



## REHABILITACIÓN DE UN MUELLE MEXICANO

**A. del Valle Moreno<sup>1</sup>, A. Torres Acosta<sup>1</sup>, M. Fabela Gallegos<sup>1</sup>, R. Hernández Jiménez<sup>1</sup>,  
D. Vázquez Vega<sup>1</sup>, J. Terán Guillén<sup>1</sup>, M. Martínez Madrid<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Mexicano del Transporte  
Km 12 carretera Querétaro-Los Galindo  
Mpio. de P. Escobedo, Qro. 76700

### RESUMEN

Debido a que las estructuras del muelle exhibían diversos indicios de daño, las autoridades del Muelle expresaron su interés en que se determinara la capacidad actual de soporte y el estado de corrosión reales del muelle. Atendiendo ese interés se instrumentaron diversos puntos en 5 de los 6 tramos, aplicando principalmente la técnica de extensometría eléctrica para medir los esfuerzos producidos por cargas aplicadas. Para la determinación del estado de corrosión del muelle, se realizaron pruebas mecánicas, químicas y electroquímicas. Se encontró que el 15% de los pilotes del muelle se debían reparar sustituyendo el acero de refuerzo y el 25% de los pilotes se debían reparar rehabilitando las varillas y reponiendo el concreto deteriorado. Los resultados de deformación mostraron que los tramos 2 y 3, poseen una mayor capacidad de carga que los tramos 4, 5 y 6. Con base en los resultados obtenidos, se propusieron las especificaciones de rehabilitación respecto a la corrosión y se establecieron cargas máximas permitidas para transitar por cada tramo del muelle.

Palabras Clave: Corrosión, Rehabilitación, Muelle, Capacidad de Carga, Extensometría

### ABSTRACT

The Pier exhibited diverse damage indications, reason why the authorities of the Pier expressed their interest in determining the lifting capacity and its corrosion state. Taking care of that interest, the technique of electrical extensometry was applied to measure the efforts produced by known applied loads. For the determination of the state of corrosion of the pier, mechanical, chemical and electrochemical tests were made. 15% of the piles of the pier were due to repair replacing the reinforcement steel and replacing the concrete deteriorated and 25% they were due to repair cleaning the rods and replacing the deteriorated concrete. The deformation results showed that sections 2 and 3 have a greater lifting capacity than sections 4, 5 and 6. With the obtained results, the rehabilitation specifications respecting to the corrosion were stated and fully allowed factored loads settled down to journey by each section of the pier.

Key words: Corrosion, Rehabilitation, Pier, Lifting capacity, Extensometry



## INTRODUCCIÓN

La degradación de las estructuras de concreto-metal, en los que participa el medio ambiente local es un fenómeno muy común en las zonas costeras. La presencia de sales, aire y altas concentraciones de humedad propician condiciones para que el acero, material común de refuerzo en estructuras de concreto, experimente cambios de tipo electroquímico, dando lugar al fenómeno de corrosión. La corrosión, como proceso de degradación electroquímico, disminuye no sólo las propiedades del acero, sino la capacidad estructural del concreto hidráulico.

Las necesidades de crecimiento al paso de los años del muelle en estudio, requirieron que de manera artificial se extendiera una zona de tierra firme sobre el mar en una porción de la bahía, facilitando el desarrollo de muelles de atraque para barcos de gran calado. Estos muelles consisten básicamente de una serie de losas de concreto hidráulico reforzado con acero, soportadas por pilas y pilotes apoyados en el lecho marino.

Para la conformación del muelle y su extensión actual, fue necesario aplicar rellenos para obtener terreno del mar, aprovechando las características físicas de la bahía. En esta saliente extendida artificialmente se ubicó el muelle con la disposición de dos bandas, la Banda Uno, con orientación norte-sur, se compone por los tramos 1, 2, 3 y 4 y la Banda Dos, con orientación este-oeste, compuesta por los tramos 5 y 6. Los seis tramos poseen características constructivas diferentes. De los seis, el tramo 1 consiste en una serie de losas de concreto tendidas sobre tierra firme contenida por muros de concreto, mientras que los restantes son losas por encima del mar. El tramo 1 corresponde al de menor calado, normalmente utilizado para el abastecimiento de combustible a los buques pesqueros de poco calado. El tramo 2 se compone de losas soportadas por pilas circulares de 1,5 m de diámetro, dispuestas en un arreglo cuadrado de 6,5 m de lado. Como característica propia, en la dirección este-oeste corren traveses de soporte de la losa sobre las pilas, proveyéndole refuerzo transversal. En los tramos 3, a 6 las losas están soportadas por pilotes cuadrados, originalmente de 0,5 m de sección, en posiciones vertical e inclinada. El tramo 6 presenta características particulares ya que, además de ser el más alejado y dar con tres de sus lados al mar, soporta la estructura para la carga y descarga de granos y de ácido sulfúrico. El objetivo principal de este proyecto fue la generación de información sobre las características y condiciones en que se encuentran los materiales que conforman la estructura para establecer, mediante una investigación detallada de diagnóstico, el origen de los daños y patologías que exhibe el muelle, conducentes a identificar acciones de reforzamiento o rehabilitación de los distintos tramos para incrementar el nivel de servicio del puerto y determinar la capacidad de carga actual a partir de mediciones específicas en porciones de losa y subestructura de soporte (pilas y pilotes).

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La evaluación de los daños por corrosión de la estructura comprendió una serie de ensayos físico-químicos de tipo semi-destructivo y no destructivo, realizados sobre las pilas y pilotes de los Tramos 2 al 6. Las pruebas de carga incluyeron el proceso de instrumentación para la medición de deformación unitaria relativa bajo la losa de los tramos mencionados, así como de vibración en algunos puntos sobre la estructura. Las mediciones se realizaron con base en la ejecución de pruebas de carga, utilizando para ello un vehículo de carga pesada tipo camión unitario de tres ejes (C3). Las técnicas utilizadas son del tipo no destructivo, por lo que no se altera la capacidad actual de soporte del muelle.



La deformación unitaria relativa considera únicamente el estado relativo de esfuerzos uniaxiales sobre los puntos instrumentados, no atendiendo estados de deformación existentes ni su historia previa. A partir de la deformación se estima el nivel de esfuerzos producido únicamente por las cargas aplicadas con el vehículo de prueba.

La medición de vibración se realizó con fines comparativos entre puntos distintos sobre la losa del muelle, con la intención de estimar la “movilidad” de los distintos tramos sujetos a medición.

La nomenclatura de identificación de las pilas y pilotes que se indica en las tablas de resultados corresponde a la utilizada en los planos que se elaboraron para la intervención de reparación que se realizó en el año 1996.

Un resumen cuantitativo de lo realizado se muestra a continuación:

Para las actividades relacionadas con corrosión:

- Identificación de daños visibles y caracterización de los mismos.
- Extracción de 26 núcleos de concreto para la realización de pruebas físicas y químicas.
- Ensaye de resistencia a compresión y determinación de peso volumétrico de 15 especímenes.
- Determinación del módulo elástico en 5 especímenes.
- Determinación del contenido de sulfatos en 2 núcleos.
- 10 pruebas de resistencia a la tensión por adherencia en el concreto con probetas de 75 mm de diámetro.
- 25 sitios en donde se realizó detección de armados y medición de espesores de recubrimiento.
- 100 series para determinación de dureza del concreto mediante esclerómetro.
- 11 determinaciones de profundidad de carbonatación, mediante solución indicadora de pH, realizadas en núcleos de concreto.
- Alrededor de 180 m<sup>2</sup> de área de lecturas para estimar el potencial de corrosión en el acero de refuerzo.
- 39 extracciones de muestras de polvo de concreto en 13 sitios para determinar el contenido de cloruros solubles en ácido.

Para las actividades relacionadas a las pruebas de carga:

- Instrumentación de galgas extensométricas.
- Preparación de sistema de adquisición de datos y vehículo para la ejecución de pruebas.
- Ejecución de pruebas de carga.
- Medición de vibración.

La ubicación de los puntos de instrumentación se hizo considerando la disposición geométrica, las características constructivas y la accesibilidad del personal. Para los ensayos de corrosión, la ubicación se hizo considerando las necesidades de cada ensayo en particular. Para las pruebas de carga, se seleccionaron puntos en pilas, pilotes, travesaños y losa para medición de deformación, algunos pares de puntos para medición de desplazamiento relativo entre ambos y algunas vigas para la medición de vibración.

### **Estimación de límites de deformación**

A partir de pruebas de compresión en 15 muestras obtenidas de pilas y pilotes de la estructura del muelle, se obtuvo el valor de  $f'_c$ , en el intervalo de 22,86 a 50,33 MPa, con un valor promedio de 34,24 MPa y una desviación estándar de 8,83 MPa. De acuerdo al coeficiente de



variación del 26% de las resistencias, se deduce una alta heterogeneidad en el valor de resistencia del concreto utilizado en el muelle.

Pruebas complementarias en cinco muestras estimaron un valor del módulo de elasticidad,  $E$ , en el intervalo de 15,99 a 21,03 GPa, con tres de ellas muy cercanas de alrededor de 20,72 GPa y las dos restantes en aproximadamente 16,3 GPa. Estos resultados muestran que el primer grupo presenta una mayor resistencia a la deformación que el segundo, por lo que en el primero menores deformaciones podrán producir mayores esfuerzos, mientras que en el segundo, similares niveles de deformación producirán esfuerzos menores.

Los límites de deformación críticos globales estimados se obtienen considerando combinaciones críticas de los valores de resistencia y del módulo de elasticidad. Tomando en cuenta el límite inferior incluyendo la desviación estándar, el valor de  $f_c'$  es de 25,41 MPa, resultando, por tanto, su valor asociado de resistencia a la tensión en 1,78 MPa (7% de  $f_c'$ ). Combinándolos con el mayor valor de  $E$  (20,72 GPa) resultan los límites críticos de deformación unitaria absoluta de 1226  $\mu\delta$  a compresión y de sólo 86  $\mu\delta$  a tensión. Los valores absolutos implican la inclusión de la historia de esfuerzo y deformación de la estructura, adicionales a los valores medidos.

Un criterio menos conservador es tomando el valor de  $f_c'$  de 34,24 MPa, con resistencia a la tensión estimada en 2,40 MPa y el promedio de  $E$  en 18,50 GPa. De acuerdo a estos valores, los límites de deformación unitaria absoluta serían de 1850  $\mu\delta$  a compresión y de 130  $\mu\delta$  a tensión, cerca del 50 % por arriba de los anteriores. No obstante, la heterogeneidad de las propiedades del concreto utilizado en los distintos tramos y en los procesos de rehabilitación genera mayor incertidumbre con estos valores.

#### **Estimación de capacidad de carga por unidad de superficie, de acuerdo a límites máximos de deformación a tensión**

Los límites de deformación críticos globales se obtienen de la combinación de valores de resistencia críticos y del módulo de elasticidad. Valor de referencia de  $f_c'$  es 25,41 MPa, con valor asociado de resistencia a la tensión de 1,78 MPa (7% de  $f_c'$ ). Combinándolos con el mayor valor de  $E$  (20,72 GPa) resultan los límites críticos de deformación unitaria absoluta de 1226  $\mu\delta$  a compresión y de sólo 86  $\mu\delta$  a tensión. Un criterio menos conservador es tomando el valor de  $f_c'$  de 34,24 MPa, con resistencia a la tensión estimada en 2,40 MPa y el promedio de  $E$  en 18,50 GPa. Los límites de deformación unitaria absoluta serían entonces de 1850  $\mu\delta$  a compresión y de 130  $\mu\delta$  a tensión. No obstante, la heterogeneidad de las propiedades del concreto utilizado en los distintos tramos y en los procesos de rehabilitación, genera mayor incertidumbre con estos valores. Para la estimación del área de referencia, se considera la correspondiente a un lado de los ejes de carga del camión C3 de prueba Figura 1. El área de referencia es 0,737 m<sup>2</sup>.

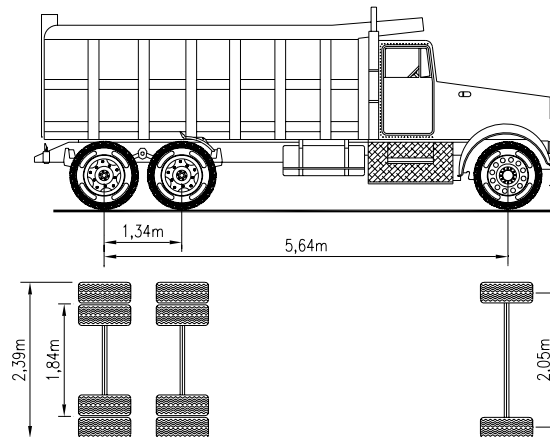


Figura 1. Distancias principales entre ejes del camión de carga C3 utilizado.

El pesaje por ejes del camión de prueba dio por resultado un peso global de 304,5 kN. De acuerdo a este pesaje, el eje delantero soporta 58,2 kN, el primer eje de carga 125,9 kN y el segundo 120,5 kN. Los ejes de carga en conjunto soportaban 246,4 kN, prácticamente el 81% del peso total del camión. Un lado de los ejes de carga soportan, entonces, 123,1 kN. La densidad de carga correspondiente a esos valores de carga y superficie es de 167 kN/m<sup>2</sup>

Los valores estimados de soporte de peso por unidad de área en cada tramo de prueba, de acuerdo a las máximas deformaciones registradas a tensión, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Capacidad estimada de soporte de carga por unidad de superficie [ton/m<sup>2</sup>].

Muelle	Deformación [μδ]	Registrada en	Tipo	Criterio 86 μδ	Criterio 130 μδ
M2	38	Losa	Tensión	38,54	58,26
	42	Losa	Delta máx	34,87	52,71
M3	31	Losa	Tensión	47,24	71,41
	38	Losa	Delta máx	38,54	58,26
M4	51	Trabe	Tensión	28,71	43,41
	60	Trabe	Delta máx	24,41	36,90
	89	Trabe	Delta máx2	16,45	24,87
M5	74	Losa	Tensión	19,79	29,91
	90	Losa	Delta máx	16,27	24,60
	142	Trabe	Tensión	10,31	15,59
	159	Trabe	Delta máx	9,21	13,92
M6	15	Losa	Tensión	97,63	147,58
	18	Losa	Delta máx	81,36	122,98
	76	Trabe	Tensión	19,27	29,13
	89	Trabe	Delta máx	16,45	24,87

Valores sombreados, sobrepasan límites estimados.

Caber reiterar que la estimación de los valores criterio (86 μδ y 130 μδ) implican un intervalo de resistencia que puede ser rebasado en algunas zonas del muelle. Esto, tanto por la presencia de zonas de reparación y obras previas, así como a las diferentes técnicas de reconstrucción y refuerzo aplicadas. Puesto que la deformación unitaria registrada corresponde a valores relativos, en la columna “Tipo” de la tabla se indica como Delta máx al intervalo de



deformación entre los valores mínimo y máximo registrados. De esta manera, el valor Delta máx siempre será mayor al valor de tensión, considerando indirectamente, pero no limitando, al caso de que exista una tensión previa por deformación en los puntos medidos, debida al historial de carga en el muelle. Se indican sombreados aquellos valores estimados por debajo de los límites de carga de referencia estimada.

Se observa de la tabla 1 que los mayores valores de deformación corresponden a menores capacidades de carga en los muelles. Debido al menor espesor y capacidad de carga, las losas requieren mayor atención que las trabes, en este sentido, para el tramo M5 se estiman las menores capacidades de carga. No obstante que en el tramo M6 los valores en la losa corresponden a estimaciones de soporte muy altos, en ese tramo se observaron discontinuidades y deterioro en zonas adyacentes, particularmente bajo la estructura de descarga de granel, lo que son indicador de una gran heterogeneidad en la estructura.

## CONCLUSIONES

Las actividades de reconocimiento del muelle y del desarrollo de la instrumentación y pruebas permitieron registrar algunas observaciones relacionadas con las condiciones estructurales aparentes y de operación del muelle. Un aspecto importante es el hundimiento que sufre el muelle M4, el cual muestra mayor evidencia en la parte de tierra de la convergencia entre las bandas Este y Sur. Este hundimiento generó la fractura y deterioro de la zona de maniobras, la cual fue reparada con la colocación de una losa sobre la existente, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. “Sobrelosa” en zona de hundimiento

Existe la posibilidad, además, de que durante las operaciones de carga en el muelle, se generen impactos al depositar material sobre la superficie de los tramos, lo que conlleva a la generación de fisuras en la parte inferior de la losa. A su vez, estas fisuras van propagándose y reflejándose tanto en la parte superior como en la inferior de la losa, dando lugar a zonas de filtración, esto, aunado a defectos de reparación y/o algunas eventualidades de incidentes en el manejo de cargas o maquinaria que dañe físicamente la estructura, promueven condiciones de deterioro acelerado de los componentes de la estructura del muelle en algunas porciones. En conclusión, los tramos 2 y 3 presentan de manera global una mayor capacidad de carga vertical que el 4, el 5 y el 6. Sin embargo, el 2 presenta mayor susceptibilidad a movimiento lateral horizontal que los demás tramos, debido posiblemente a una mayor separación entre las pilas de soporte y su verticalidad, comparado con los otros tramos. Debe notarse, no obstante, que los niveles de deformación a tensión representan una condición que puede ser crítica, particularmente en la parte inferior de las trabes y de la losa en los distintos tramos.

### Resistencia del concreto

En general, aunque se registraron valores de esfuerzo menores a  $250 \text{ kg/cm}^2$ , la resistencia a compresión puede esperarse superior a la resistencia de proyecto, consideración que se respalda



con los índices esclerométricos que arrojan buenos resultados. Sin embargo si es notable las importantes variaciones y los pesos volumétricos y módulos de elasticidad bajos, lo que evidencia que tanto en los pilotes originales como en las reparaciones el concreto no posee características de durabilidad efectiva. Está la excepción de las reparaciones coladas con la mezcla de grout y agregado grueso, las cuales han tenido un mejor comportamiento hasta el momento, si bien en muchos casos los potenciales de corrosión obtenidos son relativamente altos en la zona de variación de mareas y a simple vista se observan delgadas fisuras en algunas de ellas. En correspondencia con la baja calidad del concreto, los ensayos de resistencia a tensión por adherencia también arrojan bajos valores en promedio.

### **Contaminación del concreto**

Dado que como se comprobó, los concretos utilizados no han sido concebidos para ser durables, altos niveles de cloruros, en conjunto con el frente de carbonatación, ya han alcanzado en general altas profundidades en el concreto. Las reparaciones han mitigado los problemas temporalmente aunque algunas han sido poco exitosas, tal es el caso de las reparaciones dañadas coladas con concreto convencional y armado adicional colocado con poco recubrimiento, aunque debe decirse que a pesar de encontrarse con severa corrosión, este acero también funcionó como sacrificio al deteriorarse y proteger al acero original de los pilotes. Las reparaciones hechas con grout y sin acero de refuerzo adicional han funcionado mejor y a pesar de que las muestras de polvo indican contenidos altos de cloruro hasta los 12 cm, el acero original de los pilotes se encuentra en general a mayor profundidad debido a la sección circular de estas reparaciones.

Por otro lado, de la verificación de armados con el equipo detector y de la inspección visual, se encontraron recubrimientos con variación importante, tanto en las reparaciones como en las pilas sin reparar. En éstas últimas, los recubrimientos encontrados indican que los armados quedaban fuera de posición al momento de realizarse el colado, dejando en ocasiones en un lado de la pila espesores de recubrimiento de 3 a 4 cm, mientras que en el lado contrario pueden encontrarse espesores de hasta más de 10 cm. Aunado a esto, la presencia de panaleras en la superficie facilitaron el acceso de los contaminantes y dieron origen prematuro a los problemas de corrosión.

### **Potencial de corrosión**

El área más contaminada por cloruros y con presencia de humedad constante, verificada con las lecturas de potencial, comprende una sección de 40 a 50 cm medida hacia arriba a partir del nivel aproximado de marea alta. En esta área, tanto en reparaciones como en pilotes sin intervención, más del 90% de las lecturas estuvieron por debajo de los  $-200$  mV, y de ellas, alrededor del 70 % se encuentran por debajo de los  $-350$  mV. Lecturas también bajas y generalizadas, aunque en menor grado, se extienden todavía hasta una altura de 1 m encima del nivel de marea alta.

Por otro lado, salvo puntos aislados, las travesaños dieron lecturas con bajo potencial, lo que se coincide con los bajos niveles de cloruros encontrados en las muestras de polvo extraídas de las losas. De ahí que los problemas locales de corrosión que se encuentran en estos elementos se deben principalmente a bajos recubrimientos y a irregularidades en la superficie producidas por la falta de compactación del concreto. Esto mismo sucede con los pocos daños que se han presentado en la estructura de la pantalla del muelle.



### Pruebas de carga

Como resultado del proceso de instrumentación, de pruebas y su medición en los distintos tramos del muelle del recinto fiscal de API Guaymas, se desprende lo siguiente:

Existe una gran heterogeneidad en la condición y propiedades del concreto utilizado en la estructura del muelle. Esto fue producto de la aplicación de diversos procesos de rehabilitación previos que, a su vez, reflejaron defectos constructivos en la estructura del muelle. Estos defectos participan en las condiciones de deterioro estructural del muelle, principalmente en los tramos 3, 4, 5 y 6.

De los seis tramos que componen el muelle, el 2 y el 3 mostraron los menores niveles de deformación, cuyos intervalos de variación se mantuvieron por abajo de los posibles límites de deformación crítica a tensión ( $86 \mu\delta$ ). Para la misma carga vertical aplicada con el vehículo de prueba, en algunos puntos de medición en los tramos 4, 5 y 6, ese valor fue rebasado.

Los niveles de deformación registrados reflejan en general que los tramos 4, 5 y 6 poseen una menor capacidad de carga actual que el 2 y el 3. No obstante, las mediciones de vibración indican que el tramo 2 presenta una ligera susceptibilidad a movimiento horizontal transversal, mientras que el 3 y el 4 al vertical. Las mediciones parciales en 5 mostraron susceptibilidad a movimiento en ambas direcciones, vertical y horizontal. Para el caso de 6, no se cuenta con datos de vibración. En general, las condiciones físicas y ambientales de la zona donde se ubica el recinto, así como las actividades de operación sobre los tramos, pueden afectar la condición actual de la capacidad de estos tramos.

Las estimaciones de los límites de deformación críticos se obtuvieron de valores de resistencia de muestras de concreto de la estructura del muelle. Estos valores presentaron gran diversidad, lo que representa una condición de heterogeneidad de propiedades en toda la estructura. Así mismo, las mediciones de deformación con la aplicación de la técnica de extensometría, como técnica no destructiva, no consideran el estado de deformación previo a las mediciones. Por tanto, los valores de deformación absoluta no pueden ser obtenidos de esta manera.

Con estas pruebas se determinaron las cargas máximas permitidas por unidad de área en los tramos que conforman el muelle. Los valores estimados variaron entre 12,3 y 63,1 ton/m<sup>2</sup> considerando una losa de 35 cm de espesor. Variaciones en la capacidad de carga por diferencias en sus espesores fueron estimadas también mediante un factor de reducción y deberán utilizarse en las zonas donde los espesores son menores a 35 cm.

### REFERENCIAS

1. Gere, James M.; Timoshenko, Stephen P. "Mecánica de materiales". 2ª Edición. Grupo Editorial Iberoamérica. 1986. México.
2. Hannah, R. L.; Reed, S. E. "Strain gage" Users' handbook, Elsevier Applied Science, London and New York Society for Experimental Mechanics, Inc. 1992.
3. ACI Standard. "Building code requirements for structural concrete" (ACI 318-95), Section 8.5. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI. USA.