

Estrategias para Mejorar la Durabilidad del Concreto Reforzado Ante un Medio Ambiente Marino

Herwing López, Pedro Montes, Jorge Porras, Theodore Bremner

Facultad de Arquitectura “5 de Mayo”, Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO), 5 de Mayo No.100, Centro Histórico, Oaxaca, Oax. México.

Grupo de Materiales y Construcción (CIIDIR-IPN) Oaxaca. Hornos No. 1003, Sta. Cruz Xoxocotlán, Oax. México.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de New Brunswick (UNB), Fredericton, New Brunswick, Canadá, E3B 5A3.
hz.lopez.calvo@gmail.com

M. Ramos., V.Aguilera., (eds.) .Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

As a consequence of climate change that our planet is currently suffering, buildings are exposed to severe environmental conditions that tend to accelerate the deterioration of the materials that compose them. This effect provokes their sub-utilization in unsafe conditions or generates overspending by requiring continuous repairs in order to extend their service life. In the present paper, the progress of an extensive research project developed to evaluate various strategies to enhance the durability of reinforced concrete exposed to a marine environment is reported. Such strategies include the use of corrosion inhibitors, alone or in combination with supplementary cementitious materials in concrete structures, epoxy coated rebars and the use of a surface pre-treatment with a hydrophobic agent. To evaluate the effectiveness of the aforementioned strategies, accelerated laboratory testing and field testing were conducted. So far the results have shown to be promising, although to varying degrees, in improving the durability properties of the evaluated materials in comparison with those without such protections.

19 Introducción

Uno de los problemas más apremiantes que actualmente enfrentan los profesionales de la construcción, es la de garantizar que la infraestructura existente y/o las que se construyen hoy en día, perduren para las generaciones futuras, es decir, que se consideren estrategias de sustentabilidad en su diseño y conservación. En este sentido, los actuales reglamentos de construcción solicitan que en el diseño de una estructura se considere una vida de servicio de al menos 50 años (RCDF, 1993). Sin embargo, en estructuras expuestas ante ambientes agresivos, esta expectativa de vida se ve amenazada por diferentes mecanismos de destrucción que disminuyen sustancialmente la vida de servicio para la que fueron diseñadas.

Desafortunadamente, esta problemática se ha exacerbado a consecuencia del cambio climático que sufre nuestro planeta, ya que las edificaciones construidas en las costas están expuestas a condiciones medioambientales cada vez más agresivas lo que acelera el deterioro de los materiales que las componen reduciendo su vida útil y provocando su sub-utilización en condiciones inseguras que ponen en riesgo la vida de sus usuarios. Esta situación además genera costos excesivos en reparaciones correctivas, lo que conlleva el desperdicio de los recursos naturales con la consecuente contaminación del medio ambiente.

El principal mecanismo de destrucción en estructuras expuestas a un medio ambiente marino es la corrosión del acero de refuerzo en concreto (Koch, et al., 2002). Diversas estrategias han sido propuestas para mitigar los deleznable efectos causados en las edificaciones expuestas a un ambiente marino, entre estas destacan: el uso de agentes químicos, solos en combinación con materiales suplementarios, el uso de varillas resistentes a la corrosión y tratamientos superficiales con membranas impermeabilizantes, entre otros (Broomfield, 1997).

A pesar de sus evidentes ventajas, la aplicación de este tipo de estrategias ha sido poco ensayada en nuestro país, debido quizás a su desconocimiento o por la inexistencia de personal capacitado para su aplicación. De hecho, los actuales reglamentos y normas de construcción, nacionales y locales, no consideran aún su aplicación como una práctica obligatoria (RCDF, 1993; RCSEO, 1998).

En particular, en el Estado de Oaxaca, el cual posee 597.5 km de costas, lo que representa el 5.2% del litoral total nacional (Hernández-García, et al., 2006), actualmente poca investigación enfocada a evaluar estrategias para garantizar la durabilidad de las estructuras ante el ambiente marino ha sido llevada a cabo.

Es en este contexto que el presente trabajo adquiere relevancia, ya que tiene como objetivo presentar los avances de un extenso proyecto encaminado a evaluar diversas estrategias para mitigar los efectos causados en las estructuras debido a su exposición a un medio ambiente marino, con el fin de comprobar su eficacia y/o lograr una adecuada adaptación a nuestro medio local de aquellas estrategias que están siendo utilizadas con éxito en otros países.

19.1 Materiales y métodos

Aditivos inhibidores de corrosión y materiales suplementarios al cemento

Para llevar a cabo la evaluación de aditivos inhibidores de corrosión, solos o en combinación con materiales suplementarios, fueron preparados más de 150 especímenes de concreto de diversas geometrías y configuraciones de armadura. Los materiales utilizados en las distintas mezclas incluyeron: cemento portland ordinario (CPO), aditivos inhibidores de corrosión (AICs), solos o en combinación con materiales cementantes suplementarios (MCSs).

En la Tabla 1, se pueden observar los diferentes materiales que fueron utilizados en la elaboración de los especímenes para experimentación.

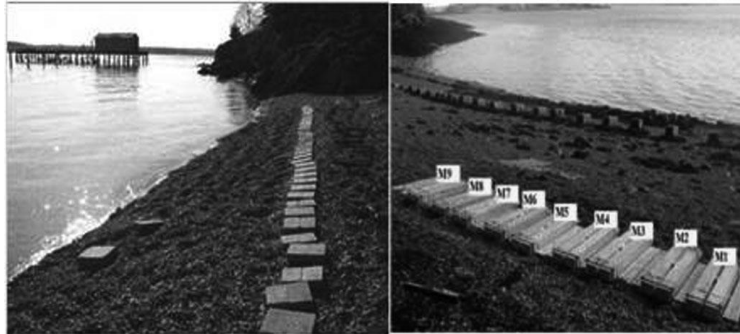
Tabla 19 Descripción de los materiales utilizados en la experimentación.

Materiales	Descripción	Niveles
CPO	Cemento Portland Ordinario	250-500 kg/m ³
AICs	Nitrito de Calcio (CNI)	12.5 y 25 L/m ³
	Disodium tetrapropenil succinate (DTS)	5 L/m ³
MCSs	Humo de sílice (SF)	8% *
	Ceniza Volante (FA)	20% y 40% *
	Reemplazo equivalente al peso del cemento	

Para comprobar la efectividad de las diferentes combinaciones, se llevaron a cabo pruebas aceleradas en el laboratorio y en campo.

En las pruebas de campo, los especímenes de concreto reforzado (primas de 300 x 200 x 55 mm) fueron expuestos durante nueve años en el sitio de exposición marina perteneciente al Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, el cual, se encuentra localizado en la Bahía de Fundi, en Maine, USA. Las condiciones climáticas en este sitio son típicas para el Atlántico Norte, con dos ciclos de humedecimiento y secado por día y un promedio de 120 ciclos de congelamiento y deshielo por año (López-Calvo, 2011). Actualmente, nueve pares de vigas de concreto reforzado están siendo expuestas en el sitio desde hace 48 meses; los resultados de este estudio serán publicados próximamente. La Figura 1, muestra las condiciones de exposición.

Figura 19 Especímenes de concreto reforzado (primas y vigas) expuestos en el sitio de exposición marina en la Bahía de Fundi, Maine, USA.



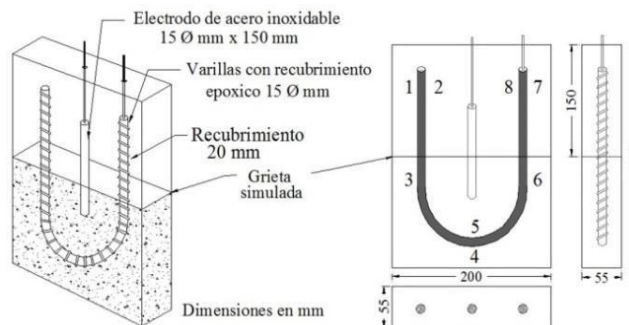
Para cuantificar los efectos causados por la corrosión, se llevaron a cabo pruebas cualitativas y cuantitativas, consistentes en inspección visual, pruebas electroquímicas no destructivas, basadas en lecturas de potenciales de corrosión (E_{corr}) en milivolts (mV) y densidad de corrosión (I_{corr}) en miliampers centímetro cuadrado ($\mu A/cm^2$); además de pruebas destructivas entre las que se incluyen, resistencia a la compresión en el concreto y pruebas de tensión en el acero de refuerzo extraídos de los elementos de concreto reforzado después de nueve años de exposición marina.

Varillas con recubrimiento epóxico (VRE):

Uno de los métodos de protección más eficientes para mitigar los deleznable efectos causados por la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto expuestas a ambientes agresivos, es la aplicación de recubrimiento epóxico adherido por fusión en las varillas de refuerzo (VRE). A pesar de que considerable investigación se ha llevado a cabo para evaluar la eficacia de este tipo de recubrimientos, todavía existen muchas incertidumbres acerca de su desempeño en ambientes marinos tropicales.

En el presente programa experimental, fueron evaluadas diferentes varillas de refuerzo con seis tipos de recubrimiento epóxico, embebidas en losas de concreto con una grieta preformada de 0.4 mm de espesor intersectando al acero de refuerzo en ángulo recto. Detalles y dimensiones de los especímenes de prueba se pueden observar en la Figura 2.

Figura 19.1 Especímenes de concreto reforzado conteniendo varillas con recubrimiento epóxico.



En el desarrollo de la etapa experimental, los especímenes de prueba fueron expuestos a lo largo de 68 meses en una cámara de ambiente marino simulado (CAMS). Durante este tiempo se llevaron a cabo pruebas electroquímicas no destructivas las cuales consistieron en lecturas de potenciales de corrosión (E_{corr}) y densidad de corrosión (I_{corr}).

Pre-tratamiento superficial con un agente hidrófobo:

En los últimos años, los tratamientos superficiales como membranas, bloqueadores de poros, y agentes repelentes al agua, utilizados como barrera de protección para evitar la penetración de sustancias promotoras del deterioro en los materiales de construcción, han incrementado sustancialmente su popularidad. El éxito en el uso de estas estrategias de protección de las edificaciones, radica esencialmente en su viabilidad de aplicación, debido a que se pueden aplicar sin que sea necesario interrumpir los trabajos de construcción o rehabilitación en estructuras nuevas o existentes, lo que las hace más rentables en comparación con otros sistemas (Almusallam et al., 2003; Ibrahim et al., 1999). En la actualidad, los agentes hidrófobos a base de silano se presentan como una alternativa eficaz para la protección de los materiales sin afectar su estructura y apariencia estética. Sin embargo, su uso en la industria de la construcción es relativamente reciente, por lo que existe incertidumbre sobre su eficacia, especialmente en estructuras expuesta ante ambientes agresivos.

Ante esto, el objetivo de este programa experimental fue evaluar la eficacia de un tratamiento superficial a base de silano alkyltrialkoxo en la prevención de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto agrietado. Las mezclas evaluadas se elaboraron con los componentes y cantidades que se describen en la Tabla 2.

Tabla 19.1 Componentes y proporciones de la mezcla de concreto evaluada

Constituyente	Unidad	Cantidad
Cemento +8% humo de silice	Kg/m ³	470
Agregado grueso	Kg/m ³	950
Agregado fino	Kg/m ³	743
* Agua	Kg/m ³	188
AIA	L/m ³	0.423
HRWR	L/m ³	7.52
w/cm	n/a	0.4
Aire	%	7.5
Revenimiento	mm	110
** f _c	28 days	40

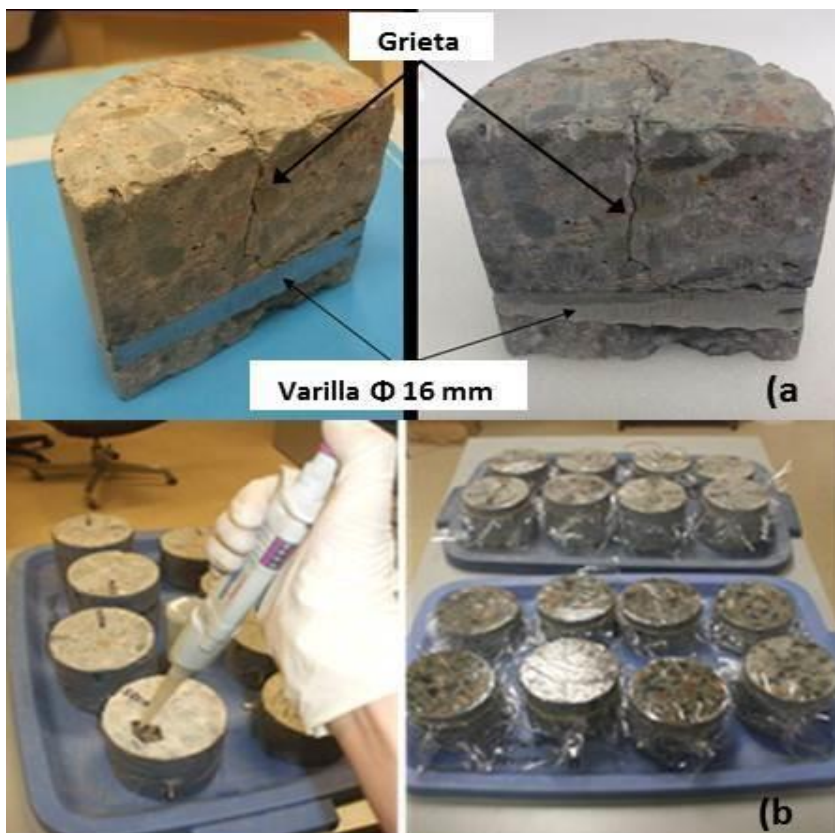
Notas: AIA, aditivo inclusor de aire RAAR: Reductor de agua de alto rango

* Agua libre; ** resultado promedio de 3 muestras

Para desarrollar el programa experimental, un total de 61 especímenes cilíndricos de concreto conteniendo una varilla corrugada de 16 mm de diámetro, colocada en la parte central de cilindros con recubrimientos de 25 mm y 45 mm, fueron elaborados. A los 28 días de edad, los cilindros fueron pre-agrietados bajo una carga controlada, con el fin de crear grietas de diversos espesores que fluctuaron entre 0.10 a 0.33 mm. Dichas grietas se formaron perpendicularmente a las varillas de refuerzo, con el fin de crear de manera deliberada un acceso directo para los agentes corrosivos del acero, y de esta manera acelerar el proceso de corrosión localizada (ver Figura 3a).

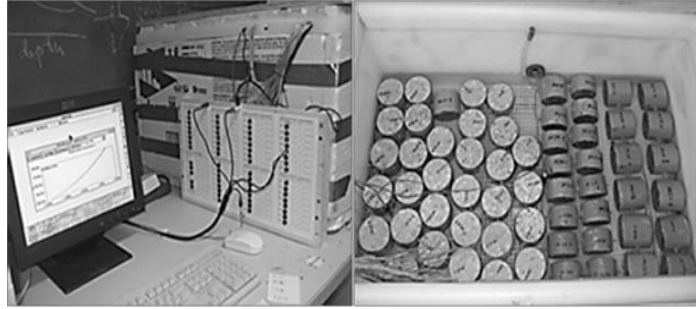
Los especímenes fueron expuestos a un medio salino, para lo cual se utilizó una cámara de ambiente marino simulado (CAMS). Previo a su exposición, los especímenes de concreto pre-agrietados fueron impregnados con el agente hidrófobo que consistió en un repelente base agua con 90% como mínimo en peso de alkyltrialkoxysilano activo. De acuerdo con lo sugerido por el proveedor, fueron aplicadas dos capas de 250 a 350 ml/m² a cada espécimen, para posteriormente ser cubiertos con una película de polietileno de 10.5 µm de espesor durante 12 horas, esto con el fin de evitar la evaporación del producto y de este modo mejorar la penetración de la solución en la superficie del concreto y a través de las grietas preformadas (Ver Figura 3b).

Figura 19.2 Sección de especímenes de concreto pre-agrietados y proceso de impregnación del agente hidrófobo a base de silano



Con el fin de evaluar la eficacia del tratamiento, los especímenes fueron sometidos durante 12 meses a ciclos de humedecimiento y secado, dentro de la CAMS, la cual, fue programada con el fin de simular condiciones de marea semi-diurna, con dos ciclos de cuatro horas de humedecimiento y ocho horas de secado, a una temperatura mínima de 24 °C y máxima de 45 °C, respectivamente. La solución de cloruro fue monitoreada en forma regular a fin de mantener su salinidad entre 3 a 4%. La Figura 4, ilustra las condiciones de exposición antes mencionadas.

Figura 19.3 Especímenes de concreto reforzado evaluados en CAMS

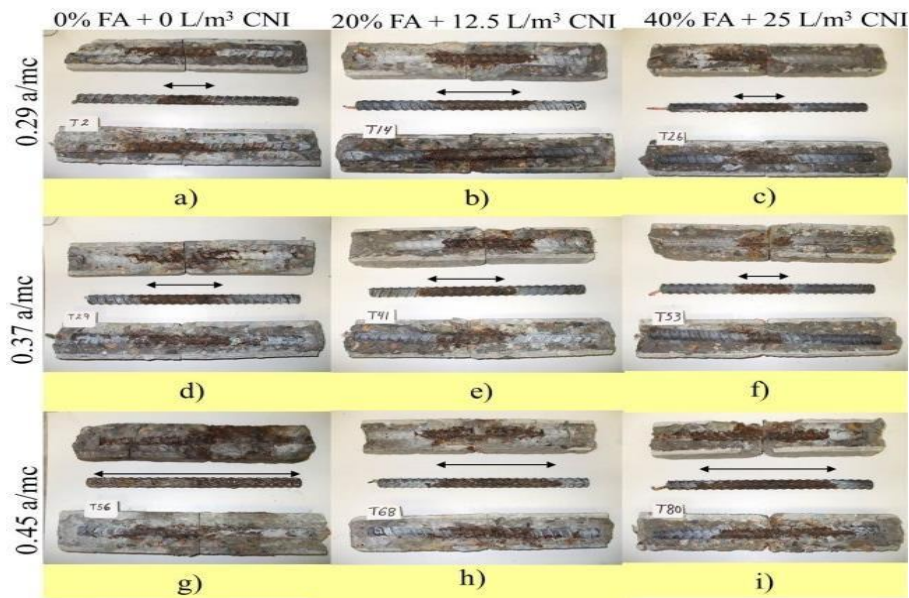


19.2 Resultados y discusión

Inhibidores y materiales suplementarios:

Los resultados de los experimentos demostraron que el uso de MSCs en combinación con AICs en concretos preparados con una baja relación agua/materiales cementantes (a/mc), presentaron un grado de protección superior a que aquellos concretos preparados sin estos materiales. En la Figura 5, se observa la inspección visual interna de especímenes preparados con distintas dosificaciones de materiales y tres diferentes relaciones a/mc , después de nueve años de exposición marina.

Figura 19.4 Inspección visual interior de especímenes después de nueve años de exposición marina

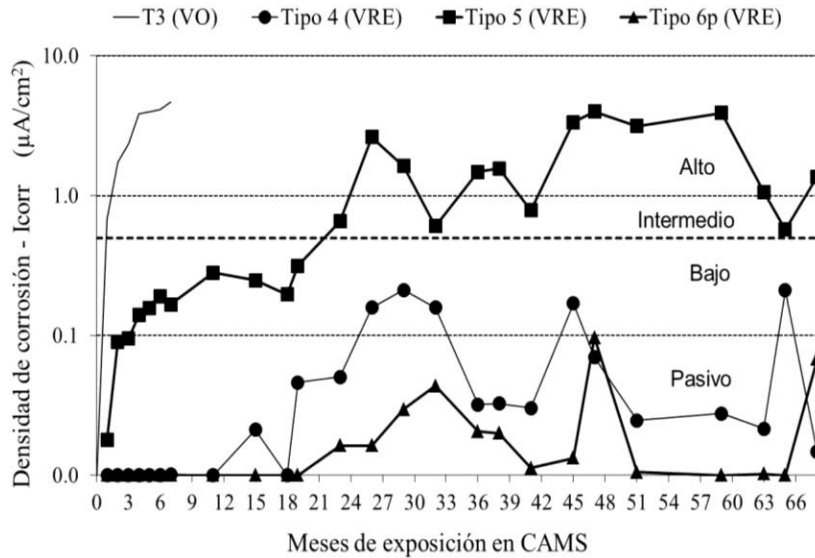


Como se puede observar en la Figura 5 la extensión de la corrosión indicada con flechas negras, fue menos extensiva en concretos preparados con una relativa baja relación a/mc (Figs. 5 a- f). En contraste, en la mayoría de especímenes preparados con una relación a/mc igual a 0.45, el acero de refuerzo presentó más de un 75% de área corroída (Figs. 5 h-i). Como se observa en la Figura 5g; en concretos ordinarios preparados sin MSCs ó AICs, la corrosión del acero de refuerzo fue del 100%. Los detalles de los experimentos y resultados completos de este trabajo de investigación pueden ser consultados en (Montes-García et al., 2009; López-Calvo et al., 2009, 2012).

Varillas con recubrimiento epóxico (VRE):

Los resultados de las pruebas de densidad de corrosión en varillas con recubrimiento epóxico (VRE) comparadas con varillas ordinarias (VO) se presenta en la Figura 6.

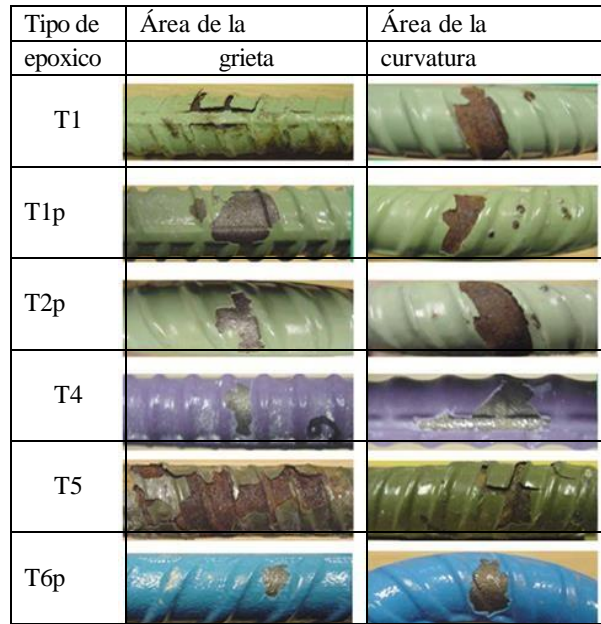
Figura 19.5 Resultados de las pruebas electroquímicas, densidad de corrosión en VRE a lo largo de 68 meses de exposición en CAMS



Los resultados de las pruebas electroquímicas revelaron que las VRE tienen una resistencia significativamente superior a la acción del medio ambiente corrosivo en comparación de aquellas varillas ordinarias sin protección (VO). Sin embargo, entre los tipos de VRE, existen algunas que presentaron una mayor resistencia a la corrosión, como es el caso de las VRE Tipo 4 y Tipo 6, al compararlas con las VRE Tipo 5. Al finalizar el tiempo de exposición, todas las VRE fueron extraídas del concreto para enseguida llevar a cabo pruebas de adherencia del recubrimiento, cuantificación del contenido superficial de cloruro y un examen visual. Durante la inspección visual se pudieron corroborar los datos obtenidos durante la evaluación electroquímica, ya que como se observa en la Figura 7, las VRE que presentaron menor daño debido a la corrosión inducida fueron efectivamente las VRE Tipo 4 y Tipo 6.

Es importante mencionar que los especímenes de concreto conteniendo las varillas control, sin recubrimiento epóxico, fueron retirados del experimento debido a que el concreto se destruyó debido a la intensa corrosión del acero de refuerzo tan solo después de 6 meses de exposición.

Figura 19.6 Inspección visual en VRE después de 68 meses de exposición



Los resultados de las pruebas no destructivas y destructivas revelaron que, en las condiciones estudiadas, el uso del recubrimiento epóxico sobre las varillas no proporciona una protección total de acero de refuerzo en el concreto agrietado. Su uso sin embargo, tiende a reducir significativamente los daños causados por la corrosión inducida. Ante estos resultados se puede inferir que el uso de las VRE puede extender significativamente la vida de servicio de las estructuras de concreto armado, en comparación con aquellas estructuras reforzadas con varillas que no cuentan con esta protección. Los resultados completos de estas experimentaciones pueden consultarse en (López-Calvo et al., 2012a).

Pre-tratamiento superficial con un agente hidrófobo:

A lo largo de la etapa de exposición se tomaron mensualmente lecturas de densidad de corrosión (I_{corr}) con el de monitorear la velocidad de propagación de la corrosión en el acero de refuerzo. Los resultados de las lecturas tomadas en especímenes con 25 y 45 mm de recubrimiento se presentan en la Figura 8 y 9, respectivamente.

Figura 19.7 Lecturas de densidad de corrosión en especímenes con 25mm de recubrimiento y diferentes espesores de grieta

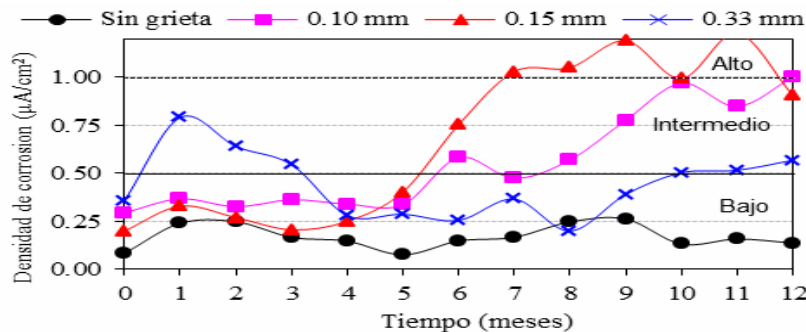
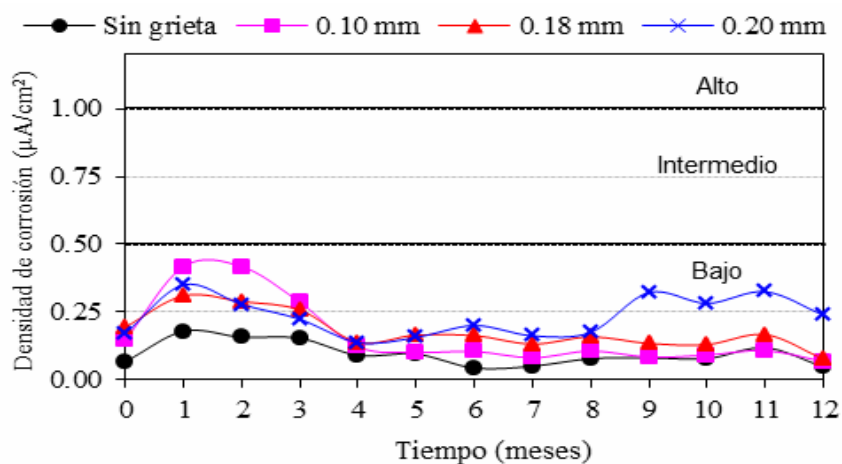


Figura 19.8 Lecturas de densidad de corrosión en especímenes con 45mm de recubrimiento y diferentes espesores de grieta.



Al final del ciclo de exposición, los resultados no fueron del todo alentadores, en especial en especímenes con recubrimiento del acero de 25 mm (ver Figura 8) debido a que la mayoría de estos concretos presentaron diversos grados de corrosión, de intermedia a alta en especímenes pre-grietados. Sin embargo, en especímenes con recubrimientos de 45 mm, el tratamiento con alkytrialkoxo silano fue relativamente efectivo en suprimir los efectos de la corrosión después de 12 meses de exposición, y solo aquellos con grietas de 0.20 mm presentaron una leve actividad (ver Figura 9). Una información detallada de las experimentaciones desarrolladas se pueden consultar en (López-Calvo et al., 2011).

19.3 Conclusiones

En el presente trabajo, la efectividad de diversas estrategias para mitigar los efectos causados por la corrosión en concreto reforzado expuesto a ante un medio ambiente marino, fue investigada.

Los resultados mostraron que, aunque en diversos grados, las estrategias evaluadas tanto en ambiente simulado y natural, mostraron una durabilidad superior en comparación con aquellos materiales que no contaban con este tipo de protecciones.

El uso de AICs, mostro resultados positivos al compararlos con los concretos preparados sin estos aditivos. Sin embargo, cuando estos fueron usados en combinación con los MCSs, su efectividad mejoró sustancialmente, al crearse un efecto sinérgico de protección al combinar ambos componentes.

Una de las estrategias que mostro mejores resultados, fue el uso de las varillas con recubrimiento epóxico. De acuerdo con las pruebas electroquímicas (densidad de corrosión), después de 68 meses a una exposición de deterioro acelerado en la CAMS, los efectos causados por la corrosión fueron visiblemente menores comparados con las varillas ordinarias sin recubrimiento. En contraste la aplicación el tratamiento superficial con alkytrialkoxo silano mostros resultados poco alentadores en concretos con poco recubrimiento del acero.

19.4 Agradecimientos

El autor reconoce el apoyo del Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) y de la Facultad de Arquitectura “5 de Mayo” de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Así también se agradece el apoyo del CIIDIR IPN Unidad Oaxaca y el Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

19.5 Referencias

Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, RCDF (1993). Recuperado de www.poi.ipn.mx/Documents/Normateca/reglamento/REGLAMENTO_DE_CONSTRUCCIONES_DISTRITO_FEDERAL.pdf.

Koch, H.G., Brongers, P.H., Thompson, N.G., Virmani, Y.P. & Payer, J.H. (2002). Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States. (Publication FHWA-RD-01-156) U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Broomfield, J. P. (1997). Corrosion of Steel in Concrete: understanding, investigation and repair. London, UK: E. & F.N. Spon.

Reglamento de construcción y seguridad estructural para el Estado de Oaxaca, RCSEO (1998). Recuperado de <http://municipiodeoaxaca.gob.mx/retys/retys/normateca/RCSEO98.pdf>.

Hernández-García, S., Lelis Zaragoza, M., Alonso Gutierrez, M., Islas Rivera, V.M., & Torres Vargas, G. (2006). Movilidad y desarrollo regional en Oaxaca. Vol1: regionalización y encuesta de origen y destino. (Publicación Técnica No. 305). Sanfandila, Qro. Méx. Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.

Lopez-Calvo, H.Z. (2011). Evaluation of corrosion in cracked high performance concrete exposed to a natural chloride environment. (Ph.D. Dissertation), University of New Brunswick, Canada.

Almusallam, A.A., Khan, F.M., Dulaijan, S.U., and Al-Amoudi, O.S.B., (2003) “Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25 pp.473–481.

Ibrahim, M., Al-Gahtani, A.S., Maslehuddin, M. & Dakhil, F.H., (1999). Use of surface treatment materials to improve concrete durability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(1), 36-49.

López-Calvo, H.Z. Montes-García, P. Bremner T.W. & Thomas, M.D.A. (2009). Effectiveness of calcium-nitrite based corrosion inhibitor and fly ash on corrosion protection of HPC slabs with a construction joint in a chloride environment. IX International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, CANMET/ACI, Sevilla España, pp.300-311.

López-Calvo, H.Z., Montes-García P., Thomas, M.D.A., & Bremner, T.W. (2012). Effectiveness of CNI in slabs with a construction joint in a marine environment. *Magazine of Concrete Research*, 64 (4), 307-316.

López-Calvo, H.Z., Montes-García, P., Kondratova, I., Bremner, T. W. & Thomas, M.D.A. (2012a). Epoxy-coated bars as corrosion control in cracked reinforced concrete. *Materials and Corrosion Journal*, 6(7), 599-608.

López-Calvo, H.Z., Bremner, T.W., Thomas, M.D.A., & Montes-García, P. (2011). Silane surface pretreatment as corrosion preventive measure of steel in cracked HPC. XI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y el XIII Congreso de Control de Calidad en la Const. CONPAT 2011, pp. 25-32.

Montes-García, P., López-Calvo, H.Z., & Bremner, T.W. (2009). Effectiveness of calcium nitrite inhibitor (CNI) in cracked concrete. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 233-244.