

Construcción del muelle de Progreso

Eric I. Moreno, Andrés A. Torres Acosta y Pedro Castro Borges

RESUMEN

Un muelle de 60 años de edad de concreto reforzado con acero inoxidable y expuesto a un ambiente tropical marino, ha presentado un buen desempeño durante su vida útil. Una inspección visual realizada recientemente ha demostrado la no existencia de daños por corrosión en la sub y superestructura, mientras que una estructura construida posteriormente (hace 30 años), y adosada al mismo muelle en cuestión, se encuentra en un estado de deterioro tal que ésta se encuentra clausurada para su uso. Este documento describe la construcción de este muelle, las características físicas y químicas de los materiales utilizados (concreto y acero) así como los resultados de inspecciones electroquímicas realizadas a la varilla de refuerzo de acero inoxidable en fechas recientes. También se presenta una breve discusión acerca de temas de durabilidad de estructuras de concreto expuestas a ambiente marino.

Palabras claves: Acero inoxidable, cloruros, concreto, corrosión, durabilidad, inspección visual, muelle, potencial de corrosión, velocidad de corrosión.

ANTECEDENTES

Ubicación del muelle

El puerto de Progreso de Castro, en el estado de Yucatán, México (Figura 1), está situado en la costa Norte de la península de Yucatán a 21.5 grados latitud Norte. El clima del puerto es tropical húmedo y su temperatura está normalmente entre 25 y 40 grados centígrados. Los vientos más frecuentes provienen del NE y SE, aunque los más fuertes provienen del N y NW. Durante los meses de abril a octubre, es frecuente tener vientos huracanados de hasta 175 km/hr. Geológicamente, la península de Yucatán es una formación de roca caliza, cuya litoral está cubierto de 4 m, aproximadamente, de arena fina, desapareciendo ésta entre 350-400 m de la costa, convirtiéndose el piso en roca desnuda. Esta formación continúa dentro del Golfo de México hacia el Norte con una pendiente de aproximadamente 1:1000 (Christensen 1954). Las corrientes marinas medidas en el lugar durante el período de construcción del muelle fueron de entre 0.15 a 0.30 m/s con dirección paralela a la costa causando un movimiento continuo del recubrimiento de arena. Desde esas fechas los estudios realizados confirmaron que era imposible dragar el suelo marino para darle

una mayor profundidad de calado y permitir atracar a los barcos en el muelle sin problemas, ya que el movimiento continuo de la arena en el suelo marino cubriría cualquier tipo de canal (Christensen 1954). Estos estudios corroboraron que las estructuras protectoras ocasionarían una erosión a gran escala en las costas aledañas a ellas. El gobierno mexicano estipuló, por las necesidades del proyecto, que el muelle debiera alcanzar la profundidad comprendida entre 5.4 y 6 m, por lo que el muelle necesitaba una longitud total de 2,000 m para cumplir este requerimiento (Christensen 1954).

El proyecto y su construcción

Este muelle fue construido entre 1937 y 1941 por la empresa danesa Christiani and Nielsen después de ganar un concurso al que convocó el gobierno mexicano (Christensen 1954). Una de las razones por las que esta empresa ganó el concurso fue la de minimizar el uso de acero convencional utilizando concreto masivo para la sub y superestructuras. Las autoridades mexicanas tenían en mente la idea de un muelle al que tuviesen que proporcionarle poco o ningún mantenimiento, pues en otras obras portuarias del país se presentaban problemas de corrosión que querían evitarse.



Figura 1. Vista General del Muelle de Progreso.

El diseño propuesto del muelle consistió en una serie de arcos de concreto simple soportado sobre pilares también de este tipo de concreto. El diseño tuvo varias ventajas. La primera consistía en que fuese una estructura abierta la cual permitiese el libre flujo de las corrientes y, por lo tanto, no ocasionar erosión y/o acumulación de arena en la costa. De acuerdo a los diseñadores, la estructura al ser construida con concreto simple —sin refuerzo— permitiría el uso de roca caliza de la región, triturada como agregado (grueso y fino), ya que la alta porosidad de este tipo de agregado permitiría el ingreso de agentes agresivos (cloruros principalmente) dentro del concreto, y en caso de poseer éste varillas de refuerzo, se generaría corrosión en un periodo muy corto.

El muelle propuesto por esta compañía quedó integrado por tres partes: acceso (de 415 m), viaducto (de 1,752 m) y el muelle fiscal (de 50 x 205 m en área). El acceso fue construido a base de piedra y en la actualidad se perdió dentro de la mancha urbana de Progreso. El viaducto consiste de 146 entre-ejes de 12 m de largo y aproximadamente 9.5 m de ancho cada uno. Cada entre-eje está formado por dos pilares de concreto simple, un cabezal (viga) reforzado y un arco de concreto simple.

La Figura 2 presenta un detalle de un entre-eje tipo. Los pilares descansan directamente sobre el terreno marino sin ser anclado. Según los diseñadores, Christiani and Nielsen, el propio peso de la estructura soportaría las cargas gravitacionales y laterales que se le aplicasen (Christensen 1954).

Estos pilares no poseen acero de refuerzo, para así tener la certeza de que en un futuro no presentasen problemas por corrosión. En el proyecto se utilizaron dos tipos de pilares, los estándar con una base circular de 4.10 m, y los de anclaje a cada sexto entre-eje. Los pilares de anclaje tienen una base

elíptica, con su eje mayor de 7.00 m y su eje menor de 4.40 m. Estos pilares de anclaje fueron diseñados para resistir la presión lateral de un arco en caso de que el arco contiguo fuese destruido. De esta manera, en caso de derrumbe, el daño se limitaría a seis entre-ejes. La Figura 3 muestra un detalle de los moldes metálicos utilizados para la fabricación de los pilares. Para dar una idea del volumen de concreto utilizado los constructores reportaron el uso de 65 m³ en la fabricación del pilar más elevado del muelle de unos 7.6 m de alto (Christensen 1954). Sin embargo, durante el proceso de construcción, y debido a la capa de arena en los primeros 400 m de la costa, fue necesario utilizar cilindros huecos de concreto masivo en los primeros 13 entre-ejes (156 m aproximadamente). Estos cilindros fueron hincados en la capa de arena.

En los cabezales de la subestructura se utilizó acero inoxidable 304 como refuerzo longitudinal, debido a que estos elementos trabajan en flexión (Christensen 1954). Se reporta que se utilizaron 220 toneladas de acero inoxidable de 30 mm de diámetro (Knudsen y Skovsgaard 1999). En la Figura 4 se presenta un detalle de la fabricación de un cabezal del muelle. En la Figura 5 se muestra el cabezal completo antes del colado de los arcos.

La superestructura consta de los arcos triarticulados, muros laterales, relleno de roca triturada y una losa de concreto armado (no detallada en el reporte publicado por los constructores). Los arcos de concreto simple salvan un claro de 9.20 m, se elevan 1.70 m y su espesor es de 40 cm (ver Figura 2). El arco se diseñó considerándolo como uno de tres articulaciones: dos en los extremos y una en la cúspide. Las articulaciones fueron fabricadas con tiras de plomo y corcho (Christensen 1954). A lo largo de los arcos y en ambos extremos, se fabricaron muros laterales de concreto simple, los cuales

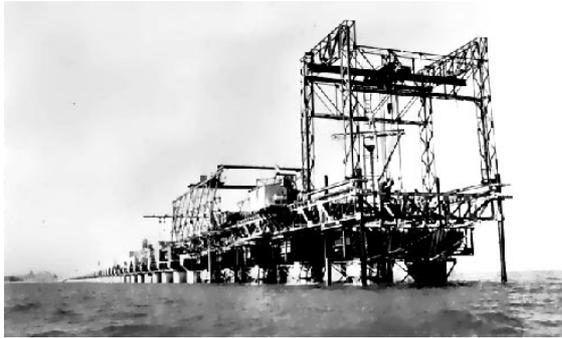


Figura 7. Vista de la estructura utilizada para la construcción del muelle (Christensen, 1954)

En un principio, el viaducto quedó formado por dos carriles, uno para ferrocarril y el otro para vehículos motorizados. Los rieles del ferrocarril fueron fijados a la losa continua de concreto reforzado (Christensen 1954).

Al final del viaducto se construyó la plataforma del muelle fiscal de 205 m de largo y 50 m de ancho. Esta plataforma posee los mismos elementos estructurales que conforman el viaducto: pilas de concreto simple, cabezal de concreto reforzado con acero inoxidable y arcos de concreto

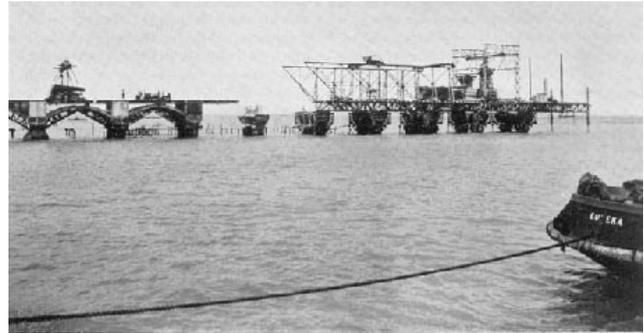


Figura 8. Desfasamiento entre las dos estructuras metálicas empleadas (Christensen, 1954)

simple (Figura 9). Consta de 25 entre-ejes de 8 metros de largo, con 26 filas de 10 pilares. Cuatro de estas filas contienen pilares de anclaje (los dos extremos y dos en medio). Los arcos de concreto tienen un claro de 5.20 m y una altura de 1.66 m. Al centro de esta plataforma se construyó el edificio de la aduana con 3 niveles de altura y construido con estructura a base de columnas, traveses y losa maciza de concreto reforzado. En la Figura 10 se muestra una vista aérea de esta plataforma y el edificio aduanal al tiempo de su inauguración.



Figura 9. Construcción de la plataforma del muelle (Christensen, 1954)

Como el proyecto original del viaducto consideraba dos líneas ferroviarias corriendo paralelas, éste fue calculado para cargas de ferrocarril aplicadas en ambos carriles. La distribución de las cargas de diseño fueron consideradas como un ferrocarril con locomotora de 85 toneladas con cinco ejes separados a cada 1.5 m y un vagón de 39 toneladas de tres ejes espaciados a 1.50 m. La

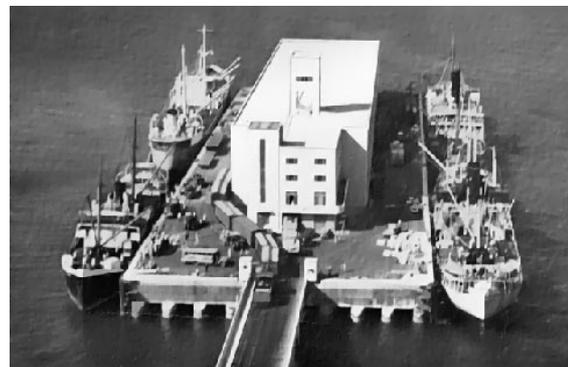


Figura 10. Vista aérea de la plataforma del muelle fiscal en 1941 (Christensen 1954).

plataforma del muelle fue calculada para cargas de 4 ton/m². La magnitud de los esfuerzos permisibles de diseño aplicado por las pilas al terreno y por las cargas externas hacia con los arcos y las pilas fueron de 15 y 25 kg/cm² respectivamente (Christensen 1954).

Como se mencionó, la compañía danesa Christiani & Nilsen ganó el concurso del proyecto y construcción del muelle, firmando el contrato a finales de 1936. La estructura metálica móvil fue erguida y lista para ser usada en noviembre de 1937. En marzo de 1941 todos los pilares ya habían sido construidos y el último de los arcos de la plataforma se construyó en septiembre de 1941.

Materiales utilizados en la construcción. Como se mencionó, se utilizó agregado producto de trituración de piedra caliza la cual poseía un peso específico de entre 1.9 y 2.0. La roca caliza para la obtención del agregado grueso provino de lajas ubicadas a flor de tierra a unos 10 km al sur del puerto de Progreso. Estas lajas eran de entre 1 y 5 m² de área y espesores entre 0.2 y 0.5 m. Las lajas fueron generalmente extraídas por medios manuales (marro, pico y barreta) y en pocos casos se utilizó dinamita. Las rocas extraídas fueron transportadas en vagones de tren hacia una maquinaria llamada quebradora con capacidad de 20 m³/hr (Christensen 1954).

En aquel entonces se estudió la posibilidad de usar arena de playa como agregado fino pero su estudio granulométrico determinó que no poseía las características de distribución adecuada de tamaños. Además se hicieron análisis de concentración de cloruros en esta arena encontrándose éstos en alta proporción, por lo que se desechó la idea de utilizarla. La arena utilizada para la construcción de este muelle también fue producto de trituración de roca caliza.

No se reportan las características químicas del cemento utilizado, pero se sabe que se consumieron aproximadamente 23,000 ton de cemento de los cuales 17,500 ton provinieron de Dinamarca y el restante provino de Estados Unidos y México. El cemento se entregó en sacos de 50 kg. El agua provino de un pozo de 8 m de profundidad ubicado a unos 150 m de la costa, y ésta fue bombeada hacia una tubería de 15 cm de diámetro hacia la mezcladora con una longitud total máxima de 2,000 m. El total de concreto fabricado y reportado por Christiani & Nielsen fue de 72, 500 m³, de los cuales 32,000 m³ fueron colocados bajo agua en los pilares, 30,000 m³ se usaron en la fabricación de los cabezales, arcos y muros laterales. Los últimos 10,500 m³ se utilizaron para la construcción del edificio de aduana y la losa sobre los rieles ferroviarios (Christensen 1954).

Desempeño actual. La importancia primordial de este muelle estriba en ser la estructura de concreto reforzada con acero inoxidable más antigua en el

continente americano. Su antigüedad (más de 60 años) permite comprobar el uso del acero inoxidable en un ambiente sumamente agresivo como es el puerto de Progreso. Este hecho ha llamado la atención a nivel mundial (Knudsen *et al.* 1998, Knudsen y Skovsgaard 1999, Knudsen y Skovsgaard 2001). Ante la falla del acero recubierto de epóxico, tanto en los Estados Unidos como en Canadá, y el todavía contradictorio desempeño del acero galvanizado, la atención se ha enfocado en el acero inoxidable. Los estudios sobre acero inoxidable como acero de refuerzo en concreto se han incrementado recientemente, así como han surgido nuevas aplicaciones como el acero normal revestido de una capa de acero inoxidable. Por otra parte, los fabricantes de varillas de acero inoxidable reclaman una vida útil de 70 años sin problemas de corrosión para el acero inoxidable tipo 304 y de 120 años para el acero inoxidable tipo 316, embebidos en concretos expuestos en ambiente marino en ambos casos. Sin embargo, estos datos son resultados de pruebas de laboratorio. De aquí la importancia de contar con datos reales de una estructura antigua como la que nos ocupa.

Inspección preliminar. Fue llevada a cabo en 1998 (Knudsen y Skovsgaard 1999), limitándose a inspeccionar el cabezal 9, que coincide con la línea costera. En esta ocasión, se procedió con una inspección visual, medición del recubrimiento de concreto, obtención de muestras para pruebas de concentración de cloruros, y análisis petrográfico. La inspección visual mostró que el muelle estaba en buena condición general, sin signos visibles de corrosión o agrietamientos. El recubrimiento de concreto fue estimado en 10.5 cm. El análisis de cloruros mostró una alta concentración, en el rango de 1.5 a 1.9% de cloruro por peso de concreto seco. El análisis petrográfico sugirió una relación agua/cemento entre 0.50 y 0.70, con una media entre 0.55 y 0.60. No se observaron huellas de reacción álcali-sílice ni de ataque por sulfatos.

Inspección por durabilidad. Fue llevada a cabo en 2001 (Castro *et al.* 2002), inspeccionándose 100 de los 146 arcos que conforman el viaducto. En esta ocasión se procedió con la inspección visual, medición de potenciales y velocidades de corrosión, y obtención de núcleos de concreto en lugares selectos para determinación del contenido de cloruros en el concreto, la resistividad y la porosidad del concreto.

De la inspección visual se observaron seis arcos con agrietamientos de consideración (> 3mm) y quince arcos mostraron agrietamientos pequeños (< 3mm). No se observaron manchas de corrosión y las

pocas zonas donde el acero inoxidable se encontraba expuesto se debían a descascaramientos producidos por impacto de barcos.

Los valores de resistividad medidos estaban en el rango de 0.5 a 2.5 k Ω , el cual es característico de una exposición a un medio agresivo, y sugiere un alto riesgo de corrosión. Los valores fueron consistentes con los esperados para concretos de baja calidad (relación agua/cemento > 0.50).

Los valores de la concentración de cloruros se encontraban en el rango entre 1.0 y 2.5 % por peso de cemento, por una parte confirmando los resultados previos, y por otra parte alertándonos sobre posibles problemas de corrosión en la barra de acero inoxidable, ya que estos valores sobrepasan el umbral de concentración de cloruros conocido para iniciar la despasivación de este tipo de acero.

La porosidad del concreto se estimó en un rango entre 19 y 24% utilizando la norma ASTM C 642. Aunque esta porosidad es grande, es la esperada para concretos hechos con piedra caliza como

agregado. La profundidad de carbonatación en las probetas estaba entre 0 y 1.5 mm, prácticamente inexistente.

Los valores de los potenciales y las velocidades de corrosión medidos en el cabezal 9 sugieren que la barra de acero inoxidable está en estado activo de corrosión, lo que es congruente con los valores de concentración de cloruros obtenidos.

CONCLUSIONES

En conclusión, el muelle de Progreso se encuentra en buena forma después de más de 60 años de vida útil. Sin embargo, empiezan a notarse signos de envejecimiento a través de los potenciales y las velocidades de corrosión, y los pequeños agrietamientos en los arcos. Estas señales son congruentes con la vida útil de los materiales empleados y sugieren que se empiecen a programar acciones de mantenimiento para poder incrementar la vida útil de este muelle dada su importancia estratégica e histórica para la región.

REFERENCIAS

1. A. Christensen, "Pier at Progreso," in *50 Years of Civil Engineering*, Christiani & Nielsen, Copenhagen, Dinamarca, 1954.
2. A. Knudsen, F. M. Jensen, O. Klinghoffer, y T. Skovsgaard, "Cost-effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement", *Memorias del Congreso Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures*, Florida, Diciembre, 1998.
3. A. Knudsen y T. Skovsgaard, "Ahead of its peers", *Concrete Engineering International*, 1999, pp. 58-61.
4. A. Knudsen y T. Skovsgaard, "The optimal use of stainless steel reinforcement in concrete"; *Memorias del Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, N. Banthia, K. Sakai, y O. E. Gjorv, eds., The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001, pp. 1360-1367.
5. P. Castro, O. Troconis, E. Moreno, A. Torres, M. Martínez, y A. Knudsen "Inspecting a half-century reinforced concrete pier made with stainless steel reinforcement in Mexico", *NACE Corrosion/2002*, Paper 02207, abril 2002.