*Analysis of damage caused
by environmental and
structural loads in a marine
sub-structure*

Análisis de daños por la interacción de cargas ambientales y estructurales en una subestructura marina

Autores

CASTRO-BORGES, P. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
pcastro@mda.cinvestav.mx
Yucatán, Mexico

TORRES-ACOSTA, A. Instituto Mexicano del Transporte
Queretaro, Mexico

BALANCÁN-ZAPATA, M. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Yucatán, Mexico

LÓPEZ-GONZÁLEZ, A. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Yucatán, Mexico

Fecha de recepción 13/09/2012

Fecha de aceptación 25/10/2012

Resumen

El muelle 6 del Puerto de Progreso fue construido hace 10 años y su principal actividad se concentra en el trabajo de dos grandes grúas para el movimiento de los contenedores. Desafortunadamente, varios problemas debidos al diseño, proceso de construcción y operación de las grúas afectaron la infraestructura de concreto del muelle causando daño y agrietamientos. La principal consecuencia de los daños ha sido hasta ahora la corrosión del concreto reforzado de las losas, vigas y pilas. Se realizaron dos inspecciones detalladas durante 2009 y 2010 siendo la última la que mostró una evaluación importante del agrietamiento y corrosión. Se hicieron pruebas mecánicas

(resistencia a compresión y martillo de rebote), químicas (cloruro) y electroquímicas (potencial de corrosión) para conocer la evolución y mecanismo de daño. El objetivo de este trabajo es presentar y discutir la información obtenida así como las recomendaciones para una reparación. Se encontró que los daños a las losas es muy pequeño principalmente por la protección de la cimbra perdida. Por el contrario, el daño mecánico en vigas y pilas estuvo relacionado con problemas durante la instalación y desempeño de las grúas, y el deterioro por corrosión fue debido a grietas. Algunas de las recomendaciones fueron el recálculo y la rehabilitación del muelle 6.

Palabras clave: Muelle, corrosión, rehabilitación

Abstract

Pier 6 of Progreso's Port was built ten years ago and its main activity concentrates on the work of two big cranes for movement of containers. Unfortunately, several problems due to design, construction process and operation of cranes, affected the concrete infrastructure of this Pier by causing damage and cracking. The main consequence of the damages has been, until now, the corrosion of reinforced concrete in slabs, beams and piles. Two inspections have been performed during 2009 and 2010 and the last one showed an important evolution of cracks and corrosion. Mechanical (compressive strength and method for rebound number of hardened concrete), chemical (chloride) and electrochemical

(corrosion potential) measurements were performed in order to know the damage evolution and mechanism. The objective of this paper is to present and discuss the information obtained as well as a recommendation for further evaluation and repair. It was found that damages on slabs are very slow mainly due to a lost concrete formwork protection. On the contrary, mechanical damage in beams and piles was related to problems during the installation and performance of cranes and corrosion deterioration was due to the cracks. Some of the recommendations were the mechanical recalculation and rehabilitation of the Pier 6 after performing programmed load tests.

Key words: Pier, corrosion, rehabilitation

1. Introducción

El muelle 6 de Progreso (Figura 1) es una estructura de concreto armado diseñada para sostener cargas de contenedores asociadas a la carga y descarga de buques portacontenedores. La superestructura está compuesta por 11 vigas o trabes longitudinales (largueros) apoyadas sobre vigas T (vigas de piso) invertidas transversalmente y 5 cubiertas continuas de concreto con una superficie de desgaste no aparente. La longitud total del muelle es de 250 m, dividida en 25 secciones (cubiertas) de 10 m. El ancho total del muelle es de 20.8 m, el cual está dividido en 7 largueros interiores espaciados cada 2 metros del centro, dos trabes principales por debajo de los rieles de las grúas Gantry y dos largueros pequeños en la fascia exterior.

El muelle 6, alquilado a la empresa Terminal de Contenedores de Yucatán (TCY), ha sido evaluado con el fin de conocer la gravedad de los daños mecánicos causados por la instalación y uso de dos grúas Gantry de 700 toneladas (Figura 2, izquierda y centro) y una grúa móvil Gottwald con ruedas de 360 toneladas (Figura 2, derecha) para realizar la carga y descarga de buques portacontenedores. Un estudio de daños que se realizó

en el 2009 permitió la selección de zonas específicas para llevar a cabo una inspección detallada durante el año de 2010, y así evaluar los materiales usados durante la construcción (concreto y acero) y los efectos del medio ambiente en los mismos materiales utilizados. Los principales daños observados en este muelle, durante la inspección del 2009, fueron agrietamientos longitudinales en la dirección del acero, debido a la corrosión de las armaduras y la pérdida de sección de concreto en varias vigas. Posteriormente se realizó una inspección detallada para evaluar el estado de la subestructura, incluido un perfil de cloruros, frente de carbonatación y grado de corrosión del refuerzo. De las inspecciones realizadas, se dedujo el mecanismo de daño y las estrategias para una mayor evaluación, así como la rehabilitación requerida. El objetivo de este trabajo es presentar y discutir la información obtenida de las inspecciones en forma detallada para conocer la interacción entre cargas ambientales y estructurales y con ello determinar los factores desencadenantes de los daños encontrados en la subestructura. Como objetivo complementario se comentan algunas acciones de mantenimiento adecuadas para prevenir más daño a la estructura.

Figura 1. Vista aérea y detalle de la ubicación del Muelle 6 y Puerto de Progreso

Figura 2. Vista frontal del Muelle 6 (Izq.) y acercamiento de los tipos de grúas empleadas: Gantry (Centro) y Gotwalt (Derecha)

2. Procedimiento experimental

Selección de las áreas a inspeccionar

Las figuras 3 y 4 muestran los ejes numerados, las zonas seleccionadas para la inspección y la orientación geográfica del Muelle 6. Los ejes del 0-37 corresponden al Muelle 7 y no son mostrados en la figura 3.

Se inspeccionaron 3 pilas, 3 tramos de losa y 3 trabes longitudinales. El criterio de selección fue el siguiente:

- Conjunto de elementos (pila, tramo de losa y trabe) sin daño visual
  - Pila tres de trabe 50, tramo central de la losa.
- Conjunto de elementos con daño marginal (grietas únicamente)
  - Pila dos de trabe 48, extremo noreste de la losa
- Conjunto de elementos con daño severo (agrietaamiento severo e incluso desprendimiento).
  - Pila tres de trabe 47, extremo suroeste de la losa.

Figura 3. Croquis del Muelle 6, las x indican las zonas donde se realizó la inspección.

Figura 4. Croquis de la vista en planta del muelle 6. Las X señalan los puntos donde se realizaron las extracciones de los núcleos para el análisis químico de la losa (carbonatación y cloruros)

Distribución del refuerzo estructural y espesor de recubrimiento

En la tabla 1 se muestran el promedio de los recubrimientos y de la disposición del refuerzo de cada elemento.

Tabla 1. Espesor de recubrimiento y disposición del refuerzo en los elementos inspeccionados

Elemento	Recubrimiento (cm)	Refuerzo longitudinal
Pila	9 ± 1 cm	1" @ 8 ± 1 cm
Trabe	10 ± 2	1" @ 18 ± 2 cm
Losa	10 ± 2	$\frac{1}{2}$ " @ 20 ± 2 cm

Aunque una inspección típica incluye por lo general la evaluación de la velocidad de corrosión (i_{corr}) (Castro-Borges *et al.* 2010; del Valle Moreno *et al.*, 2011; Medeiros *et al.* 2012), el contrato para esta inspección solo incluyó las técnicas que se describen a continuación, sin embargo, la combinación de las técnicas contempladas para este caso dio una visión completa del problema, y se pudieron establecer los procedimientos de reparación.

Análisis químico (Carbonatación y cloruros)

Se extrajeron núcleos de concreto (75 mm de diámetro x 150 mm de profundidad nominal) en algunos elementos estructurales, con el fin de determinar la profundidad de carbonatación mediante la técnica de la fenoltaleína (Troconis Oladis, 1997), y el contenido de cloruros totales (en un medio ácido) a diferentes profundidades de acuerdo a la norma estándar ASTM C 1152 (ASTM C1152, 1990). Los resultados, los cuales corresponden a un promedio de dos muestras, se presentan en la siguiente sección.

Análisis electroquímico (potencial de corrosión)

Se realizaron las mediciones de potencial electroquímico, de acuerdo a la norma ASTM C-876 (ASTM C-876, 1996), empleando un electrodo de cobre/Sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) con un Voltmetro de alta impedancia (mayor a 10 MW). La conductividad eléctrica del refuerzo se confirmó antes de las mediciones. La aplicación de esta técnica permitió evaluar el comportamiento electroquímico a través de mapas isopotenciales y determinar el riesgo por corrosión del acero de refuerzo en los diferentes elementos. De acuerdo a la literatura (Francois *et al.* 1997), los resultados de esta técnica son válidos para indicar si existe riesgo o no de corrosión, principalmente en elementos con alto contenido de humedad, como es el caso del muelle 6.

Pruebas mecánicas (resistencia a la compresión y el método para el número de rebote del concreto endurecido)

La resistencia a la compresión se llevó a cabo mediante la extracción de núcleos de concreto (75 x 150 mm) en ciertas partes de la losa y en determinadas vigas de acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM C42/C42M (ASTM C42/C42M, 2010). Las propiedades mecánicas de los pilotes se realizaron mediante la prueba de dureza por número de rebote (ASTM C805/C805M, 2008) con un esclerómetro analógico modelo 58-C0181N.

3. Resultados

La Tabla 2 muestra los resultados de profundidad de carbonatación para traveses y losas. Como era de esperarse, la carbonatación no juega un papel importante en el proceso de degradación, si se compara con la profundidad del recubrimiento de refuerzo en la Tabla 1, donde el promedio del recubrimiento mínimo de concreto estaba cerca de 8 cm.

Tabla 2. Profundidad de carbonatación en traveses y losa

Elemento		Carbonatación (cm) Cara Este	Carbonatación (cm) Cara Oeste
Trabe	47	2.4	4.0
	48	2.7	2.4
	50	2.2	2.8
Losa	Extremo sureste	2.5 cm	
	Centro de losa	2.4 cm	
	Extremo Suroeste	2.5 cm	
	Extremo Noroeste	2.6 cm	

Nota: Cada resultado mostrado en la tabla 2 es el promedio de dos núcleos.

La figura 5 muestra los perfiles de concentración de cloruros (% en peso de cemento) de la trabe no. 47 (lesión grave), trabe no. 48 (daño mínimo) y la trabe no. 50 (sin daños) en las caras Este (CE) y Oeste (CO). La línea horizontal punteada en la figura representa el umbral crítico de cloruros (Castro-Borges Pedro, 1998) obtenido a partir de concretos similares expuestos en

la región. Como se observa, las traveses no. 47, 48 y 50 tienen más cloruro en ambas caras que el umbral reportado (Castro-Borges Pedro, 1998), con excepción de la trabe 40 CE y la trabe 50 CE. Incluso las traveses sin daño tienen una concentración de cloruro, junto al acero de refuerzo, cercana al umbral (Castro-Borges Pedro, 1998).

Figura 5. Perfiles de concentración de cloruros de las traveses no. 47, 48 y 50, caras Este y Oeste.

Por otro lado, la Figura 6 muestra los perfiles de concentración de cloruros de la losa (L) en diferentes zonas (ver puntos de medición en las letras X del croquis de la Figura 3). Como se observa, el umbral de cloruros para este tipo de concreto no ha sido excedido (Castro-Borges Pedro, 1998)

Figura 6. Perfiles de concentración de cloruros de la losa en diferentes zonas.

La figura 7 muestra un mapeo típico del potencial de corrosión realizado sobre las traveses. Este es el caso específico de la trabe no. 47 (daño grave) en la cara Este (CE). Como se observa, en las partes más bajas de

la trabe se presentan valores de potencial de corrosión (E_{corr}) muy negativo, lo que indica un 90% de riesgo de corrosión del refuerzo (ASTM C 876, 1996). Esta activación del refuerzo está siendo ocasionada por la presencia de iones cloruro encontrados en la matriz

de concreto. Esquemas similares se presentan en las figuras 8 y 9. Los valores de E_{corr} son, en este caso, el reflejo del estado mecánico de las traves (muy dañado, daño mínimo y sin daño) ya que proporcionan información sobre el estado de corrosión.

Figura 7. Mapa de potencial electroquímico de la trabe 47, mV vs Cu/CuSO₄, cara Este.

Figura 8. Mapa de potencial electroquímico de la trabe 48, mV vs Cu/CuSO₄, cara Este.

Figura 9. Mapa de potencial electroquímico de la trabe 50, mV vs Cu/CuSO₄, cara Este.

La tabla 3 muestra la resistencia a la compresión, según el método ACI 318 (ACI-318, 2005), encontrada en los diferentes elementos estructurales a partir de núcleos de la losa y trabes, utilizado para las pilas. Los problemas de corrosión en las trabes observadas fueron corroborados con los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión, que demuestran valores típicos de un concreto permeable. Sin embargo, la tabla 4 muestra los resultados de la prueba a la tracción (prueba brasileña), que en realidad es un método indirecto para obtener la resistencia a la tracción del concreto. Un ensayo brasileño debe mostrar valores del orden del 8% al 10% de los de la resistencia a la compresión (ASTM C496/C496M-04e, 2004). Los resultados de la tabla 4, son casi un tercio de los resultados de la tabla 3. Esta situación puede conducir a la formación de grietas y problemas mecánicos en las trabes y pilas, procedentes de la operación de las grúas Gantry y Gottwald en el muelle.

4. Discusión

La observación visual y los resultados indican que los elementos mecánicos tienen un comportamiento estructural adecuado, especialmente si se consideran

las cargas axiales con un alto peso específico. Sin embargo, el nivel de daños observados, llevó a pensar sobre la interacción inesperada de cargas estructurales y el medio ambiente.

El efecto ambiental aparentemente ha producido corrosión en la armadura del muelle. Las evidencias de corrosión son comprensibles, debido a que la resistencia mecánica, tanto a la compresión como tracción, no corresponden a concretos durables. Sin embargo, el problema de corrosión no es solo debido a la penetración de cloruros del medio ambiente en el concreto, sino también al ingreso de cloruros en las grietas de los elementos estructurales como consecuencia de los problemas de impactos durante la instalación y funcionamiento de las grúas. La figura 10 muestra de nuevo el mapeo de potencial de media celda de la trabe 47 con un acercamiento que permite ver una grieta longitudinal en la parte inferior de la viga, directamente relacionada con los valores de potencial obtenidos.

Desafortunadamente no se cuenta con ninguna evidencia sobre el momento en el que comenzó el daño estructural y el motivo que lo originó, debido a que el muelle 6 es una estructura de más de 10 años de edad.

Tabla 3. Resultados de la resistencia a la compresión de la losa, trabes y pilas

Resistencia a la compresión obtenida en los elementos estructurales evaluados (kg/cm ²)									
Losa				Trabes			Pilas		
Extremo sureste	Extremo Suroeste	Centro de losa	Extremo Noroeste	47	48	50	Bajo trabe 47	Bajo trabe 48	Bajo trabe 50
272*	255*	255*	250*	237	232*	231*	367**	359**	335**

Nota*: Los resultados que se muestran de losa y trabes son el promedio de tres y cuatro núcleos respectivamente.

Nota**: Valor promedio de las tres pilas bajo cada una de las trabes. En cada pila se tomaron 20 mediciones de esclerometría y se reporta el promedio de estas.

Tabla 4. Resistencia a la tensión indirecta de la losa y las trabes*

Elementos estructurales		Resistencia a la tensión indirecta kg/cm ²
Losa	Centro de losa	11.23*
	Extremo Suroeste	8.93*
	Extremo Noroeste	7.43*
Trabes	47	13.00*
	48	10.93*
	50	15.28*

Nota*: Los resultados que se muestran de losa y trabes son el promedio de tres y cuatro núcleos respectivamente

Las cargas estructurales que recibe el muelle 6, por simple inspección visual y por los datos obtenidos de las pruebas mecánicas (Tablas 3 y 4), parecen estar en acuerdo con el diseño estructural para este tipo de muelle. Sin embargo, parece ser que el análisis y diseño estructural no contempló el tipo e intensidad de carga ocasionado por la instalación, funcionamiento y tipo de esfuerzos ocasionados con las grúas. Aunque no se cuenta con una evidencia contundente de lo anterior, sí se pudo observar que los daños reportados en el 2010 no existían hace dos años y no están relacionados con el comportamiento esperado del muelle. La figura 11 muestra las

fotografías de una pila tomada en 2009 y en 2010. La aparición de grietas durante el último año parece estar relacionada, como se dijo antes, a la operación de las grúas en este muelle. Las pilas y las vigas presentan un aumento del número de grietas entre las inspecciones de 2009 al 2010. En la Figura 12 se presenta una hipótesis acerca de los posibles momentos de flexión y las grietas causadas por las correspondientes grúas. La figura 12 muestra una representación esquemática del efecto de carga de la grúa Gantry en el muelle, y dos fotos donde las grietas sobre pilotes parecen corresponder con el tipo de movimiento de las grúas.

Figura 10. Mapa de potencial electroquímico de la trabe 47, mV vs Cu/CuSO₄, cara Este.

Figura 11. Fotografía de la pila 3, eje 34, en el 2009 y 2010. Propagación de la grieta, aparentemente, debido a la operación de las grúas.

Figura 12. Mecanismo de falla propuesto y causante de grietas por el uso de las grúas Gantry.

La combinación de diferentes circunstancias (diferente distribución de carga comparada con la del diseño original, diseño estructural sin criterios de durabilidad, la agresividad del medio ambiente a la que está expuesta, etc.) se han combinado, acelerando el proceso de daño a la estructura como se describe en este trabajo.

5. Conclusiones

El daño de las traves y pilotes en el muelle 6, del puerto de Progreso, ha tenido una rápida evolución del 2009 al 2010. De acuerdo con la información disponible descrita en este trabajo, parece ser que las grúas Gantry y Gottwald, que se utilizan durante el transporte de carga y descarga de contenedores, está transmitiendo una carga que no había sido considerada. Este efecto, junto con la inesperada pérdida de alineación de las grúas durante su instalación, el funcionamiento y movimiento está originando y causando el agrietamiento y desprendimiento de concreto en su estructura (principalmente en las traves). La baja calidad del concreto permite el agrietamiento y fácil ingreso de los cloruros, lo que acelera la despasivación

del acero e incrementa el proceso corrosivo en las traves y pilotes del muelle.

La combinación de diferentes circunstancias (cargas no contempladas en el diseño, la baja calidad del concreto, etc.) instan a tener consideración sobre el uso de los criterios de durabilidad que se debe contemplar en un diseño estructural (clasificación atmosférica, calidad del concreto, etc.), para asegurar la sustentabilidad y funcionalidad de la estructura.

6. Recomendación

Se debe contemplar primeramente una reparación de daños con restitución de secciones previo control de la corrosión del refuerzo y posteriormente contemplar un recálculo estructural que contemple la compensación de cargas excéntricas, deslizamientos, desplomes y movimientos de torsión que están afectando en diferentes formas y magnitud a los elementos estructurales (traves y pilas). Posterior al recálculo, se recomienda realizar un refuerzo de las secciones con elementos de fibras de carbono.

Referencias

- ACI-318 05 (2005), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI Committee 318, p. 430.
- Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, Annual book of ASTM standards, p. 12.
- ASTM C496/C496M-04e (2004), Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual book of ASTM standards, p. 5.
- ASTM C805 / C805M - 08 (2008), Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, Annual book of ASTM standards, p. 3.
- ASTM Standard C 876. (1996). Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Annual book of ASTM Standards, 04 (02), p. 425-430.
- ASTM Standard C 1152 (1990), Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, Annual book of ASTM standards.
- Castro-Borges P. (1998), Chloride threshold in the tropical marine environment of the Yucatán Peninsula in México, (extended abstract) 49th Congress of the International Society of Electrochemistry, Kitakyushu, Japan, September 13-21, p. 551
- Castro-Borges P., Córdova-Quintal, M. L., Balancán-Zapata M. & Zozaya-Ortiz A., *"Inspection of a 70 year-old slab of a building in the Gulf of México"* en Advances in Concrete: An Asian Perspective, Eds. R. Gettu, K. Jayasankar and K. P. Pradeep, Proceedings of the 3rd Asian Conference on Ecstasy in Concrete, Chennai, Madras, India, 2010, pp. 677-686.
- del Valle Moreno, A., Fabela Gallegos, M.J., Hernández Jiménez, J.R., Vázquez Vega, D., Torres Acosta, A., Terán Guillén, J., Martínez Madrid, M. (2011). Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas, Publicación Técnica 336, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, ISSN: 0188-7297.
- Francois, R., Arliguie, G. & Bardy, D. (1997), Electrode potential measurements of concrete reinforcement for corrosion evaluation. *Cement and Concrete Research*, 24 (3) 401-412
- Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Giordano, D. E., Vignolo, A., Galeano, R. & Helene, P. (2012). Inspeção no palácio de la luz – Montevideo: uma visão durabilidade. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 2 (2) 94-109
- Troconis Oladis and Members of DURAR Network (1997), *Manual for Inspecting, Evaluating and Diagnosing Corrosion in Reinforced Concrete Structures*, CYED, Program XV.b, Durability of Reinforcement, p. 207.