



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

MONITOREO ELECTROQUÍMICO DE PROBETAS EXPUESTAS A DIFERENTES AMBIENTES EN MÉXICO – PROYECTO DURACON

**R.R. Camacho Turrubiates¹, A.A. Torres Acosta², J.T. Pérez Quiroz², W. Martínez Molina³,
E. Alonso Guzmán³, R. Tobias Jaramillo¹.**

1 Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller”, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Tampico – Madero, Boulevard Adolfo López Mateos S/N. Tampico, Tamaulipas.

2 Instituto Mexicano del Transporte, Km 12+000 Querétaro – Galindo CP. 76700. Sanfandila, Qro.
Coordinación Mexicana RED DURACON.

3 Facultad de Ingeniería, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Ciudad Universitaria. Morelia, Michoacán.

RESUMEN

El proyecto internacional “DURACON” cuenta con la participación de 11 países Iberoamericanos cuyo principal objetivo es la caracterización de la durabilidad del concreto en distintos ambientes reinantes de los países participantes. El proyecto considera la exposición de probetas de concreto reforzado y sin acero de refuerzo en estaciones localizadas por lo menos en dos ambientes: marino y urbano.

En esta investigación se presentan los resultados obtenidos durante 9 años de exposición de la estación de Morelia, ubicada en México, expuesta a un ambiente urbano. Los datos presentados incluyen el monitoreo electroquímico del acero de refuerzo, el monitoreo de la resistividad y la carbonatación del concreto, así como algunos parámetros ambientales. Se efectuó un análisis de correlación múltiple entre el monitoreo de las probetas y los parámetros ambientales para encontrar posibles tendencias.

ABSTRACT

The international Project “DURACON” has the participation of 11 Iberoamerican countries, which its first target is the characterization of the durability of concrete exposed to different prevailed environments of the participating countries. The Project considers the exposition of reinforced concrete specimens located in monitoring stations at least on two environments: marine and urban.

This work submits the obtained results during 9 years of exposure in Morelia station, located in Mexico, exposed to an urban environment. The submitted data include the electrochemical monitoring of reinforcing steel, resistivity and concrete carbonation, also

some of the environmental parameters. A multiple correlation analysis was made between monitored specimens and environmental parameters to find out possible trends and/or correlations.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas del deterioro en las estructuras de concreto reforzado es la corrosión en el acero de refuerzo, debido a distintos factores que influyen desde la etapa de diseño hasta las condiciones de exposición y servicio, reflejando como consecuencia elevados costos de mantenimiento y reparación. Aunado a los altos índices actuales de contaminación, dicho problema se agrava, por lo que a efectos de preservar la integridad estructural, resulta de gran importancia determinar el grado de daño que presenta el acero a causa del proceso de corrosión.

La porosidad es una de las características de la microestructura del concreto que influye en el paso de agentes agresivos hasta llegar con el acero de refuerzo. Cuando la humedad ambiental es suficiente, estos poros están rellenos por un líquido acuoso constituido principalmente por iones OH⁻ (alcalinidad elevada con un pH entre 12 y 14). A esta elevada alcalinidad el acero se recubre de una capa de óxidos (pasivante) que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión, mientras el concreto sea de buena calidad, no esté fisurado y no cambie sus características físicas o químicas por agresiones exteriores [1].

En ambientes urbanos, urbano/industriales o urbano/marinos, la carbonatación es un problema que actualmente está afectando a muchas estructuras, debido a la diversidad de climas que posee nuestro país, aunque en menor escala en comparación con el producido por los cloruros. Sin embargo, se tienen dificultades similares para su predicción: ambos problemas tienen una relación directa con los parámetros meteorológicos del ambiente al cual se encuentran expuestas las estructuras [2].

Este proyecto busca determinar la durabilidad del concreto expuesto en distintas condiciones ambientales predominantes en México, basándose en la exposición de especímenes de concreto con acero y sin acero de refuerzo en ambientes diversos (urbano, marino, urbano - industrial, urbano - marino, rural - marino e industrial - marino). El número total de estaciones de monitoreo en México es de 15, pero este trabajo presentará un avance de los resultados obtenidos en la estación de Morelia únicamente. El objetivo de este trabajo es presentar y discutir las tendencias de la carbonatación del concreto y los parámetros electroquímicos del acero de refuerzo, en la estación de monitoreo de Morelia, en función de las variables meteorológicas estudiadas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las estaciones de ensayo natural fueron construidas con paneles metálicos para sostener los especímenes de concreto a un metro por encima del suelo, orientados hacia la dirección de los vientos predominantes.

Materiales para la fabricación de especímenes de concreto.

Los concretos estudiados fueron fabricados tomando en cuenta las especificaciones que se presentan a continuación:

1. Tipo de Cemento: Portland I (Superficie específica Blaine a 3600 y 8% de C3A).
2. Árido Silíceo triturado de 19 mm (grueso).
3. Arena cuarzosa.
4. Relación a/c: 0.45 y 0.65.
5. Adición de plastificante 0.30 % vs cemento (tipo Plastiment VZ de Sika o similar).
6. Asentamiento 10 ± 1.0 cm
7. Encofrado en madera resinosa.
8. Curado bajo agua por 7 días.
9. Se fabricaron 6 vigas de concreto con acero de refuerzo para cada estación (tres con relación a/c = 0.45 y tres con relación a/c = 0.65).

Especímenes de concreto para las estaciones de ensayo natural.

En la figura 1 y 2 se muestran los especímenes de concreto que fueron expuestos en las estaciones de ensayo natural se fabricaron en forma prismática de 15x15x30 cm con 3 barras de acero, con espesores de recubrimiento de 1.5, 2 y 3 cm

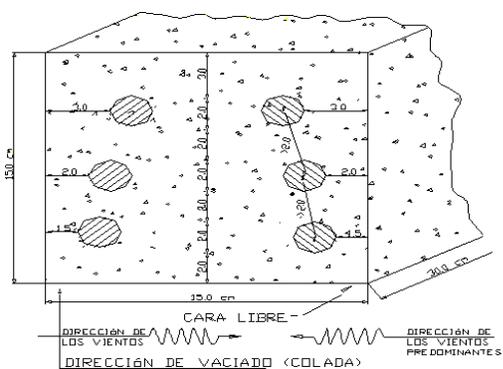


Figura 1.- Sección transversal del espécimen de concreto.

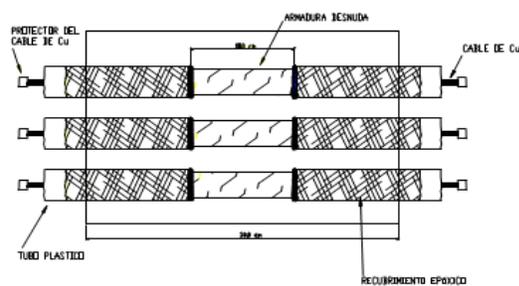


Figura 2.- Sección longitudinal del espécimen de concreto.



Figura 3.- Estación de monitoreo en Morelia

Ensayos a realizar sobre los especímenes de concreto expuestos en las estaciones de ensayo natural.

Inicialmente, el proyecto DURACON estableció que los especímenes de concreto con acero de refuerzo se expondrían en las estaciones de ensayo natural por un período de hasta cuatro años. Durante este período, se realizarán ensayos para determinar ciertos parámetros de durabilidad, como se especifica a continuación:

1. Potencial de media celda (ASTM C 876).
2. Potencial de corrosión y Resistencia de Polarización Lineal (GECOR).

La medición del potencial de media celda (E_{corr}), velocidad de corrosión (i_{corr}) y la resistividad del concreto (ρ) se determinaron al menos una vez al año, empleando el Gecor 6™. La i_{corr} fue obtenida usando la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal (R_p) [3]. Las probetas fueron colocadas en la estación con una cara orientada hacia los vientos predominantes (cara expuesta, CE), y la otra cara resguardada de los vientos predominantes (cara resguardada, CR), realizando la evaluación electroquímica en ambas caras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potenciales de corrosión

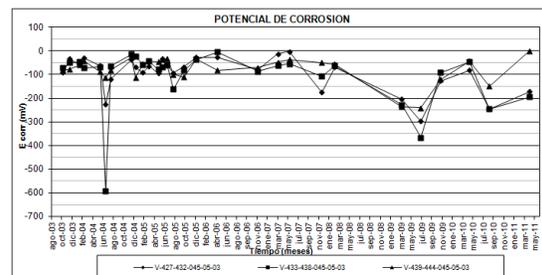
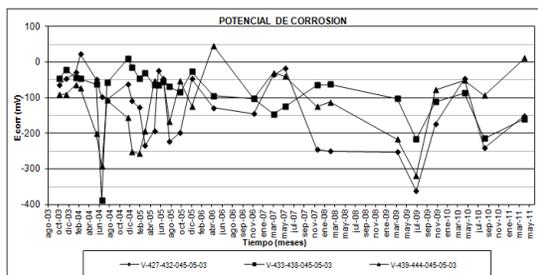
El análisis de los valores de potencial obtenidos de cada uno de los especímenes en estudio, se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876-91 (ver tabla 1) [4].

Tabla 1. Interpretación de resultados de acuerdo a la norma ASTM C-876-91

Potencial E_{corr} (mV)	Riesgo de daño
> -200	10% de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
< -350	90% de probabilidad de corrosión

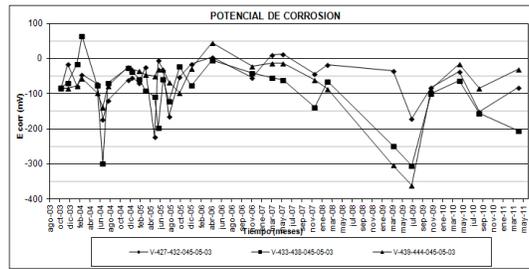
En la figura 4 (a-c) se muestran las gráficas correspondientes al comportamiento del potencial de corrosión en la cara resguardada de las vigas 1,2 y 3 (relación a/c de 0.45); durante los 9 años de exposición en la estación de Morelia. Se observa una mayor variación en los valores correspondientes a las barras con recubrimiento de 30 mm y 15 mm, mientras que la viga con recubrimiento de 20 mm se comporta de manera más homogénea.

De acuerdo con la tabla mostrada anteriormente, para el año 2004, se alcanzan valores superiores a -350 mV lo que indica la posible formación de una película pasiva sobre las varillas de acero, posteriormente se observa una oscilación entre los valores de -200 mV y -350 mV que de acuerdo con la tabla anterior se tiene una incertidumbre de encontrar corrosión en el acero. En la figura 5 (a-c) se muestra el comportamiento del potencial de corrosión de las vigas con a/c = 0.65, observándose de igual manera que en las vigas con a/c = 0.45 que en 2004, se presenta en todas las barras una probabilidad del 95% [5] que se haya desarrollado corrosión debido a que se superan los -350 mV.



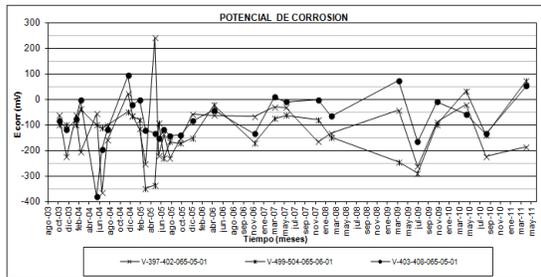
a) Relación a/c: 0.45, recubrimiento 30 mm

b) Relación a/c: 0.45, recubrimiento 20 mm

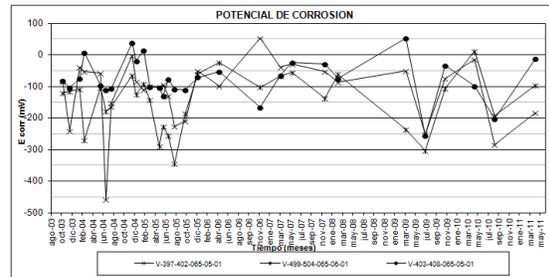


c) Relación a/c: 0.45, recubrimiento 15 mm

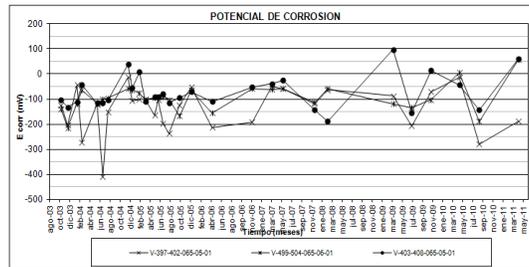
Figura 4.- Comportamiento del potencial en las vigas 1 – 3



a) Relación a/c: 0.65, recubrimiento 30 mm



b) Relación a/c: 0.65, recubrimiento 20 mm



c) Relación a/c: 0.65, recubrimiento 15 mm

Figura 5.- Comportamiento del potencial en las vigas 4 – 6

Posteriormente, se observa que en las barras con recubrimiento de 30 y 20 mm se presenta una oscilación entre los valores de -200 y -350 mV, lo que indica que hay incertidumbre de que la corrosión siga presentándose, mientras que las barras con recubrimiento de 15 mm reflejan solamente el 10% de que exista corrosión.

Velocidades de corrosión

El análisis de las graficas de i_{corr} obtenidas de cada una de las vigas en estudio, se realizó de acuerdo al manual editado por la Red DURAR (ver tabla 2) [1].

Tabla 2. Clasificación de i_{corr} en términos de vida útil (Red DURAR)

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable

0.1 – 0.5	Moderado
0.5 - 1	Elevada
> 1	Muy elevada

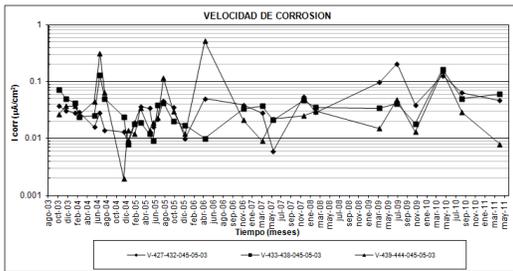
La figura 6 (a-c) muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión en las vigas 1-3 con $a/c = 0.45$, que de acuerdo con la tabla 2, predomina un nivel de corrosión moderado en la mayor parte del tiempo de exposición, presentándose registros de corrosión elevada para el 2004 en los 3 recubrimientos. Para el caso de las vigas 4-6 con $a/c = 0.65$ se encontró una situación similar en la que prevalece un nivel de corrosión moderado.

Parámetros ambientales

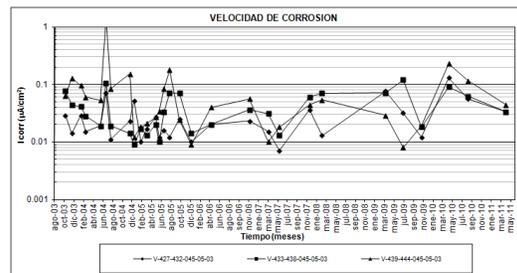
En las figuras 7-9 se muestra el registro de los parámetros ambientales (temperatura, precipitación y humedad relativa) correspondientes a la estación de Angamacutiro, Mich. Debido a que es la estación más cercana al sitio de estudio.

La figura 7 muestra el registro de la temperatura a lo largo del periodo de exposición, observándose una temperatura promedio que varía de 15 y 21° C. En la figura 8 se observa el comportamiento de la precipitación, registrándose mayor precipitación en el año 2008.

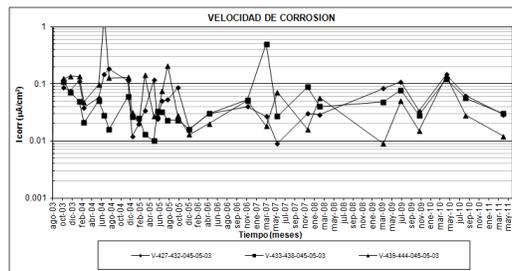
Respecto a la humedad relativa, se observa en la figura 9 que el promedio anual oscila entre el 40 y 85%, lo que indica que puede ser un factor ambiental que propicie la corrosión por carbonatación.



a) Relación a/c: 0.45, recubrimiento 30 mm



b) Relación a/c: 0.45, recubrimiento 20 mm



c) Relación a/c: 0.45, recubrimiento 15 mm

Figura 6.- Comportamiento del potencial en las vigas 1-3

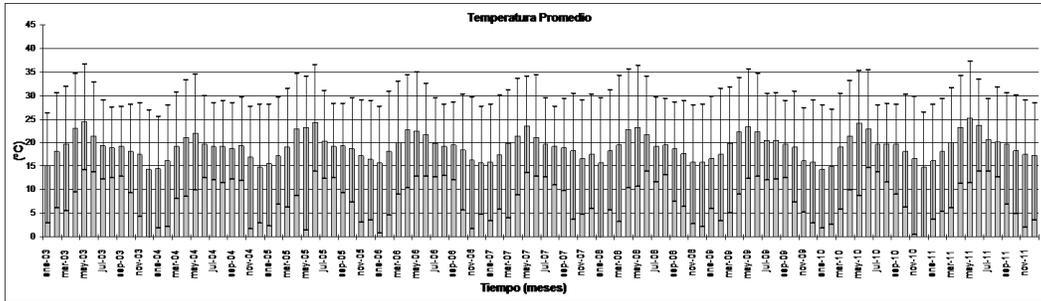


Figura 7.- Registro de temperatura

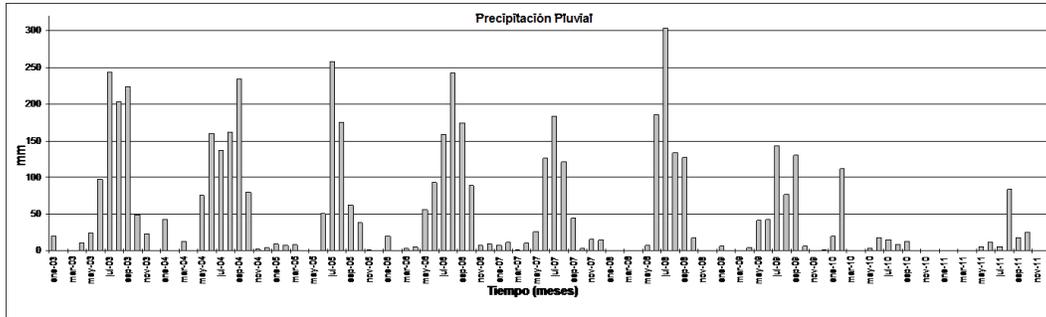


Figura 8.- Registro de precipitación

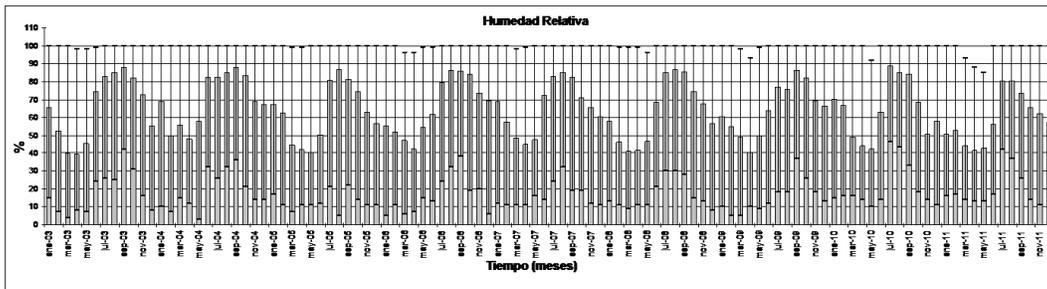


Figura 9.- Registro de humedad relativa

Análisis de correlación

Se llevó a cabo un análisis de correlación entre las variables electroquímicas y los parámetros ambientales descritos anteriormente, encontrándose una mayor correlación entre la humedad relativa y la velocidad de corrosión, sin embargo esta información no es suficiente para obtener conclusiones y/o modelos para predecir el comportamiento de la corrosión en las probetas expuestas.

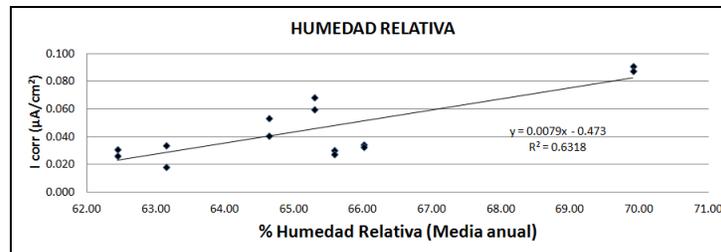


Figura 10.- Correlación de % de humedad relativa VS icorr

En la figura 10, se muestra la correlación efectuada entre la humedad relativa media anual (HRMA) y la velocidad de corrosión con los datos correspondientes a las varillas de refuerzo con recubrimiento de 20 mm., encontrándose un coeficiente de correlación de 0.63. Sin embargo se debe tomar en cuenta que el rango de variación de la HRMA es de apenas 9% por lo que la pendiente en la recta de regresión es casi despreciable. En la actualidad se están revisando los resultados de otras estaciones del Proyecto DURACON-México, que cuenta con 15 estaciones en total. Las variaciones de la HRMA de todas las estaciones mexicanas podrán definir cual de los parámetros ambientales son los más significativos para pronosticar el comportamiento electroquímico del acero en estos tipos de concreto usado en el Proyecto DURACON México.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la literatura consultada y la normativa correspondiente, los valores de E_{corr} e i_{corr} que se obtuvieron en el año 2004 en la mayoría de las varillas de refuerzo, se presenta un estado de corrosión moderado, por lo que es probable que se haya formado una película pasiva el óxido formado de tal manera que el refuerzo no continuó corroyéndose en los años subsecuentes.

Se presenta una mayor variación en los datos electroquímicos obtenidos de las probetas fabricadas con cemento de relación a/c de 0.45 con respecto a las de relación a/c de 0.65.

Hasta la fecha, no se han encontrado tendencias apreciables con respecto a las variables electroquímicas y los parámetros ambientales estudiados en la estación de Morelia. Se está trabajando con los resultados de las otras 14 estaciones del Proyecto DURACON México para determinar la posible dependencia de la velocidad e corrosión con los parámetros electroquímicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la participación de la Dra. Oladis Troconis de Rincón por el apoyo para que este grupo participe en las actividades del Proyecto XV.3 DURACON de CYTED. También los autores agradecen la participación del Centro Tecnológico del Concreto de la empresa Holcim APASCO, en la fabricación de los especímenes de concreto.

REFERENCIAS

- [1] O. Trocónis de Rincón y Miembros de la Red DURAR. "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado". CYTED. ISBN 980-296-541-3 Maracaibo, Venezuela. 1997 (1era. Edición). 1998, 2da. Edición.
- [2] F.J. Olguín Coca et al. Influencia de Factores Ambientales y Electroquímicos en la Durabilidad del Hormigón. Port. Electrochim. Acta, Coimbra, v. 22, n. 4, 2004
- [3] S. Feliú, J. A. González, C. Andrade, V. Feliú, Determining polarization resistance in reinforced concrete slabs, Corros. Sci, 29, 105 (1989).

[4] American Society for Testing and Materials, (1991), ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM, Philadelphia, USA.