

INSPECCION DE LA CORROSION EN PUENTES DE CONCRETO REFORZADO MEDIANTE UN MONITOREO AUTONOMO A DISTANCIA INSPECTION OF CORROSION IN REINFORCED ONCRETE BRIDGES BY AUTONOMOUS REMOTE MONITORING

Por / By José Castañeda, Fecundo Almeraya, Citlalli Gaona, Gregorio Vásquez, Alberto Martínez

Resumen

En este trabajo de investigación se establece un sistema de conservación de puentes de concreto reforzado, a través de un monitoreo autónomo a distancia, instalando sensores de corrosión y transmitiendo las señales por radio módem de manera inalámbrica en tiempo real, con la finalidad de corregir oportunamente los daños causados por la corrosión en ambientes marinos. El estudio se basa en una evaluación y diagnóstico completos de puentes empleando técnicas de Mapeo de Potenciales de Corrosión (ASTM C876) y Resistencia a la Polarización (ASTM G59). Con este sistema se podrán instrumentar puentes de concreto reforzado, sin afectar la integridad estructural y conservando la estética de las estructuras. También se podrá contar con un historial permanente del comportamiento de las estructuras en servicio, para cada época del año de manera continua; y conocer la vida residual de dichas estructuras; Además con esta investigación se eliminarán los mantenimientos no programados.

Palabras clave: *puentes, corrosión, concreto reforzado, electroquímica, monitoreo autónomo, inspección de puentes, mantenimiento, durabilidad, potencial de corrosión, velocidad de corrosión, transmisión de datos a distancia, alarma en tiempo real, vigilancia continua.*

Abstract

In this investigation we establish a conservation system for reinforced concrete bridges, through autonomous remote monitoring, installing corrosion sensors and transmitting the signs for wireless radio modems in real time, with the purpose of timely correcting the damages caused by corrosion in marine environments. The study is based on a complete evaluation and diagnosis of bridges using electrochemical techniques like Corrosion Potential Mapping (ASTM C876) and Polarization Resistance (ASTM G59). Using this system, it becomes possible to install instruments in reinforced concrete bridges, without affecting the structural integrity and preserving the aesthetics of the structures. Furthermore, it is also now possible to have a permanent track record of the performance of the structures in service, on a continuous basis for each season of the year, and to know the residual life of such structures. In addition, this study will contribute to eliminate non-programmed maintenance activities.

Keywords: *bridges, corrosion, reinforced concrete, electrochemical, autonomous monitoring, bridges inspection, maintenance, durability, corrosion potential, corrosion rate, remote data transmission, real time alarm, continuous surveillance.*

1. INTRODUCCION

Parte muy importante de las estructuras de concreto está reforzada con varilla de acero, y la corrosión de este refuerzo es la causa principal del deterioro de las mismas, ocasionando tanto pérdidas materiales como humanas. Uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad estructural de las obras civiles como puentes, túneles, carreteras, muelles, etc., de un país, es la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

El reporte Hoar (Hoar, 1971), calculó pérdidas por corrosión en el *Reino Unido* de 250 millones de libras esterlinas en el sector de la construcción. La *NACE (National Association of Corrosion Engineers)* en 1985, estimó que en los *Estados Unidos de Norteamérica*, existen 300,000 puentes que requieren protección catódica. Y necesitan aproximadamente \$23.1 billones de dólares tanto para reparaciones como para protección catódica; con lo anterior se rescatarían \$89 billones de dólares (Wyatt, 1993). En un estudio realizado recientemente por el *Batelle Institute*, en los *Estados Unidos de Norteamérica*, los costos por corrosión son de \$300 billones de dólares al año. (Graves, 1998).

Este trabajo de investigación tiene como propósito principal, establecer un sistema de conservación de puentes de concreto reforzado, a través de un monitoreo autónomo a distancia, instalando sensores de corrosión y transmitiendo las señales por radiomodems de manera inalámbrica en tiempo real, con la finalidad de corregir oportunamente los daños causados por la corrosión en ambientes marinos. El estudio se basa en una evaluación y diagnóstico completos de puentes, empleando las técnicas de mapeo de potenciales de corrosión con norma ASTM C 876 (ASTM C876, 1991; ACI 222R, 1996) y resistencia a la polarización lineal de acuerdo a norma ASTM G59 (ASTM G59, 1992).

Con este sistema se podrán instrumentar puentes (ya construidos) de concreto reforzado, sin afectar la integridad estructural y conservando la estética de las estructuras. También se podrá contar con un historial permanente del comportamiento de las estructuras en servicio, para cada época del año de manera continua y conocer la vida residual de dichas estructuras; además con esta investigación se eliminarán los mantenimientos no programados. (Rodríguez, 1991; Romero, 1991)

Con lo anterior se evitarán consecuencias de desastre, teniendo ahorros económicos y de tiempo, mediante una supervisión a distancia, automatizada y continua, sin necesidad de enviar frecuentemente a personal de inspección de puentes; se reducirán en gran medida los mantenimientos no programados (ACI 345. 1R, 1997; ACI 546.1R, 1997). También se contará con un historial completo del puente en operación así como un diagnóstico del estado actual de la estructura. (Balaguer, 1991)

El puente “*El Presidio Auxiliar*”, motivo del estudio, se construyó en 1955 y se encuentra a cargo de la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)*, y se localiza en el *Poblado Villa Unión*, cerca del *Puerto de Mazatlán*, en el Estado de *Sinaloa*. Esta estructura es considerada de gran importancia, ya que une el tránsito vehicular del centro del País con el Estado de *Sinaloa*. (ver *Figura 1*)



Figura 1. Ubicación y vista del puente "El Presidio Auxiliar"

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología consistió en evaluar y diagnosticar un puente de concreto reforzado cerca de un medio marino. Además se realizó un examen visual detallado del puente, posteriormente se localizó el acero de refuerzo de la estructura, continuándose con la medición de técnicas electroquímicas empleando mapeo de potenciales de corrosión (ASTM C876) y resistencia a la polarización (ASTM G59), en las zonas más representativas. Estos procedimientos se detallan como sigue.

2.1. Inspección Visual Detallada

La investigación de campo se realizó mediante procedimientos eficiente, sistemáticos y organizados, para minimizar la posibilidad de pasar por alto cualquier elemento del puente. Las observaciones se hicieron claras y detalladas (croquis y fotografías), de manera que pudieran interpretarse debidamente en fechas posteriores al elaborar el reporte final (Trocónis, 1997; SCT, 1988; SCT, 1995)

La inspección visual detallada del puente se desarrolló de la siguiente manera:

- Recorrido general del puente.
- Elaboración y llenado de formatos para determinar el estado físico de la estructura.
- Elaboración de una ficha de antecedentes de la estructura y del medio ambiente.
- Levantamiento de daños de cada elemento, así como toma de muestras.

2.2. Localización del Acero de Refuerzo

Fue necesario detectar la ubicación y profundidad del acero de refuerzo embebido en el concreto para cada elemento de la estructura (pilas y estribos). El equipo detector de varilla empleado se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Equipo detector de varilla en concreto

2.3. Medición de Potenciales

Consistió en tomar lecturas del potencial de corrosión (ASTM C876) del acero de refuerzo del concreto (pilas y estribos del puente), mediante el empleo de electrodos de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4). Estas mediciones sirvieron para establecer el área de cambio de potencial mediante un mapeo completo de potenciales (ACI 222R, 1996).

La medición de potenciales de corrosión se realizó de la siguiente manera:

- a) Una vez localizada la armadura (acero de refuerzo), se limpió el área seleccionada del elemento así como el acero expuesto para la conexión.
- b) Localizada la distribución del acero, se trazó sobre la superficie del concreto, una cuadrícula con espaciamientos uniformes entre nodos de 50 cm (ver Figura 3).
- c) Se conectó el electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 al negativo del voltímetro; en tanto el acero de refuerzo expuesto se conectó al cable positivo del voltímetro.
- d) En la Figura 4 y Figura 5, se muestra la manera en que se realizaron estas mediciones.
- e) Finalmente se elaboró un plano de la superficie de cada elemento, y se colocaron los valores de potenciales de cada nodo de la cuadrícula. Hecho lo anterior se trazaron líneas de isopotenciales de cada nodo hasta elaborar un mapa de potenciales. Estas gráficas pueden ser observadas en la sección de resultados.

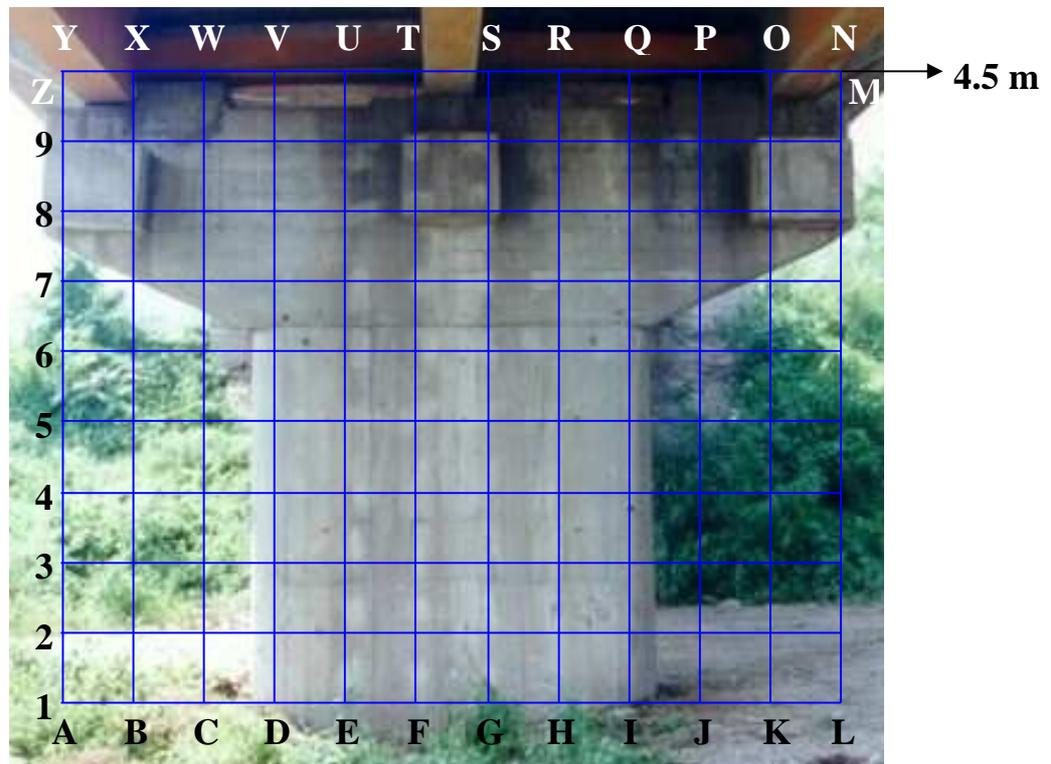


Figura 3. Cuadrícula de mediciones de las pilas (vista frontal).



Figura 4. Medición de potenciales en pila hasta 4.5 m.



Figura 5. Medición de velocidad de corrosión empleando el GECOR 6.

2.4. Medición de Velocidad de Corrosión

Para las mediciones de velocidad de corrosión se empleó una cuadrícula, similar a la utilizada en la medición de potenciales, con espaciamientos entre nodos de 100 cm.

Estas mediciones se realizaron en base a la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización, R_p (ASTM G59), empleando equipos científicos como son los potencióstatos/galvanostatos, instrumentos capaces de medir la Resistencia a la Polarización (R_p), que se relaciona con intensidad de corrosión (i_{corr}), a través de la ecuación de Stern y Geary (Stern, 1957; Trocónis, 1997; Rodríguez, 1991).

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}} \quad (1)$$

donde:

$$B = \text{constante}^1 (26 - 52 \text{ mV})$$

$$R_p = \Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$i_{corr} = \mu\text{A} / \text{cm}^2$$

La Resistencia a la Polarización resulta de aplicar una pequeña perturbación eléctrica a las armaduras, y medir el cambio de potencial o intensidad que se produce. Estas perturbaciones no deben causar un cambio mayor de $\pm 20 \text{ mV}$.

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (2)$$

Los valores obtenidos en $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ se pueden transformar en pérdida de espesor/tiempo mediante la Ley de Faraday.

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{año}} = \left(\frac{M}{\delta n F} \right) i_{corr} \approx 11.6 i_{corr} \quad (3)$$

en donde:

M = masa atómica del metal

n = número de electrones transferidos

F = constante de Faraday (96,500 Coulombios)

δ = densidad del metal

Los equipos empleados fueron los siguientes, ver Figura 6:

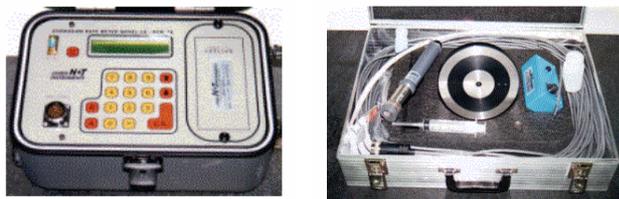


Figura 6. Equipo de corrosión GECOR 6

¹ Para ensayos de campo se aconseja el valor de 26 mV, el cual corresponde a armaduras corroyéndose.

3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Medición de Potenciales de Corrosión

Los valores de potencial indican la probabilidad acerca de la corrosión que se esté presentando en el acero estructural (varilla, estribos), pero es muy importante que estos datos sean interpretados adecuadamente considerando la información que pueda recopilarse acerca de las condiciones climatológicas y ambientales circundantes, así como de la calidad de los materiales.

En la Tabla 1, se muestran los criterios de evaluación de potenciales del acero de refuerzo en el concreto, empleando el electrodo de referencia de Cu/CuSO₄.

Tabla 1. Criterios de evaluación empleados en el mapeo de potenciales de corrosión (Trocónis, 1997)

Condición	Potencial (mV)	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	0.200 a -0.200	Ausencia de Cl ⁻ PH > 12.5 H ₂ O (HR↑)	Despreciable
Corrosión localizada	-0.200 a -0.600	Cl ⁻ , O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Alto
	-0.150 a -0.600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Moderado alto
Corrosión uniforme	0.200 a -0.150	Carbonatado O ₂ , seco (HR↓)	Bajo
	-0.400 a -0.600	Cl ⁻ elevado, H ₂ O ó carbonatado H ₂ O (HR↑)	Alto
	< -0.600	↑Cl ⁻ elevado, H ₂ O↑ (sin O ₂)	Despreciable

Analizando cada una de las gráficas de potenciales, se pueden conocer las zonas de los elementos (pilas y estribos) con mayor probabilidad de ser corroídas. Por ejemplo en las Figuras 7, 8, 9 y 10, se observa que los potenciales más negativos se encuentran en las partes inferiores y superiores de las pilas.

De los dos estribos, el que resultó con potenciales más negativos fue el Estribo 2, principalmente en la parte inferior. Nótese que los valores más críticos en los dos estribos no sobrepasan el intervalo de -250 a -200 mV (Figura 11).

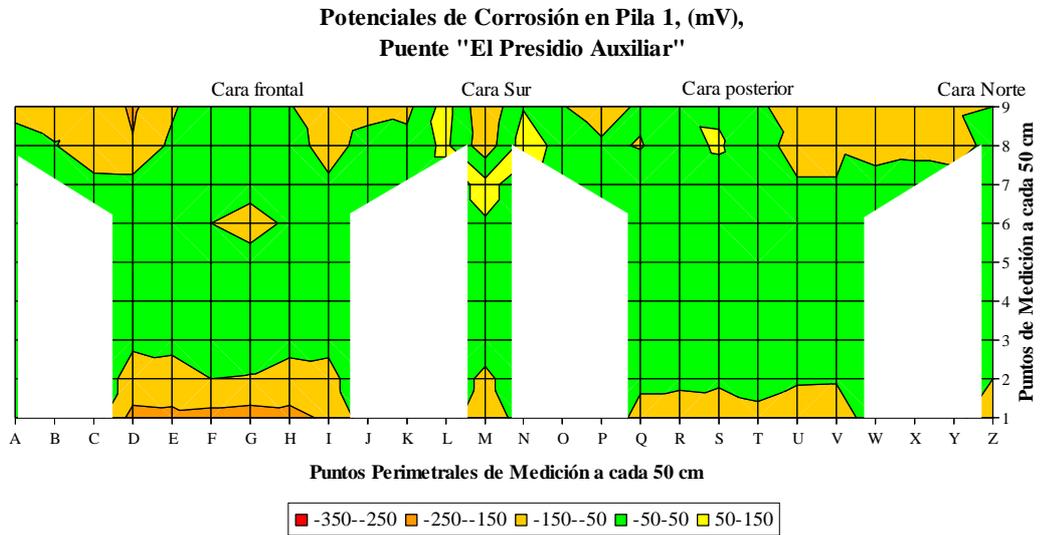


Figura 7. Líneas de isopotenciales en Pila 1

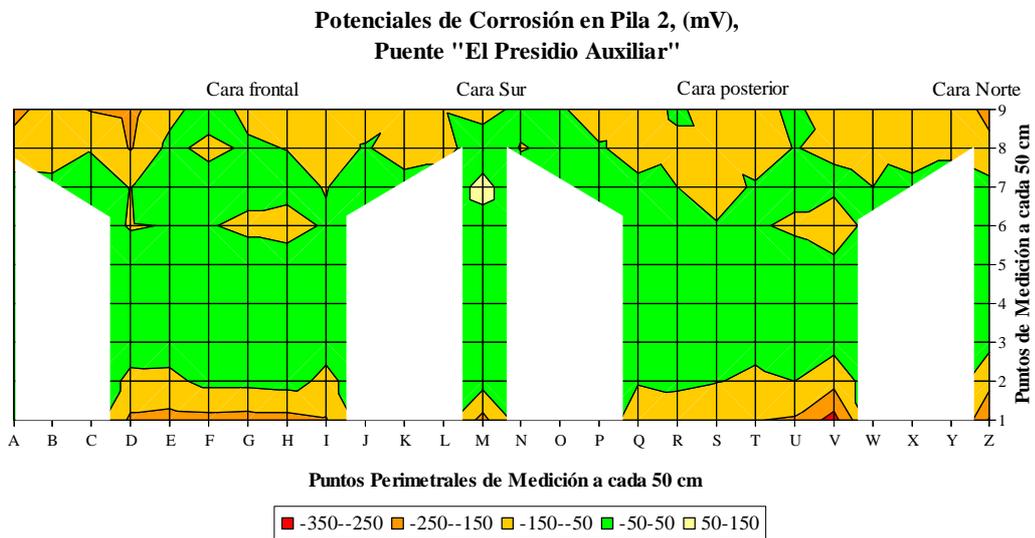


Figura 8. Líneas de isopotenciales en Pila 2

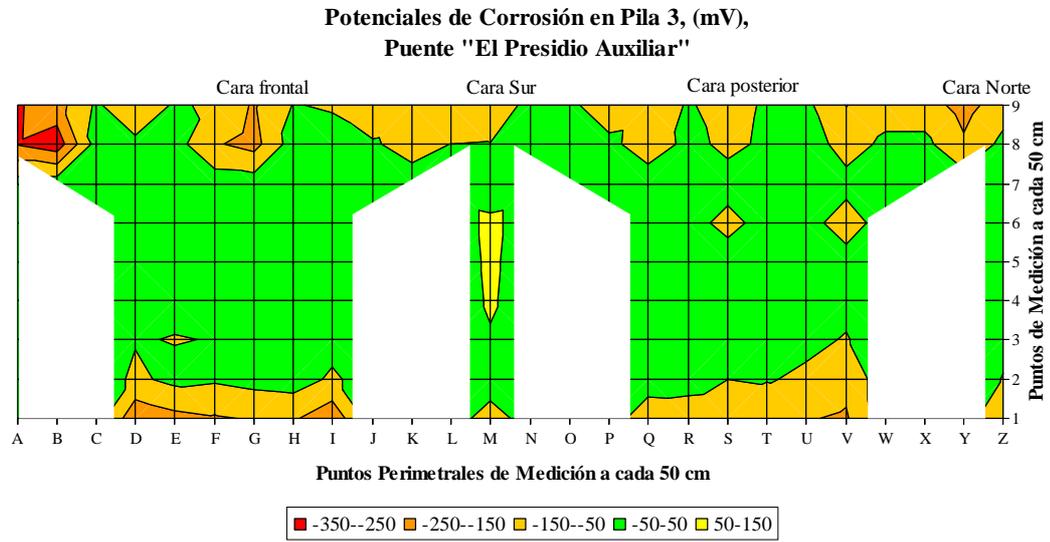


Figura 9. Líneas de isopotenciales en Pila 3

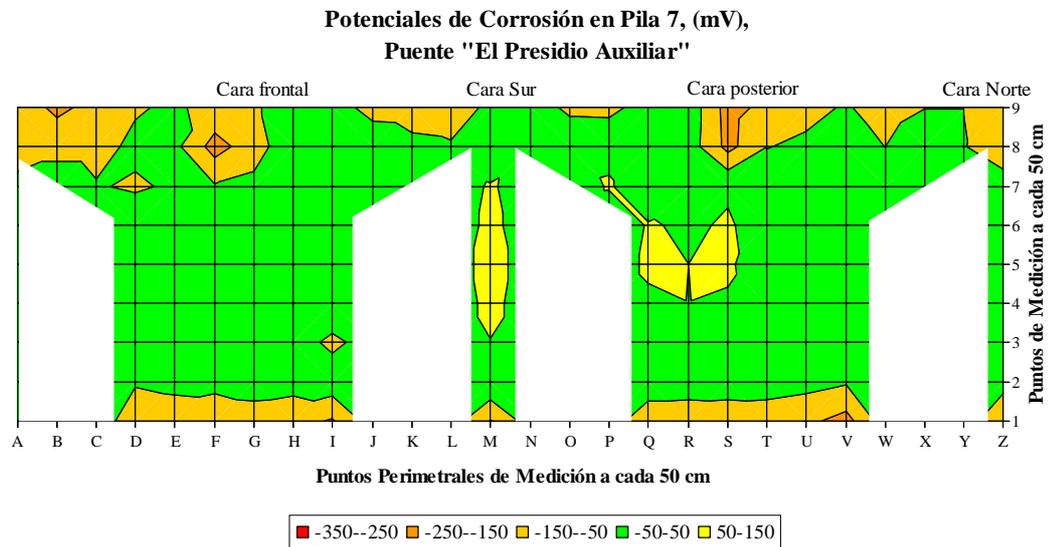


Figura 10. Líneas de isopotenciales en Pila 7

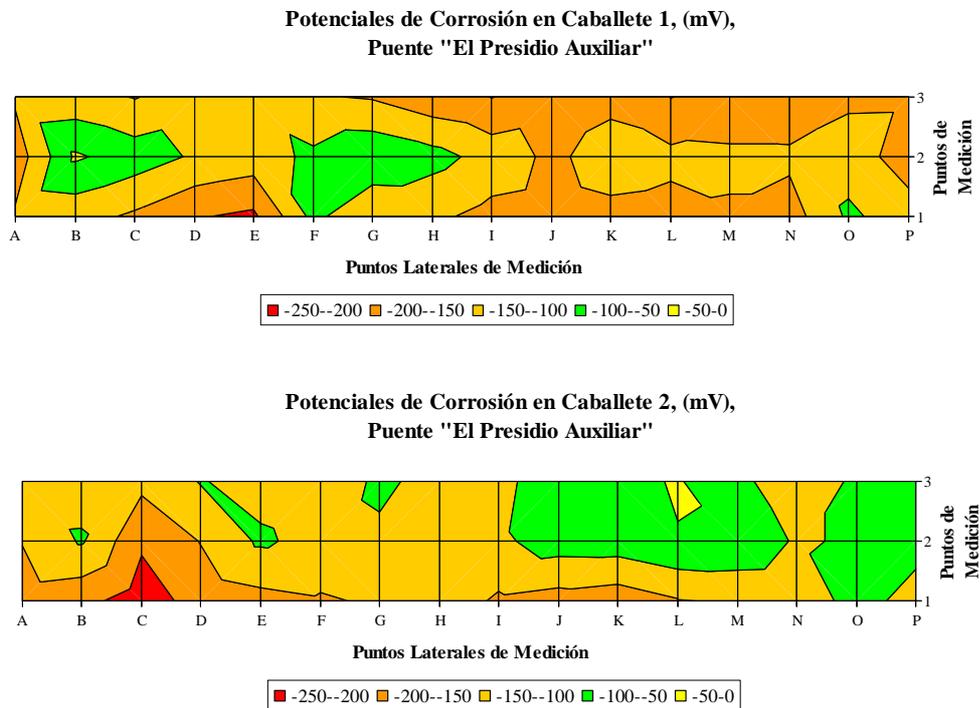


Figura 11. Líneas de isopotenciales en Estribo 1 y Estribo 2 (cara frontal)

Analizando los resultados obtenidos de cada una de las pilas y estribos, se encontró que las pilas con potenciales más negativos son las pilas 2 y 3; y en los estribos el número 2 es el que presentó potenciales más negativos en la parte inferior del elemento.

Se puede puntualizar que la zona de mayor problema, que presenta los potenciales más negativos, se encuentra en la parte inferior (contacto del elemento de concreto con el suelo y agua de lluvia), y superior de las pilas (escurrimientos de la superestructura a la subestructura).

3.2. Medición de la Velocidad de Corrosión

Analizando las gráficas de la velocidad de corrosión obtenidas de algunas pilas, se observa que los valores más críticos se presentaron en las caras frontales (Oeste – Este), y en la parte superior de las Pila 1 y Pila 2, es decir, se encuentra en corrosión moderada, por tener valores de $(0.1 - 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2)$. En tanto las otras pilas presentaron valores de $i_{\text{corr}} < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, siendo la corrosión despreciable (véase Tabla 2).

En todos las pilas monitoreadas se registró mayor i_{corr} en las partes superiores. Debido a los escurrimientos de agua en la losa (Figuras 12, 13, 14 y 15).

Tabla 2. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil (Trocónis, 1997)

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	$i_{corr} \times 0.0116$ (mm/año)	Grado de Corrosión
< 0.1	< 0.00116	Despreciable
0.1–0.5	0.00116–0.0058	Moderado
0.5–1	0.0058–0.0116	Elevada
>1	>0.0116	Muy elevada

Velocidad de Corrosión en Pila 1

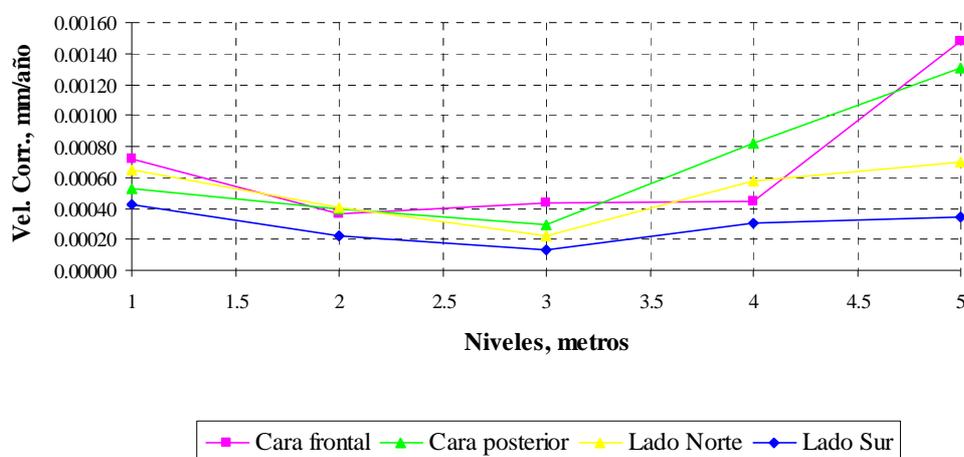


Figura 12. Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la altura de las pilas, Pila 1

Velocidad de Corrosión en Pila 2

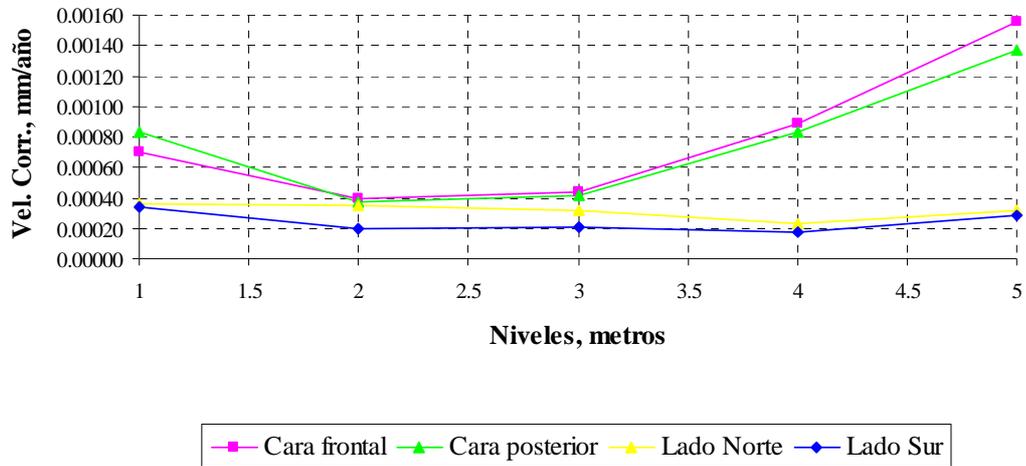


Figura 13. Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la altura de las pilas, Pila 2

Velocidad de Corrosión en Pila 3

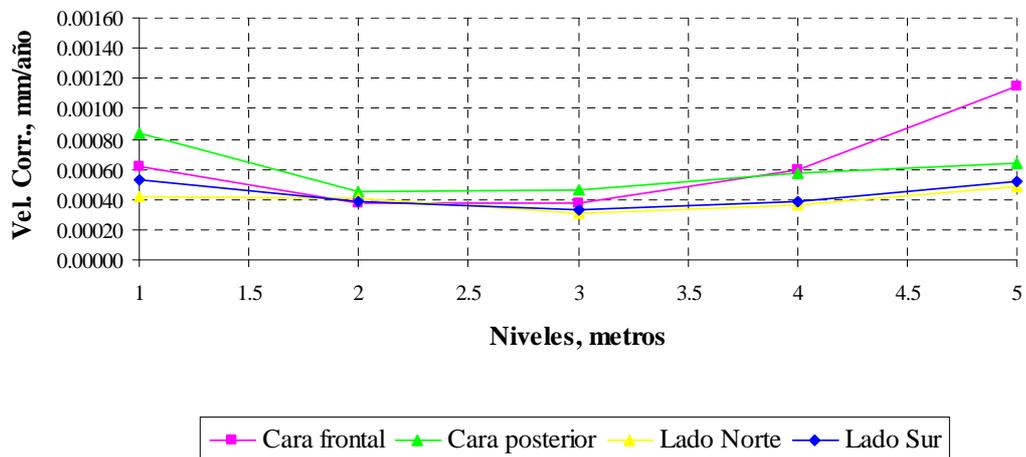


Figura 14. Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la altura de las pilas, Pila 3

Velocidad de Corrosión en Pila 7

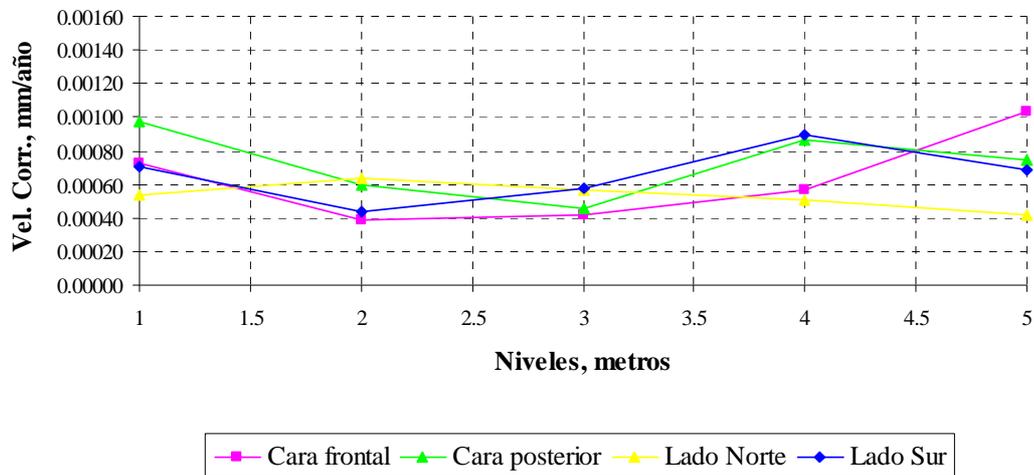


Figura 15. Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la altura de las pilas, Pila 7

Después de conocer el estado actual del puente “*El Presidio Auxiliar*”, mediante una inspección visual (STC, 1988) y el uso de técnicas electroquímicas, se continúa actualmente desarrollando la programación a distancia de dicho monitoreo.

El sistema instalado (instrumentación del puente), consta de electrodos de referencia embebidos en el concreto y colocados estratégicamente en diversos puntos de la estructura. Las señales de voltaje y corriente se procesan (discretizan y multiplexean), a un radio módem transmisor/receptor, el cual envía la señal a otro radio módem transmisor/receptor (Broomfield, 2000).

Será necesario continuar con mediciones en el puente, para conocer el comportamiento que tiene la corrosión en las diversas épocas del año.

Se destaca la importancia que tiene la conservación de puentes para prevenir que los daños causados por los agentes ambientales y por las cargas rodantes disminuyan las condiciones de servicio, provocando caos o insuficiencia de la red vial de transporte. El esquema mostrado en la Figura 16 ilustra el proceso de transmisión/recepción de datos en tiempo real, a distancia y de manera continua.

<i>Principales dispositivos de monitoreo</i>	<i>Información técnica</i>	 <p data-bbox="1107 994 1420 1021">Instrumentación de columnas</p>
 <p data-bbox="220 600 547 656">Radio Modem RS-232/RS-485 interfaces</p>	<p data-bbox="563 398 1018 645">Dimensiones: 60mm × 120mm Rango de frecuencia: 2.4 a 2.48 GHz Temperatura de operación: 0°C a 70°C Consumo de energía: 4 Watts, 10 a 30 V_{CD} Buffer: 8 K Bytes Velocidad de transmisión: 1 Mbps Alcance máximo: 20 Km</p>	
 <p data-bbox="228 999 539 1055">Electrodos de referencia para concreto</p>	<p data-bbox="563 689 1026 1003">Dimensiones: 38.1mm de diámetro y 177.8 mm de longitud. Cable: 15 m # 14 tipo RHH-RHW Material: cerámica con membrana de retención de humedad. Estabilidad: 5 mV con 3.0 µA Temperatura de operación: -23°C a 80°C Tipos: Cu/CuSO₄, Ag/AgCl, Zn/ZnSO₄ Relleno de gelatina: Cu, Ag, Zn</p>	



Figura 16. Monitoreo autónomo a distancia de la corrosión en puentes de concreto reforzado en ambientes marinos. Transmisión y recepción de datos en tiempo real

4. CONCLUSIONES

- En cuanto al mapeo de potenciales; donde se presentaron los potenciales más negativos fueron en las pilas 2, 3 y 4. En las gráficas de potenciales se observa que los registros de voltaje más negativos se presentaron en las partes inferiores (contacto con el suelo) y superiores de las pilas (escurrimientos de agua). El riesgo de daño, de acuerdo con la Tabla 1, es bajo y en algunos casos localizados; pues los rangos de potenciales registrados, en las pilas más críticas, fluctúan de +73 a -304 mV (Pila 3), +73 a -290 mV (Pila 2). Otras pilas registraron valores favorables de potenciales de +137 mV (Pila 6).
- Los valores más elevados de velocidad de corrosión se presentaron en los niveles más altos de las caras frontales (Oeste - Este), y posteriores con valores máximos de $0.127 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, es decir 0.0014732 mm/año (ver Figura 11 y Figura 12). Mientras que todos los valores obtenidos en las pilas restantes, fueron inferiores a los $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ó 0.00116 mm/año ; indicando con ello que las velocidades de corrosión son despreciables, sin embargo no por ello se deben dejar de estudiar estas estructuras, ya que se puede monitorear en un periodo de tiempo considerable para ver el comportamiento de los elementos, pues las condiciones imperantes son desfavorables para las estructuras de concreto reforzadas (humedad, lluvia, ambiente marino).
- Las pilas del puente se encuentran en buenas condiciones debido a la calidad del concreto. Aún estando el puente en un ambiente agresivo salino el refuerzo no demostró tener problemas de corrosión severa.
- Con un monitoreo autónomo a distancia de puentes se conocerá con certeza el comportamiento de la corrosión y el estado actual de las estructuras, sin necesidad de enviar frecuentemente a personal inspector de puentes y especialistas en corrosión. Este sistema de conservación de puentes evitará consecuencias de desastre, al detectar oportunamente posibles anomalías; por lo que se tendrán ahorros económicos y de tiempo. Otro aspecto importante del sistema es evitar cierres del tránsito por mantenimientos no programados.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado al Centro SCT-Sinaloa y su Director Ing. Julio César Huerta Flores, así como al Ing. Wilfrido García e Ing. Francisco López Picos por las facilidades otorgadas para el presente estudio. También se agradece al CIMAV y en particular al M.C. Adán Borunda Terrazas, M.C. Víctor Orozco Carmona, M.I. Alfredo Barraza Tirado, y M.I. Demetrio Nieves Mendoza.

6. REFERENCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1996), *Corrosion of Metals in Concrete (ACI 222R-96)*. American Concrete Institute, U.S.A.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1997), *Routine Maintenance of Concrete Bridges (ACI 345.1R-92)*, American Concrete Institute, U.S.A.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1997), *Guide for Repair of Concrete Bridges Superstructures (ACI 546.1R-80)*, American Concrete Institute, U.S.A.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991), *ASTM C876-91: Standard Test Method for Polarization Resistance Measures*. ASTM, Detroit, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1992), *ASTM G59-92: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM, Philadelphia, USA.
- BALAGUER C. E. Y CUVILLO J. R. (1991), *Conservación, Rehabilitación y Gestión de Puentes, en I Simposio Nacional*, Dirección de carreteras, Asociación Técnica de Carreteras y Asociación Técnica Española del Pretensado, Madrid, España.
- BROOMFIELD, J. P., DAVIES K. Y HLADKY K. (Julio de 2000), *Permanent Corrosion Monitoring in New and Existing Reinforced Concrete Structures*, Materials Selection & Design Vol. 39, No. 7, U.S.A., págs. 66-71.
- GRAVES, B. Y WALKER, S. (1998), *AST Combats Corrosion*, U.S.A. Process Performance, diciembre de 1998.
- HOAR T. P. (1971), *Report of The Committee on Corrosion and Protection*, Dept. Of Trade and Industry. HMSO, London.
- RODRÍGUEZ S. J. (1991), *Aplicación de la Medida de la Velocidad de Corrosión de las Armaduras al Estudio de Estructuras de Hormigón, en: I Simposio Nacional sobre Conservación, Rehabilitación y Gestión de Puentes*, Dirección General de Carreteras; Asociación Técnica de Carreteras y Asociación Técnica Española del Pretensado, 18-20 de junio de 1991, Madrid, España.
- ROMERO M.O. (1991), *Conservación de Puentes en Seminario Internacional de Puentes*, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Octubre de 1991, Sanfandila, Querétaro.
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT). (1988), *Manual para Inspección y Conservación de Puentes, Tomo I y Tomo II*, Dirección General de Servicios Técnicos, . México, D.F., 259 págs.
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT). (1988), *Formato para Inspeccionar de Puentes y Pasos a Densivel*, Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Técnicos, México, D.F., 47 págs.
- STERN, M. Y GEARY, A. L. (enero de 1957), *Electrochemical Polarization, I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, en: Journal of the Electrochemical Society*. Electrochemical Society. Niagara Falls, New York, págs. 56-63.
- TROCÓNIS DE R. O. (1997), *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, DURAR Red Temática XV.B. Durabilidad de la Armadura "DURAR", Río de Janeiro, 195 págs.
- WYATT, B.S. (1993), *Cathodic Protection of Steel in Concrete*, Corrosion Science, Vol. 35, Great Britain, pág. 1601.

José Castañeda

*Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería en Vías Terrestres
Estudiante de Doctorado en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
División de Deterioro de Materiales e Integridad Estructural / Grupo Corrosión
México*

*Civil Engineer, Master in Engineering Transport Systems
Doctorate Student in Material Science
Advanced Materials Research Center
Division of Deterioration of Materials and Structural Integrity / Corrosion Team
Mexico
jose.castaneda@cimav.edu.mx*

Facundo Almeraya

*Ingeniero en Metalurgia, Doctor en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
División de Deterioro de Materiales e Integridad Estructural / Grupo Corrosión
México*

*Metallurgy Engineer, Ph. D. Material Science
Advanced Materials Research Center
Division of Deterioration of Materials and Structural Integrity / Corrosion Team
Mexico
facundo.almeraya@cimav.edu.mx*

Citlalli Tiburcio.

*Ingeniero en Metalurgia, Doctor en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
División de Deterioro de Materiales e Integridad Estructural / Grupo Corrosión
México*

*Metallurgy Engineer, Ph. D. Material Science
Advanced Materials Research Center
Division of Deterioration of Materials and Structural Integrity / Corrosion Team
Mexico
citlalli.gaona@cimav.edu.mx*

Gregorio Vázquez

Ingeniero en Electrónica

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

División de Deterioro de Materiales e Integridad Estructural / Grupo Corrosión

México

Electronics Engineer

Advanced Materials Research Center

Division of Deterioration of Materials and Structural Integrity / Corrosion Team

Mexico

gregorio.vazquez@cimav.edu.mx

Alberto Martínez Villafañe.

Licenciado en Físico-Matemáticas, Doctor en Ciencias de la Corrosión

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

División de Deterioro de Materiales e Integridad Estructural / Grupo Corrosión

México

Bechelor Science in Physics and Mathematics, Ph. D. In Corrosion Science

Advanced Materials Research Center

Division of Deterioration of Materials and Structural Integrity / Corrosion Team

Mexico

martinez.villafane@cimav.edu.mx