima ($C_{s\max}$) y mínima ($C_{s\min}$), dado por: $C_s \text{ promedio} = (C_{s\max} + C_{s\min})/2$ y $T = 12$,

valor dado en función de la recurrencia anual observada.

El modelo se aplicó con base en los valores reportados de cloruros ambientales como $C_{s\max}$ y $C_{s\min}$, y su desarrollo se muestra en la figura 5.

El considerar la variación sinusoidal del contenido de cloruros en la superficie del concreto C_s no es común

Figura 4. Perfiles de cloruros en función del tiempo de exposición y resistencia a la compresión (f'_c) correspondientes a probetas con 1,3 y 7 días de curado

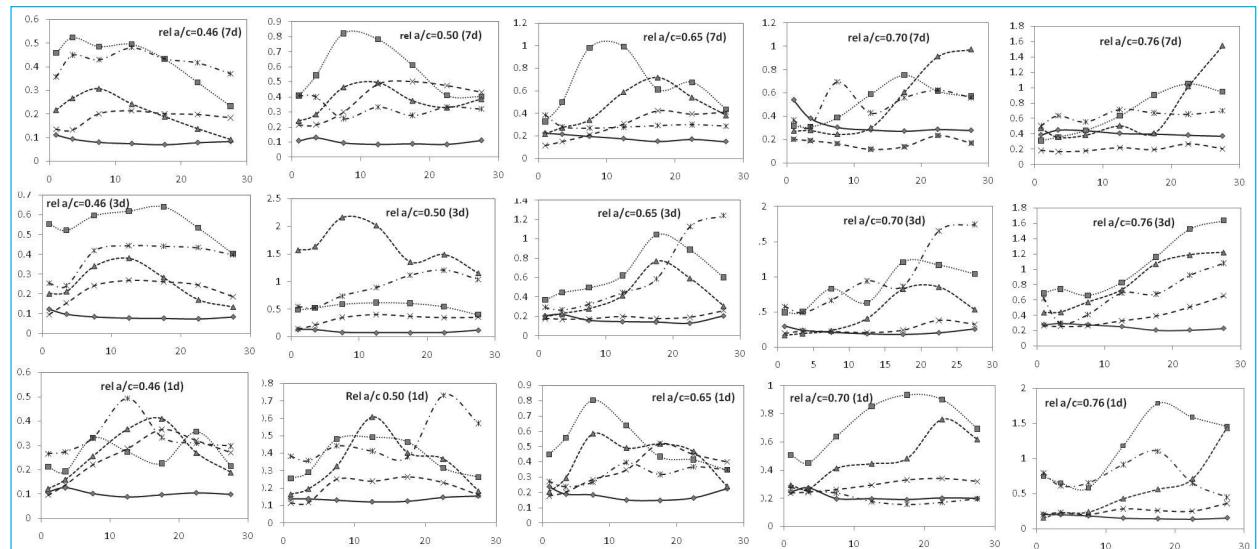
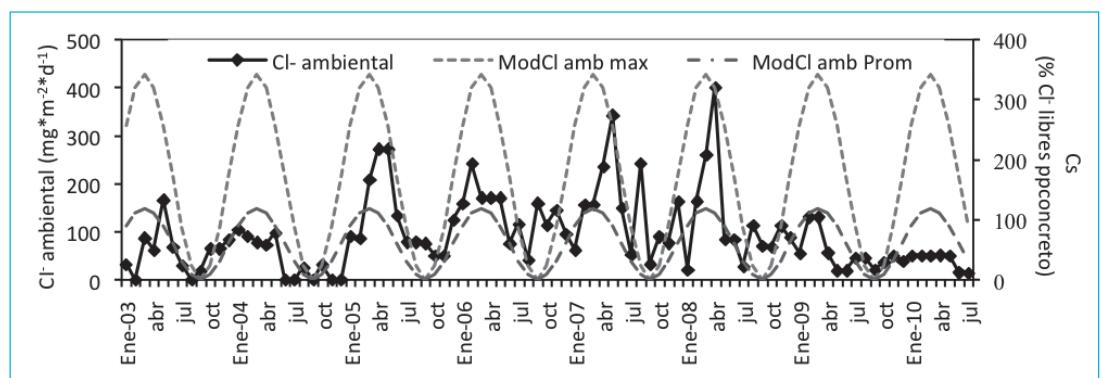


Figura 5. Desarrollo del modelo aplicado a la concentración de cloruros ambientales determinados en el periodo 2003-2010, en el Puerto de Progreso, Yucatán, México



y en pocos estudios ha sido reportada C_s en función de parámetros ambientales (T , HR , C_{Cl}). Se ha reportado una variación estacional de C_s para un periodo de un año y se hizo una simulación de las condiciones ambientales por un periodo de 39 meses (Saetta et al., 93) para obtener perfiles de penetración de cloruros totales, donde su evolución en función del tiempo es similar a la obtenida con el modelo que se presenta en este trabajo. También se reporta que el microclima tiene una gran influencia sobre C_s y este parámetro a su vez con el ingreso de cloruros al concreto en un estudio de dos años (Paulsson and Silfwerbrand, 02) realizado para analizar cualitativamente como afectan las cargas ambientales la vida de servicio de losas de puentes, determinando una C_s variable. Por otra parte, recientemente se mostraron los efectos de parámetros ambientales sobre los perfiles de penetración de cloruros en concreto, a partir de un modelo derivado de la ec. 2 en el cual se consideró C_s variable (Ho and Jang, 07), este estudio menciona la conveniencia de poder predecir la penetración de cloruros en estructuras de concreto expuestas a microambiente marino. El modelo que se presenta en este trabajo refleja el comportamiento del contenido de cloruros en la superficie del concreto en un microambiente marino, particularmente para la zona de Puerto Progreso, Yucatán, México.

Concentración superficial de cloruros en el concreto, C_s y Coeficientes de difusión, D

Se determinó C_s y el Coeficiente de difusión efectivo, D_e , calculados a partir de los valores promedio de los perfiles de penetración de cloruros, mediante la solución de Crank a la 2^a Ley de Fick. En la figura 6 se

presenta el desarrollo del modelo de C_s y los valores calculados de C_s , para 2 relaciones a/c y 3 tiempos de exposición obtenidos con apoyo del Programa de cómputo TableCurve 2D v5.0 Trial, mediante la ecuación 2. 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 (Ho and Jang, 07). Se evaluó el modelo de concentración en función de los datos experimentales, tomando los valores máximo y mínimo de concentración de cloruros en la superficie para cada caso.

En la figura 7 se muestran los resultados del análisis de datos de probetas cilíndricas de concreto, con cinco diferentes resistencias a la compresión: 150, 200, 250, 300 y 350 kg/cm² (0.46, 0.50, 0.65, 0.70 y 0.76 respectivamente) y tres tiempos de curado: 1, 3 y 7 días. D y C_s se obtuvieron con el procedimiento descrito anteriormente.

La aplicación del modelo oscilatorio sinusoidal al comportamiento de cloruros en la superficie del concreto de probetas expuestas a ambiente marino de Progreso, Yuc., Méx., para 4 y 11 años de exposición (figuras 6 y 7) muestra gráficamente la variación cíclica estacional y multianual de C_s similar a la modelada por Saetta et al. [93] y Paulsson and Silfwerbrand [02], el cual permite predecir el valor de C_s en función del tiempo de exposición y emplear este valor en la determinación de perfiles de penetración de Cl⁻ y en las predicciones de vida de servicio.

Figura 6. Aplicación del modelo oscilatorio sinusoidal al comportamiento de cloruros en la superficie del concreto de probetas expuestas a ambiente marino de Progreso, Yuc., Méx., para 2 relaciones a/c y 4 años de exposición

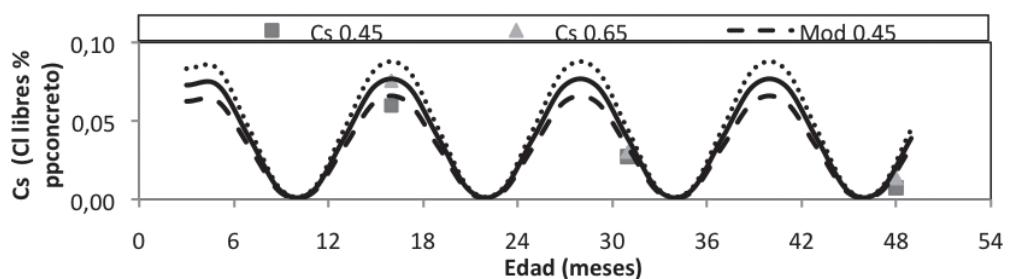
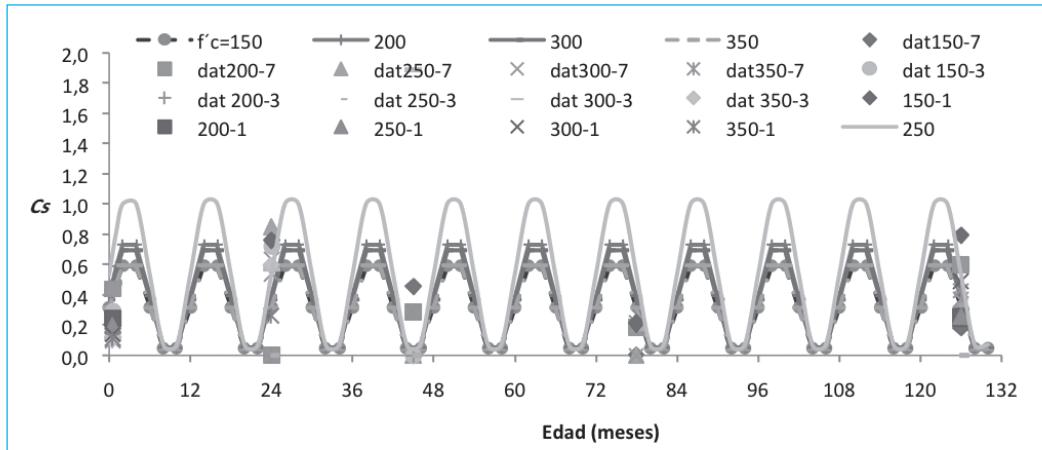


Figura 7. Aplicación del modelo oscilatorio sinusoidal al comportamiento de cloruros en la superficie del concreto de probetas expuestas a ambiente marino de Progreso, Yuc., Méx., para 5 relaciones a/c, 11 años de exposición y 3 diferentes tiempos de curado



Como parte de la validación de resultados del modelo oscilatorio sinusoidal de C_s , se realizó la aplicación del modelo sinusoidal (Ec. 3) para el comportamiento de cloruros ambientales en ambientes marinos del Caribe, a datos del estudio experimental reportado por Corvo *et al.* (1997). En la figura 8 se muestran los resultados, donde para Progreso, Yuc. y Viriato, Cuba, se ajustaron con un valor $T=12$, para Puerto Morelos, Q.R. y La voz, Ven. fue $T=6$ y para Adicora, Ven. $T=3$; esta variación de T indica una variación estacional de los cloruros ambientales, mismos que se ajustan a períodos de doce meses (anual), de 6 meses (semestral) y de 3 meses (trimestral) respectivamente.

Posteriormente se realizó el análisis de datos de penetración de cloruros, de estudios similares en ambiente marino seleccionados de la literatura reciente y que se muestran en la tabla 2, todos, excepto uno (indicado en la tabla), corresponden a estudios en concreto OPC (Hastie,06; Thomas and Bamforth,99; Castañeda *et al.*,97; Saetta *et al.*,93; Castro *et al.*,92). En la figura 9 se presenta la localización geográfica de los lugares donde se realizaron los estudios experimentales reportados en este trabajo. Este dato es importante por la cantidad de cloruros determinados en la superficie del concreto de acuerdo a los perfiles de penetración. En la zona del Caribe los valores son menores a los reportados en las zonas del mar del norte y sur del Pacífico. Con los valores de C_s de los estudios experimentales analizados (tabla 2) se evaluó el modelo sinusoidal de C_s presentado en este trabajo, cuyo desarrollo se muestra en la figura 10 junto con los datos de referencia.

Es importante conocer la ubicación geográfica de los estudios analizados para establecer con mayor claridad la relación que existe entre los resultados reportados (Saetta *et al.*,93; Hastie,06; Perez *et al.*, 05; Castañeda *et al.*, 97) y la influencia de las condiciones ambientales.

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 and Silfverbrand,02) y se ha encontrado que está relacionada con el microclima (Castañeda *et al.*,97). En este estudio se observó que cambia no solo durante el año, sino en función de ciclos multianuales que reflejan el comportamiento ambiental global de la región de exposición, sin embargo, en los modelos tradicionales solo se considera una concentración superficial constante (Nilsson,96). Algunos autores han estimado una concentración superficial variable estacional en modelos probados para un ciclo anual (Ho and Jang,07) o bianual (Castañeda *et al.*,97).

Los resultados en la aplicación del modelo de C_s a datos de la literatura nos muestran la congruencia en el comportamiento cíclico estacional y multianual de C_s para un microambiente marino, que pueden relacionarse a su vez con el CCG estudiado y reportado por Mendoza [09]. Este modelo es un primer acercamiento para entender la cinética de penetración de cloruros en la superficie de concreto de estructuras expuestas a un microambiente marino.

Figura 8. Aplicación del modelo oscilatorio sinusoidal al comportamiento de cloruros ambientales (mol/lt) reportados por Corvo et al. en 1997 [23], en 5 lugares de la región Caribe

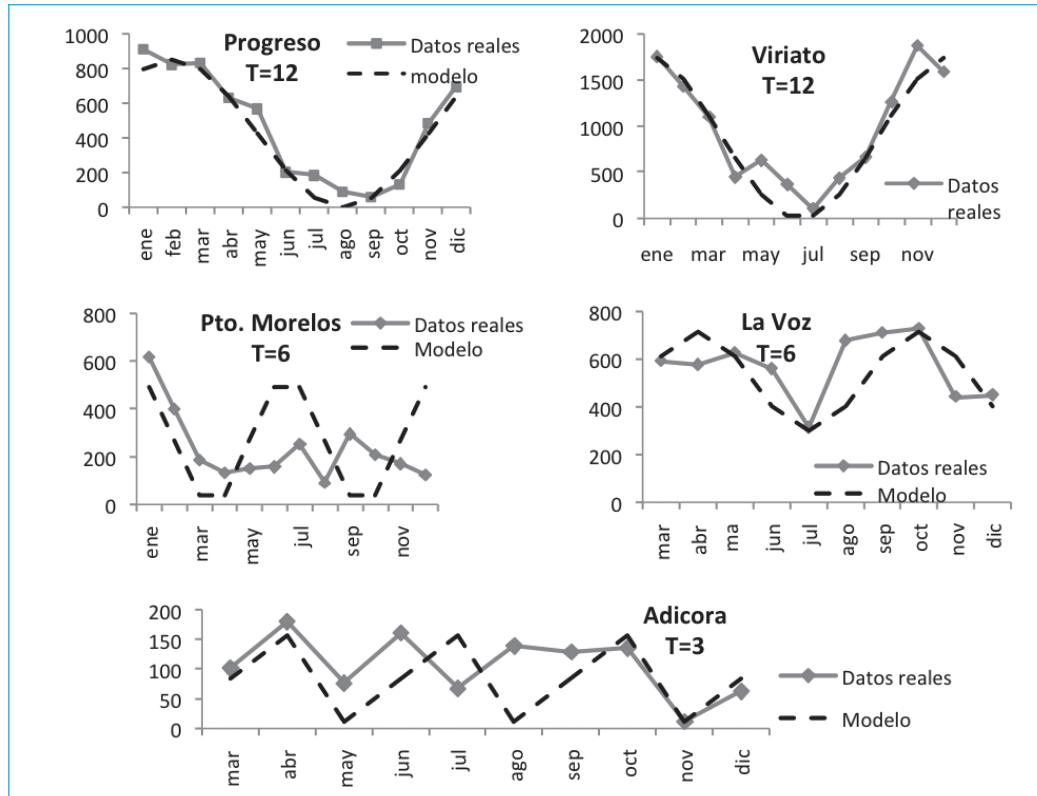


Tabla 2. Datos de estudios experimentales consultados

Autor / Lugar	Año publicación	Estudio	T exp	rel a/c mezcla
Hastie Wellington Harbour, Weka Bay, New Zealand.	2006	1998	5 años	0.4 OPC
Thomas Folkestone, England.	1999	1987	8 años	0.66-0.54-0.48 OPC-PFA-GBS
Castañeda et al. Península Yucatán, Méx.	1997	1993	2 años	0.46-0.70-0.76 OPC
Saetta et al. Padova, Italia	1993		3 años	0.50-0.75-0.60 OPC
Castro et al. Península Yucatán, Méx.	1992		10 años 34 meses	0.4 OPC
Modelo aplicado a datos de Mangat				

Figura 9. Localización geográfica de zonas de estudios experimentales reportados en este trabajo

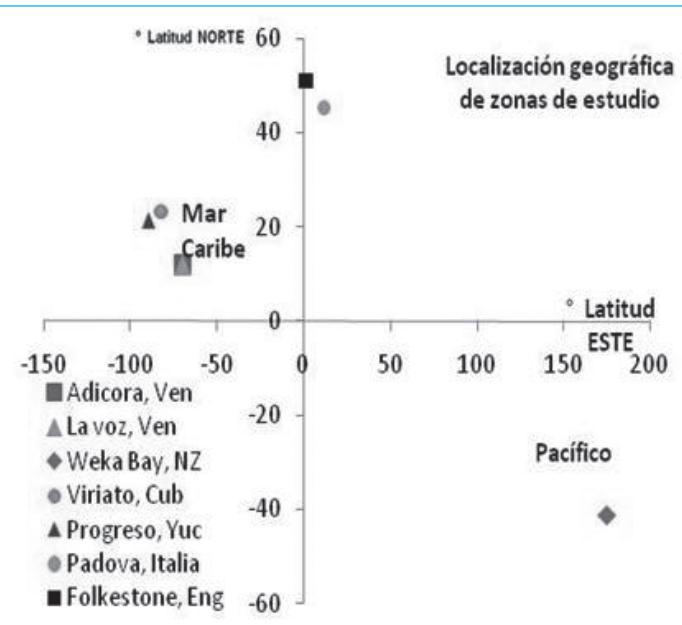
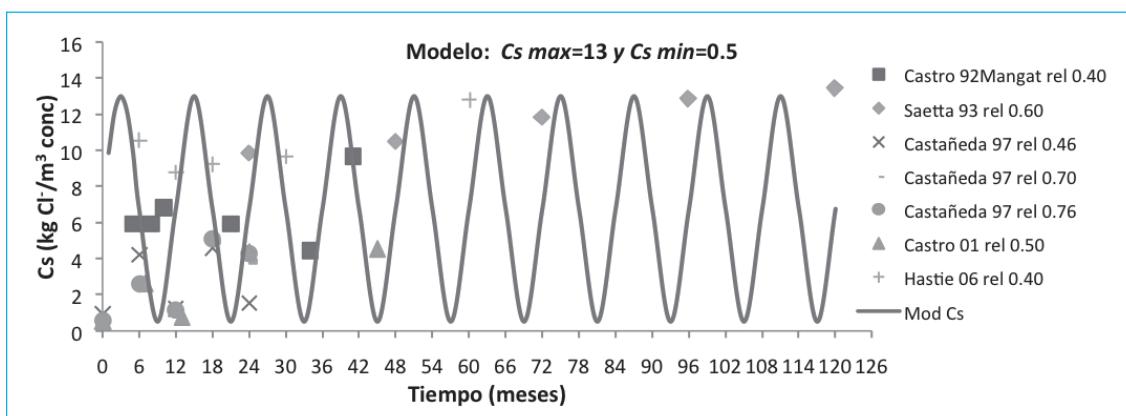


Figura 10. Aplicación del modelo oscilatorio sinusoidal al comportamiento de cloruros Cs, de estudios experimentales en ambiente marino, reportados en la literatura (Tabla 2)



4. Conclusiones

Estas conclusiones aplican exclusivamente a las condiciones de exposición y materiales de este trabajo, por lo que su extrapolación en condiciones diferentes deberá ser cuidadosa.

- Se mostró que la relación entre ambiente y concreto en términos de penetración de cloruros se describe mejor cuando se utilizan pocas variables pero con mayor representatividad.
- Los cloruros ambientales reflejan un comportamiento cíclico anual y multianual
- La concentración de cloruros en la superficie del concreto es modelable y muestra una relación directa con la concentración de cloruros en el microambiente marino de referencia.
- Los períodos de lluvia no influyen significativamente en la concentración de cloruros en la superficie de las vigas, aunque sí representan una disminución en la concentración de cloruros ambientales.
- La representación sinusoidal sugirió que la concentración de cloruros en la superficie del concreto depende más de las condiciones del microambiente en la época en que se tomen los datos, que del comportamiento interno de los cloruros.
- Como puede apreciarse, el disponer de un modelo que refleje el comportamiento de los cloruros en la superficie del concreto con respecto al tiempo, es relevante porque pueden obtenerse datos en

forma predictiva que se utilicen para el análisis de la difusión de cloruros en estructuras actuales.

5. Recomendaciones

Es importante hacer notar que los resultados de este trabajo permiten dar otro enfoque en la consideración de parámetros para un modelo de predicción de vida útil, al considerar la relación del efecto climático en ciclos anuales en el proceso de penetración de cloruros. Por tanto, el comportamiento cíclico de los parámetros ambientales estudiados y su influencia en las variables de los modelos de predicción, como son la concentración superficial de cloruros del concreto y el coeficiente de difusión, muestran la necesidad de hacer más investigaciones de largo término que se apeguen a las características del lugar de exposición y al tipo de materiales empleados.

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, que son las que están expuestas a los diferentes microambientes, bajo diferentes niveles de agresividad.

6. Agradecimientos

Al IPN, al CIIDIR Unidad Oaxaca, a los Proyectos CONACYT Ciencia Básica 57420 y CIAM 54826, al CINVESTAV Unidad Mérida, a la Ing. Mercedes Balancán Z. por la facilitación de información climática.

7. Referencias

- Angst U., Elsener B., Larsen C. and Vennesland Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete- A review. *Cement and Concrete Research* (39), 1122-1138.
- ASTM-C-114-05. Determinación de cloruros por medio del método del ión selectivo o potenciométrico.
- ASTM-C-1218-99. Extracción de cloruros solubles al agua.
- Berke N. and Hicks M. (1994) Predicting chloride profiles in concrete. *Corrosion Engineering*. 50(3), 234-239.
- Berke N., Hicks M., Malone J. and Rieder K. (2005). Concrete Durability. *Concrete International*, agosto 2005, 63-68.
- Castañeda H., Castro P., González C. and Genescá J. (1997). Model of chloride diffusion in concrete structures exposed in the Yucatan Peninsula (Mexico) (In spanish). *Revista de Metalurgia del CENIM*, 33(6), 387-392
- Castro B. P., De Coss G. R. y Maldonado L. L. (1992). Difusión de iones Cl⁻ en concretos de uso común en la Península de Yucatán. *Memorias 1^{er} Taller internacional sobre Corrosión*. 23-28 de marzo de 1992, 152-160
- Castro-Borges, P. and Mendoza-Rangel, J.M. (2009). Influence of climate change on concrete durability in Yucatan Peninsula. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 45(1), 61-69.
- Corvo F., Haces C., Betancourt N., Maldonado L., Vélez L., Echeverría M., De Rincón O. and Rincón A. (1997).

- Atmospheric corrosivity in the caribbean area. *Corrosion Science*, 39(5), 823-833
- Crank J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. Crunel University Uxbridge. 2nd edition. Oxford University Press.
- Genescá, J. (1995). *III Corrosión atmosférica. Mas allá de la herrumbre*. Fondo de Cultura Económica. México, DF.
- Gjørv O. E. Tan K. and Zhang M-H.(1994). Difusivity of chlorides from Seawater into High-Strength Lightweight Concrete. *ACI Materials Journal*, 91(5), 447-452.
- 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, 133-144.
- Ho Byung Hwan and Jang Seung Yup (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 37, 47-53.
- ISO 9223:1992 *Normas ISO para la clasificación de la agresividad atmosférica*.
- Mendoza R., J.M. (2009). "Service life of reinforced concrete structures influenced by global climate change on tropical marine environment" (In spanish). *Tesis Doctoral*. CINVESTAV Mérida, IPN. Mérida, Yucatán, México.
- Nilsson, L-O. (1996). Interaction between microclimate and concrete –a prerequisite for deterioration. *Construction and Building Materials*, 10(5), 301-308
- Paulsson-Tralla J. and Silfwerbrand J. (2002). Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using measured surface concentrations. *ACI Materials Journal*, 99(1), 27-36.
- Pérez García, E.J., Castro-Borges, P., O'Reilly D., V.A., Seiglie G., Fernández E., I. (2005) Influence of wind direction in the chloride profiles obtained in structures near the Caribbean Sea. Viaduct Case Turiguanó-Cayo Coco in Cuba (In spanish). *Materiales y Construcción*, 55(277), 67-74.
- Saetta A.V., Scotta R.V. and Vitaliani R.V. (1993) Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete. *ACI Materials Journal*, 90(5), 441-451.
- Shin Ch. B. and Kim E. K. (2002) Modeling of chloride ion ingress in coastal concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 757-762.
- Thomas M. D.A. and Bamforth P.B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 29, 487-495.
- Troconis de Rincón, O. and DURACON Collaboration. (2005) Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results, *Building and Environment*, 41, 952-962.
- 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, 1312–1323.