

Evaluación de la capacidad de carga de la estructura de un muelle corroído en el Golfo de México

M. Martínez-Madrid*¹ , A. A. Torres-Acosta¹ , S. Aschermann², B. Commander², J. Grimson², P. Castro-Borges³ 

*Autor de Contacto: martinez@imt.mx

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.323>

Recepción: 15/06/2018 | Aceptación: 16/08/2018 | Publicación: 31/08/2018

RESUMEN

Se realizó una prueba de carga viva y un análisis de calificación en un muelle dañado por la corrosión en el Golfo de México para evaluar su integridad estructural. Los procedimientos incluyeron instrumentación para la aplicación de carga de cuatro cargas diferentes (50, 60, 350 y 700 Toneladas) para examinar su rendimiento estructural, luego calibrar los modelos de elementos finitos resultantes de la estructura y finalmente estimar los factores de clasificación de carga utilizando la metodología AASHTO. Los resultados mostraron que los daños por corrosión no representaron una amenaza estructural extrema; sin embargo, se descubrió que los elementos estructurales de varios pilares actualmente están sobrecargados y necesitan ser reforzados externamente. Se describen los procedimientos de prueba, el análisis y el manejo de datos

Palabras clave: capacidad de carga; tasa estructural; daño por corrosión.

Citar como: M. Martínez-Madrid, A. A. Torres-Acosta, S. Aschermann, B. Commander, J. Grimson, P. Castro-Borges (2018), “Evaluación de la capacidad de carga de la estructura de un muelle corroído en el Golfo de México”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 347-362, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.323>

¹ Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Km. 12 Carretera Querétaro - Galindo, Sanfandila, Querétaro, México

² Bridge Diagnostic Inc., 1995 57th Court North Suite 100, Boulder CO 80301-2810, Estados Unidos.

³ CINVESTAV, Unidad Mérida, Km 6 Carretera Antigua a Progreso, Cordemex, Mérida, Yucatán, México.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2019.

Load rating assessment of a corroded pier structure in the Gulf of Mexico

ABSTRACT

This work assesses the structural integrity of a pier located in the Gulf of Mexico through a live-load testing analysis of a corroded structure that withstands heavy loads. Procedures included instrumentation for load application of four different loads (50, 60, 350, and 700 Ton) to examine its structural performance, then calibrate the resultant finite-element models of the structure, and finally estimate the load rating factors using AASHTO methodology. Results showed that corrosion damages did not appear to represent an extreme structural menace; however, it was found that several piers' structural elements are currently overloaded and need to be externally reinforced. This paper outlines the testing procedures, describing both the followed analysis and the data management criteria.

Keywords: load capacity; structural rate; corrosion-damage.

Avaliação da capacidade de carga da estrutura de um cais corroído no Golfo do México

RESUMO

Uma prova de carga e análise de classificação em um cais danificado pela corrosão no Golfo do México foi realizado para avaliar sua integridade estrutural. Os procedimentos incluíram instrumentação para aplicação de carga de quatro cargas diferentes (50, 60, 350 e 700 t) para examinar seu desempenho estrutural, calibrar os modelos de elementos finitos resultantes da estrutura e, finalmente, estimar os fatores de classificação de carga usando a metodologia AASHTO. Os resultados mostraram que os danos causados pela corrosão não representaram uma ameaça estrutural extrema; no entanto, constatou-se que os elementos estruturais de vários pilares estão atualmente sobrecarregados e precisam ser reforçados externamente. Este documento descreve os procedimentos de ensaio, de análise dos resultados e os critérios de gerenciamento de dado.

Palavras-chave: capacidade de carga; taxa estrutural; dano de corrosão.

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que la corrosión del acero de refuerzo representa un enorme y costoso problema por solucionar en estructuras en ambientes marinos, por ello es requerida obligadamente una inversión enfocada en su preservación (Schmitt Günter, 2009), (Hays).

Estructuras de concreto que son expuestas al agua de mar son especialmente susceptibles a la corrosión. Cuando las sales y otros químicos difunden a través del concreto, promueven la aparición de grietas debido a las tensiones internas que provocan las capas de óxido expansivo del acero. Además, la humedad y sales pueden permear rápidamente a través de estas grietas para causar más daños prematuros relacionados con la corrosión (NASA Kennedy Space Center). A pesar de que el agrietamiento es el signo más evidente de problemas de corrosión, puede estar relacionado a otros daños, como deterioro estructural, una pérdida de la rigidez por flexión, así como también pérdida de capacidad de carga. Además, los productos de corrosión debilitan la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, por lo tanto, afectando las propiedades mecánicas de la estructura dañada, dando como resultado un decremento en su integridad estructural.

La mayoría de los muelles en México muestran un grado de corrosión como se detalla en un reporte por Torres Acosta et al. (2012). El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) en conjunto con Bridge

Diagnostics, Inc. (BDI) instrumentaron un procedimiento original para evaluar el daño de un muelle dañado por la corrosión para determinar si cumple aún de manera apropiada el uso para el que fueron diseñados originalmente. Esto con la intención de ser aplicado como herramienta de diagnóstico a todos los puertos importantes en México.

Una parte primordial en esta evaluación es una prueba de carga para determinar si un muelle, mostrando daños significativos por corrosión, puede aún operar sin riesgo, soportando todas las cargas de servicio requeridas, incluyendo grúas pórtico y vehículos transportadores de contenedores que se encuentran presentes normalmente durante procedimientos de carga y descarga. Esto se logra evaluando el desempeño estructural a través de una serie de pruebas de carga controladas, y posteriormente desarrollando los modelos de campo verificados, de acuerdo a los cuales el muelle es clasificado por carga usando las especificaciones AASHTO LRFD (AASHTO, 2002).

Como lo sugiere el término, la prueba de carga diagnóstico, es un proceso no destructivo que puede determinar el desempeño de una estructura bajo condiciones de carga normales. Para puentes y muelles, la carga normalmente es aplicada por vehículos (camiones o grúas) con pesos de eje medidos a través de rutas preestablecidas. La ubicación del vehículo debe ser monitoreada a junto con las mediciones de varios sensores adecuados.

Después de que las pruebas de carga están completas, los valores medidos son usados para verificar y calibrar las respuestas teóricas generadas por un modelo representativo en un software. Para el uso del modelo este debe tener características de geometría y rigidez realistas. Esto se logra esencialmente reproduciendo el procedimiento de prueba de carga con un modelo de Análisis de Elemento Finito (AEF); esto incluye la generación de un modelo a dos o tres dimensiones de la estructura (dependiendo de la complejidad de esta), aplicando sensores virtuales en el modelo y aplicando escenarios con cargas idénticas a las usadas en los procedimientos de carga prueba en campo. Teniendo representación geométrica certera y reproduciendo la carga prueba, se puede hacer una comparación directa entre las respuestas en campo y analíticas.

Una vez obtenido el modelo representativo, las cargas de diseño o clasificación requeridas, pueden ser aplicadas y las capacidades de carga pueden ser calculadas para todos los componentes en el modelo. Debido a que las cargas aplicadas a cada elemento estructural son generadas por una representación realista de la estructura completa, las cargas componentes son más precisas. Otra ventaja de la prueba de carga diagnóstico es el determinar si una sección que parece dañada o significativamente corroída está causando o no una redistribución de la carga a otros componentes estructurales. A pesar de todo, debido al daño por corrosión, la capacidad del componente se vería significativamente afectada, causando una capacidad de carga reducida y un error de cálculo para ese miembro de la estructura en particular. Esta es una aclaración importante porque la estructura puede responder en una manera perfectamente adecuada bajo cargas típicas como se verificó en las pruebas de campo, pero en la realidad, la capacidad de carga es significativamente más baja debido a la capacidad estructural disminuida. Por lo tanto, mediciones estructurales no indicarán que un miembro de la estructura es “débil”, aun cuando luzca “dañado”. Esta brecha entre inspecciones visuales y respuestas estructurales conocidas es lo que llevó al desarrollo del “Acercamiento Integral” que esencialmente combina mediciones de campo, inspección visual, y el modelado analítico para reducir la incertidumbre inherente en las tres herramientas de evaluación.

Con respecto a la clasificación de carga de los componentes, la misma ecuación especificada por la AASHTO – Manual para evaluación de condición de puentes es aplicado en (AASHTO, 2002). Además, las condiciones de carga crítica son diferentes a esas aplicadas a las pruebas de carga. Todas las cargas de vehículos requeridas son aplicadas al modelo de la estructura incluyendo los escenarios multi-presencia y efectos dinámicos.

$$RF = \frac{C - \gamma_{DC}(DC) - \gamma_{DW}(DW) \pm \gamma_P(P)}{\gamma_L(LL + IM)} \quad (1)$$

Donde:

RF = Factor de clasificación para miembro individual.

C = Capacidad del elemento

γ_{DC} = LRFD Factor de carga para componentes estructurales y uniones

DC = Efecto de carga muerta debido a componentes estructurales.

γ_{DW} = LRFD factor de carga para componentes estructurales y uniones

DW = Efecto de carga muerta debido a componentes estructurales.

γ_P = LRFD factor de carga para cargas permanentes distintas a cargas muertas = 1.0

P = Cargas permanentes diferentes a cargas muertas.

LL = Efecto por carga viva

IM = Efecto de impacto, AASHTO a medida.

2. METODOLOGÍA

2.1 Procedimientos para Pruebas Estructurales

2.1.1 Proceso de instrumentación.

El muelle evaluado era una estructura de concreto reforzado la cual fue diseñada para soportar importantes cargas incluida una grúa pórtico, cargas vehiculares y de contenedores provenientes de la carga y descarga de barcos. Su superestructura comprende 11 vigas longitudinales puestas en vigas T invertidas transversales, y una plataforma continua de 5 tramos sin aparente superficie de desgaste indicado y su ancho es 20.8 m dividido en 7 largueros interiores espaciadas 2 metros de sus centros, 2 vigas principales bajo las vías de las grúas, y dos pequeños largueros exteriores.

En general, el muelle presentó diferentes niveles de degradación estructural, mostrando signos de corrosión del acero principalmente evidenciadas por largas áreas de desprendimientos. Había grietas visibles en los largueros, vigas principales, y en la parte superior de la losa. Fue evidente la sobrecarga por el aplastamiento de la plataforma fija prefabricada adyacentes a los largueros. La figura 2 muestra los resultados de la inspección del daño en el muelle entre las vigas principales 38 y 47, obtenidas antes de que el muelle fuese instrumentado. Las tablas 1 y 2 muestran algunas de las patologías típicas de degradación observadas en la inspección de daños realizada al muelle.

Dos zonas del muelle (entre las vigas principales 38 y 47) fueron instrumentadas y puestas a prueba con carga: una zona con degradación mínima denominada como “saludable” (entre las vigas 38 y 40, tabla 1), y otra con signos notorios de degradación, definida como “dañada” (entre las vigas 45 y 47, tabla 2). Ambas secciones fueron instrumentadas con 44 transductores de tensión, 8 transductores de desplazamiento, y 8 transductores de rotación (Figura 1). Había longitudes de calibre extendido de 61 cm usadas en los largueros principales y las vigas T invertidas para lograr esfuerzos distribuidos de manera similar en el concreto reforzado.

Los transductores de esfuerzos e inclinómetros fueron fijados a miembros estructurales usando un adhesivo de curado rápido y bases removibles montadas, o “pies”. Los sensores fueron instalados y una vez realizadas las pruebas, fueron removidos. Sensores de desplazamiento tipo voladizo fueron fijados a la estructura instalando dos anclajes de cuña de ¼ de pulgada (6 mm) y atornillando los sensores a los anclajes.

2.2.2 Pruebas de carga.

El muelle se sometió a varios tipos de pruebas de carga, las cuales incluyeron varias posiciones transversales de camiones de carga, el movimiento de una grúa pórtico y el movimiento de una grúa Gottwald aunada a una carga soportada por la grúa (Figura 3). Se colocaron marcadores fijos para determinar donde cruzaban los vehículos, para así poder realizar comparaciones de estos análisis a futuro con respecto a las cargas por vehículos en las mismas ubicaciones que en las pruebas de campo.

Las primeras pruebas consistieron en una serie con cargas dinámicas semi – estáticas que consistieron en un camión contenedor desplazándose a través de los tramos instrumentados en 6 diferentes posiciones laterales. Todas las pruebas fueron registradas continuamente a una frecuencia de muestreo mínima de 33.33 Hz. Las pruebas de carga se realizaron a una velocidad de rastreo lenta (4-8 km/h) para minimizar los efectos dinámicos.

La segunda serie de pruebas consistió en desplazar una de las grúas pórtico grandes a través de los tramos instrumentados. Similar a las pruebas con el camión de carga, las mediciones y la posición de la grúa fueron registradas continuamente a un ritmo de muestreo mínimo de 33.3Hz. La grúa pórtico montada en vías para las pruebas tenía un peso de 700 tons. (43.75 toneladas por eje con una separación entre soporte de 15.24 m).

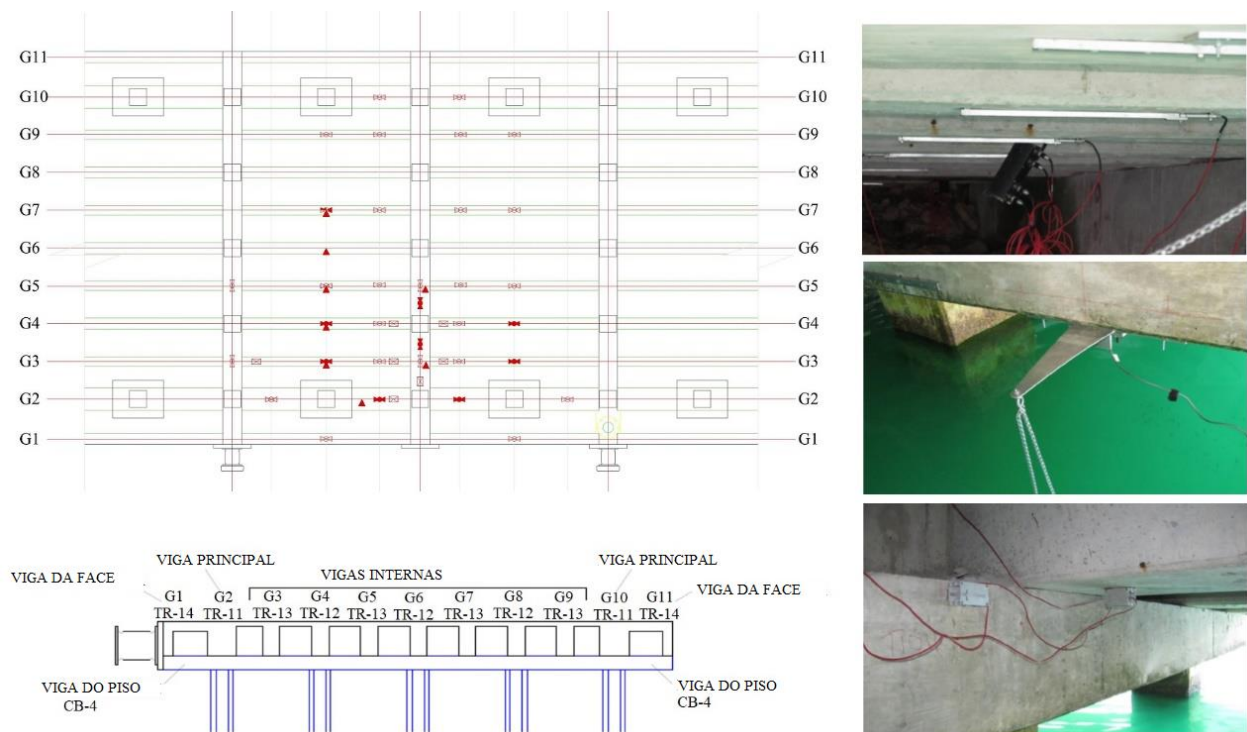


Figura 1. Plano de instrumentación general con ubicaciones de medidores secciones transversales y designación de elementos estructurales. Foto superior: medidores de carga a mitad de tramo; foto central: Sensor de deflexión; inferior: Inclinómetro y sensores de rotación.

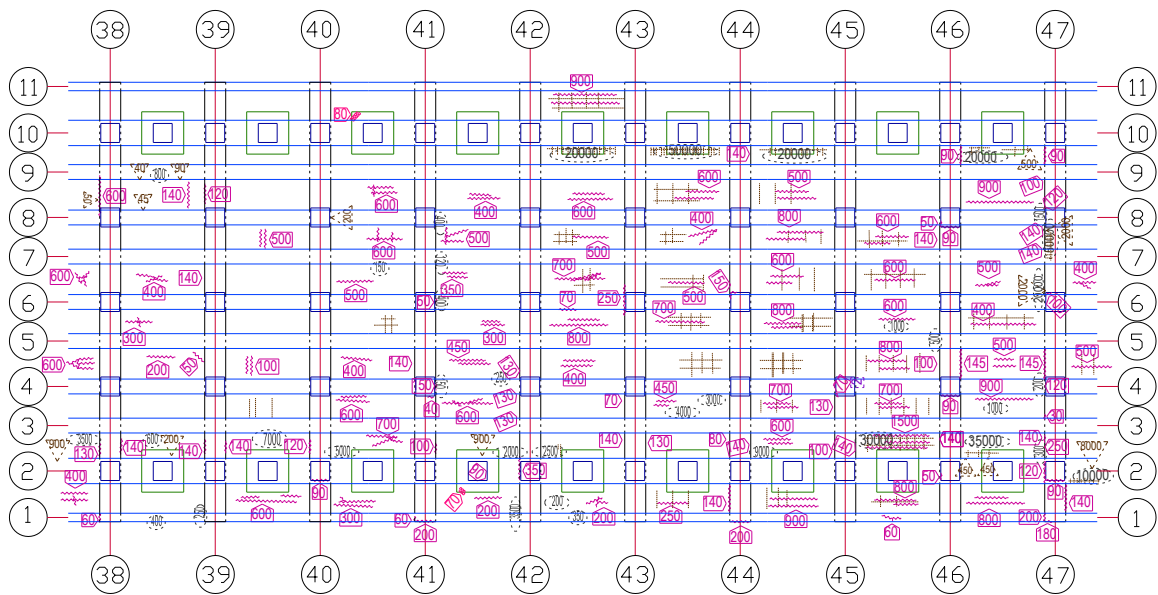


Figura 2. Inspección de daños de vigas 38 y 47 del suelo del muelle. La sección “saludable” comprendió el área del muelle entre las vigas del suelo 38 y 40. La sección “dañada” fue definida como el área del muelle entre las vigas 45 y 47 del suelo.

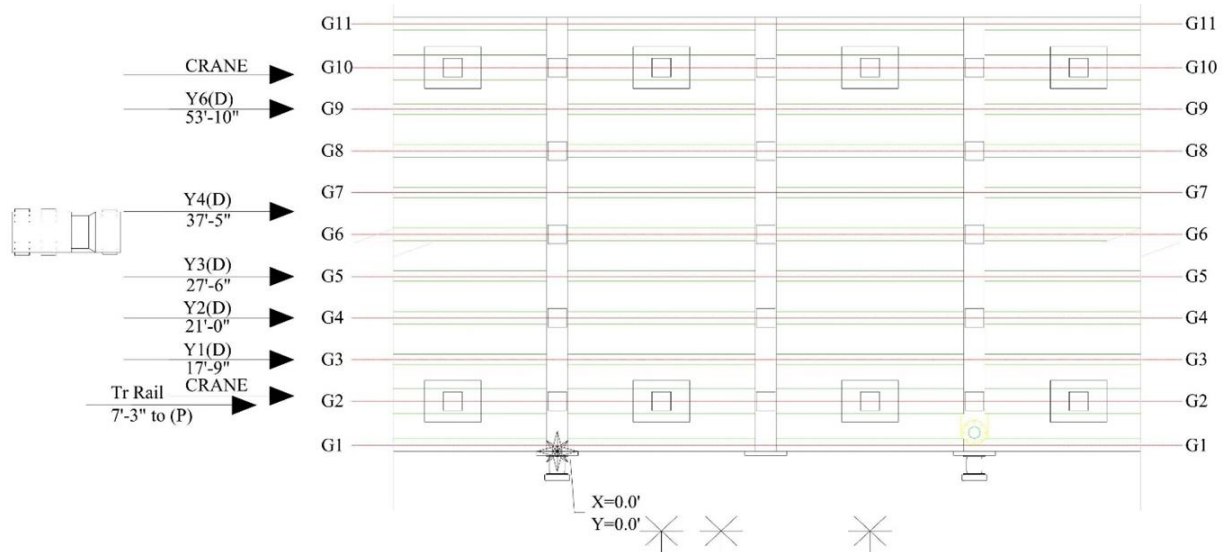


Figure 3. Posición general de camión de carga generada por el camión plan y tipos de carga aplicadas en las pruebas (de izquierda a derecha camión grúas pórtico y Gottwald).

El camión usado en la sección “saludable” pesó 48.18 toneladas, distribuyéndose 3.01 toneladas en el eje 1 (con una separación entre ruedas de 2.03 m), 11.67 toneladas en los ejes 2 y 3 (con una separación de 2.13 m), y 10.63 toneladas en los ejes 4 y 5 (con una separación entre ruedas de 2.13 m). La sección “dañada fue puesta a prueba con un camión de 39.7 toneladas de peso, con una distribución de 3.13 toneladas en el eje 1 (con una separación de ruedas de 2.06 m), 9.91 toneladas en los ejes 2 y 3 (con una separación de ruedas de 2.18 m), y 8.13 toneladas en los ejes 4 y 5 (con una separación de ruedas de 2.18 m. Idealmente los mismos contenedor y camión debieron haberse usado en ambas pruebas, sin embargo, esto no fue factible debido a las operaciones normales del puerto.

La tercera serie de pruebas consistió en pruebas de cargas estáticas usando la grúa pórtico, pero esta vez sin movimiento. Para estas pruebas, la grúa se colocó de manera que el centro de su carro oeste se localizara a la mitad del primer tramo instrumentado (12 y 19 respectivamente). Los datos se registraron continuamente mientras la grúa realizaba una serie de maniobras típicas de carga y descarga: levantar un contenedor completamente lleno, después mover el contenedor al extremo lejano del embarcadero (sobre el agua), después mover el contenedor al final cercano del embarcadero, posteriormente bajar el contenedor de regreso al suelo. Estas pruebas estáticas fueron realizadas para obtener un entendimiento cualitativo de las características en la transferencia de cargas de la grúa durante el proceso de carga y descarga.

La cuarta y última serie de pruebas fueron una de carga dinámica y una de carga estática, llevadas a cabo con la grúa Gottwald más pequeña. Como en las otras pruebas de carga dinámica, las mediciones de los sensores y la posición longitudinal de la grúa fueron registrados continuamente a una velocidad de muestreo mínima de 33.3 Hz mientras la grúa era movida a lo largo de los tramos instrumentados a velocidad lenta. Debido a un mal funcionamiento de la grúa y sus limitaciones, solo fue realizada una prueba a lo largo de la ruta marcada, y solo en el área “dañada” del muelle. La prueba estática consistió en registrar datos mientras la grúa extendía sus estabilizadores, los bajaba, los levantaba por completo del suelo, regresaba a bajarlos, y los replegaba. La grúa Gottwald pesaba 360 toneladas, distribuidas equitativamente en sus ejes con 60 toneladas en cada uno (con una separación entre soportes de 4.65 m).

Tabla 1. Inspección de daños de la sección “saludable” del muelle.













Floor Beams 38-39	
Viga 38 del suelo vista general cara este	
Viga 39 del suelo vista general cara oeste	   Pequeña grieta entre G8-G9. Pequeña delaminacion bajo G1
Pilar 1, viga 38 del suelo Cara este	 

Tabla 2. Inspección de daños en la sección dañada.

Floor Beam 46-47	
Viga de suelo 39 vista general, cara este	
Viga de suelo 46 vista general cara oeste	    
Detalle de viga de suelo 47, Cara oeste, entre G6-G7.	

3. RESULTADOS

3.1 Investigación preliminar de los resultados de pruebas

Todos los resultados de campo fueron examinados en primera instancia gráficamente para dar una evaluación cualitativa de la respuesta de la estructura a cargas dinámicas.

Las respuestas estructurales como función de la posición de la carga fueron registradas por el indicador de posición portátil del camión, proveyendo datos de esfuerzo en función de la posición. Los resultados de las pruebas de cruces de camiones idénticos fueron reproducibles, y todas las deformaciones parecieron ser lineales con respecto a la magnitud de la carga (posición del camión) y la vasta mayoría de respuestas regresaron a cero, indicando que la estructura actuó en un régimen lineal- elástico. Los resultados de deformación por el camión pueden ser observados en la Figura 4, en la cual se observó una reproducibilidad de las pruebas y un comportamiento lineal – elástico.

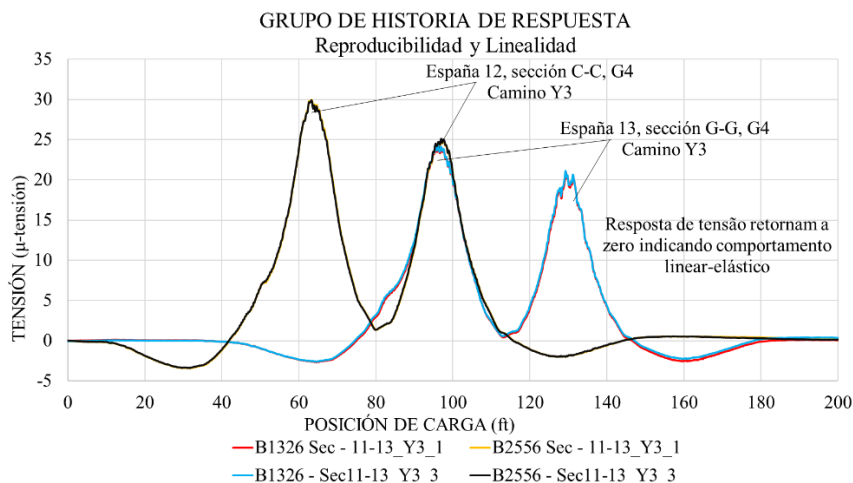


Figure 4. Reproducibilidad y comportamiento lineal – elástico de los resultados de pruebas - deformaciones.

Las magnitudes de las respuestas de los sensores de deformación del tramo central en el área “dañada” fueron mucho menos consistentes que las magnitudes obtenidas de la sección “saludable”. Estas respuestas eran de esperarse debido al nivel más alto de degradación observado en la sección “dañada” en comparación con la sección “saludable” del muelle, e indica que pueden ser confirmados valores de resistencia más bajos en el modelo FE de la sección “dañada”. La Figura 5 ilustra magnitudes de deformación consistentes registrados en la sección “saludable”, y la Figura 6 ilustra los resultados inconsistentes de la sección “dañada”. Los valores máximos de deflexión de ambas secciones fueron comparados directamente. En general, hubo concordancia entre ambas regiones y frecuentemente la sección “saludable” tuvo deflexiones ligeramente mayores (porque la carga aplicada a la sección “saludable” era mayor).

Una comparación directa de los resultados de desplazamiento y deformación fue hecha para las respuestas del camión y la grúa Gottwald. La grúa Gottwald indujo respuestas significativamente mayores en las vigas de suelo y largueros en comparación con el camión completamente cargado. Esto se puede observar en la figura 7 para los valores de desplazamiento de los largueros y en la figura 8 para los valores de deformación de los mismos. La distribución de carga lateral de esta estructura fue examinada usando la deformación del borde inferior y los valores de desplazamiento para todas las vigas para las posiciones del camión que generaron las máximas respuestas del tramo central. La distribución lateral aparente fue baja en ambas partes. Esto puede ser debido al hecho de que las partes estructurales de la Gottwald son muy largas y absorben la mayor parte de la carga, y también fue posible que la plataforma fuese flexible debido a las extremadamente largas cargas puntuales aplicadas por los camiones contenedor cargados y la grúa móvil Gottwald. Durante el proceso de prueba de cargas, se observó que las formas fijas en el lugar (SIIP) fueron aplastadas más severamente en la cara interior de los largueros principales.

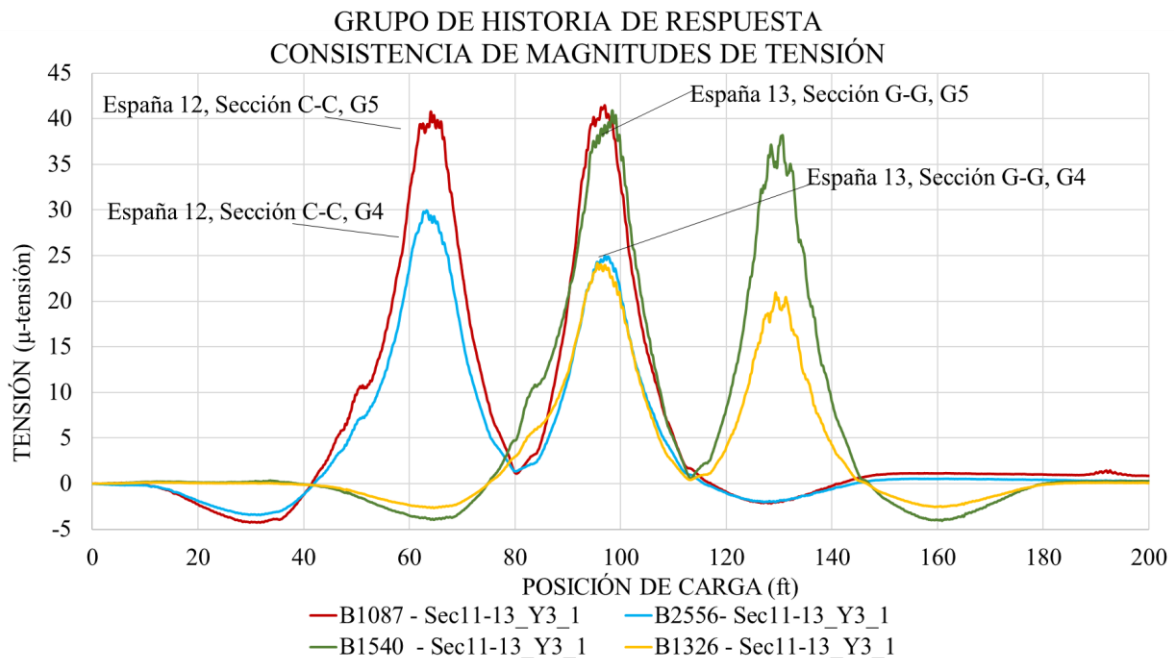


Figura 5. Magnitudes de deformación del tramo central consistentes registradas en la sección “saludable”.

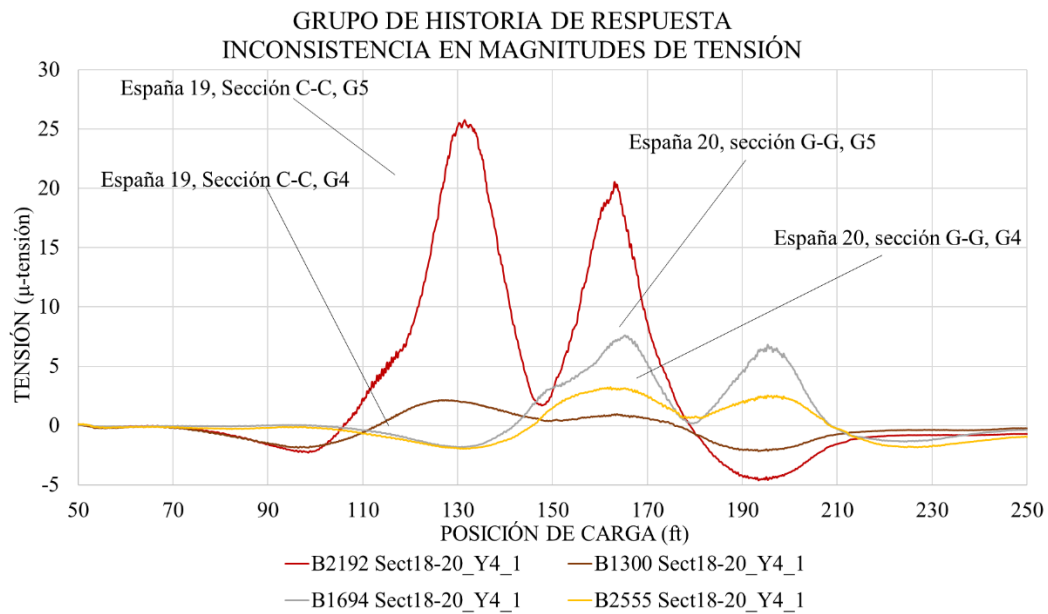


Figura 6. Magnitudes de deformación en el tramo central inconsistentes en la sección “dañada”.

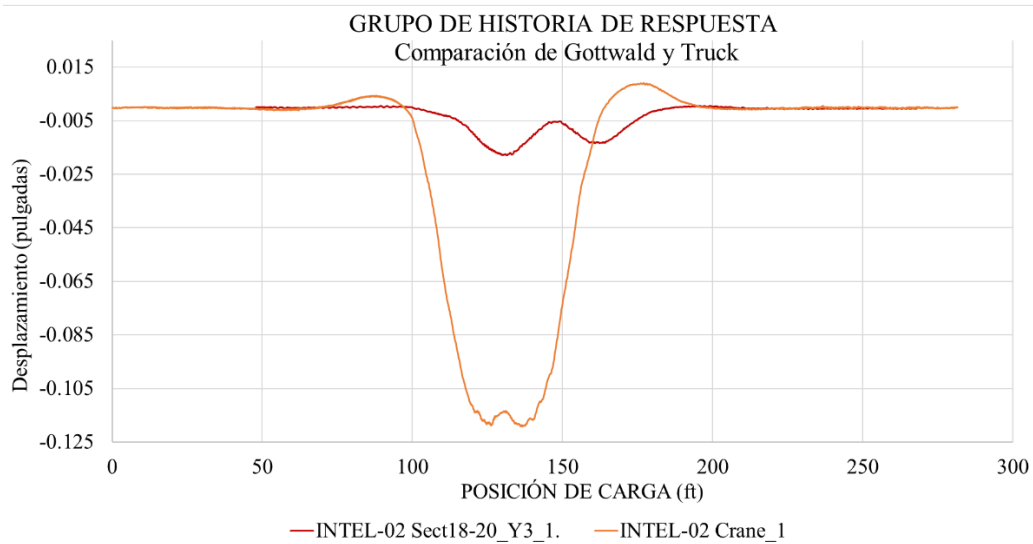


Figura 7. Desplazamientos medidos de la viga secundaria producida por un camión y una grúa Gottwald.

Esto puede ser debido a que los rieles para el carro de la grúa pórtico se encuentran desviados hacia la parte interior de la cara de los largueros principales y el hecho de que los estabilizadores de la grúa Gottwald principalmente ponen carga a la plataforma y los largueros inmediatamente adyacentes a las vigas principales. Esto indicó que la losa en esas ubicaciones solo transfería carga en una dirección. Parecía que la carga del camión en los largueros interiores era transferida a las vigas principales bastante bien, pero que la carga de la grúa no era transferida a los largueros principales de la manera esperada. Esto fue un factor importante en el modelo. La distribución de la carga de la grúa a los largueros interiores es ilustrada en la Figura 9.

Como se planteó anteriormente, todos los datos de las pruebas fueron procesados inicialmente y evaluados para su calidad. Posteriormente, un conjunto de datos de prueba para cada trayectoria fue seleccionado por tener la mejor calidad aparente. Los datos seleccionados fueron usados posteriormente para calibrar los modelos de elemento finito (MEF) para la estructura, que fueron a su vez usados para producir las capacidades de carga.

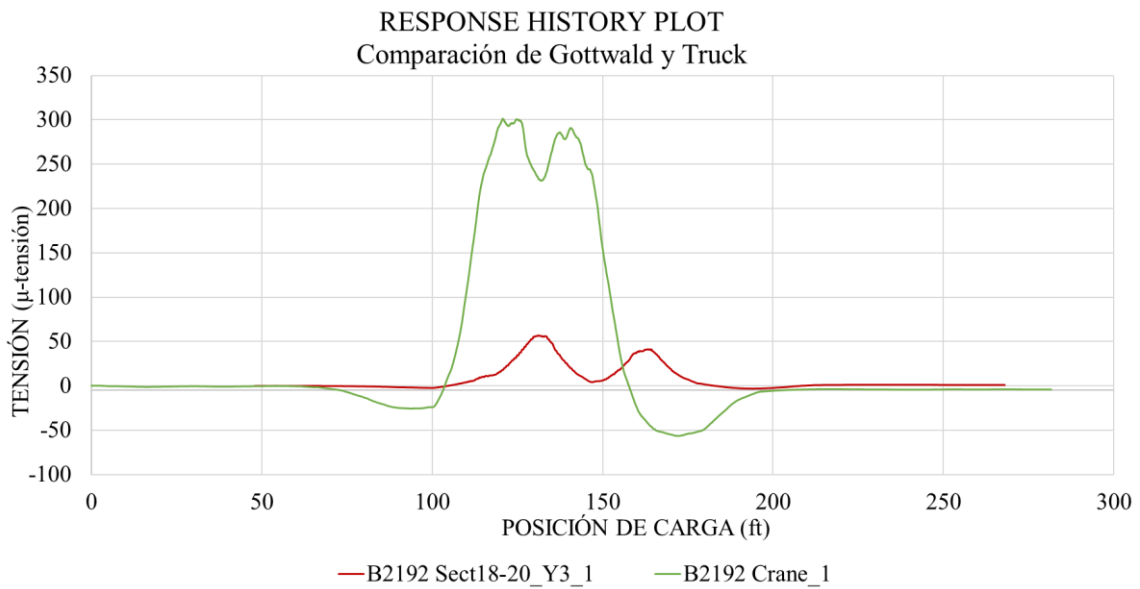


Figure 8. Deformación de larguero debido al camión y la grúa Gottwald.

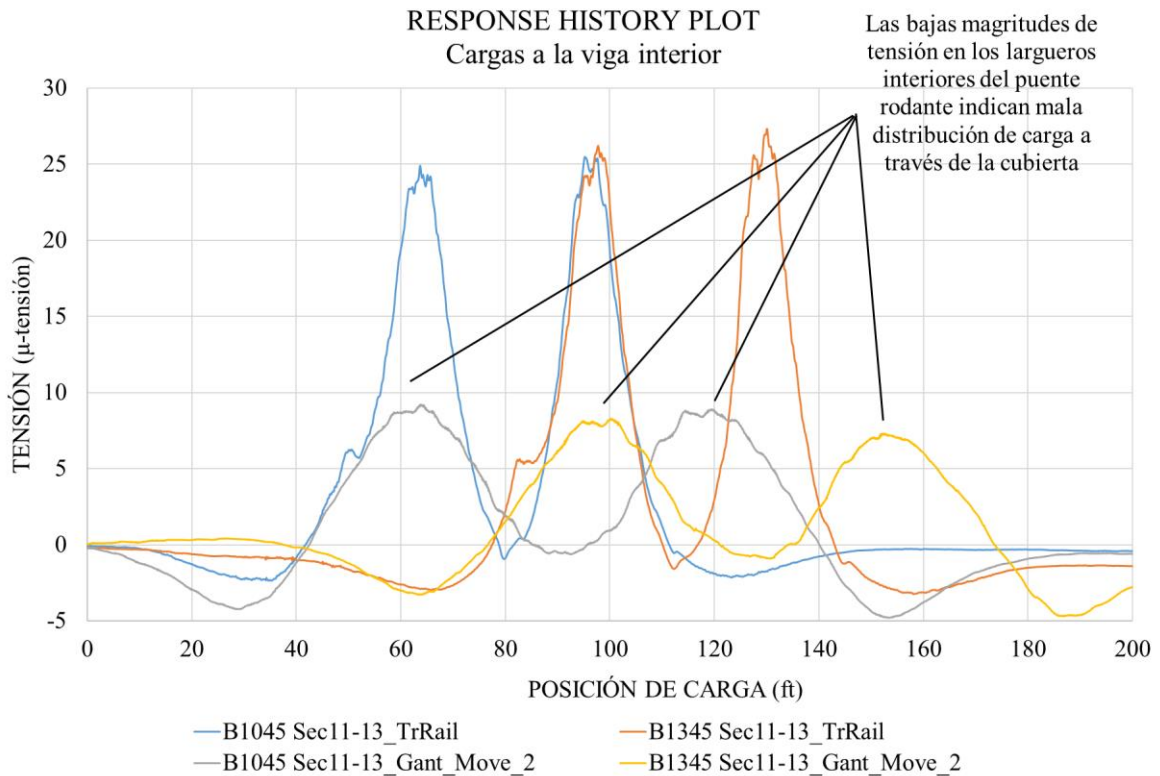


Figure 9. Distribución de la carga de la grúa para largueros interiores.

3.2 Modelado, Análisis y correlación de datos

La información obtenida en la investigación preliminar de estas pruebas fue posteriormente usada para verificar la exactitud de un MEF (Figura 10). Los tres métodos y hallazgos de los procedimientos del modelado de elemento finito (EF) fueron: Generación del modelo de EF; Modelo de Procedimientos de Calibración, y finalmente Resultados de la calibración del modelo.

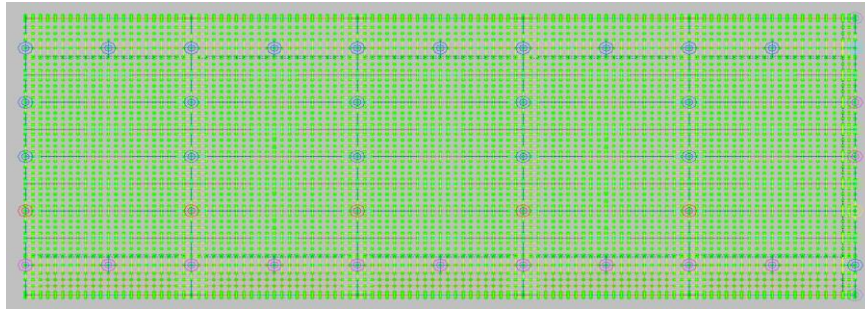


Figure 10. Modelo de elemento finito de la estructura del muelle evaluado.

Siguiendo con los procedimientos de optimización, el modelo “saludable” produjo un coeficiente de correlación promedio de 0.9729, mientras que el modelo “dañado” produjo una correlación promedio de 0.9704. Ambas correlaciones pueden ser consideradas como adecuadas para una estructura de concreto reforzado (R/C) de este tipo. La tabla 3 muestra la exactitud de los valores del modelo y los parámetros usados en el modelo inicial y obtenidos para los modelos finales. Estos valores fueron determinados para establecer los iniciales como teóricos, y los finales ajustándolos a los resultados del modelo finito.

3.3 Resultados de capacidades de carga.

Una vez el modelo de elemento finito fue calibrado para las condiciones de campo, se hizo un análisis ingenieril para identificar cualquier parámetro optimizado que pudiese cambiar con el tiempo o que fuese no fidedigno con cargas muy pesadas o futuros daños. El factor de clasificación de carga fue determinado por una fórmula basada en la capacidad de cierto elemento, en las cargas estáticas y dinámicas aplicadas (y sus correspondientes factores), y en un efecto de impacto considerado. Es conocido que un factor de clasificación de carga mayor a 1.0 indica que la capacidad de un miembro excede las cargas aplicadas con los factores de seguridad deseados. (AASHTO, 2002). Un factor de clasificación menor a 1.0 indica que un elemento es deficiente por lo tanto ciertos vehículos o cargas específicas no pueden cruzar el puente con el factor de seguridad deseado. Un número cercano a 0.0 indica que la estructura no puede cargar su propio peso muerto y mantener el factor de seguridad deseado. El componente con el factor de clasificación más bajo generalmente controla la clasificación de carga de la estructura completa. Como se mencionó anteriormente, la ecuación para clasificación especificado por el Manual de Evaluación para la Condición de Puentes de la AASHTO fue usada (AASHTO, 2002).

3.3.1 Cálculos de la capacidad

Las capacidades de momento y cortante fueron calculadas para los largueros R/C usando las Especificaciones de Diseño de Puentes de la AASHTO LRFD 5ta edición – 2010 y los planos estructurales de construcción entregados por el IMT. De acuerdo a los planos entregados, el límite elástico de las barras de refuerzo se asumió era de $4,200\text{kg/cm}^2$. La fuerza a la compresión del concreto se asumió era de 233 kg/cm^2 basados en las pruebas de compresión de los cilindros llevada a cabo en núcleos muestra del IMT.

3.3.2 Procedimientos para la clasificación de carga

Las capacidades de cargas se realizaron con el modelo calibrado de acuerdo al método de AASHTO LRFD. Los factores de carga y resistencia usados en los cálculos de clasificación de carga son mostrados en la tabla 4. Varias combinaciones de vehículos de carga fueron también consideradas para la clasificación de carga. Combinaciones de carga se basaron en los procedimientos normales de operación y se intentó incluir otras combinaciones factibles que podía o no ser condiciones de operación típicas. Hubo 6 escenarios específicos: uno con la grúa pórtico sola, uno con la grúa

Gottwald sola, una con la misma grúa Gottwald estática, una con cuatro camiones contenedores, uno con la grúa pórtico y un camión, y el final con la grúa pórtico y cuatro camiones.

3.3.3 Resultados de la clasificación de las cargas

La tabla 5 muestra un resumen de la clasificación de factores de carga y respuestas para los vehículos de clasificación de carga anteriormente mencionados. Los factores de clasificación de momento crítico positivo ocurrieron en la mitad de las vigas T invertidas debido a una cantidad insuficiente de acero de refuerzo para momento positivo. Las capacidades de los momentos negativos se controlaron en los extremos de las vigas T pero fueron apenas inferiores a 1.0 para todas las capacidades usadas. Las capacidades de cortantes críticos fueron controladas por la capacidad de carga de los estribos de las vigas T invertidas para la falla de la suspensión.

El factor de capacidad de carga controlando el total de esta estructura fue 0.20 produciendo el momento positivo con la grúa Gottwald al desplazarse.

Tabla 3. Precisión del modelo y valores de los parámetros.

Parámetros del modelado	Valores iniciales del modelo	Valores finales del modelo
Módulo efectivo (E [kg/cm ²])		
- Losa		
- Losa junto a vigas-T	225,000	35,150
- Losa adyacente a viga TR-11	225,000	17,580
- Vigas TR-13 al centro del claro	225,000	17,580 / 0
- Vigas TR-13 a ¼ claro	225,000	81,275 / 60,960
- Vigas TR-13 en extremos	225,000	220,400
- Vigas TR-12 al centro del claro	225,000	43,940
- Vigas TR-12 a ¼ claro	225,000	142,510 / 106,870
- Vigas TR-12 en extremos	225,000	220,400
- Vigas TR-11 al centro de claros	225,000	70,300
- Vigas TR-11 en extremos	225,000	101,900
- Vigas-T a centro del claro	225,000	109,700
- Vigas-T a los extremos	225,000	89,150
		256,600
Rigidez torsional efectiva (J [cm ⁴])		
- Vigas-T invertidas	69,960,000	52,208,000
Resistencia vertical de pilas en apoyos de Vigas T(Fz [kg/cm])		
- Resorte interior de pilas	1,597,000	1,160,800
- Resorte intermedio de pilas	1,597,000	803,600
- Resorte exterior de pilas	1,196,500	1,303,700
Parámetros Error	Valores iniciales del modelo "Sana"/"Dañada"	Valores finales del modelo "HEALTHY"/"DAMAGED"
Error Absoluto	95,515 / 35,500	33,000 / 29,600
Porcentaje de Error	36.7% / 13.0%	5.6% / 12.1%
Escala de Error	2.9% / 4.3%	1.5% / 3.9%
Coefficiente de correlación promedio	0.8973 / 0.9133	0.9729 / 0.9704

4. DISCUSIÓN

Se realizaron análisis para las cargas críticas y sus respuestas para el momento positivo, para el momento negativo y para el cortante. La mayoría de las capacidades de carga resultaron en valores que estuvieron debajo de 1.0 significando que todas las cargas excedían las capacidades de los elementos. El factor de carga crítica y las respuestas para el momento positivo fue de 0.20 producido por la grúa Gottwald desplazándose. Para el momento negativo, la combinación de la grúa pórtico con cuatro camiones contenedores fue crítica con un factor de 0.94. La capacidad de carga crítica y respuestas para el cortante resultó ser de 0.5 con la grúa Gottwald, de nuevo, pero estática.

Respecto a las deflexiones en general no hubo demasiadas diferencias entre las secciones “saludable” y “dañada”. Estas dos secciones fueron instrumentadas de manera idéntica y mostraron ligeras diferencias en sus resultados, teniendo una deflexión de -4.55×10^{-22} cm en la sección “dañada”.

Tabla 4. Cargas aplicadas y factores de Resistencia.

Rating Method	Description	Loading Type	Factor
AASHTO LRFR (Inventario)	Carga muerta - Estructural	Todo Vehículo	1.25
	Carga Viva	Grúa Pórtico (Diseño)	1.75
		Grúa Gottwald (Legal)	1.40
		Camiones (Diseño)	1.75
	Factor de Impacto	Grúa Pórtico (Diseño)	5%
		Grúa Gottwald (Legal)	5%
		Camiones (Diseño)	33%
AASHTO LRFR (Operando)	Carga muerta - Estructural	Todo Vehículo	1.25
	Carga viva	Grúa Pórtico (Diseño)	1.35
		Grúa Gottwald (Legal)	1.40
		Camiones (Diseño)	1.35
		Grúa Pórtico (Diseño)	5%
		Grúa Gottwald (Legal)	5%
		Camiones (Diseño)	33%
AASHTO Factores de Resistencia	Momento	N/A	0.90
	Cortante	N/A	0.90

Tabla 5. Factores críticos de desempeño LRFR y pesos para las cinco configuraciones de carga.

Rating Vehicle	Response, Location	LRFR – Inventory		LRFR – Operating	
		RF	Tons	RF	Tons
Grúa Pórtico	+ Momento, TR – 11	0.86	399 (una lado)	1.11	515 (un lado)
Gottwald Crane	+ Momento, Viga T	0.20	72 (neto)	0.20	72 (neto)
Grúa Gottwald Estática	Cortante, Viga T Patín	0.50	180 (neto)	0.20	72 (neto)
Camión contenedor	+ Momento, Viga T	0.55	12.8 (doble eje)	0.71	16.6 (doble eje)
Camión contenedor + Grúa Pórtico	+ Momento, Viga T	0.49	N/A	0.64	N/A

5. CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas de carga indicaron que el muelle se comportaba de una manera elástica – lineal, a pesar del hecho de que se observaron inconsistencias en las magnitudes de las respuestas de la sección “dañada” por corrosión. Muchas de las vigas estructurales, especialmente las vigas T invertidas laterales, mostraron signos de desprendimiento de concreto bastante severo debido a una expansión del acero de refuerzo (corroído). Sin embargo, esto es principalmente un problema por servicio y no tiene un efecto mayor en las capacidades estructurales de las secciones hasta que exista una pérdida de acero significativa debido a la corrosión. Puede ser por tanto posible que las grandes cargas aplicadas generasen grietas por deformación, que pueden provocar una alta exposición del acero de refuerzo a iones cloruro. Se obtuvo una correlación adecuada por el análisis después del proceso de calibración, por lo tanto, indicando que todas las respuestas estructurales fueron lineales.

El factor de clasificación crítico para este muelle fue 0.2 obtenido con la grúa Gottwald en movimiento fue controlado por el momento positivo en las vigas T invertidas transversales de R/C. Es importante destacar que la baja clasificación de carga fue debido a un acero de refuerzo de momento positivo insuficiente en el patín inferior de las vigas en T invertidas. Pruebas no destructivas (NDE) deberán ser llevadas a cabo en las vigas T invertidas para localizar y determinar la cantidad de acero remanente presente.

Otros componentes estructurales también tuvieron factores de clasificación menores a 1.0 para la grúa Gottwald en movimiento. De hecho, la capacidad de carga del patín de las vigas T invertidas solo produjo factores de clasificación ligeramente mejores a 0.50, la capacidad de momento de las vigas TR-13 en el tramo central llegó solo a 0.75. Como consecuencia, consideraciones técnicas cuidadosas deben ser seguidas debido a que los resultados sugieren evitar el uso de la grúa en las operaciones normales hasta que los miembros dañados o deficientes sean reforzados (para aumentar su capacidad de carga). El reforzamiento de todos los miembros inadecuados es una opción factible debido a que los componentes débiles se encuentran relativamente aislados. Es recomendable, sin embargo, que se realicen pruebas NDE primero para verificar que las capacidades usadas para la clasificación de carga estuvieron en efecto basadas correctamente en la cantidad de acero presente en los miembros. Como un mínimo se deben tomar ciertas acciones para que la grúa Gottwald nunca se coloque entre tramos de la grúa pórtico.

Inspecciones a futuro se deberán centrar en el aumento de grietas en el momento de las vigas T invertidas transversales y largueros o trabes secundarias. Además, se debe poner especial atención a las áreas de apoyo de los patines de las vigas T invertidas y las señales de falla asociadas con los soportes de las vigas.

Las conclusiones y factores de clasificación de carga presentados en este reporte son dadas como recomendaciones basadas en el comportamiento y respuestas de la estructura, así como las condiciones al momento de hacer las pruebas de carga. Se deberá considerar daño estructural y degradación a futuro para otras clasificaciones de pruebas de carga.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT)

Se agradece la ayuda del M. Balancan-Zapata durante la inspección de daños y las pruebas de cargas en la estructura del muelle. Los hallazgos y opiniones en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan la opinión de quienes la patrocinan.

7. REFERENCIAS

- Torres Acosta, A. A., Castro Borges, P., Martínez Madrid, M. (2008), “*Reporte final del “Proyecto núm. EE 04/08: Inspección y evaluación por durabilidad de los muelles 6 y 7 de la terminal remota de la API Progreso”*”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, diciembre.
- Günter, S., Schütze, M., Hays, G. F., Burns, W., Han, En-H., Pourbaix, A., Jacobson, G. (2009), “*Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control*,” World Corrosion Organization, Worldwide rights reserved.
- Hays, G. F., “*Now is the Time*,” World Corrosion Organization, <http://www.corrosion.org/>
- Kennedy Space Center, *Corrosion Technology Laboratory*, NASA Privacy Statement, Disclaimer, and Accessibility Certification, Florida. (<http://corrosion.ksc.nasa.gov/corrincon.htm>)
- Broomfield, J. P. (1997). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*.
- Torres Acosta, A. A. (2012). “*Project No. EE 05/12 Informe Final: Inspección Preliminar de la Infraestructura del Muelle en 13 Puertos Federales Mexicanos*” Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, May.
- AASHTO (2002) “*AASHTO Manual for the Condition Evaluation of Bridges*” American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Bridge Diagnostics, Inc. (2012). *Integrated approach to Load Testing*, Bridge Diagnostics, Inc.