



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



**UNA EVALUACIÓN DE LAS REPARACIONES DE PILAS DE CONCRETO DAÑADAS  
POR CORROSIÓN UTILIZANDO ENCAPSULAMIENTOS DE FIBRA DE VIDRIO**

Andrés A. Torres Acosta,<sup>1,2</sup> José T. Pérez Quiroz<sup>1</sup> y Angélica de L. del Valle Moreno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Mexicano del Transporte, Km 12+000 Carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila,  
Querétaro. C.P. 76700

<sup>2</sup>Universidad Marista de Querétaro, Marte No. 2, Col. Centro, Querétaro, Querétaro

**RESUMEN**

Desde los años cuarenta se han utilizado en EEUU sistemas de encapsulamientos conocidos como encamisados en la reparación de subestructuras de concreto, ubicadas en ambiente marino, dañadas por el efecto de la corrosión del acero de refuerzo o presfuerzo. Este estudio presenta una discusión objetiva del uso de estos sistemas y la migración hacia otros sistemas que disminuyen o paran por completo la degradación paulatina de estas estructuras por la corrosión del acero.

**Palabras clave:** Concreto, conservación, corrosión, degradación, durabilidad, encapsulamiento, puentes.

**ABSTRACT**

Since the forties in the US, pile jacket systems have been used to repair concrete substructures in marine environment, with corroded reinforcement or prestressed steel. This investigation presents an objective discussion regarding the use of such systems and the migration towards other systems which diminish or stop completely the degradation of these structures due to corrosion of the steel.

**Key words:** Concrete, maintenance, corrosion, degradation, durability, pile jackets, bridges.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



### INTRODUCCION

En términos generales, se sabe que la degradación de la infraestructura de concreto por corrosión del acero de refuerzo (o de pre-esfuerzo) se debe, principalmente, a la penetración de cloruros en ambiente marino o a la penetración de CO<sub>2</sub> en ambiente urbano. En el caso de la infraestructura expuesta a un ambiente marino se ha observado en estudios de campo en diversas partes del mundo, incluyendo México, que la corrosión se debe principalmente a la penetración en el concreto del ion cloruro y consecuentemente la activación del acero de refuerzo. Los productos de corrosión se expanden (ya que poseen una densidad menor que el metal de procedencia) produciendo agrietamientos y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto de las propias barras de acero.<sup>1</sup> Esta degradación no es únicamente del concreto, sino también del anclaje de la barra de acero en el concreto, disminuyendo la capacidad de carga de este material (Torres Acosta and Martínez-Madrid 2003).<sup>2</sup>

Para saber el estado de la infraestructura de transporte en lo que respecta a corrosión, personal de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) han realizado evaluaciones puntuales a diversas estructuras de concreto que presentan daños por corrosión: seis puentes en el estado de Veracruz, dos puentes en Campeche y Michoacán, uno en Baja California, Coahuila, Nayarit y Tamaulipas, y otros más en proceso de evaluación. Estas evaluaciones están siendo coordinadas por ambas instancias para que se realicen en conjunto y así el personal de la SCT obtenga experiencias de diagnóstico y evaluación por corrosión en la infraestructura del transporte.<sup>3-4</sup>

Este programa de evaluación por corrosión de puentes se ha extendido aún más, y a incluido a la infraestructura portuaria mexicana, propiedad de las Administraciones Portuarias Integrales (también llamadas API's). Desde el 2003 se han estado monitoreando diferentes muelles en México, no solo desde el punto de vista de corrosión sino también desde el punto de vista estructural.<sup>5</sup> En total se han evaluado cinco puertos desde que se amplió el proyecto a los puertos mexicanos: Guaymas, Manzanillo, Vallarta, Coatzacoalcos y Progreso.

Una vez conocido el daño en cada uno de los puentes a cargo de la SCT o los muelles de las API's y su patología, la siguiente etapa correspondería a la generación de los proyectos de rehabilitación de cada uno que presente estos daños. En esta etapa el IMT apoya a la SCT o a las API's en proponer y revisar los proyectos de rehabilitación. Estos proyectos se licitan de acuerdo a la normatividad de la SCT/API y en algunos casos, el IMT funge como asesor externo de la SCT en la revisión de dichos proyectos, para que se realizasen conforme a la normatividad existente de la SCT en este rubro.

De entre los sistemas de reparación que existen en la actualidad y que se han utilizado en México se encuentra el de encapsulamiento usando forros o camisas de materiales compuestos como fibras de vidrio. Este sistema ha sido empleado en varios países y se tienen los registros de algunas subestructuras marinas de puentes en donde se han colocado, principalmente en el estado de la Florida, en Estados Unidos de Norte América, así como en el estado de Campeche en México. Es por ello que este trabajo tiene como fin el discutir algunos puntos que han sido difíciles de comentar en México por la falta de trabajos publicados sobre el tema y que han



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



generado algunas especulaciones en el uso del encapsulamiento dentro de la industria de la construcción en nuestro país. Es entendible que será un tanto debatible la información que ahora se presentará, pero se espera que sirva para que otros investigadores, así como empresas que comercializan este producto tomen conciencia en los temas sin resolver que hasta la fecha se tienen sobre el uso de estos sistemas de rehabilitación.

### **DATOS HISTÓRICOS CONOCIDOS DEL USO DEL SISTEMA EN AMBIENTE MARINO**

#### **Experiencias en México**

Durante la inspecciones de algunos de los puentes de la SCT, se pudo observar que algunos presentaban signos de haberse reparado con un sistema de encapsulamiento conocido con el nombre de “encamisados” o “camisas” (comúnmente conocido como “chaqueta” en muchos países Iberoamericanos) de fibra de vidrio. Este sistema comprende el uso de una barrera física fabricada con fibra de vidrio translúcida, en el caso de los nuevos sistemas, que se adhiere a la superficie de la pila (o pilote) de concreto, dañado por corrosión, mediante el vaciado de una lechada, mortero o concreto con un agregado de tamaño máximo no mayor a 9 mm entre del encapsulamiento y la superficie de la pila por reparar. Para reforzar al material vaciado dentro del encapsulamiento, se coloca en algunos casos una malla electro soldada o fabricada con varilla corrugada. La Figura 1 presenta una fotografía tomada de la subestructura de un puente ubicado en el estado de Campeche, la cual muestra el sistema de encapsulamiento con fibra de vidrio translúcida de nueva generación, colocada hace ya unos cuatro años.



**Figura 1.** Fotografía de la reparación realizada en un puente en el año 2002 con camisas de fibra de vidrio de segunda generación.

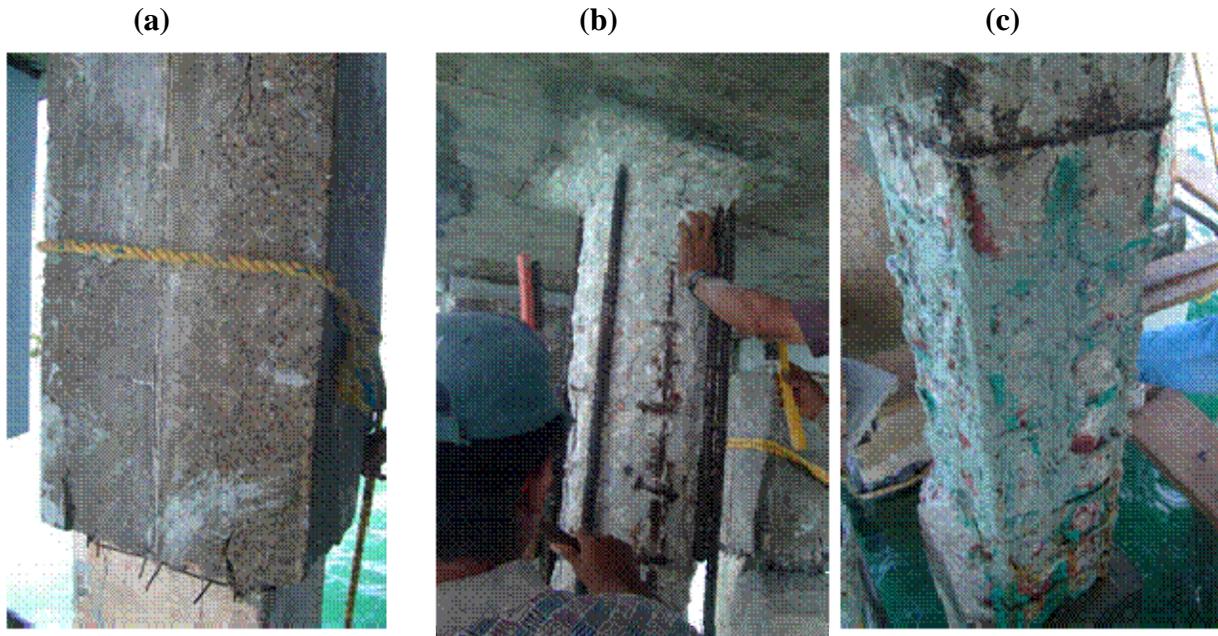
Estructuras de puentes tan importantes como el éste en el estado de Campeche, y otro en el estado de Nayarit, han sido y/o están siendo reparadas con estos sistemas de encapsulamiento. En la Figura 2 se muestran las etapas del procedimiento de reparación utilizado en ese mismo puente en el año 2002 para rehabilitar un sistema de encapsulamiento instalado a fines de los años 90's. Las fotografías del procedimiento de rehabilitación efectuado en el mismo puente en 2002 mostraron muchas deficiencias. De esta experiencia de inspección varios son los puntos que llamaron la atención y fueron presentados en un reporte detallado a la SCT.



(a)

(b)

**Figura 2.** (a) Desprendimiento del encapsulamiento antes de iniciar la rehabilitación; (b) Procedimiento de eliminación del encapsulamiento de primera generación para ser restituida por otro de segunda generación (similares a Figura 1).



**Figura 3.** (a) Procedimiento de retiro del encapsulamiento de fibra de vidrio; (b) limpieza de la varilla con cepillo de alambre (procedimiento manual); y (c) recubrimiento anticorrosivo colocado en las varillas corroídas.

Primero se pudo observar que los encapsulamientos de fibra de vidrio pudieron mantenerse en su lugar únicamente un periodo de cuatro años, ya que la primera reparación con las camisas de color azul de primera generación fue concluida en el año 1998. En la evaluación realizada cuatro años después se pudo observar a pilotes en donde el encapsulamiento desapareció y las barras de refuerzo de los pilotes mostraban una corrosión muy avanzada (Figura 2a). Estos desprendimientos fueron aparentemente debidos a la fricción del agua de mar que golpeo durante cuatro años que estuvo la camisa colocada o al impacto de alguna embarcación en esos pilotes. Se pudo también observar (Figura 3a) que la acción de la corrosión del acero de algunas de estos encapsulamientos sin desprender continuó, y alcanzó a agrietar el mortero/concreto usado en el sistema de reparación. El mortero/concreto aparentemente se agrietó por la expansión de los productos de corrosión del acero de refuerzo, indicativo que las camisas no pararon por completo el proceso de degradación por la corrosión del acero cubierto por éstas.

Durante la inspección de los trabajos de reparación de las camisas dañadas se pudo también observar la falta de conocimiento de los trabajadores en el proceso de reparación durante la limpieza y preparación de la superficie de las barras de refuerzo dañadas por corrosión. Se observó el uso de técnicas rudimentarias para la limpieza (a mano y con cepillos de alambre, ver Figura 3b) por lo que no se esperaba una resistencia adecuada en el recubrimiento de epóxico colocado para proteger las barras de refuerzo del ambiente marino existente. Además como se observa en la Figura 3c el concreto detrás de las barras de refuerzo no fue removido de los pilotes, por lo que la contaminación por cloruros presente a la profundidad de la barra, y que



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



generó la corrosión del mismo refuerzo, no pudo eliminarse completamente. Al no eliminar todo el concreto contaminado que está en contacto con el acero como es regularmente instruido en manuales del tema,<sup>6</sup> el proceso de corrosión continuará, a pesar de los materiales colocados por encima de las barras de refuerzo durante la rehabilitación (pintura epóxica, mortero/concreto de reparación libre de cloruros, camisa de fibra de vidrio). Esto es, cierta cantidad considerable de los cloruros que generaron la corrosión de este acero continúan en la misma posición antes de la reparación por lo que la degradación continuará aunque, tal vez, con una menor velocidad de corrosión en la zona reparada, pero acelerando la corrosión en la zona sin reparar.

Estas malas prácticas de rehabilitación en donde no existe una adecuada supervisión, tanto de la contratista de los trabajos como de la empresa que suministra los productos de rehabilitación nos podrían hacer pensar que el encapsulado no funcionó debido a las malas prácticas constructivas. Sin embargo, en otros países más desarrollados y que podría pensarse que la supervisión es más rigurosa se creería que el sistema podría funcionar adecuadamente y la durabilidad, tanto de la estructura reparada como de la reparación en sí, podría ser óptima. Pero se conocen estudios en el estado de la Florida, que presentan problemas similares a los observados en el puente evaluado en México. A continuación se presentan los resultados de dos inspecciones realizadas en 1998 al 2005 en varios puentes del estado de la Florida que poseen este tipo de rehabilitación.

### Experiencias en la Florida

Este sistema muy utilizado en los EEUU desde la década de los cuarenta,<sup>7-9</sup> en los últimos años ha sido tema de controversia entre las compañías suministradoras de este producto y las experiencias mostradas a lo largo de su utilización en el mundo entero.

El estado de la Florida es el estado con mayor longitud de costas de la unión americana. Además, el clima subtropical de este estado ha afectado en gran medida principalmente a la subestructura de los puentes, las cual está en contacto directo, en muchos casos, con zonas de salpique las cuales son las más propensas a la formación de corrosión, por el efecto de una alta contaminación de cloruros en la superficie de concreto de las subestructuras de varios puentes producidos por los cambios de marea, ya que esta zona está en contacto con una mayor concentración también de oxígeno disuelto que aumenta la velocidad de la corrosión en el acero. Esta zona de salpique (conocida como “splash zone” en la literatura en inglés) está delimitada a unos 60 a 180 cm de la línea de marea alta.<sup>8</sup>

Varios han sido los trabajos que se presentaron dentro del Florida Department of Transportation (FDOT) para estimar la eficiencia del sistema de reparación por encapsulamiento de fibra de vidrio.<sup>7-8</sup> Estos concuerdan con el hecho de que aunque funcionan como una barrera física contra la acción del medio ambiente (ingreso de más agua, oxígeno o cloruros), no eliminan por completo el problema que la estructura (o subestructura) presenta ya que por debajo de la zona encapsulada el agua y el oxígeno penetran por detrás de la reparación vía capilaridad. Entre los resultados más interesantes obtenidos en su trabajo, Sen et al. explicaban que por la simple pérdida de recubrimiento el pilote pierde un 34% de su capacidad portante en carga axial y un 46% en flexión; por pérdida de los estribos pierde un 37% por carga axial y un 69% por flexión;



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



y por último encontraron que al perderse el acero longitudinal (presforzado) por corrosión en un 50% se pierde un 40% de la capacidad de carga axial y un 78% de capacidad en flexión.<sup>8</sup> Pero el resultado que se obtuvo de este trabajo que está relacionado con el sistema de encapsulamiento fue que la resistencia axial o por flexión de los pilotes con reparación tipo encapsulado no mostraron incremento alguno, por lo que se concluyó que el encapsulamiento no incrementó la resistencia del elemento dañado y menos llegó a obtenerse la resistencia original antes del daño mecánico simulando corrosión.

El trabajo del grupo de Hartt de la Universidad Atlántica de la Florida realizó un levantamiento del estado que se encuentran alrededor de 18 puentes evaluados de 279 puentes reparados en Florida por este método hasta el año en que se publicó el trabajo.<sup>7</sup> Cada uno de estos 18 puentes fue evaluado visualmente y se seleccionaron al azar varios pilotes para una inspección más detallada. Esta inspección en detalle incluyó el retirar las camisas instaladas para verificar el estado de las barras de refuerzo o presfuerzo de los pilotes reparados. Se estimó un índice denominado NCR, que en inglés significa Calificación Numérica de la Condición del Pilote.<sup>7</sup> Este índice se estimaba con la diferencia entre la calificación de daño obtenida por inspección visual con el encapsulamiento colocado y la calificación de daño después de quitarle al pilote evaluado el encapsulamiento de fibra de vidrio.

En resumen el grupo de Hartt encontró que era muy difícil el descubrir si debajo de la camisa de fibra de vidrio de la reparación del pilote el acero tiene problemas de corrosión,<sup>7</sup> por lo que sería inadecuada una inspección visual para detectar daños antes de que el deterioro haya avanzado en gran medida, por lo que la resistencia del o los pilotes reparados estaría muy comprometida cuando las camisas muestren algún deterioro por corrosión que sea detectado visualmente (desprendimiento del encamisado como sucedió en el puente de Campeche). Dos fueron las recomendaciones que el grupo del Dr. Hartt propuso: primero el que era de extrema urgencia el que se hiciera una evaluación a conciencia y en detalle en más de 55 puentes estatales de Florida reparados por este método para saber su estado de degradación real.<sup>7</sup> Segundo pidió al estado de la Florida que “abandonen” el uso de este tipo de reparación en puentes dañados por corrosión marina.<sup>7</sup>

En la Universidad del Sur de la Florida se realizaron proyectos de investigación en donde se estudió el caso del encapsulamiento y como la actividad de corrosión podría disminuirse con este tipo de sistema.<sup>9</sup> Para ello utilizaron prismas de concreto presforzado pequeños en donde el acero fue corroído aceleradamente utilizando una corriente anódica externa como se explica en publicaciones anteriores.<sup>5</sup> Una vez que el concreto se agrietó por la corrosión del acero, varios prismas fueron encapsulados usando una tela de material compuesto base fibra de carbón previo levantamiento de grietas por corrosión. Sus resultados demostraron que después de haberse envuelto con la encapsulamiento de fibra de carbón el agrietamiento continuó propagándose, pero no con la misma velocidad que los prismas sin el encapsulamiento, por lo que concluyeron que éste procedimiento de reparación disminuye la degraación dentro de la zona recubierta. Pero a la vez demostraron que esas grietas se extendieron hacia fuera de la zona encapsulada, por lo que esta reparación no detiene la extensión a otras zonas en donde el encapsulamiento no se instaló. Este grupo presentó en su publicación algunos resultados del comportamiento electroquímico de pilotes de concreto presforzados que fueron reparados con camisas de fibra de

carbón en la zona de salpique así como en la zona sumergida del pilote de un puente en Florida. En esta investigación se presentan mediciones de velocidades de corrosión del acero, un tanto rudimentarias, pero que dan un indicio de que la actividad de corrosión disminuyó cinco veces de  $5 \mu\text{m/año}$  a valores del orden de  $1 \mu\text{m/año}$  después de casi dos años de estar funcionando el sistema de reparación.

Se desconoce la existencia de otro trabajo que pueda sustentar lo encontrado por el grupo Mullins y Sen,<sup>9</sup> por lo que es de interés de muchos el demostrar que el sistema aplicado ya en varias de las estructuras de puentes y muelles de nuestro país pueda de verdad extender la vida útil de estructuras dañadas por corrosión las cuales fueron reparadas con este sistema.



**Figura 4.** Sistema de protección catódica tipo encapsulado llamado “Life Jacket” utilizado desde hace una década en Florida.

### **Encapsulamientos con Protección Catódica**

Otro sistema de rehabilitación que se sigue utilizando en puentes de la Florida y otros estados de la Unión Americana es el de protección catódica. Este tipo de sistema de rehabilitación incluye, además del encapsulamiento como el discutido anteriormente, una malla de cinc puro (casi 100% de cinc) en forma de malla metálica que se coloca entre la camisa de fibra de vidrio y el pilote de concreto (dentro del mortero de reparación o lechada). Este metal cinc (el cual es más activo por corrosión que el acero) protege al refuerzo o presfuerzo mediante una conexión directa entre ambos metales, formándose así una cupla galvánica en donde el cinc dona electrones al acero y de esa manera protege al acero de más corrosión.

Se tiene la experiencia de Florida que el sistema con PC ayuda en gran medida a que los pilotes que presentan corrosión continúen su proceso corrosivo. La Figura 4 muestra al sistema instalado en un puente de la Florida. Este sistema con PC ya está siendo evaluado en el mismo puente de Campeche, el cual se colocó entre los años 2003 y 2004. La Figura 5 muestra fotografías del sistema instalado en el puente de Campeche.



**Figura 5.** Mismo sistema de protección catódica con encapsulamiento usado en uno de los caballetes del puente en Campeche.

Se puede observar en la Figura 5, en donde se muestra el caballete del puente en Campeche, dos regiones muy bien definidas: el cabezal pintado de gris y los pilotes con el encapsulamiento color blanco. El color gris del cabezal corresponde al sistema de termorrociado con cinc que se instaló a la par que el encapsulamiento para darle protección directa al cabezal, ya que el encapsulamiento solo puede proteger a los pilotes. Este tipo de sistema de protección catódica (termorrociado) ha sido estudiado también varios años y se ha demostrado en México también como sistema que puede ser utilizado pero con ciertas restricciones e inconvenientes. Para mayor información sobre este termorrociado favor de confrontar las referencias [10] y [11].

Cabe aclarar que después de casi diez años estar estos sistemas colocados en varios pilotes de puentes en el estado de la Florida, no se han encontrado encapsulamientos que muestren desprendimiento alguno, pero si se encontraron en evaluaciones recientes que el daño que representa el agrietamiento por corrosión del recubrimiento del concreto, se presentó por arriba del sistema, por lo que se están realizando estudios en Florida para mejorar el drenado de corriente que genera el ánodo de cinc para que estas grietas, como la mostrada en la Figura 6, no se presenten.



**Figura 6.** Agrietamiento típico presente en la superficie de los pilotes sobre el sistema de encapsulamiento con o sin protección catódica.

### **RECOMENDACIONES FINALES**

En virtud de los resultados hasta ahora encontrados en relación al uso de encapsulamientos de fibra de vidrio de segunda generación (traslúcidos) o fibra de carbón, se recomienda que éstos no sean utilizados en subestructuras contaminadas por cloruros a menos que sean utilizadas en sistemas que detengan por completo la corrosión como es el caso de encapsulamientos con protección catódica. En estructuras o subestructuras en donde la corrosión del acero embebido en concreto pudo haber sido generada por otro ambiente como el urbano o industrial (efecto conocido como carbonatación), el sistema de protección por encapsulamiento podrá ser usado siempre y cuando no están presentes cloruros en la ecuación de deterioro.

De igual manera es recomendable el uso de encapsulamientos que posean protección catódica integrada en ambientes urbanos, industriales, marinos o combinación de estos ambientes a la vez. En estos últimos sistemas se tendrá que considerar entre sus costos el que sea monitoreado en tiempos cortos no mayores a 2 años para conocer su eficiencia y obtener sus tiempos óptimos de mantenimiento que pueden variar dependiendo del ambiente en donde son colocados.

### **REFERENCIAS**

1. A.A. Torres Acosta, “Durabilidad de Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino. Parte 2 – Periodo de la Propagación de la Corrosión ( $T_2$ ),” Construcción y Tecnología,



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
**Chihuahua; Chih. México**  
**Del 12 al 14 de Noviembre**



- Instituto, Mexicano del Cemento y del Concreto, 16, 185 (2003): pp. 22-33, México, D.F. (México)
2. A.A. Torres-Acosta and M. Martínez-Madrid, “Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 4 (2003): pp. 344-353.
  3. A.A. Torres-Acosta, M. Martínez-Madrid, A. del Valle-Moreno y J.T. Pérez-Quiroz, “El Uso de Nuevas Tecnologías en el Mantenimiento, Conservación en la Infraestructura de Puentes en México que Presenta Daños por Corrosión,” *Revista Ingeniería de Construcción*, 19, 2 (2004): pp. 65-72.
  4. A.A. Torres-Acosta, G. Núñez-Rodríguez, M.A. Backhoff-Pohls, M. Martínez Madrid y M. Aguilar-Martel, “Aplicación de un sistema de información geoestadística para la evaluación ambiente-corrosión en la degradación de la infraestructura de puentes en México,” *Revista Ingeniería de Construcción*, 20, 3 (2005): pp. 215-222.
  5. A. del Valle Moreno “Estudio y modelación electroquímica de la cinética de la corrosión en sistemas protegidos católicamente por ánodos galvánicos,” Tesis de Doctorado en Química, Universidad Nacional Autónoma de México, (2005), México, D.F., (México).
  6. Red Rehabilitar, “Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: Reparación, Refuerzo y Protección,” Eds. P. Helene y F. Pereira, (2002), Sao Paulo (Brasil).
  7. W. Hartt, W. and M. Rapa, “Condition Assessment on Jackets upon Pilings for Florida Bridge Substructures,” Final Report, Florida Department of Transportation, WPI-0510803, April (1998), Tallahassee, Florida (USA).
  8. R. Sen, G. Mullins, and D. Snyder, “Ultimate Capacity of Corrosion Damaged Piles,” Final Report, Florida Department of Transportation, Contract BA-576, October, (1998), Tallahassee, Florida (USA).
  9. R. Sen, G. Mullins, K. Suh, and D. Winters, “Application in Underwater Repair of Corroded Piles,” in SP230: 7th International Symposium on Fiber-Reinforced (FRP) Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Editors: C. K. Shield, J. P. Busel, S. L. Walkup, D. D. Gremel, American Concrete Institute, 38800 Country Club Dr. Farmington Hills, MI 48331, USA, (2005): pp. 1139-1155.
  10. A. del Valle Moreno, A. A. Torres Acosta, M. Fabela Gallegos, M. Martínez Madrid, “Patología de la Degradación de un Muelle del Pacífico Mexicano,” *Revista Ingeniería de Construcción*, 21, 3 (2006): pp. 193-204.
  11. J. T. Pérez Quiroz, “Seguimiento por medio de la Técnica de Impedancia Electroquímica de la Protección Catódica del Acero de Refuerzo en Concreto Modificado por un Agente Humectante,” Tesis de Maestría en Ciencias Químicas, Universidad Nacional Autónoma de México, (2001), México, D.F., (México).