

El uso de nuevas tecnologías en el mantenimiento, conservación en la infraestructura de puentes en México que presentan daños por corrosión

The use of new technologies in the maintenance, conservation of corrosion damaged bridge infrastructure in Mexico

Andrés Torres, Miguel Martínez*, Angélica del Valle*, José Pérez**

** Instituto mexicano del transporte, Querétaro, MÉXICO
atorres@imt.mx*

*Fecha de recepción: 24/02/2004
Fecha de aceptación: 07/07/2004*

Resumen

Este trabajo presenta los avances que a la fecha se han logrado en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), dentro del marco del Plan Nacional de Evaluación de la Degradación por Corrosión en Puentes, para conocer el grado de deterioro que guarda la infraestructura del transporte en México por efectos de la corrosión y el impacto que el ambiente ejerce sobre dicha infraestructura de concreto, así como los primeros resultados en cuanto al inventario nacional de daños por corrosión de infraestructura de puentes de la Red Federal de Carreteras Libres (RFCL). Para este estudio se utilizó una herramienta basada en Sistemas de Información Georreferenciada (SIG), la cual sirve como base para la ubicación geográfica de los puentes y, con esto, determinar los parámetros meteorológicos en donde cada puente está expuesto. De los resultados encontrados a la fecha se obtuvieron únicamente un 7.5% de los puentes en este inventario que mostraron cierto grado de corrosión. Estos puentes están siendo inspeccionados uno por uno para así determinar la patología del problema y poder determinar la manera óptima de poder repararlos.

Palabras clave: Concreto, corrosión, durabilidad, puentes, Sistemas de Información Georreferenciada SIG

Abstract

This investigation presents the procedure within the National Plan of Bridge Corrosion Evaluation from the Mexican Ministry of Transport and Communications (SCT in Spanish), and the Mexican Transport Institute (IMT in Spanish). The first part of this Plan includes the evaluation from the corrosion point of view of about 6,500 federal government bridges within Mexico, and correlates the effect of the environment on bridge durability. This work also includes the inventory used and the process of discrimination to obtain the number of bridges that show corrosion degradation as a function of their geographical position. The discrimination analysis was performed with a Global Positioning System (GPS), which was used to locate using geographic coordinates each bridge of the inventory and correlate the environment in which the bridge is exposed, and the corrosion degradation. At the moment only 7% of the total 6,500 bridges of the inventory used showed some type of corrosion degradation. The bridges in this inventory with some corrosion damage are being inspected to obtain the pathology and determine the best way to repair them.

Keywords: Concrete, corrosion, durability, bridges, Global Positioning Systems GIS

1. Introducción

Los sistemas carretero y portuario nacionales cuentan con un sistema de administración de conservación y mantenimiento de su infraestructura que permite conocer de manera genérica el estado actual de conservación que guarda cada obra, para así programar reparaciones dependiendo del nivel de daño cuantificado y calificado.

Desafortunadamente, dentro de esos sistemas de administración y conservación no existía un rubro

que permitiese establecer la degradación que por corrosión se está desarrollando en aquellos puentes, muelles o estructuras de concreto. Tal situación produce que constantemente se confundan agrietamientos estructurales causados por ejemplo por asentamientos propios de los movimientos de la estructura con aquellos causados por corrosión, y repetidamente se concursen reparaciones inadecuadas a estructuras dañadas por corrosión y no por acciones estructurales (cargas gravitacionales,

accidentales, asentamientos, impacto, flujo plástico del concreto, etc.).

Por tal motivo es de fundamental importancia que el país cuente con una información valiosa, fidedigna y certera de la agresividad del medio ambiente, en combinación con agregados típicos de la región para determinados tipos de concreto, tanto a nivel regional como nacional, para así poder sugerir y normar los estándares de construcción que se deban seguir en aquellos lugares donde se pretendan erigir obras de infraestructura.

Muchos ingenieros encargados de la vigilancia del buen funcionamiento de nuestra infraestructura de transporte desconocen en este momento la existencia de alguna metodología para la evaluación de dicha infraestructura. Esta evaluación por corrosión serviría como punto de partida para la prevención, en caso de que la degradación sea nula o mínima, o para la corrección en el caso de que la degradación por corrosión sea severa.

Si se toma en cuenta que las obras de infraestructura que se concursan en México deben obedecer cierta normativa estandarizada de construcción de tipo estructural, estática y dinámica, empleando materiales locales para cada obra y que no existe un conocimiento tácito de la agresividad del medio ambiente ni de sus componentes, ni siquiera a nivel estatal, es imposible que se diseñen y construyan estructuras durables de concreto reforzadas que resistan al deterioro ambiental de la zona. El desconocimiento del medio ambiente que rodeará a una estructura, su reacción con lo agregados locales y la agresividad resultante, no favorece la construcción de obras de infraestructura que resistan los embates degradantes del medio ambiente y por tal la vida útil de la misma se ve severamente mermada.

2. Durabilidad de estructuras de concreto

En los últimos veinte años el término "durabilidad" se ha estado escuchando con más frecuencia en la rama de la ingeniería civil. Países industrializados como los EEUU, España, Francia, Reino Unido y Japón, han tomado a la durabilidad como un tema de gran importancia, invirtiendo en esta área sumas millonarias en estudios de investigación.

En Latinoamérica un esfuerzo similar se realizó en el año 1997 al presentarse el reporte de la Red Temática Iberoamericana DURAR (1997), en el cual se desarrollaron

algunos conceptos básicos sobre vida útil, evaluación, mantenimiento, reparación y/o rehabilitación de obras de concreto armado dañadas principalmente por corrosión de la armadura. La vida útil de una estructura se definió por DURAR como "el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente".

Hasta ahora, se han propuesto varios modelos que contemplan el concepto de durabilidad y que analizan la degradación por corrosión del acero de refuerzo (o pre-esfuerzo) en función del tiempo. Éstos se evaluarán brevemente a continuación.

El modelo de Tuutti (1982), en el cual se basan la mayoría de los ya existentes, señala que la vida útil de un puente (T_{VU}) se puede representar de la siguiente forma:

$$T_{VU} = T_1 + T_2 \quad (1)$$

En este modelo, se denomina T_1 al período de iniciación del fenómeno, y se define como al lapso de tiempo que tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación. En tanto, se denomina T_2 al período de propagación, que se refiere al periodo entre la pérdida de protección de la película pasiva y la manifestación externa de los daños por corrosión (manchas de óxido, agrietamientos, o desprendimientos de la cobertura del concreto). La etapa T_2 (estudiada con mayor detalle en la segunda parte de este documento) finalizará con la formación de pequeñas grietas (con anchos menores de 0.1 mm) o manchas de óxido.

Si en la estructura se observan otros tipos de degradaciones como grietas más anchas de 0.1 mm, delaminaciones, barras de refuerzo expuestas con corrosión visible, etc., dicha estructura se encontrará más allá de su vida útil, o sea, en el periodo de su vida residual. El periodo de la vida residual finaliza hasta un límite inaceptable de durabilidad el cual se podría expresar en función de la capacidad de carga del elemento estructural. La Figura 1 presenta, de manera gráfica, las etapas T_1 y T_2 , así como el periodo de la vida residual en relación a la pérdida de la capacidad de carga o resistencia del elemento estructural (Torres Acosta 2001, Torres Acosta y Martínez Madrid 2001; Torres Acosta y Martínez Madrid, 2003; Torres Acosta et al., 2003).

4. Metodología

Se propone que el proyecto se desarrolle con las siguientes etapas fundamentales:

1. *Evaluar la infraestructura existente: esta etapa requiere la realización de 3 sub-etapas:*

-Generar una base de datos en formato electrónico para análisis de la información que posee la DGCC en su sistema SIPUMEX, dentro del sistema del IMT denominado Sistema de Información Geoestadística del Transporte (SIGET).

-Discriminar los puentes dañados por corrosión utilizando los datos generados en la primera etapa.

-Formular el Programa de evaluación detallada en los puentes que muestran daños por corrosión de la DGCC.

2. *Proponer un programa de medición instrumental del grado de corrosión de los puentes a cargo de la DGCC, el cual sería realizado en conjunto con el personal de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT.*

3. *Proponer medidas de rehabilitación de puentes dañados por corrosión de la DGCC.*

4. *Desarrollar un programa de monitoreo puntual de casos aislados de urgente evaluación en puentes de la DGCC.*

5. Evaluación de la estructura existente

5.1 Generación de una base de datos

En el año 1993, la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) y la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) implementó un sistema de administración de puentes denominado Sistema Integral de Puentes Mexicanos o SIPUMEX. Esta base de datos contempla la ubicación con coordenadas geográficas y entre lo más importante desde el punto de vista estructural, las características geométricas, el material y tipo de estructura y la fecha de construcción. La Tabla 1 lista a los puentes que este sistema posee divididos por estado o entidad federativa.

Además, la DGCC cuenta con información de las reparaciones realizadas las estructuras y con una calificación que define el estado del puente desde el punto de vista estructural. Esta calificación, que va desde 0 a 5, informa si el puente está en excelentes condiciones (calificación 0) o si ha rebasado su límite último y está a punto de colapsar si no se realiza una reparación mayor

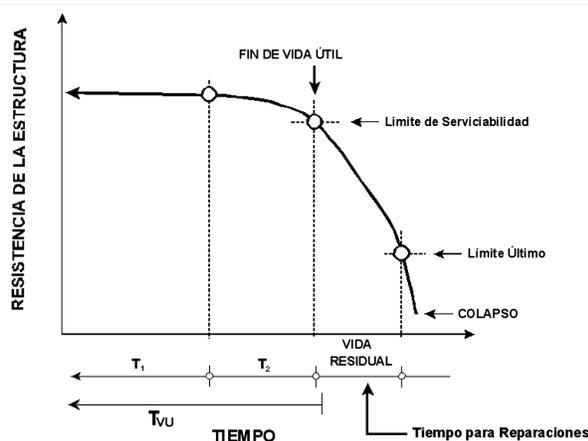


Figura 1. Modelo propuesto de durabilidad por corrosión en ambiente marino

Otros modelos como el de Bažant (1979a, 1979b) o el de Browne (1980), similares a los de Tuutti, especifican que T_2 finaliza al encontrarse daños visibles en la estructura o elemento estructural. En cambio, el modelo de Beeby (1983) especifica que T_2 finaliza hasta que un nivel inaceptable de la corrosión se ha alcanzado. Esto quiere decir que el elemento puede estar más allá de su periodo de vida útil y encontrarse en la etapa de su vida residual (Torres Acosta y Martínez Madrid, 2003).

3. Objetivo y alcances del proyecto

El objeto primordial de este proyecto es evaluar el deterioro por corrosión de los puentes administrados por la Dirección General de Conservación de Carreteras en todo el territorio nacional, y proponer un programa permanente de control y monitoreo que permita contar con estructuras protegidas.

El alcance del proyecto es el de proporcionar a la DGCC y DGST los lineamientos para el diagnóstico de la infraestructura de todos los puentes federales que se encuentran en servicio actualmente, utilizando las nuevas tecnologías de diagnóstico y evaluación de estructuras, así como, en caso de encontrarse efectos de la corrosión, plantear la metodología para su control, prevención o corrección. Con ayuda de los residentes de puentes de la SCT se podrá evaluar todos los dañados y se sentarán las bases para que los puentes administrados por la DGCC sean permanentemente valorados a través de su propio sistema de administración de puentes.

(calificación 5). La calificación que el inventario de SIPUMEX adjudica a los puentes no refleja el posible daño que por corrosión puedan tener; por lo que a partir del año 2000 la SCT, en coordinación con el IMT, implementa un proyecto denominado "Plan Nacional de Evaluación de la Degradación por Corrosión en Puentes", el cual permitirá conocer el estado que guardan los puentes de la Red Federal Carreteras Libres (RFCL) en México.

Como primera etapa en este proyecto se conformó el inventario de todos los puentes administrados por la DGCC en formato electrónico (hoja de cálculo), utilizando la base de datos existente y contenida en el SIMPUMEX. Para ello se entregaron a los investigadores del IMT a cargo del proyecto, los resúmenes de los últimos reportes del SIPUMEX obtenidos por el personal a cargo del manejo de la información de las oficinas correspondientes de la DGCC y DGST. A partir de este inventario se realiza una discriminación de los puentes que tienen antecedentes de daños por corrosión y de aquellos con una mayor probabilidad de presentar corrosión en función de su ubicación y el entorno.

Tabla 1. Número y longitud de puentes de la RFC por estado (resumen de SIPUMEX)

Estado	Número Puentes	Longitud (Km)	Estado	Número Puentes	Longitud (Km)
Aguascalientes	70	2.5	Nayarit	124	4.8
Baja California	122	4.8	Nuevo León	241	8.4
Baja Calif. Sur	96	2.9	Oaxaca	382	17.2
Campeche	74	2.0	Puebla	140	4.0
Coahuila	305	9.0	Querétaro	63	2.2
Colima	58	3.1	Quintana Roo	19	0.8
Chiapas	266	11.3	San Luis Potosí	251	8.6
Chihuahua	352	9.9	Sinaloa	230	10.4
Durango	237	7.0	Sonora	457	9.0
Guanajuato	162	3.9	Tabasco	84	5.6
Guerrero	390	18.5	Tamaulipas	349	10.9
Hidalgo	197	7.0	Tlaxcala	152	3.9
Jalisco	298	11.1	Veracruz	415	18.7
México	208	8.2	Yucatán	23	1.1
Michoacán	463	15.8	Zacatecas	195	4.8
Morelos	77	1.9			

5.2 Discriminación de los puentes dañados por la corrosión

Antes de comprobar de manera visual si el puente manifiesta corrosión, se realizaron en el 2001 cinco cursos regionales, basados en la experiencia de la Red Iberoamericana DURAR (1997), dirigidos a los ingenieros de la SCT encargados de los puentes, con el objetivo de capacitar al personal de la DGCC y DGST

para que tuvieran los conocimientos básicos de decisión para el correcto diagnóstico de la patología del deterioro observada en los puentes a su cargo. Evidencias visibles como manchas de óxido en la superficie, agrietamiento y desconchamiento en la cobertura del concreto, podrían indicar que la estructura se ha deteriorado; sin embargo, y dependiendo de la importancia de la estructura, otros métodos más sofisticados pero no muy costosos, podrían ser utilizados para obtener el estado de corrosión, antes de presentarse dichas evidencias. Para utilizar estas técnicas modernas de inspección, el IMT capacitó al personal de la DGCC y DGST residente en los puentes, para detectar problemas típicos de corrosión y la patología que puedan presentar:

Es menester recalcar que las inspecciones preliminares referidas, fueron realizadas por los ingenieros residentes en puentes, quienes tomaron el curso antes mencionado. El análisis de los datos proporcionado por la SCT se llevó a cabo con el personal del IMT mediante el uso de una herramienta de cómputo única en el mundo, generada en el IMT, denominada Sistema de Información Geoestadística del Transporte (SIGET). Este análisis espacial fue utilizado para la agrupación y representación cartográfica de los puentes que puedan estar propensos a la corrosión, en función de su posición geográfica y de las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestos (Torres Acosta et al., 2002).

Al final de esta etapa se presentó un informe detallado a la DGST y DGCC en donde se listan los puentes que potencialmente muestran daños por corrosión, representados mediante mapas cartográficos y en formato tabular. Con la información resultante, se sientan las bases para monitorear todos aquellos puentes que presenten daño por corrosión, conforme se describe en los párrafos siguientes. Los resultados obtenidos a la fecha son presentados en las Figuras 2 y 3. La Figura 2 muestra el análisis espacial y la ubicación geográfica de los puentes que presentan algún tipo de daño visual. Las prioridades para evaluación de los puentes están definidas como: Alta, Media y Baja, dependiendo de la calificación de SIPUMEX (Alta: 4 y 5, Media: 2 y 3, Baja: 0 y 1). La Figura 3 muestra un histograma del porcentaje de los puentes divididos por entidad federativa (Torres Acosta et al., 2002).

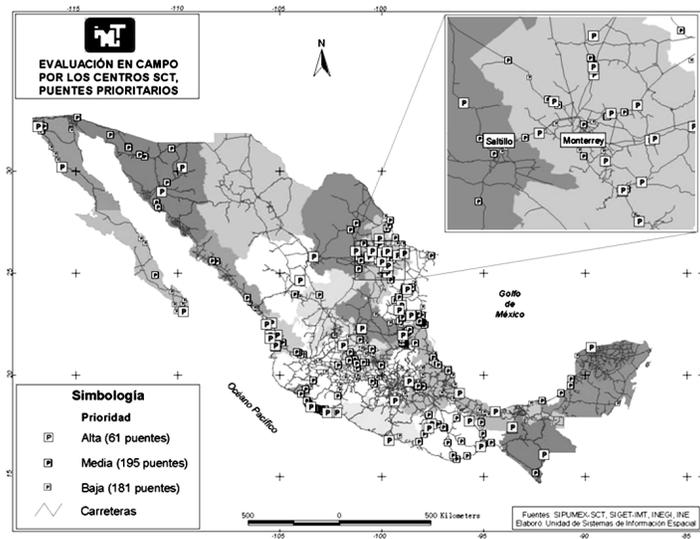


Figura 2. Resultados obtenidos de las evaluaciones visuales de la etapa de discriminación del Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión de la SCT.

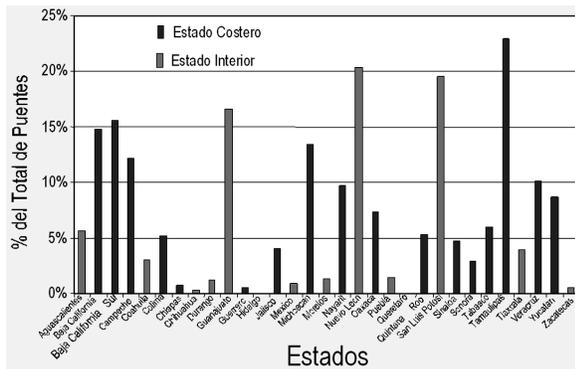


Figura 3. Puentes que presentan daños visuales por corrosión según el levantamiento realizado por los Centros SCT.

Al final de esta etapa se presentó un informe detallado a la DGST y DGCC en donde se listan los puentes que potencialmente muestran daños por corrosión, representados mediante mapas cartográficos y en formato tabular. Con la información resultante, se sientan las bases para monitorear todos aquellos puentes que presenten daño por corrosión, conforme se describe en el siguiente ítem.

5.3 Programa de evaluación detallada en los puentes que muestran daños por corrosión

En las primeras dos etapas de este proyecto se generó un inventario de puentes pertenecientes a la RFCL, definiendo la prioridad de éstos para la realización de

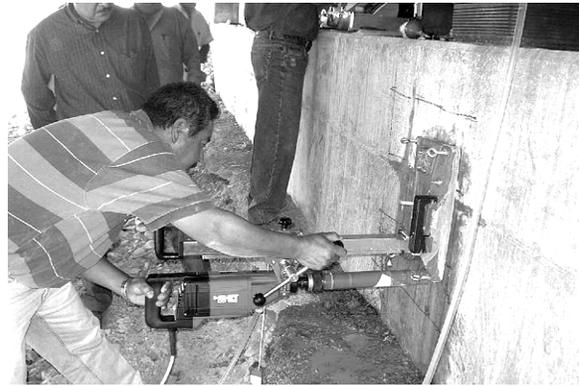
una evaluación más detallada y conocer con mayor exactitud el grado de deterioro del puente por corrosión.

En esta etapa del proyecto, iniciada en el 2001, se generó un programa de evaluaciones detalladas de aquellos puentes que presentan un deterioro crítico por corrosión, con el fin de recomendar las reparaciones adecuadas dependiendo de la patología observada. Para la realización de esta tercera etapa se impartió en 2003 un curso intensivo teórico/práctico denominado "Especialización en Monitoreo y Diagnóstico de la Corrosión en Puentes." En este curso se capacitó a los encargados de evaluación de puentes en el uso de nuevos equipos de monitoreo de corrosión para estructuras de concreto. En esta etapa se contempló, también, la dotación de cinco juegos de equipos de medición, los cuales fueron entregados a los respectivos Directores Regionales de la DGST en México. En estos cursos se capacitará al personal de la SCT para realizar monitoreo detallado de la infraestructura de puentes que muestran daños por corrosión (discriminados en la etapa anterior). Entre las pruebas de monitoreo que se imparten en este curso se encuentran las de obtener las propiedades físico-químicas de los materiales (concreto y acero), la velocidad de corrosión (que tan rápido la estructura se está deteriorando) y la pérdida de sección de acero por corrosión (DURAR 1997). La Figura 4 presenta algunas de las actividades que se realizaron durante los cursos realizados en el 2003.

a)



b)



c)



d)



Figura 4. (a, b, c y d), experiencias de la SCT en monitoreo y diagnóstico de puentes dañados por corrosión en el periodo 2002-2003.

En la actualidad personal de la SCT y del IMT han realizado evaluaciones puntuales a diversas estructuras de concreto que presentan daños por corrosión: Puente Jamapa II, Pajaritos, Coatzacoalcos I, Coatzacoalcos II, Nautla y Tecolutla en Veracruz, Puente Si-Hó y La Unidad en Campeche, Puente La Misión en Baja California, Puente Moralillo I en Tamaulipas, Puente Cuto del Porvenir y La Esperanza en Michoacán, Puente Arroyo Seco en Coahuila, Viaducto del Muelle de Progreso en Yucatán y el Muelle de Coatzacoalcos en Veracruz. 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.

6. Programa de rehabilitación de puentes dañados por corrosión de la DGCC

Una vez conocido el daño y su patología en cada uno de los puentes a cargo de la SCT, la siguiente etapa corresponde a la generación de los proyectos de rehabilitación de cada uno. En esta etapa el IMT está apoyando a la SCT en proponer y revisar los proyectos de rehabilitación. Además, se están realizando durante el último semestre de 2004, cursos Regionales sobre Rehabilitación de Puentes y Estructuras de Concreto Dañados por Corrosión, en donde se darán las bases para realizar un proyecto de rehabilitación en función del diagnóstico y la patología encontrada. Así se tratará

8. Agradecimientos

Los autores agradecen a los Ingenieros Juan Orozco y Orozco e Ignacio Hernández Quinto por su colaboración en la logística de los Cursos Regionales de los Centros SCT. También son merecedores de un sincero agradecimiento los Geógrafos Miguel Backhoff Pohls y Gilberto Núñez de la Unidad de Sistemas de Información Espacial del IMT por el apoyo recibido para el análisis espacial de la información y la generación de los mapas.

9. Referencias

de subsanar el problema en la forma más adecuada, y no como regularmente se hace: reparar sin saber cual fue el motivo del problema, con lo que conlleva a la aparición de la misma patología sobre la reparación en periodos de pocos años. Estos cursos se basan en la metodología de la Red Rehabilitar del CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), organismo de Consejo de Ciencia de España (REHABILITAR 2003). Estos proyectos adecuados serían licitados de acuerdo a la normatividad de la SCT y si es posible, el IMT actuaría como asesor externo de la SCT en la revisión de dichos proyectos, para que se realizasen conforme a la normativa existente. Los resultados se discutirán por separado en publicaciones posteriores a la presente.

En virtud de que el deterioro por corrosión en la infraestructura del transporte es un fenómeno cuyo proceso involucra la interacción continua del medio ambiente con el concreto, este proyecto no termina en estas cuatro etapas. Se necesita que exista un programa permanente de monitoreo que podría ser realizado por el propio personal de campo de la SCT con la debida asesoría de los investigadores del IMT. Como consecuencia del conocimiento que resulte de esta evaluación, será factible formular códigos, normas o requerimientos mínimos que apoyen el diseño de dichas estructuras bajo el concepto de durabilidad, y así se minimicen los costos de mantenimiento.

7. Comentarios Finales

A fin de evitar que en el mediano plazo se presenten fallas catastróficas en las estructuras, es necesario continuar con la evaluación del deterioro por corrosión que abarca el 100% de los puentes federales, los clasifique y discrimine. Esta evaluación, se está realizando en la SCT mediante el proyecto a nivel nacional que el IMT está coordinando. Herramientas tecnológicas de vanguardia como los sistemas satelitales de posición geográfica y equipos de monitoreo de la corrosión en estructuras de concreto seguirán revolucionando la manera de conservar la infraestructura de concreto contra la corrosión. El proyecto presentado, único en el mundo en cuanto a su extensión territorial y capacidad de coordinación, es un ejemplo de la transferencia de nuevos sistemas tecnológicos mexicanos al mundo. En la actualidad otros países como España, Venezuela, Brasil y Argentina están interesados en el sistema alimentado por el inventario de puentes mexicanos, queriendo implementarlos en sus propios países.

Bažant Z.P. (1979a), "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures - Theory", *J. Struct. Div., ASCE*, vol. 105, pp. 1137-1153.

Bažant Z.P. (1979b), "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures - Application", *J. Struct. Div., ASCE*, 105, pp. 1155-1166.

Beeby A.W. (1983), "Cracking, Cover, and Corrosion of Reinforcement", *Conc. Intl.*, vol. 5, no.2, pp. 35-40.

Browne R.D. (1980), "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures", *ACI SP-65*, Ed. V. M. Malhotra, (Detroit, Michigan, USA: American Concrete Institute, 1980), pp. 169-204.

DURAR Red (1997), "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales (Maracaibo, Venezuela: CYTED, 1997).

REHABILITAR Red (2003), "Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón: Reparación, Refuerzo y Protección," Eds. P. Helene y F. Pereira, CYTED, (Sao Paulo, Brasil: Bandeirantes Industrias Gráficas, 2003), ISBN 85-903707-1-2.

Torres Acosta A.A. (2001), "Durabilidad de Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino. Parte 1 - Periodo de la Iniciación de la Corrosión (T1), Construcción y Tecnología, vol. 13, no.157, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, junio del 2001, pp. 24-35.

Torres Acosta A.A. y Martínez Madrid, M. (2001), "Diseño de Estructuras con Criterios de Durabilidad," *Publicación Técnica No. 181, Instituto Mexicano del Transporte.*

Torres Acosta A.A., Martínez Madrid, M., Backhoff Pohls, M. y Núñez Rodríguez, G. (2002), "Aplicación de un Sistema de Información Geoestadístico para la Evaluación de los Agentes Corrosivos del Medio

Ambiente en la Degradación de la Infraestructura de Puentes en México," Colloquia-2002, (Maracaibo, Venezuela: 7-10 de julio).

Torres Acosta A.A., y Martínez Madrid, M. (2003), "Residual Life of Corroding Concrete Structures in Marine Environment," J. of Materials in Civil Eng., ASCE, vol. 15, no. 4, July-August, pp. 344-353.

Torres Acosta A.A., Fabela Gallegos, M.J., Hernández Jiménez, J.R., Muñoz Noval, A., y Martínez Madrid, M.(2003), "Stiffness loss of concrete beams due to corrosion of reinforcing steel". Paper # 03282, NACE CORROSION/2003 Symposium 03-STG-46, March 16 to 20, 2003, San Diego, California; USA.

Tuutti K., (1982), "Corrosion of Steel in Concrete". Stockholm, Sweden: Swedish Cement and Concrete Research Institute.

