

Multivariate Analysis of the Variables Influencing the Form of the Chloride Profile in Reinforced Concrete Structures Exposed to a Tropical Marine Climate

Análisis Multivariado de las Variables que Influyen en la Forma de los Perfiles de Concentración de Cloruro en Estructuras de Hormigón Armado Expuestas a un Clima Tropical Marino

I. G. SEIGLÍE^a

E. J. PÉREZ-GARCÍA^b

P. CASTRO-BORGES^c

Abstract

Chlorides coming from the marine breeze are the main cause of corrosion and deterioration of the structures in marine environment. On the other hand, the interpretation of their concentration profile is an important tool to predict future behavior of the structure and to take preventive/corrective actions. Such profiles are commonly interpreted through mathematical tools and the exposure environment is one of the heaviest variables in the resulting predictions. Because of the complexity of the species transport phenomena associated to the predictions, there is no enough consensus when explaining results obtained under different circumstances and materials.

The multivariate analysis is applied in this work as a tool to validate the interpretation of the form of the chloride concentration profile of concrete as well as to show its dependency with several parameters such as the direction and incidence of dominant winds, the blocking to the marine breeze and the wet and dry process in the substructure of the Turigüanó. Cayo Coco viaduct bridges.

An association of the different variables in groups allowed obtaining a dendrogram that confirmed: more influence of chloride penetration in the elements located to the East side, and in coincidence with the dominant winds; the existence of a peak in the concentration profile of the closest external beams' parts that would be associated to the wet and dry process of the elements; the existence of a blocking to the marine breeze that promotes lesser affection by the chlorides in the central beams and North sides from the bridges than on other parts.

Keywords: Chloride, corrosion, concrete, marine environment, multivariate analysis.

Resumen

Los cloruros provenientes de la brisa marina son la principal causa de corrosión y deterioro de las estructuras en ambientes marino. El estudio e interpretación de sus perfiles de penetración son valiosas herramientas para predecir el comportamiento futuro de la estructura y tomar medidas preventivas/correctivas. Dichos perfiles son comúnmente interpretados a través de herramientas matemáticas, siendo el ambiente de exposición una de las variables con mayor peso en las predicciones. Dada la complejidad de los fenómenos de transporte asociados a la predicción no existe aún consenso al momento de explicar los resultados obtenidos bajo circunstancias y materiales diferentes.

Este trabajo aplica el análisis multivariado como una herramienta para validar la interpretación de la forma del perfil de concentración de cloruros del hormigón y demostrar la dependencia de la dirección e incidencia de los vientos, del apantallamiento y del proceso de mojado y secado en la estructura de los puentes del Pedraplén Turigüanó - Cayo Coco.

Se obtuvo un dendograma, en el que se asocian las diferentes variables en grupos, que permitió confirmar: que los elementos ubicados al lado Este, coincidentes con la dirección de los vientos predominantes, se encuentran mas afectados por la penetración del ion cloruro; la existencia de un pico en los porcentajes de cloruros cercanos a la cara exterior de las vigas, que pudiera estar asociado al efecto de mojado y secado en los elementos; la existencia de un efecto de apantallamiento que provoca que las vigas centrales y el lado norte de estos puentes estén menos afectados por el ion cloruro.

Palabras-clave: Cloruros, corrosión, hormigón, ambiente marino, análisis multivariado.

a UPIV. Facultad de Ingeniería. Universidad de Ciego de Ávila. Ciego de Ávila Cuba.

b Laboratorio Provincial MICONS. Facultad de Ingeniería. Universidad de Ciego de Ávila. Ciego de Ávila. Cuba.

c Centro de Investigación y de Estudios de Avanzados del IPN, Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Km. 6, Antigua Carretera a Progreso, 97310, Mérida, Yucatán, México.

1 Introducción

La obtención del perfil de cloruros en una estructura de hormigón, es de importancia particular, pues a través de su correcta interpretación es que se podrán obtener mejores modelos de predicción (Castro et al [1]). En la literatura se han encontrado trabajos de varios autores en los que cada vez se le da una mayor importancia a este tema (Berke y Hicks [2], Weyers [3]), aunque se reconoce que los resultados encontrados solo aplican a las circunstancias de estudio específicas (Pérez-García et al [4]).

Se han presentado en la literatura (Castro et al [1], Pérez-García et al [4] Roy et al [5]) trabajos en los que se discuten efectos como el de la altura, las zonas de secado y mojado y de mojado continuo y la calidad del hormigón en la forma del perfil de concentración de cloruros y su interpretación. Los resultados de estos autores fueron extraídos tanto de probetas expuestas a ambiente marino, como de edificios y un puente. La cantidad de resultados y las características de los elementos analizados, vislumbran la influencia de parámetros como el apantallamiento o la posición geográfica, así como de los microclimas (Castro et al [6]).

En la literatura consultada, se plantea un análisis descriptivo de las variables, pero se manifiesta la necesidad de

explicar la influencia de diferentes factores que existen en las estructuras en función de un estudio estadístico multivariado, combinando variables paramétricas y no paramétricas, que permita exponer la relación ente ellas.

El objetivo de este trabajo es demostrar la posibilidad de certificar estadísticamente, a través de un análisis multivariado, el efecto de parámetros como el apantallamiento, los vientos dominantes y posición geográfica en la forma del perfil de concentración de cloruros, así como ratificar la existencia, bajo condiciones de exposición y materiales diferentes a los reportados en la literatura, de efectos como el del mojado continuo y secado.

2 Desarrollo experimental

2.1 Características del viaducto y sus puentes

El Viaducto Turiguanó-Cayo Coco fue puesto en operación en 1989. Sus condiciones atmosféricas y características de construcción provocaron, después de doce años de puesto en funcionamiento, daños severos por corrosión en varios de sus puentes. Los perfiles de cloruros que se analizan aquí provienen de los puentes 4, 5 y 6 que son representativos de los daños observados, cuya inspección y resultados se han reportado previamente (Pé-

Tabla 1 – Porcentaje de cloruro con relación al peso del cemento de los puentes 4, 5 y 6

| Elemento | Parámetros | Profundidad, cm. | | | | |
|----------|--------------|------------------|------|------|------|------|
| | | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| Puente 4 | # Mediciones | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | Promedio | 0,57 | 0,68 | 0,78 | 0,61 | 0,49 |
| | Desv. Std. | 0,25 | 0,30 | 0,40 | 0,30 | 0,30 |
| | Máximo | 0,98 | 1,12 | 1,80 | 1,28 | 1,12 |
| | Mínimo | 0,23 | 0,26 | 0,23 | 0,12 | 0,05 |
| Puente 5 | # Mediciones | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | Promedio | 0,64 | 0,86 | 0,70 | 0,62 | 0,54 |
| | Desv. Std. | 0,41 | 0,51 | 0,41 | 0,44 | 0,41 |
| | Máximo | 1,48 | 1,88 | 1,36 | 1,68 | 1,43 |
| | Mínimo | 0,26 | 0,36 | 0,19 | 0,08 | 0,01 |
| Puente 6 | # Mediciones | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | Promedio | 0,63 | 0,74 | 0,87 | 0,72 | 0,55 |
| | Desv. Std. | 0,35 | 0,32 | 0,43 | 0,37 | 0,31 |
| | Máximo | 1,40 | 1,50 | 1,80 | 1,60 | 1,12 |
| | Mínimo | 0,24 | 0,20 | 0,15 | 0,12 | 0,05 |

Tabla 2 – Listado de Variables

| Nº | Nombre | Descripción | Tipo de Variable |
|----|--------|-----------------------|------------------|
| 1 | P4 | Puente 4 | No Paramétrica |
| 2 | P5 | Puente 5 | No Paramétrica |
| 3 | P6 | Puente 6 | No Paramétrica |
| 4 | V13 | Viga 13 | No Paramétrica |
| 5 | V 7 | Viga 7 | No Paramétrica |
| 6 | V 1 | Viga 1 | No Paramétrica |
| 7 | LN | Lado norte | No Paramétrica |
| 8 | LS | Lado sur | No Paramétrica |
| 9 | CO | Cara oeste | No Paramétrica |
| 10 | CE | Cara este | No Paramétrica |
| 11 | CA | Cara abajo | No Paramétrica |
| 12 | PROF 1 | Profundidad 1 cm. | Paramétrica |
| 13 | PROF 2 | Profundidad 2 cm. | Paramétrica |
| 14 | PROF 3 | Profundidad 3 cm. | Paramétrica |
| 15 | PROF 4 | Profundidad 4 cm. | Paramétrica |
| 16 | PROF 5 | Profundidad 5 cm. | Paramétrica |
| 17 | CADM | cloruros < 0,20% | Paramétrica |
| 18 | CNA | cloruros \geq 0,20% | Paramétrica |

rez-García et al [7]). Los 14 puentes están distribuidos irregularmente a lo largo del viaducto, uno se construyó basculante, de estructuras metálicas, los restantes fueron ejecutados según el proyecto típico de puentes para carretera en Cuba, con vigas de hormigón armado, postensadas, prefabricadas todas con los mismos materiales, en el mismo centro de producción e idéntica resistencia característica proyectada a los veintiocho días, la cual se alcanzó en todos los casos.

2.2 Materiales y programa experimental

Se realizó un muestreo en la viga 1 extrema del lado Oeste del viaducto, la viga 13 del Este y la viga 7 Central en cada uno de los puentes Nos. 4, 5 y 6. Por cada viga, se analizaron sus dos apoyos: norte y sur, y en cada uno de ellos tres caras: Este, Oeste e Inferior.

Para los ensayos de cloruros se tomaban muestras de polvo a 1,0 cm, 2,0 cm, 3,0 cm, 4,0 cm y 5,0 cm de la cara exterior, mediante un taladro con broca de 25 mm de diámetro con una guía para asegurar la profundidad. El polvo se almacenó en bolsas plásticas de cierre hermético,

limpiándose cuidadosamente los residuos y soplando con aire mediante una pera evitando la contaminación en cada profundidad. Se tomaron un total de 90 muestras de polvo y se determinó el contenido de cloruros en un laboratorio acreditado por el método ASTM C-1152 (ASTM C-1152 [8]) obteniéndose los cloruros totales en relación con el peso del cemento.

Los porcentajes obtenidos de cloruros se muestran en la Tabla [1]. Con esos resultados, se propusieron una serie de variables mostradas en la Tabla [2], donde se asumen diferentes variables para las estructuras analizadas, con valores paramétricos y no paramétricos.

La variable paramétrica es la que se define como aquella forma variable y en función de parámetros; la variable no paramétrica es aquella donde los datos se reportan no como valores continuos sino más bien en una escala ordinal asignando rangos a los datos. Como variables paramétricas se asumieron la profundidad con relación a la cara exterior de la viga en centímetros (PROF) y los porcentajes de cloruros totales con relación al peso del cemento (nomenclatura de CNA para asumir valores mayores o iguales a un umbral de 0,20

Tabla 3 – Características de los grupos del Dendograma

| Grupo | Relaciona |
|-------|-----------------------------|
| 1 | PROF 1 con CADM |
| 2 | PROF 2 con Grupo 1 |
| 3 | PROF 5 con Grupo 2 |
| 4 | V7 con Grupo 3 |
| 5 | PROF4 con Grupo 4 |
| 6 | P5 con Grupo 5 |
| 7 | PROF3 ,V1,CE, con Grupo 6 |
| 8 | P4 con Grupo 7 |
| 9 | CO, V13, CA, P6 con Grupo 8 |
| 10 | LS con Grupo 9 |
| 11 | CNA , LN con Grupo 10 |

por ciento, y CADM para los que son menores a ese valor). Para efectos de este trabajo se tomó como límite el valor de 0,20 que especifica el manual de la Red Durar (Troconis et al [9]) aunque es importante señalar que hay disponibilidad de literatura con respecto a umbrales de cloruros libres que podrían aplicar a esta situación

una vez hechas las transformaciones correspondientes (Alonso et al [10]). Dentro de las variables no paramétricas se tienen aquellas que identifican posición, lugar o elemento como son el puente con letra P acompañada del número de puente, la viga con la letra V y el número correspondiente, el lado con la letra L sea Norte o Sur y la cara con letra C acompañada de la letra que identifica la posición en donde se tomó la muestra.

3 Resultados

Los valores se analizaron según el paquete estadístico S.P.S.S. 11 de la familia MICROSOFT (SPSS 11 [11]), del cual se empleó un Análisis de Grupo o Cluster, técnica multivariante exploratoria que permite clasificar grupos de variables, minimizando la variación interna dentro del grupo y maximizando la variación entre grupos. Se utilizó el Método Jerárquico (Martín-Guzmán [12]) para agrupar las variables en clusters sucesivamente largos, hasta que en el último paso, todas las variables quedan agrupadas en un sólo cluster. Para evitar la desventaja de la diferencia de escalas entre las variables, estas fueron estandarizadas a Z según el programa (SPSS 11 [1]), quedando todas expresadas con media cero y varianza uno, obteniendo un dendograma como salida que es mostrado en la Figura [1]. El dendograma es la representación gráfica que mejor ayuda a interpretar el resultado de un análisis cluster. Este dendograma entre grupos plantea un listado de casos o de las variables que se referencia en el eje Y, como

Figura 1 – Dendograma entre grupos

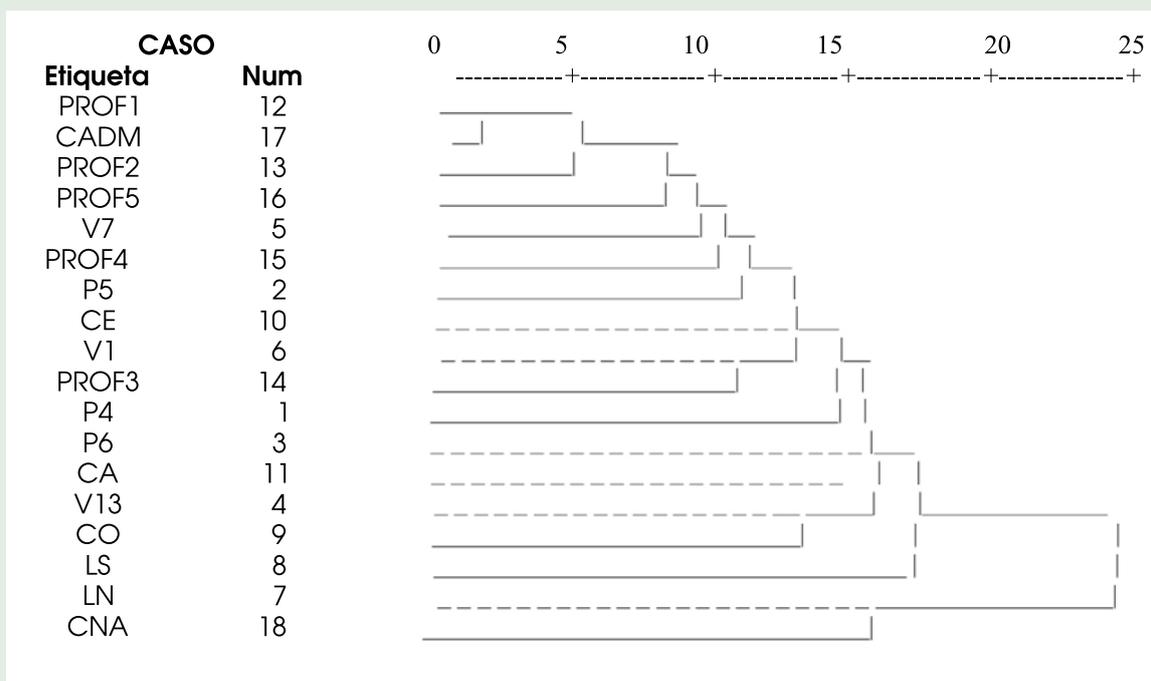
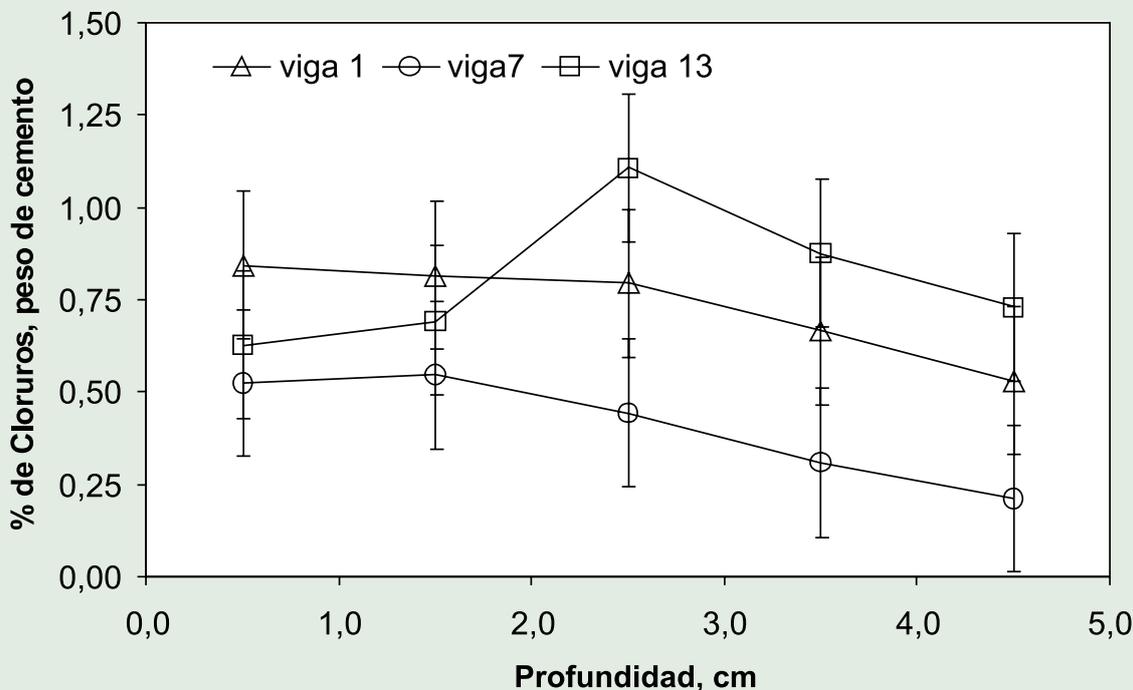


Figura 2 – Comparación de los perfiles de cloruros promedio en las vigas 1, 7 y 13 del puente 4



se observa en la Tabla [2], y agrupados en 11 grupos, según una distancia escalar que aparece en el eje X. Esta distancia escalar muestra mayor interrelación entre variables mientras es mas pequeña o cercana a cero, por el contrario mientras mas se aleja de cero menos interrelación existe entre las variables, sin despreciar la que exista entre ellas por separado. Estas se observan en 11 grupos numerados de menor a mayor a medida que se alejan del eje Y, en la Tabla [3].

4 Discusión

Para interpretar mejor el significado del dendograma de la Figura [1] se anexan las Figuras [2], [3] y [4], correspondientes a los perfiles de cloruros de los puentes 4, 5 y 6 (Pérez-García et al [4]). En el análisis del dendograma de salida de la corrida de datos es evidente que cuando la distancia escalar es menor éstos están mas fuertemente relacionados, de lo cual se infiere que el 50 % de los primeros grupos ofrecen una mayor relación, pero el resto ofrece una relación que se debe tener en cuenta.

En este análisis multivariado los Grupos que se enumeran como 1 y 2 validan los efectos de mojado y secado al estar los por cientos de concentración de cloruros con valor inferior a 0,20 (CADM) muy relacionados con las profundidades 1 y 2 (PROF1, PROF2) además de estar relacionados con la profundidad 5 (PROF 5). Por el contrario, las profundidades centrales 3 y 4 de los elementos de hormigón, se ubican en el centro del dendograma(PROF3 y PROF4) y

se relacionan con los cloruros mayores al umbral (CNA) y que en los perfiles de concentración quedan evidenciados por un pico central de porcentaje de cloruro mayores a 0,20 como se pueden ver en las Figuras [2], [3] y [4]. De esta forma se valida estadísticamente la forma de los perfiles como se explica en trabajos anteriores (Pérez-García et al [4]). En varios trabajos (Castro et al [1, 6], Meira et al [13]) se ha reportado y/o reafirmado que, los picos detectados en los perfiles de cloruros obtenidos de las probetas expuestas pueden ser debidos al efecto piel del hormigón (Meira et al [13]), la interfase hormigón carbonatado y no carbonatado (Castro et al [1,6]), el lavado de los cloruros por la lluvia (Meira et al [13]) o la interfase entre la zona permanentemente húmeda y la que se seca y se moja continuamente (Castro et al [1,6]). Por las características de los puentes de Cayo Coco (calidad del hormigón, ubicación geográfica, elevación con respecto al mar) se podría pensar que los picos son debidos a la existencia de dos zonas, una de continua humedad y otra de mojado y secado. Esta contribución es útil, además, para comprender la importancia de la calidad del recubrimiento, del hormigón.

El Grupo numerado como 7 en la Tabla 2, por su parte, valida la influencia de la dirección de los vientos al relacionar la Cara Este (CE) con los valores mayores de cloruros a las profundidades 3 y 4, según se demostró en el párrafo anterior. Se reconoce que existen en la literatura estudios enfocados al análisis de los perfiles de cloruros en estructuras reales (Castro et al [14]). En los que se revisaron (Troconis et al [9], Petterson [15], Castro et al

Figura 3 – Comparación de los perfiles de cloruros promedio en las vigas 1, 7 y 13 del puente 5

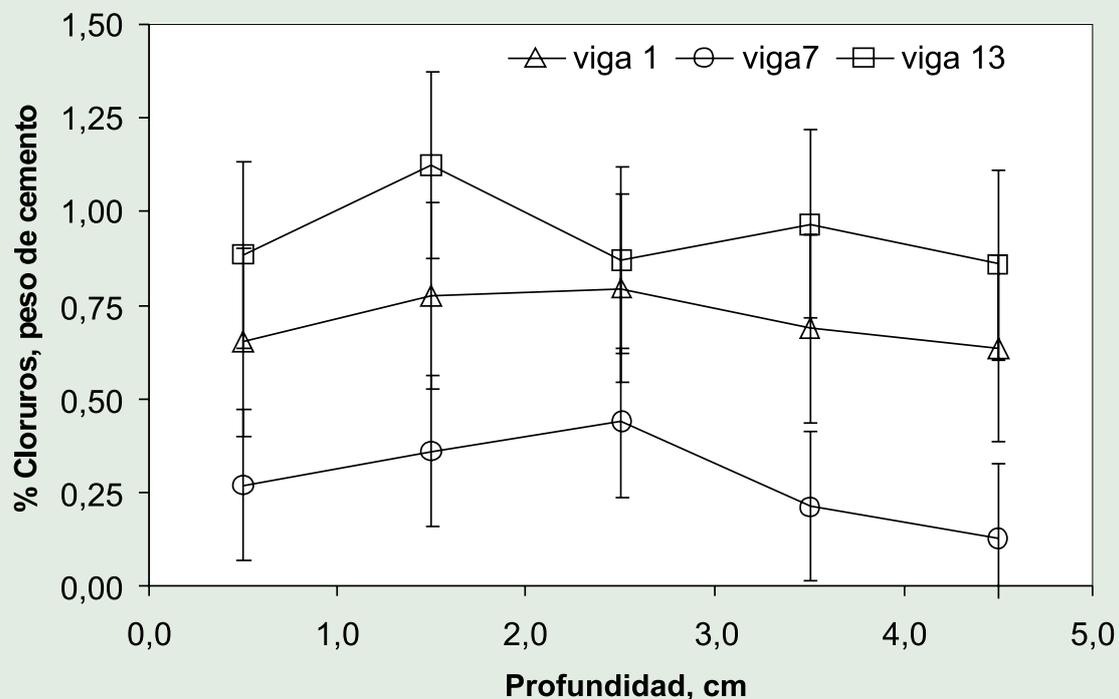
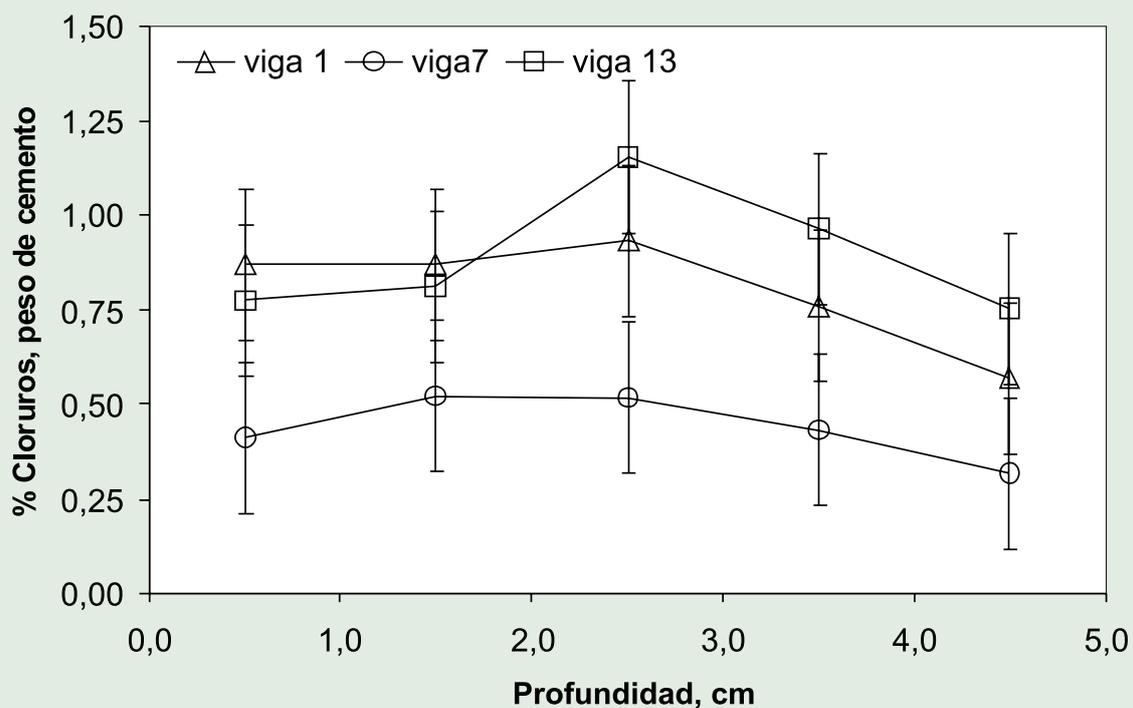


Figura 4 – Comparación de los perfiles de cloruros promedio en las vigas 1, 7 y 13 del puente 6



[1,6], Roy et al [5]) se enfatizan, entre otras, las contribuciones de la elevación, distancia al mar y orientación geográfica. En estos trabajos se vislumbra, pero no se discute, el efecto de los vientos predominantes, que ha sido analizado (Castro et al [14]), únicamente para el caso de carbonatación. En el trabajo revisado (Castro et al [14]) se acepta que la carbonatación aumenta de Oeste a Este, debido a que en el Este hay mayor tiempo de mojado y secado. Si se tiene en cuenta que tanto en Yucatán como en Cayo Coco los vientos predominantes son del Noreste se entiende que el secado y mojado ocasione un mayor y más rápido ingreso de cloruros. Por esta razón los perfiles de cloruros en el Este son mayores que en el Oeste (ver Figuras [2], [3] y [4]). Esto es útil para la industria de la construcción, pues los diseñadores podrían tomarlo en cuenta en el diseño para que en el lado Este se tengan en cuenta pinturas, acabados exteriores y otros que permitan disminuir los efectos del viento en la durabilidad de la estructura.

En algunos trabajos analizados (Troconis et al [9], Castro et al [14]) se inducen los efectos del apantallamiento como barrera para evitar el ingreso de agentes deletéreos externos al hormigón. En el caso de Cayo Coco se tienen dos tipos de apantallamiento; el primero de Norte a Sur, pues el lado sur (LS) es el que recibe directamente la acción del oleaje y los vientos, siendo no solo el que tiene mayor perfil sino también el que está más deteriorado; y el segundo se debe al resguardo de la viga 7 (V7) que no tiene influencia directa del aerosol marino. De la literatura (Sand [16]) se infiere el efecto del apantallamiento cuando se analiza la dirección del viento en zonas montañosas o estableciendo la incidencia del microclima y la topografía del lugar. En el análisis se valida que el grupo 4 de la Tabla 2 se relaciona con la viga 7 (V7), ubicada en el centro de los puentes y los cloruros menores al umbral (CADM), por el contrario la viga 13 (V13) en el grupo 11, se relaciona con el Lado Sur (LS) y con los Cloruros mayores al umbral de 0,20 (CNA). Este efecto está motivado por la posición de los elementos de los puentes. Para la industria de la construcción esto permite que los proyectistas establezcan requisitos más exigentes de calidad de los elementos ubicados en la zona no apantallada evitando la incidencia directa del mar y su aerosol en esas partes de las estructuras.

5 Conclusiones

Las siguientes conclusiones rigen principalmente para las condiciones del medio y de la estructura evaluada y, aunque se hayan validado con datos y experiencias de otros autores, deben contrastarse cuidadosamente con otras construcciones:

El análisis multivariado con la asociación de variables en grupos validó las relaciones encontradas en trabajos previos, es decir:

- a. La existencia de un pico en los porcentajes de cloruros cercanos a la cara exterior de las vigas, que pudiera estar asociado al efecto de mojado y secado en los elementos.

- b. Que los elementos ubicados al lado Este, coincidentes con la dirección de los vientos predominantes, se encuentran más afectados por la penetración del ión cloruro que los del lado Oeste.
- c. Que en los puentes analizados, las vigas centrales y el lado Norte están menos afectados por el ión cloruro que los demás elementos debido a un efecto de apantallamiento.

6 Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de la Construcción (MICONS), por financiar parte de los trabajos, al Laboratorio central de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) que realizó los ensayos de Cloruros, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Ciego de Ávila por su apoyo, al CINESTAV del IPN, Unidad Mérida y al CONACyT por su apoyo parcial en la movilidad de los investigadores y algunas fases de la investigación. Los puntos de vistas expresados aquí son de los autores y no necesariamente de las instituciones participantes.

7 Referencias bibliográficas

- [01] CASTRO, P. et al. Corrosión en estructuras de concreto armado. p. 24, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Segunda Edición, México, 2001.
- [02] BERKE NS., HICKS MC. Predicting chloride profiles in concrete, Corrosion, v. 4, n. 3, 1994; p.234-239.
- [03] WEYERS RE. Service life model for concrete structures in chloride laden environments, ACI Materials Journal, v. 95, n. 4, 1998; p. 445-453.
- [04] PÉREZ GARCÍA E.J., CASTRO-BORGES P., O'REILLY V.A., SEIGLIE G. I., FERNÁNDEZ E. I. Influencia de la dirección del viento en los perfiles de cloruros obtenidos en estructuras expuestas en el Mar Caribe. Caso Viaducto Turiguanó-Cayo-Coco en Cuba. Materiales de Construcción, v. 55, n 277, 2005; p. 75-81.
- [05] ROY SK., CHYE LK., NORTHWOOD DO. Chloride ingress in concrete as measured by field exposure tests in atmospheric, tidal and submerged zones of a tropical marine environment. Cement and Concrete Research., v. 23, n. 6, 1993; p.1289-1306.
- [06] CASTRO P, DE RINCON OT, PAZINI E. Interpretation of chloride penetration profiles in marine environment, Cement and Concrete Research, v. 31, n. 4, 2001, 529-537.
- [07] PÉREZ-GARCÍA EJ., SEIGLIE G. I., FERNÁNDEZ E. I. Evaluación de los puentes de hormigón armado del pedraplén Turiguanó – Cayo Coco como obra del patrimonio vial de la provincia de Ciego de Ávila, casos: puentes 4, 5 y 6, La Habana, 2001, Tesis para la obtención del Grado de Master en Ciencias, Facultad de Arquitectura, p.116.

- [08] ASTM C-1152-90: Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete; Annual Book of ASTM, Section 4, v. 4.02, Concrete and Aggregates; PA, EE.UU., 1995.
- [09] TROCONIS, O. et al. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, Segunda Edición, p.208, 1998.
- [10] ALONSO C., ANDRADE C., CASTELLOTE M., CASTRO P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar, Cement and Concrete Research, v. 30, n. 7, 2000, 1047-1055.
- [11] SPSS 11.0 Microsof Windows.SPSS Inc. Headquarters, 233 S. Wacker Drive, 11th floor. Chicago, Illinois 60606.
- [12] MARTÍN-GUZMÁN, P. Curso básico de estadística económica. AC, DL. Madrid. ISBN:84-7288-142-3, 1991.
- [13] MEIRA GR., PADARATZ IJ., ALONSO MC., ANDRADE MC. Effect of distance from sea on chloride aggressiveness in concrete structures in brazilian coastal site. Materiales de Construcción, v. 53, n. 271-272, 2003; p.179-188.
- [14] CASTRO P., MORENO EI., GENESCA J. Influence of marine micro-climates on carbonation in reforced concrete buildings. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 10, 2000, p. 1565-1571.
- [15] PETTERSON, K. H. Factors influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete. In: C. Sjoström (Ed.), "Durability of Building Materials and Components", v. 1, Chapman and Hall, p. 334-341, 1996.
- [16] SAND B. T. The effect of the environment load on chloride penetration, Nordisk miniseminar - Kloridinntrenging i betong, Goteborg, 1993, p. 113-124.