

# Degradación por corrosión de un muelle del pacífico mexicano

## Corrosion degradation of a pier on the mexican pacific

Angélica del Valle\*, Andrés Torres\*, Manuel Fabela\* y Miguel Martínez\*

\* Instituto Mexicano del Transporte, Querétano, MÉXICO  
 a valle@imt.mx

Fecha de recepción: 05/ 09/ 2006  
 Fecha de aceptación: 01/ 11/ 2006  
 PAG. 193 - 204

### Resumen

Se evaluó el estado estructural y el daño por corrosión del muelle Manzanillo en el Estado de Colima, México. Se realizaron ensayos químicos, mecánicos, electroquímicos y de carga a las tres Bandas que componen el Muelle. La losa de la Banda B presentó la mejor durabilidad, seguida por la de la Banda C que mostró poca evidencia de daño. La losa de la Banda A exhibió discontinuidades (agrietamientos, delaminaciones, desconchamientos) con exposición de la varilla de refuerzo, así como altos niveles de deformación a tracción durante los ensayos de carga, lo que representa una condición crítica. Se recomendó el empleo de un sistema de tablestacado con relleno total de toda la Banda A que restaure la resistencia estructural a tensión en la subestructura de la losa de la Banda A, así como la rehabilitación del concreto y varillas de refuerzo en los pilotes dañados, para recuperar su capacidad de carga y restituir la integridad estructural del muelle. Se generó el proyecto de rehabilitación para reparar el 20% de los pilotes de todo el muelle sustituyendo el acero de refuerzo y reponiendo la sección de concreto y el 48% de los pilotes sólo reemplazando la sección de concreto.

Palabras Clave: Muelles, concreto, corrosión, inspección, rehabilitación, exposición marina

### Abstract

The Manzanillo Pier in the State of Colima was evaluated for the structural integrity and corrosion damage. A series of chemical, mechanical, electrochemical and load tests performed. to the three sectors that constitute the Pier. The B Sector showed the better durability, followed by the C Sector that showed little evidence of damage. The reinforcement of the substructure of the A Sector exhibited discontinuities and high levels of deformation to tension, representing a critical condition. A quay wall harbor with backfill of the whole area was recommended to restore the structural tensile resistance of the substructure of the A Sector, as well as the rehabilitation of the concrete and rebars of all damaged piles, in order to recover the load capacity and restore the structural integrity of the Pier. The rehabilitation project of Sectors B and C, considered the repair of 20% of the piles by replacing the rebars and restoring the concrete section. On other 48% of the piles only the restoring the concrete section was required.

Keywords: Piers, concrete, corrosion, inspection, rehabilitation, marine exposure

## 1. Introducción

El daño que ocasiona la corrosión en la infraestructura de concreto es un problema multimillonario en prácticamente todos los países del mundo. En un estudio llevado a cabo en Estados Unidos y Japón, la Federal Highway Administration, (FHWA, 1998), encontró que aproximadamente el 3% del Producto Interno Bruto, pudo atribuirse directa o indirectamente a costos de corrosión. La corrosión de las armaduras en el concreto está reconocida como una de las principales contribuciones en el deterioro de concreto armado, especialmente en ambientes agresivos en los que puede darse la contaminación por iones cloruro (Andrade, 1993).

En 1998 México contaba con 5.000 puentes en la red federal, lo que representaba una inversión superior

a los 800.000 millones de dólares (Galindo, 1998), si se estima que se requiere un mínimo de 2% de la inversión para su conservación anual, se deduce que se requeriría un presupuesto anual de 16 mil millones de dólares, como el mínimo necesario para la conservación de esas obras. No sólo en 1988, sino durante muchos años subsiguientes, los presupuestos asignados fueron nulos o mucho menores que lo requerido, afectando no sólo a puentes, sino a todas aquellas estructuras e infraestructura en las cuales su mantenimiento quedó pospuesto para un mejor momento socio-económico.

En 1994 inició operaciones el Muelle de Manzanillo (Figura 1). Este muelle, de características únicas en México, cuenta con 17 posiciones de atraque

y 14 hectáreas de áreas de almacenamiento equipadas con 13,5 km. de vías férreas y 5,4 km. de vialidades. Sirve a 15 estados de la República Mexicana, que representan el 64% del Producto Interno Bruto (PIB) del país, se encuentra ubicado estratégicamente para atender el comercio internacional, con los países localizados en la cuenca del Pacífico y constituye un punto de trasbordo ideal para los países de Centro y Sudamérica. Actualmente, escalan en forma regular 26 líneas navieras que permiten conectarse con 74 destinos en el mundo, favoreciendo el transporte intermodal.

El muelle cuenta también con servicio de tren de doble estiba y 14 terminales e instalaciones especializadas, todas ellas operadas por inversionistas privados para el manejo de todo tipo de carga. También brinda rendimientos de clase mundial, y tiene una posición privilegiada para competir favorablemente con otros puertos ubicados en el Pacífico mexicano. Actualmente atiende la creciente demanda del tránsito de mercancías, pasando de 3.825.000 toneladas en 1994, a 12.300.000 toneladas métricas con inversiones en el orden de los 130 millones de dólares en 2006. De igual forma, el tránsito de mercancías ha crecido de 63.807 TEUS (contenedores de 20 pies (6,0 m.)) en 1994, a más de 500.000 TEUS, ubicándolo como el puerto que más crecimiento ha experimentado en los últimos años, (tasa media de crecimiento anual compuesta del 37%), en lo que a tránsito de contenedores se refiere, con lo que alcanzó primer lugar en el pacífico mexicano y segundo a nivel nacional (Puerto clase mundial, 2005).

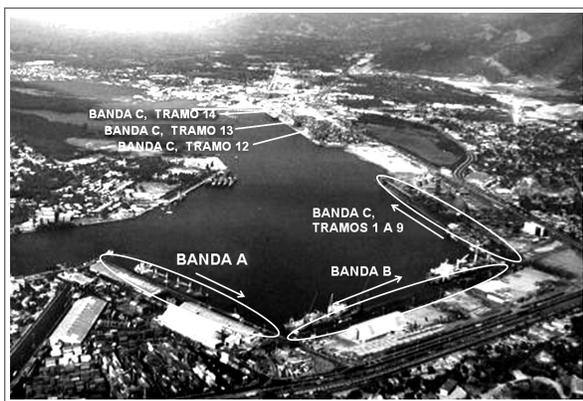


Figura 1. Vista aérea del Muelle Manzanillo

Dada la importancia de carácter estratégico que tiene el Muelle Manzanillo en el Estado de Colima, las autoridades administrativas, solicitaron la realización de una inspección y diagnóstico de las condiciones actuales de la estructura del muelle que condujeran al proyecto de su rehabilitación. La investigación detallada de

diagnóstico, determinó el origen de los daños y patologías que exhibe el muelle. De acuerdo a los resultados del estudio, se emitieron una serie de recomendaciones relativas a procedimientos y sistemas de rehabilitación, que permitan reparar adecuadamente los daños y con ello, alargar la vida remanente de la estructura (del Valle et al., 2005a).

El Muelle Manzanillo, inició su construcción en 1993 con la Banda A y en años siguientes se construyeron la Banda B y los tramos 1 a 9 y 12 a 14 de la Banda C. Consta de 4177 pilotes y pilas distribuidos en tres Bandas: Banda A: 1418 pilotes distribuidos en 8 tramos; Banda B: 1296 pilotes repartidos en 12 tramos y Banda C: 1463 pilas y pilotes dispuestos en 14 tramos. Los pilotes tienen una sección de 50 cm. x 50 cm. y las pilas tienen un diámetro de 2 m.

## 2. Desarrollo

Se recopiló la mayor información posible, incluyendo algunos datos del proyecto original y planos de modificaciones. Posteriormente se hizo el levantamiento de daños y la realización de ensayos. Con toda esa información se realizó el análisis teórico del comportamiento de los elementos para evaluar los daños encontrados y encontrar las causas de dichos daños. Finalmente se desarrolló una metodología de análisis y evaluación de las ventajas y desventajas de cada opción considerada.

La inspección visual y el levantamiento de daños se realizaron en todos los pilotes. Para cada ensayo se calculó estadísticamente el número de pilotes a evaluar. El levantamiento de daños se hizo a todos los pilotes, ya que no existía historial fidedigno del estado real del muelle. La evaluación de la estructura comprendió los siguientes ensayos físico-químicos de tipo semi-destrutivo y no destructivo:

- Determinación de las características mecánicas del concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión de núcleos (26 ensayos), índices esclerométricos (115 series) y ensayos de resistencia a tensión por adherencia (21 ensayos).
- Determinación del grado de contaminación interna en el concreto mediante pruebas de carbonatación (12 determinaciones), contenido de cloruros (48 extracciones de muestras de polvo de concreto en 16 sitios), contenido de sulfatos (en 5 muestras) y medición de reactividad álcali-agregado (dos especímenes).
- Verificación de la concordancia entre la información

documental y la estructura construida, mediante detecciones y cuantificaciones del acero de refuerzo en 41 sitios.

- Determinación del potencial de corrosión en aproximadamente 200 m<sup>2</sup>.
- Pruebas de carga estáticas y dinámicas para medir valores de deformación unitaria superficial, es decir, alargamiento o acortamiento relativo en la superficie de losas y pilotes, para estimar los esfuerzos correspondientes.
- Identificación y caracterización de daños.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Resistencia a la compresión

La extracción de 41 núcleos (testigos) de concreto se realizó de acuerdo a la Norma ASTM C42/C 42M-99, mientras que el ensayo se llevó a cabo de acuerdo a las Normas ASTM C39-96 y C617-94. El valor promedio de la resistencia a la compresión fue de 38,7 MPa, sin embargo el coeficiente de variación fue del 23% (30,4 MPa mín.- 49,3 MPa máx.). El criterio de aceptación fue  $f'_c$  ensayada  $\geq f'_c$  diseño.

La resistencia de diseño fue de 35 MPa y los promedios de las resistencias obtenidas estuvieron por encima de este valor, sin embargo se obtuvieron valores muy variados, uno de ellos de tan solo 17 MPa. El coeficiente de variación ofrece una forma de estimar la homogeneidad del concreto, el valor de 23% obtenido es indicativo de importantes variaciones en la elaboración del concreto (dosificación de materiales, relación a/c, mezcla, colocación, compactación, curado, etc.).

El peso unitario promedio obtenido (2 108 kg/m<sup>3</sup>) (2 317 kg/m<sup>3</sup> máx., 1 921 kg/m<sup>3</sup> mín., un coeficiente de variación de 9,4 y n=26 muestras), denota un concreto de peso normal. (2 200 kg/m<sup>3</sup>). (del Valle et al., 2005a).

Pese a la gran heterogeneidad del concreto, los resultados de los ensayos y los índices esclerométricos mostraron resistencia a la compresión admisible al cumplir con los criterios de aceptación establecidos para cada ensayo.

#### 3.2 Ensayos esclerométricos

Estos ensayos fueron realizados de acuerdo con la Norma ASTM C805-97 mediante un esclerómetro marca Germann Instruments, modelo D-100, con una escala de lectura de número de rebote de 10 a 100.

La esclerometría fue útil para determinar la homogeneidad del concreto. Aunque los coeficientes de variación fueron menores (15,1%) que los obtenidos

mediante las pruebas de resistencia a compresión, debe notarse que hubo sitios donde los resultados variaron radicalmente, arrojando valores equivalentes a  $f'_c$  de tan sólo 21 MPa (del Valle et al., 2005b). (54,0 MPa máx., 41,5 MPa mín., 46,0 MPa promedio, un coeficiente de variación del 11,5% y n= 26 muestras).

#### 3.3 Pruebas de adherencia

Realizadas de acuerdo a la Norma ASTM C-881-90, con equipo marca Germann Instruments, modelo Bond Test, con intervalo de lectura de 0 a 25 kN y mediante probetas de acero de 7,6cm. de diámetro. La preparación de la superficie se realizó con martelinadora y retirando aproximadamente 2 mm. de espesor de la superficie.

La resistencia a la adherencia promedio fue de 1,6 MPa, (2,1 MPa máx., 1,4 MPa mín., un coeficiente de variación de 27,1% y n= 20 muestras) la cual se considera baja. Es destacable que los coeficientes de variación estuvieron por encima del 20%, indicando la gran heterogeneidad en las condiciones superficiales del concreto.

#### 3.4 Detección de armados

Las lecturas se realizaron con un equipo marca Protovale, modelo CoverMaster CM90, con intervalos de lectura desde 7 hasta 180mm. y para barras de 5 a 50mm. de diámetro.

La finalidad principal de ese ensayo fue comparar la profundidad a la que se encontraban las varillas, así como el diámetro de las mismas, contra la información contenida en los planos estructurales. Fue notable la variación registrada en los espesores de recubrimiento del acero de refuerzo, abarcando desde los 2,5cm., hasta los 9cm. (el 76% de las varillas se encontraron a una profundidad de 5cm., el 13,4% a una profundidad menor a los 5 cm. y el 3,5% de las varillas a una profundidad mayor a los 7,5cm.) lo que mostró una vez más, problemas constructivos.

#### 3.5 Profundidad de carbonatación

Los núcleos de concreto se impregnaron con una solución indicadora de pH para determinar la profundidad de avance del frente de carbonatación. Al parecer, los altos porcentajes de humedad en el concreto mantuvieron sus poros superficialmente saturados e impidieron la penetración de los gases de CO<sub>2</sub>, por lo que la profundidad de carbonatación promedio fue de tan solo 9mm., valor muy lejano aún de las varillas más superficiales (35mm.). (Máx. 30, Mín. 1, con una



variación estándar de 10 y  $n = 12$  muestras).

### 3.6 Contenido de sulfatos

El ensayo para determinar el contenido de sulfatos en los núcleos de concreto extraídos, se efectuó conforme a las Normas ASTM C-114 y C-1218. El 0,06% sulfatos promedio por peso de cemento medido, ubican en el nivel de ataque insignificante a los sulfatos, por lo que no representó ningún tipo de riesgo para la integridad de la estructura. (Máx. 0,09, Mín. 0,04 y  $n=5$ ).

### 3.7 Reactividad álcali-agregado



Figura 2. Grietas por posible reacción álcali-agregado

En 3 de los núcleos extraídos se pudieron apreciar pequeñas grietas localizadas generalmente a una profundidad de unos 5 cm. de la superficie del concreto y en sentido paralelo a dicha superficie (Figura 2). No habiendo evidencia previa de contaminación por sulfatos, para descartar si el origen de las grietas se debía a alguna reacción química del tipo álcali-agregado, se eligió el núcleo que manifestaba el mayor número de esas pequeñas grietas, para determinar el potencial de reactividad mediante el método del uranilo, en correspondencia con la Norma ASTM C-856. Después de realizado éste ensayo, no se observó ningún indicio de reactividad entre los agregados y los materiales cementantes, por lo que se puede asumir que muy probablemente estas grietas se debieron a la mala compactación del concreto durante el colado.

### 3.8 Contenido de cloruros

Para la determinación del contenido de cloruros solubles en ácido, se ensayaron muestras de 1,5 gramos de polvo de concreto extraídas en 3 rangos de profundidades para cada uno de los sitios: de 0 a 25mm., de 25 a 50mm. y de 50 a 75mm. Las mediciones fueron efectuadas con equipo marca Germann Instruments, modelo RCT.

Los contenidos de cloruros obtenidos se encuentran por encima del valor umbral permitido internacionalmente para el inicio de la corrosión de 0,4% con respecto al contenido de cemento a todas las profundidades exploradas. (Máx. 4,32%, Mín. 0,09%, el promedio 1,21% y el coeficiente de variación  $y = n = 48$  muestras).

A excepción de la penetración de los cloruros, las pruebas realizadas no dieron indicio de que existiera algún otro tipo de contaminación en el concreto. Los contenidos de sulfatos fueron insignificantes, no hubo señales de reactividad entre los álcalis del concreto y el avance del frente de carbonatación está aún muy lejos de alcanzar al acero de refuerzo. La alta concentración de cloruros en todo el muelle, particularmente a profundidades donde se encontraban las varillas, prácticamente garantizó que la corrosión de las varillas estuviera ya activada.

### 3.9 Potencial de corrosión

Se utilizó el equipo Cormap System CM-4000, marca James Instruments, constituido por una media celda de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

En las zonas seleccionadas, se tomaron potenciales a diferentes alturas en cada una de las caras de los pilotes. En coherencia con los resultados de las pruebas de contenido de cloruros, las lecturas que revelan un mayor potencial de corrosión, son las localizadas en la sección de los pilotes comprendida en una longitud de aproximadamente  $\pm 50$  cm. del nivel máximo de marea. En esta área, cerca de un 90% de las lecturas fueron más negativas que los  $-200$  mV y de ellas, más del 25 % se encuentran por debajo de los  $-350$  mV lo que significa que existe una probabilidad del 90% de existencia de corrosión activa. Eventualmente, en algunos pilotes también se obtuvieron potenciales de corrosión muy negativos ( $\sim 300$  mV en el extremo que conecta el pilote con la losa del muelle. (Máx. 511 mV, Mín.  $-30$  mV y  $n = 1320$  muestras).

Es notable que en las secciones del muelle de más reciente construcción, se registraran valores más negativos que los  $-350$  mV, alta probabilidad de corrosión

activa.

### 3.10 Pruebas de carga estáticas y dinámicas

Para medir la deformación unitaria relativa sobre la superficie de concreto de los pilotes y losa se aplicó la técnica de extensometría eléctrica y un sistema de adquisición y registro de datos. Se instrumentaron 24 zonas en diversos pilotes y losa considerando tres niveles de deterioro por corrosión: zonas con daño avanzado, zonas con daño medio y zonas sin daño.

Las mediciones se realizaron empleando galgas extensométricas (transductores) Measurements Group tipo EA-06-20CBy-120, de 120 Ohms de resistencia nominal y factor de galga de 2,10. Estas galgas permitieron obtener la deformación unitaria en términos de microdeformaciones,  $\mu\epsilon$  (deformación expresada en el orden de  $10^{-6}$ ).

Para determinar el efecto mecánico de las cargas sobre la estructura, se establecieron una serie de pruebas estáticas y dinámicas aplicando pesos conocidos en zonas instrumentadas y registrando los niveles relativos de deformación unitaria producidos en esos puntos. Adicionalmente, se midió la flecha producida en la losa durante la carga estática y la deformación unitaria producida por el paso de otros vehículos sobre la zona instrumentada (carga dinámica). Para estas pruebas, se utilizaron una grúa de 7 ejes de 470 T para movimiento de contenedores y un montacargas de 15 T, el cual se cargó con dos rollos de placa delgada de alrededor de 7 T cada uno. Figura 3.

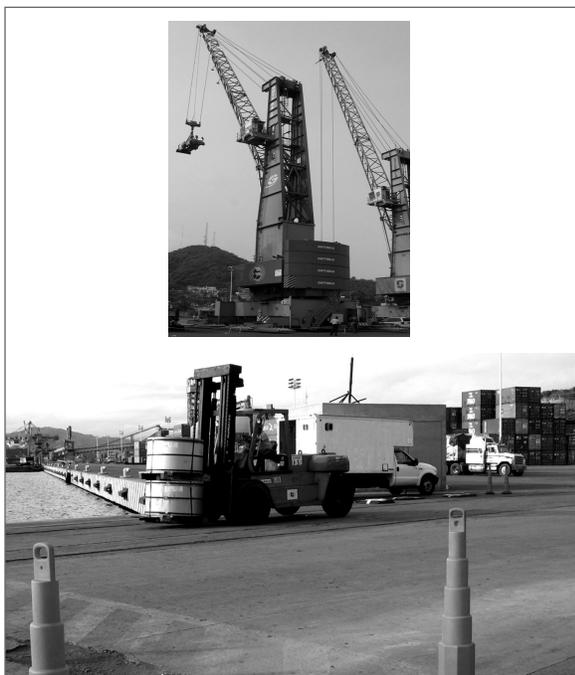


Figura 3. Grúa y Montacargas utilizados para pruebas estáticas y dinámicas

Para las Bandas B y C, los resultados mostraron bajos niveles de deformación unitaria respecto a la carga estática controlada, básicamente a compresión hasta  $-162 \mu\epsilon$ , con deformación a tracción poco significativa, siendo el máximo de sólo  $20 \mu\epsilon$ . Además, la losa se mantiene estructuralmente sana, con niveles de deformación unitaria en el intervalo de  $-8$  a  $20 \mu\epsilon$ . El movimiento de vehículos y maquinaria sobre la losa de la zona instrumentada produjeron valores de deformación unitaria en los pilotes de hasta  $-162 \mu\epsilon$ , representando en algunos casos hasta 20 veces más que la experimentada estáticamente. Ejemplos del tipo de registros de deformación unitaria se presentan en la Figura 4, tomados como historia de la aplicación de las cargas (durante la ejecución de pruebas).

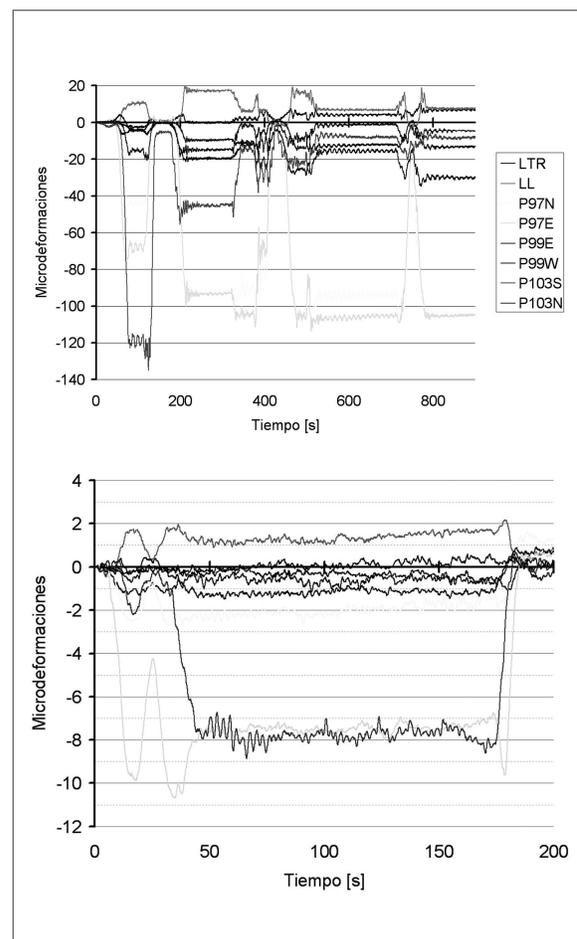


Figura 4. Ejemplo de registros de deformación unitaria relativa en pilotes, obtenidos durante pruebas sobre la Banda B

El valor de  $-162 \mu\epsilon$ , máximo registrado durante el proceso global de pruebas, corresponde a un esfuerzo de compresión estimado de 4,4 MPa. Este esfuerzo es inferior a la resistencia promedio de los pilotes en la vecindad, de alrededor de 32,96 MPa; sin embargo, es necesario considerar el estado de esfuerzos absoluto, es decir, incluyendo el correspondiente a estados anteriores a las mediciones y que no puede detectarse con la instrumentación aplicada, (Fabela et al., 2005a).

El caso de la Banda A fue diferente, al ser esta sección del muelle la más antigua. No obstante que se le ha dado algún mantenimiento y que la resistencia va de 40,5 MPa a 44,3 MPa, la losa mostró diversas discontinuidades (grietas y fracturas en la superficie inferior), así como defectos con un mayor grado de daño que las otras Bandas. Los valores de esfuerzo relativo estimados en la estructura de concreto reforzado en esta Banda fueron desde 0,470 MPa en compresión a 1,73 MPa en tracción. Esto implica que para contrarrestar el nivel de daño y los altos niveles de deformación en esta Banda, se requiere un reforzamiento externo que proporcione mayor resistencia estructural.

La combinación de daño por corrosión con bajos niveles de deformación en algunos de los pilotes instrumentados, constituyó un indicador de la poca participación de los mismos en el soporte de la carga, ya que debido a la corrosión, la adherencia entre la varilla y el concreto se perdió, por lo que el elemento deja de funcionar como una unidad perdiendo capacidad de carga en dicho pilote. Este daño aparente en los pilotes se refirió a discontinuidades, siendo de mayor severidad cuando la varilla de refuerzo quedó expuesta y con degradación evidente del acero por corrosión. Lo anterior vino a constatar, que el daño por corrosión del acero de refuerzo en el concreto afectó la integridad estructural del muelle, disminuyendo significativamente su capacidad de carga.

Los resultados indicaron que las mayores deformaciones se presentaron en los pilotes sin daño y en los pilotes con daño menor, lo que sugirió que debido a la pérdida de capacidad estructural de pilotes dañados por corrosión, los pilotes sin daño deben soportar mayores niveles de esfuerzo y deformación. Estos niveles se ven amplificadas si la estructura se sujeta a cargas que se desplazan sobre la superficie de la losa, comparada con las mediciones de cargas estáticas.

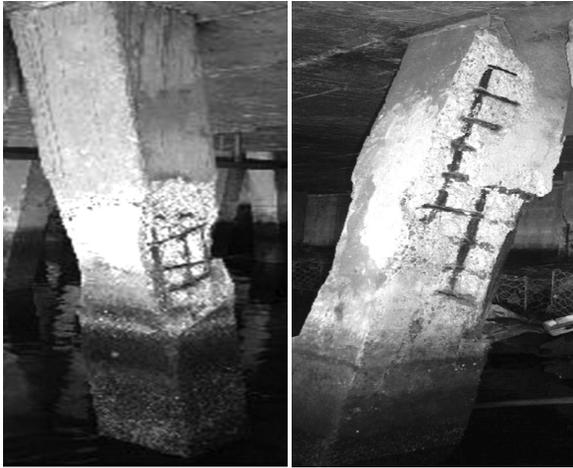
Los pilotes cercanos a las juntas entre los tramos experimentaron mayores esfuerzos que los ubicados en las partes alejadas de esas juntas. Esto se debió a un efecto de carga en voladizo promovida por la separación estructural entre módulos, es decir, a que en los extremos de la losa en esas zonas no disponían de otros pilotes para su soporte, (Fabela et al., 2005b).

### 3.11 Levantamiento de daños

En estructuras de concreto reforzado, la corrosión de las varillas es la causa de deterioro más común, aunada a defectos en la construcción y grietas. Sin embargo hay que resaltar que la mayoría de las veces es muy difícil discernir la causa original de dichas manifestaciones, por lo que se tiene que realizar una evaluación pericial para encontrar la causa real de la patología y poder reparar eficientemente.

En el Muelle Manzanillo, el medio ambiente, combinado con procesos de construcción con ciertas deficiencias, propició el mecanismo de corrosión que causó un alto deterioro del muelle, en el cual los daños más graves se presentaron en la zona de marea y salpique de los pilotes. Agrietamientos, delaminaciones, desprendimientos y pérdida de sección en el acero de refuerzo fueron las manifestaciones patológicas más comunes mostradas en todo el muelle. La mayoría de los daños en los pilotes se localizaron justo por encima del nivel de marea máximo, que fue precisamente la zona en que se identificó que existe un mayor contenido de cloruros y el mayor nivel de potencial de corrosión, por lo tanto, fue la zona de mayor actividad corrosiva. Las Figuras 5 y 6 muestran ejemplos de los daños más comunes encontrados.

En algunas zonas, la corrosión en el acero que comenzó en la zona de marea, se extendió con el tiempo hacia las partes altas de los pilotes, aunque en esas partes los niveles de cloruros fueron menores, su concentración fue aún alta (0,184% con respecto al contenido de cemento). Por lo tanto, si existieron menores recubrimientos, deficiencias en el colado, fisuras, juntas frías, hormigueros, etc., la corrosión se propagó rápidamente.



Exposición de acero en pilotes



Grietas que van de traves a pilas



Grietas en pilotes y coronas de pilotes



Grietas en traves



Desconchamientos



Grietas paralelas a las varillas

Juntas frías y desconchamientos en coronas de pilotes



Exposición de acero, desconchamientos y cimbra sin remover en losa

Figura 5. Ejemplos de daños en pilotes y losa

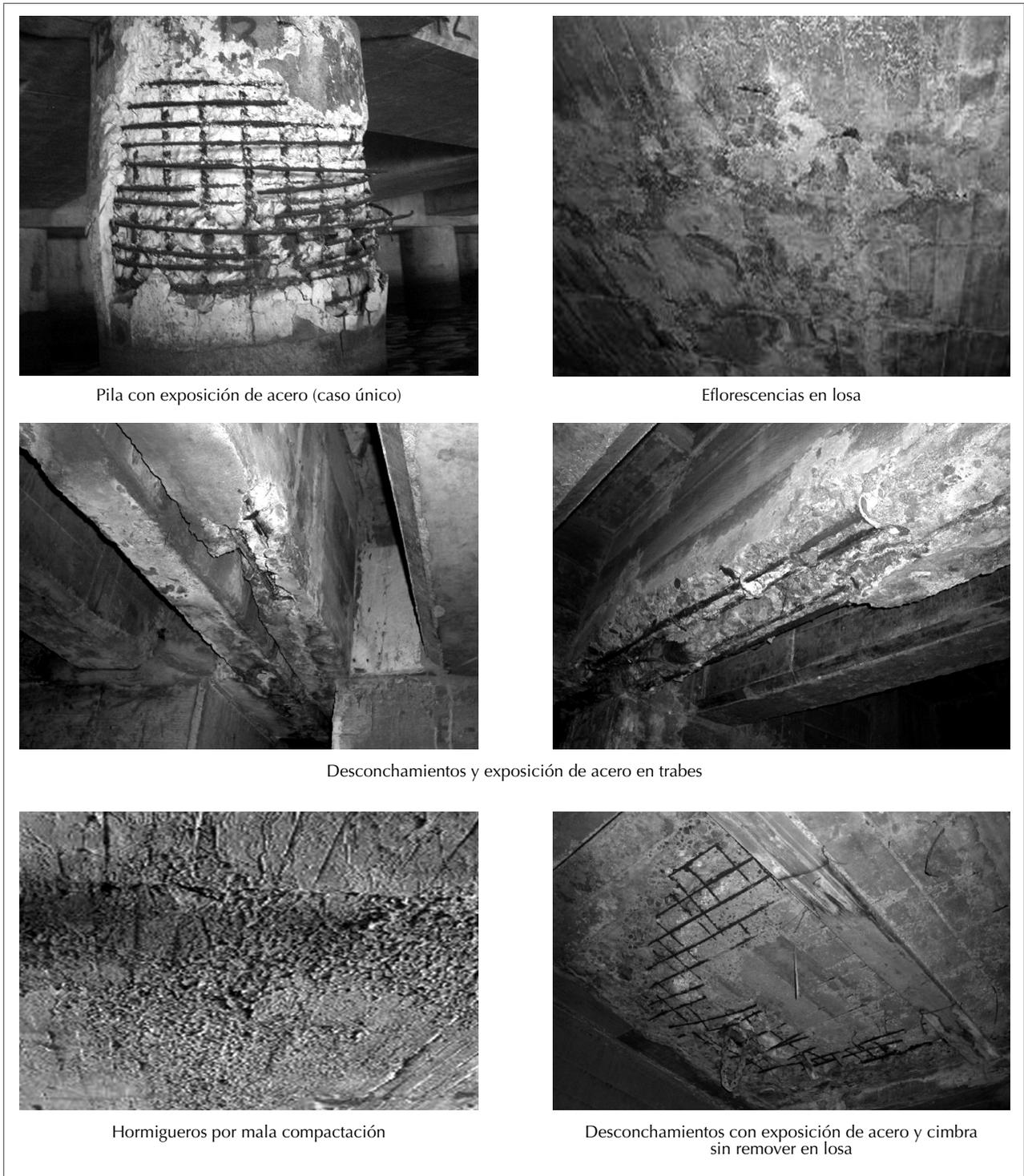


Figura 6. Diversos tipos de daños encontrados en pilas, losa y trabes

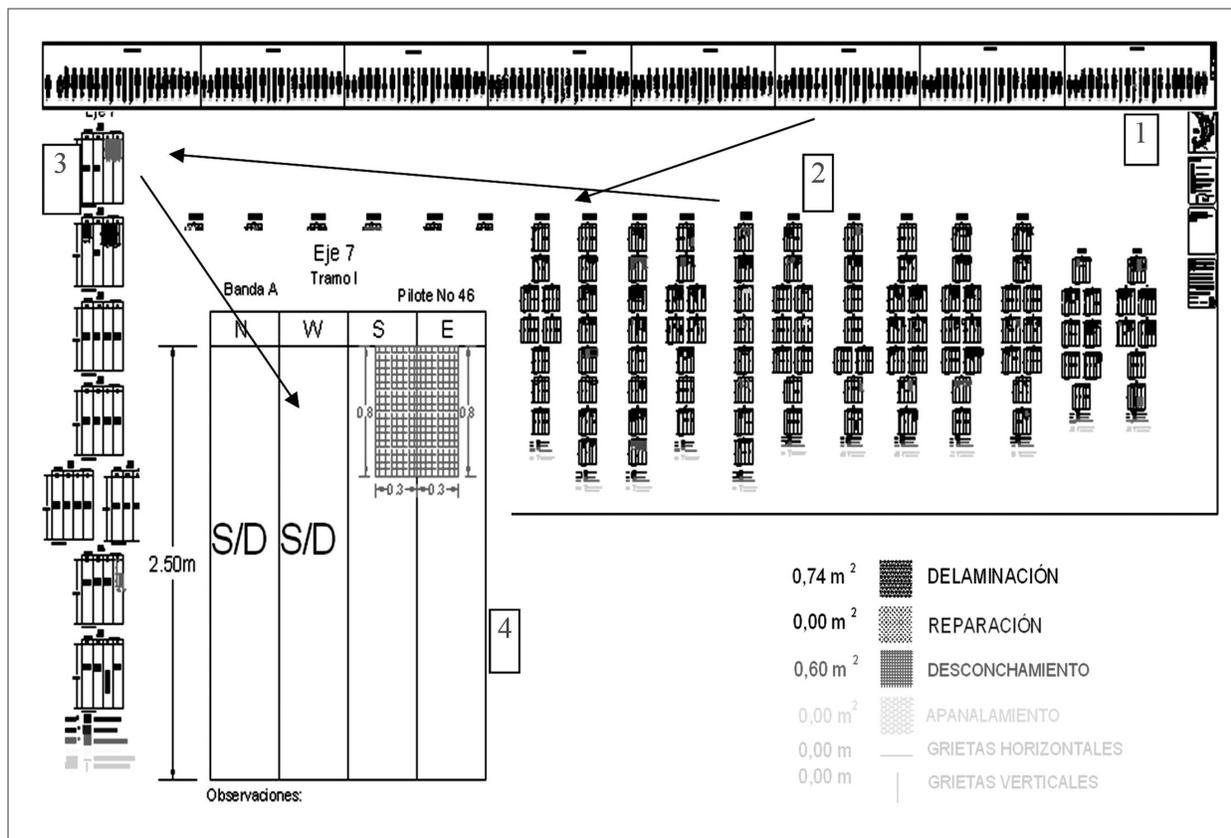


Figura 7. Ejemplo de los planos de levantamiento de daños. En cada pilote se identificó el tipo de daño y se midieron sus dimensiones y ubicación.

El levantamiento de daños incluyó la identificación y medición de los daños en cada cara de cada pilote, lo que se plasmó en planos que permitieron la rápida ubicación de cada pilote en particular. La Figura 7 muestra un ejemplo de la realización de los planos, en la zona 1 se representa el total de los pilotes inspeccionados, la zona 2 muestra un acercamiento a la distribución por ejes que se tiene de los pilotes, el número 3 corresponde a un solo eje y la sección 4 ejemplifica el levantamiento de daños de un solo pilote.

### 3.12 Proyecto de rehabilitación

Los estudios de daño en general requieren de un equipo multidisciplinario y especialista, que permita profundizar en el entendimiento de las variables que influyen en la patología de la estructura. Para analizar todos los resultados de la evaluación, se creó una base de datos de cada pilote y ensayo realizado y se combinaron con los criterios de aceptación internacionalmente aceptados de dichos ensayos. De esta forma se generó un listado con la identificación del pilote, el número de caras que habría que reparar

y las dimensiones de dicha reparación.

La clasificación de las reparaciones se dio como sigue:

Clasificación Tipo I, requiere reposición de acero, reposición de concreto y adición de protección. Clasificación Tipo II, requiere reposición del concreto y adición de protección.

Clasificación Tipo III, requiere sólo adición de protección. Una vez establecida la clasificación de los pilotes, se procedió a buscar la alternativa óptima de reparación para cada caso en particular, por lo que se desarrolló una metodología de análisis en donde se valoraron las ventajas y desventajas de cada opción considerada.

Las opciones analizadas fueron en síntesis: Encamisado simple de los pilotes; Encamisado de los pilotes con un sistema de protección catódica; Uso de Fibra de Carbono como refuerzo estructural de todo el pilote y de los casos en donde se requería sólo reforzar la zona de salpique y oleaje; Uso de concretos convencionales; Uso de aditivos tales como superfluidificantes, microsílca e inhibidores de la corrosión; Uso de morteros tixotrópicos; Aplicación de



morteros expansivos autonivelantes; Aplicación de selladores superficiales; Utilización de ánodos discretos como sistema de Protección Catódica; Protección Catódica por corriente impresa; Selección de Puentes de adherencia y Zinc Termo-rociado como sistema de Protección Catódica.

Todas las alternativas debían cumplir con los requerimientos particulares de este muelle tales como: necesidad de poder ser aplicadas por personal con poca o ninguna experiencia, emplear materiales base (cemento y agregados) de la región, tener una relación eficiencia-costos muy alta, permitir el desarrollo de resistencias normales, no modificar la apariencia del concreto final, tener una vida útil de 50 años, poder aplicarse en climas cálidos, no alterar las propiedades del concreto fresco ni endurecido, no generar segregaciones en el concreto y cumplir con las medidas de seguridad internacionales de la Organization of Safety and Health Administration (OSHA). Como resultado de la metodología empleada, se generó el proyecto de rehabilitación que se resume a continuación:

Los pilotes que se clasificaron como Tipo I (826 pilotes en total) se debían reparar un sistema tipo Tremie. El acero debía ser sustituido utilizando un concreto con microsilica y superfluidizantes capaces de poder aplicarse con conectores mecánicos y como puente de adherencia se debía humedecer con agua libre de cloruros la zona a reparar por lo menos durante 4 h. Adicionalmente debían protegerse con el sistema de Protección Catódica mediante Zinc Termo-Rociado.

Los pilotes clasificados como Tipo II (2014 pilotes en total) se debían reparar empleando un mortero expansivo autonivelante, mezclado con agregados de 12mm. hasta 30% máximo del peso del mortero y como puente de adherencia se debía humedecer con agua libre de cloruros la zona a reparar por lo menos durante 4 h. Adicionalmente debían protegerse con el sistema de Protección Catódica mediante Zinc Termo-Rociado. Los pilotes clasificados como Tipo III (1337 pilotes en total) sólo debían protegerse con el sistema de Protección Catódica mediante Zinc Termo-Rociado.

La Figura 8 muestra un ejemplo del Sistema de Protección Catódica mediante Zinc Termo-Rociado sugerido como complemento a la reparación que deberá realizarse a las Bandas B y C.

Debido al avanzado estado de deterioro general en que se encontraron algunos tramos del muelle (específicamente la Banda A), su rehabilitación requería un reforzamiento estructural que implicaba un costo

bastante elevado. Prácticamente se tenían que reparar y reforzar todos los pilotes de dichos tramos, por lo que con base en resultados de este proyecto, la Administración del Muelle decidió que esa sección fuera completamente remodelada. Para ello, se diseñó un sistema de tablestacado con relleno de enrocamiento que permitirá, no sólo reforzar estos tramos para poder manejar mayores volúmenes de carga, sino también se podrá realizar un dragado que permita recibir buques de mayor calado. El costo de la reposición de la Banda A sería de \$15 millones de dólares, sin embargo, con el sistema de tablestacado y enrocamiento costará sólo \$12 millones de dólares, ya que se rellenará toda el área de la subestructura, la cual será delimitada por el tablestacado, obteniendo además la ventaja de la profundidad adicional.

La opción del tablestacado con enrocamiento precisa de un análisis de esfuerzos que incluya cargas verticales y momentos de doblado inducidos por flexión, así como la carga transversal debida al posible arqueamiento del suelo, adicionalmente se necesita una compactación específica del material de relleno hasta la profundidad requerida, para ello se deberá demoler la losa de la Banda A, realizar la compactación que resulte del estudio de mecánica de suelos y posteriormente rehabilitar la losa. Esta opción podría ser realizada por una compañía europea en 2007.

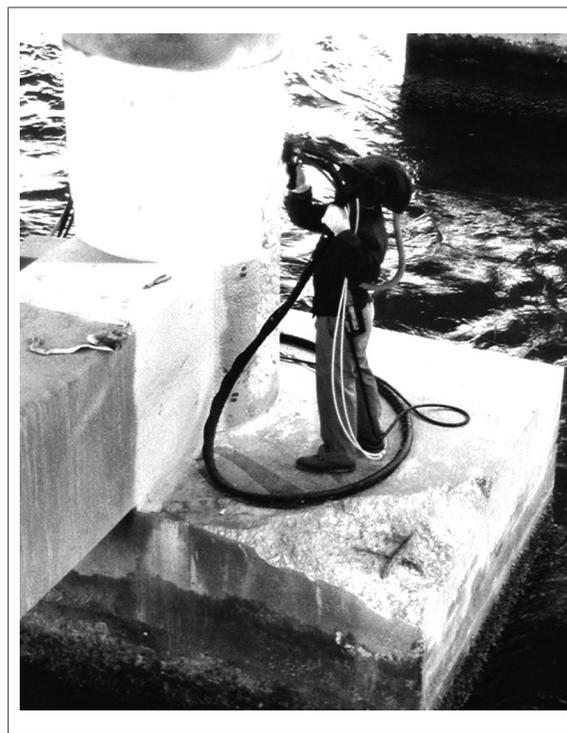


Figura 8. Aplicación de protección catódica mediante zinc termo-rociado

Durante el desarrollo de este proyecto se detectaron posibles áreas de oportunidad que al parecer son práctica común, por lo que merecen ser resaltadas.

1. Selección de materiales. La dualidad que implica la modernidad, nos lleva a tener que ser precavidos, ya que por un lado pretendemos estar a la vanguardia en el uso de nuevos materiales y tecnologías, sin embargo, muchas veces no se tienen datos suficientes para poder establecer si un nuevo producto realmente podrá cumplir lo que promete, o si lo hará sin alterar otra parte del sistema concreto-varilla, por lo que es aconsejable valorar con datos experimentales fidedignos los materiales a seleccionar, sin caer ni en el escepticismo total que nos cierre las puertas a posibles mejoras o la confianza que nos lleve a un fracaso inesperado.
2. Supervisión. Quizás la parte más crítica del proceso de construcción/repación, ya que implica no sólo el conocimiento técnico, sino el trato con personas, materiales, maquinaria y equipo que inciden directamente en la calidad. La selección del personal capacitado tanto en la rama técnica como en la humanística es de vital importancia para obtener productos de calidad con la seguridad requerida.
3. Capacitación. La capacitación y en entrenamiento de todo el personal involucrado en una construcción/repación, es la única manera de poder aprovechar las ventajas que el avance de la tecnología ofrece.

## 4. Conclusiones

La combinación de materiales y tecnologías nuevas con las buenas prácticas tradicionales de ingeniería es la mejor opción para rehabilitar estructuras de concreto. La evaluación y el análisis del comportamiento e integridad de estructuras de concreto reforzado, tales como muelles de atraque, requieren de un enfoque multidisciplinario, tanto para determinar las estrategias de evaluación de la degradación por corrosión, como para la determinación de la disminución de la capacidad portante.

El 20% del total de los pilotes se encuentra dentro de la Clasificación Tipo I, por lo que requiere reposición de acero, reposición de concreto y adición de protección

El 48% del total de los pilotes se encuentra dentro de la Clasificación Tipo II, por lo que requiere reposición del concreto y adición de protección  
El 32% del total de los pilotes se encuentra dentro de la

Clasificación Tipo III, requiere sólo adición de protección.

La losa de la Banda B presentó el mejor comportamiento estructural, con deformaciones muy bajas, seguido por la de la Banda C que mostró poca evidencia de daño. Sin embargo, la losa de la Banda A exhibió discontinuidades y exposición de la varilla de refuerzo, así como altos niveles de deformación tracción, lo que representa una condición crítica.

Debido a la pérdida de capacidad estructural de pilotes dañados por corrosión, los pilotes sin daño deben soportar mayores niveles de esfuerzo y deformación. Estos niveles se ven amplificados si la estructura se sujeta a cargas que se desplazan sobre la superficie de la losa, comparada con las mediciones de cargas estáticas.

Se sugiere una rehabilitación mediante el sistema de tablestacado con enrocamiento en la Banda A. Las Bandas B y C requieren la restitución de concreto y varilla de refuerzo en los pilotes dañados para recuperar su capacidad de carga y restituir, a su vez, la integridad estructural del muelle. Así mismo se sugiere el empleo de un Sistema de Protección Catódica por ánodos galvánicos en las Bandas B y C.

## 5. Referencias

- Administración Portuaria Integral de Guaymas (2006), "Clase Mundial en Puerto. [En línea]. México, disponible en <http://www.apimanzanillo.com.mx> [Accesado el día 25 de julio de 2006]
- Andrade C. (1993), Calculation of chloride diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. 1993 Cement and Concrete Research. 24-2. Pp. 380-384. EUA.
- del Valle M.A., Torres A. y Martínez M. (2005a), "Primer Informe Parcial, Proyecto EE 05/05 Evaluación, Diagnóstico y Proyecto de Rehabilitación de las Bandas "A", "B" y "C" del Muelle de API Manzanillo". Instituto Mexicano del Transporte (IMT), julio 7, México.
- del Valle M. A., Torres A. y Martínez M. (2005b), "Tercer Informe Parcial, Proyecto EE 05/05 Evaluación, Diagnóstico y Proyecto de Rehabilitación de las Bandas "A", "B" y "C" del Muelle de API Manzanillo". IMT, septiembre 25, México.
- del Valle M.A., Torres A. y Martínez M. (2005c) "Quinto Informe Parcial, Proyecto EE 05/05 Evaluación, Diagnóstico y Proyecto de Rehabilitación de las Bandas "A", "B" y "C" del Muelle de API Manzanillo". IMT, diciembre 12, México.

Fabela M., Hernández R., Vázquez D. y Flores O. (2005a)  
"Segundo Informe Parcial, Proyecto EE 05/05 Evaluación,  
Diagnóstico y Proyecto de Rehabilitación de las Bandas  
"A", "B" y "C" del Muelle de API Manzanillo". IMT,  
julio 7, 2005, México.

Fabela M., Hernández R., Vázquez D. y Flores O. (2005b),  
"Cuarto Informe Parcial, Proyecto EE 05/05 Evaluación,  
Diagnóstico y Proyecto de Rehabilitación de las Bandas  
"A", "B" y "C" del Muelle de API Manzanillo". IMT,  
diciembre 12, México.

FHWA (1998), Assessment of Physical condition of  
concrete bridge components. Julio, US Department of  
Transportation, Federal Highway Administration, EUA.

Galindo S. (1998), Amilcar. "Situación General de los  
Puentes en México. Memorias del Curso Institucional  
sobre Inspección, Mantenimiento y Rehabilitación de  
Puentes. UNAM, Palacio de Minería, 3-13 de noviembre  
1998, México.

