



Viaducto de arcos de Progreso, Yucatán: primera obra de concreto construida con acero inoxidable

Andrés Antonio Torres Acosta
Pedro Castro Borges
Miguel Martínez Madrid
Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Angélica del Valle Moreno
David Vázquez Vega
Óscar Flores Centeno
José Ricardo Hernández Jiménez
María Guadalupe Lomelí González
Mercedes Balancán Zapata
Alexia Zozaya Ortiz
Jorge Briceño Mena

**Publicación Técnica No. 510
Sanfandila, Qro., 2018**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Viaducto de arcos de Progreso, Yucatán: primera obra de concreto construida con acero inoxidable

Publicación Técnica No. 510
Sanfandila, Qro., 2018

Esta investigación, y consecuente transferencia tecnológica, fue realizada entre la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte (Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, Dr. Miguel Martínez Madrid, Dr. Manuel de Jesús Fabela, Dra. Angélica del Valle Moreno, M.C. David Vázquez Vega, M.C. Óscar Flores Centeno, M. C. José Ricardo Hernández e Ing. María Guadalupe Lomelí González) y el Cinvestav - Mérida (Dr. Pedro Castro Borges, Ing. Mercedes Balancán Zapata, M. I. Alexia Zozaya Ortiz y M. en I. Jorge Briceño Mena).

Esta investigación es el producto final de numerosos proyectos de investigación externos realizados a la Administración Portuaria Integral (API) de Progreso, los cuales se enuncian en la bibliografía de este trabajo (de la referencia [2] a la [21]).

Se agradece la colaboración de la API Progreso, por las facilidades y el apoyo económico para la realización de los trabajos que este documento explica.

Contenido

Índice de figuras		v
Sinopsis		vii
Abstract		ix
Resumen	ejecutivo	xi
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes de la estructura evaluada	7
Capítulo 2.	Inspecciones realizadas	9
Capítulo 3.	Pruebas de capacidad estructural	19
Capítulo 4.	Conclusiones	25
Bibliografía		27

Índice de figuras

Figura I.1	Vista de los arcos 7 al 13 del viaducto de Progreso (foto arco 13)	1
Figura I.2	Dimensiones de la sub y superestructura del muelle	2
Figura I.3	Construcción de una de las pilas de concreto masivo (Christensen, 1954)	3
Figura I.4	Fabricación de un caballete: cabezal más dos pilas (Christensen, 1954)	3
Figura I.5	Vista del proceso constructivo de los arcos de concreto simple (Christensen, 1954)	4
Figura I.6	Vista del andamio utilizado para la construcción del muelle de Progreso (Christensen, 1954)	4
Figura I.7	Vista aérea del viaducto en la década de los 50 (Colección, Aerofotos de México S.A. de C.V., actualmente parte de la colección propiedad de Fundación ICA)	5
Figura 1.1	Cargas que transitan por el viaducto de arcos durante 2004 y 2005	7
Figura 2.1	Sistema de refuerzo estructural usado en 2003 para reforzar grietas (fisuras) existentes de manera localizada	11
Figura 2.2	Sistema de refuerzo estructural usado en 2008 y 2009 para reforzar grietas (fisuras) existentes de manera generalizada	13
Figura 2.3	Formación de nuevas fisuras en los arcos donde el refuerzo externo tipo CFRP no alcanzaba a cubrir el arco	15
Figura 2.4	Movimiento observado en el apoyo 34, entre los arcos 34 y 35	16
Figura 2.5	Nuevas fisuras observadas sobre el apoyo 30 del viaducto	17
Figura 2.6	Fisuras encontradas en la inspección 2013 en el apoyo 30	18

Figura 3.1	Vista aérea del muelle Progreso actual	19
Figura 3.2	a) Evidencias de la corrosión del acero inoxidable en uno de los cabezales ubicados en la plataforma del muelle fiscal. Grietas estructurales típicas observadas en b) arcos sin refuerzo estructural y c) vigas	20
Figura 3.3	Posiciones de instrumentación de extensómetros	21
Figura 3.4	Resultado típico de deformación vs tiempo, obtenido de una prueba de carga estática	22
Figura 3.5	Resultado típico de deformación vs tiempo, obtenido de una prueba de carga dinámica	23
Figura 3.6	Resultado típico de deformación vs tiempo, obtenido de dos pruebas dinámicas de carga al azar: (a) muestra la respuesta en deformación en los arcos instrumentados al pasar dos vehículos independientes; (b) muestra la respuesta en deformación de un vehículo parado sobre la zona instrumentada en el arco en el carril oeste y otros tres vehículos pasando al azar en el carril este	24

Sinopsis

La presente investigación incluye los avances del proyecto de inspección, evaluación por durabilidad y capacidad de carga estructural y rehabilitación del viaducto antiguo de Progreso, Yucatán, México. Este proyecto se inició en el año 2001, al conocerse que esta estructura fue construida con acero inoxidable entre los años 1936 y 1941, lo que la convierte en la primera estructura de concreto fabricada con este material resistente a la corrosión y, por ende, la primera estructura en América que haya considerado en su diseño el uso de materiales durables para soportar el ambiente marino tropical al que está expuesta.

Abstract

The present investigation includes details of Progreso's Old Viaduct inspection, durability evaluation, load capacity testing, and structural rehabilitation project. This project initiated in 2001 after finding out that this concrete structure, built between 1936 and 1941, used stainless steel as reinforcement, thus becoming the first structure built with this type of corrosion resistance steel reinforcement and, the first one in America where durable materials for tropical marine environment were used.

Resumen ejecutivo

El estudio está dividido en función de las intervenciones realizadas desde 2001 hasta 2013, año en el cual se autoriza la construcción de un viaducto alternativo paralelo al antiguo, para eliminar en el segundo el paso de vehículos pesados que estaba dañando estructuralmente esta obra.

Se inicia con una explicación de la ubicación y las dimensiones geométricas del viaducto antiguo y los pormenores más importantes durante su construcción. Se continúa con una breve explicación de las inspecciones realizadas a esta magna obra desde el año de inaugurada hasta 2013. En cada una de ellas se detallan los puntos más importantes y la razón que motiva la continuación de las evaluaciones a lo largo de la vida de servicio de este viaducto.

Finalmente se explican las pruebas de carga estructural realizadas que sirvieron de sustento técnico para tomar la decisión de reforzar todos los arcos y algunos cabezales con materiales de última generación, elaborados a partir de compuestos de plástico reforzados con fibras de carbón (CFRP, por sus siglas en inglés).

Por último, a manera de conclusiones, se muestra el sustento para exponer a la Administración Portuaria Integral (API) de Progreso en su momento la necesidad de construir un viaducto alternativo, paralelo al antiguo, para permitir el tránsito de vehículos más pesados que llegan o salen del puerto de altura de Progreso.

Introducción

El puerto de Progreso de Castro está situado en la costa norte de la península de Yucatán, México, a 21.5 grados latitud norte (figura 1). El clima del puerto es semiseco cálido y su temperatura oscila entre los 25 y 40 grados centígrados. Los vientos más frecuentes provienen del NE y SE, aunque los más fuertes provienen del N y NO. Durante los meses de abril a octubre, es frecuente observar vientos huracanados de hasta 175 km/h. Geológicamente, la península de Yucatán es una formación de roca caliza, cuya costa está cubierta aproximadamente de 4 m de arena fina, desapareciendo ésta entre los 350-400 m de la costa convirtiéndose el piso en roca desnuda. Esta formación continua dentro del golfo de México hacia el norte con una pendiente de aproximadamente 1:1000.

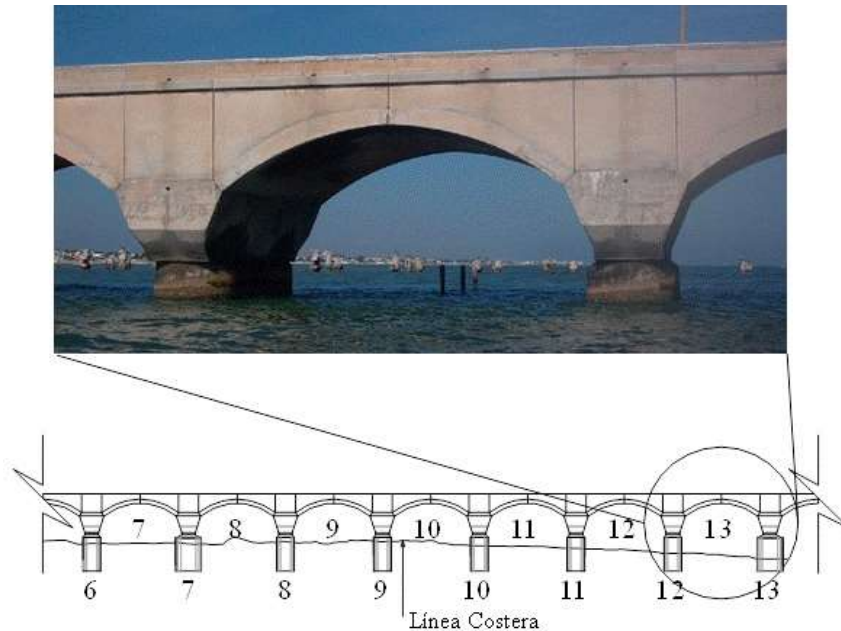


Figura I.1 Vista de los arcos 7 al 13 del viaducto de Progreso (foto arco 13)

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 resultó ganadora fue por minimizar el uso de acero convencional utilizando concreto masivo para las sub y superestructuras. Las autoridades mexicanas tenían en mente la idea de un muelle que requiriera muy poco o nulo mantenimiento, pues en otras obras portuarias del país se tenían problemas de corrosión que querían evitarse.

Consistente en una serie de arcos de concreto simple soportado sobre pilares también de concreto simple, el diseño propuesto ofrecía numerosas ventajas: la primera radicaba en que se trataba de una estructura abierta, la cual permitiría el libre flujo de las corrientes y, por lo tanto, no ocasionaría erosión o acumulación de arena en la costa. De acuerdo con los diseñadores, al estar construida con concreto simple —sin refuerzo—, la estructura 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 la compañía danesa consta de tres partes: el acceso (de 415 m), el viaducto (de 1,752 m) y el muelle fiscal (de 50 x 205 m en área). El acceso fue construido a base de piedra, aunque en la actualidad se perdió dentro de la mancha urbana de Progreso. El viaducto se conforma de 146 entrejes de 12 m de largo y aproximadamente 9.5 m de ancho cada uno. Cada entreje está formado por dos pilares de concreto simple, un cabezal (viga) con acero inoxidable de temperatura y un arco de concreto simple.

La figura I.2 presenta un detalle de un entreje tipo. Los pilares descansan directamente sobre terreno marino sin estar 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 se presentasen problemas por corrosión. La figura I.3 muestra un detalle de los moldes metálicos utilizados para la fabricación de los pilares (Christensen, 1954). 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 aproximadamente 7.6 m de alto (Christensen, 1954).

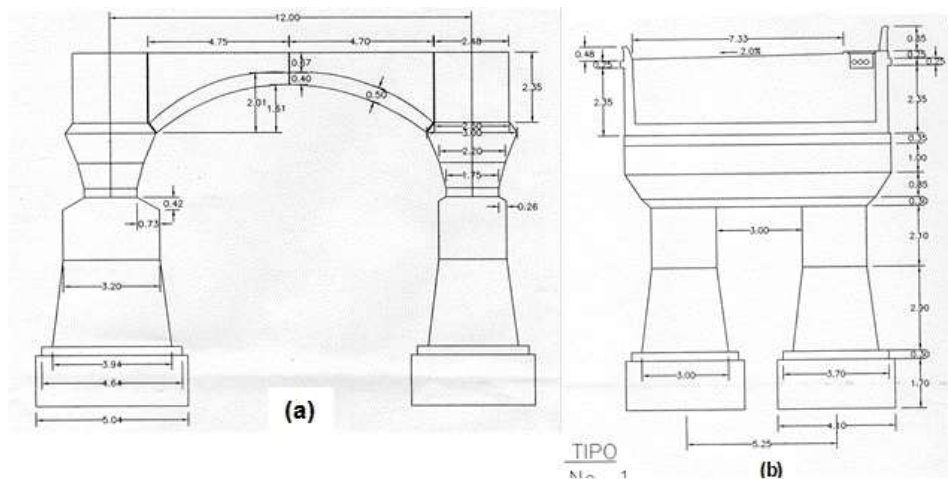


Figura I.2 Dimensiones de la sub y superestructura del muelle

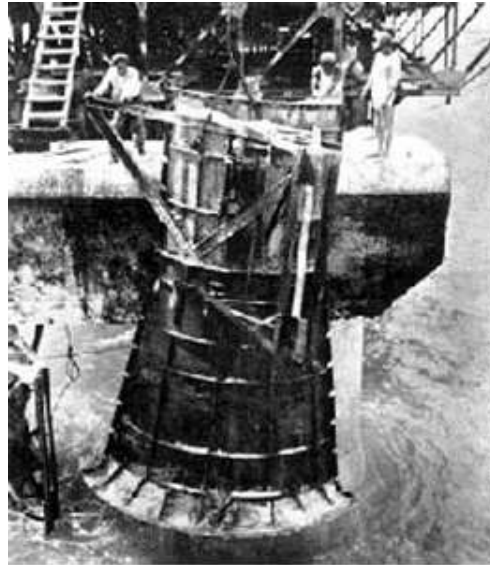


Figura I.3 Construcción de una de las pilas de concreto masivo (Christensen, 1954)

En los cabezales de la subestructura se utilizó acero inoxidable 304 (con cuantía de acero, $\rho = \text{área transversal de acero} / \text{área transversal de concreto}$, del 0.15%) como refuerzo longitudinal, debido a que estos elementos trabajan en flexión (anónimo, 1938). Se reporta que se utilizaron 220 toneladas de acero inoxidable de 30 mm de diámetro (anónimo, 1938). En la figura I.4 se presenta un detalle de la fabricación de un cabezal del muelle (Christensen, 1954).

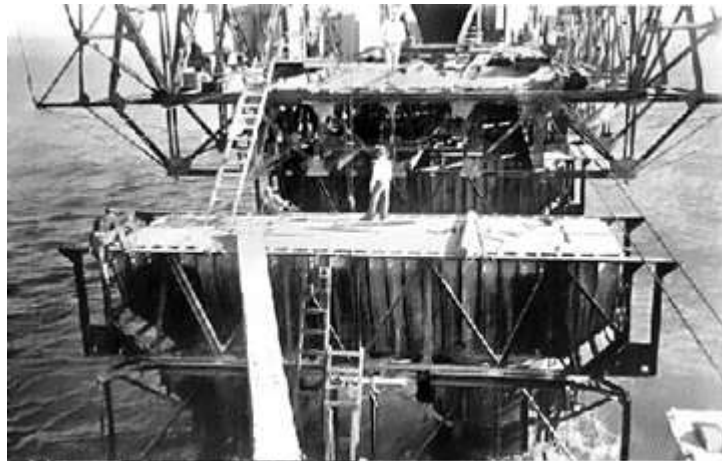


Figura I.4 Fabricación de un caballete: cabezal más dos pilas (Christensen, 1954)

La superestructura consta de 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 I.2). El arco se diseñó

considerándolo como una de tres articulaciones: dos en los extremos y una en la cúspide. Las articulaciones se fabricaron 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 funcionan como contenedores del relleno a base de piedra triturada (ver figura I.2). En la figura I.5 se presentan dos detalles de la fabricación de estos arcos y muros laterales. En la figura I.6 se presenta un detalle de la estructura metálica utilizada para erguir cada una de las secciones que forman parte de esta monumental estructura (Christensen, 1954).

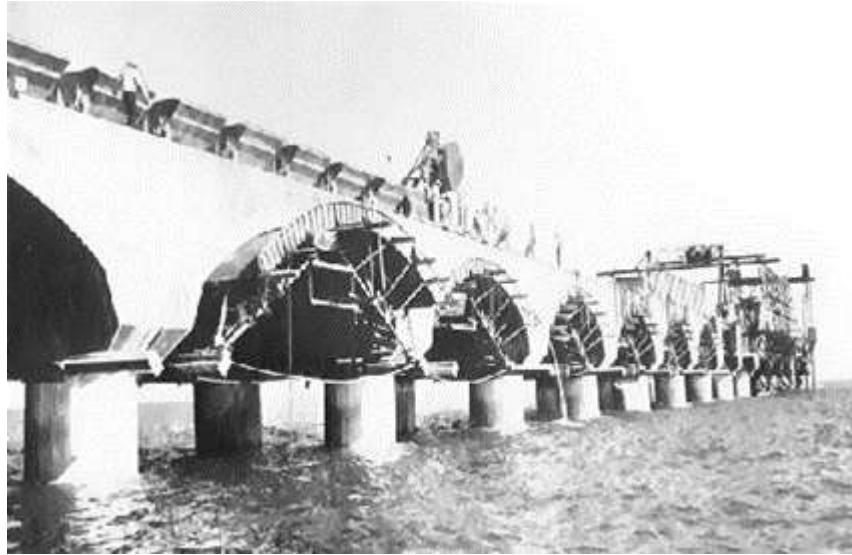


Figura I.5 Vista del proceso constructivo de los arcos de concreto simple (Christensen, 1954)

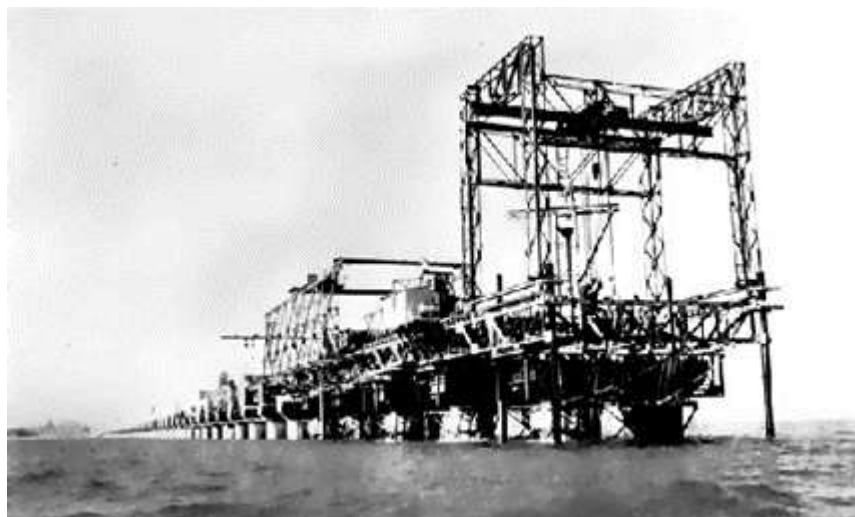


Figura I.6 Vista del andamio utilizado para la construcción del muelle de Progreso (Christensen, 1954)

En un principio, el viaducto constó de dos carriles, uno para ferrocarril y el otro para vehículos motorizados. Los rieles del ferrocarril se fijaron 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 con acero inoxidable de temperatura y arcos de concreto simple. Al centro de esta plataforma se construyó el edificio de la aduana con tres niveles de altura a base de columnas, traveses y losa maciza de concreto reforzado. En la figura 1.7 se muestra una vista aérea de esta plataforma y el edificio aduanal al momento de su inauguración (Christensen, 1954).

Como se mencionó, la compañía danesa Christiani & Nilsen ganó el concurso del proyecto y construcción del muelle, y firmó el contrato a finales de 1936. La estructura metálica móvil fue erguida y quedó lista para usarse en noviembre de 1937. En marzo de 1941 ya se habían construido todos los pilares y en septiembre de ese mismo año se construyó el último de los arcos de la plataforma (Christensen, 1954).



Figura I.7 Vista aérea del viaducto en la década de 1950 (Colección, Aerofotos de México S.A. de C.V., actualmente parte de la colección propiedad de Fundación ICA)

1 Antecedentes de la estructura evaluada

1.1 Cargas de diseño del viaducto alterno

Como el proyecto original del viaducto consideraba dos líneas ferroviarias paralelas, éste se calculó en función de las cargas de ferrocarril aplicadas en ambos carriles. La distribución de las cargas de diseño se consideró como para 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 plataforma del muelle se calculó 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 los arcos y las pilas fue de 15 y 25 kg/cm², respectivamente.

En la actualidad, estas cargas de diseño ya se alcanzaron, al pasar sobre los arcos del viaducto vehículos pesados cargados con granos y agregados (con pesos de entre 60 y 75 toneladas, figura 1.1). Cabe aclarar que estos vehículos pesados pueden pasar sobre un mismo arco por tener éstos direcciones encontradas: graneleros transitan de sur a norte y vehículos con agregados de piedra transitan de norte a sur.



Figura 1.1 Cargas que transitan por el viaducto de arcos durante 2004 y 2005

1.2 Ampliación del muelle de altura

A fines de la década de 1970 y principios de los años 1980, se amplió la infraestructura del puerto de Progreso con la construcción de una extensión de casi 4.5 km mar adentro (figura 3). La expansión buscaba permitir al puerto recibir embarcaciones de mayor calado (profundidad de eslora), ya que éstas no podían atracar en el antiguo muelle (plataforma al final del viaducto) al no poder fondear adecuadamente (figura 3). Esta extensión se construyó a base no de un viaducto tipo puente que permitiera el paso de las corrientes sino mediante un relleno tipo carretero con diferentes capas de piedra (pedraplén) y relleno compactable de la región (sascáb).

Gracias a esta ampliación, el acceso del flujo vehicular aumentó a cuatro carriles en esta zona ampliada, con lo que se duplicó la capacidad de tráfico vehicular, aunque la zona original (viaducto de arcos) quedó restringido a dos carriles nada más. Por obvias razones, esta ampliación incrementó el flujo de bienes y servicios a las zonas de embarque y desembarque del puerto, por lo que se incrementaron sustancialmente las cargas aplicadas a lo largo del acceso de casi 6 km al puerto de altura, incluidos los 2 km iniciales del viaducto de arcos y la plataforma del antiguo muelle fiscal.

2 Inspecciones realizadas

Como parte de sus actividades, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), órgano desconcentrado de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), tiene la encomienda de prestar apoyo para la realización de proyectos de investigación o servicios al sector transporte. En el marco de estas funciones, el IMT presta servicios de consultoría en ingeniería en distintas ramas del sector —entre ellas, las Administraciones Portuarias Integrales (API) y la Coordinación de Puertos y Marina Mercante—, en la solución de problemas ingenieriles en la operación de sus puertos.

Desde 2001, el IMT ha estado trabajando en conjunto con la API Progreso, principalmente en la determinación del estado en que se encuentra su infraestructura de concreto, y en particular, el viaducto de arcos (por sus características de durabilidad en sus 70 años de funcionamiento). Desde ese año, se realizan inspecciones estructurales y de durabilidad al viaducto de arcos, de las que se derivan numerosos reportes de investigación. En total, se han generado 27 reportes [1-27], como resultado de la intensa labor del IMT y la API Progreso con el fin de que la infraestructura del puerto de Progreso pueda seguir funcionando con la debida seguridad, confiabilidad y durabilidad para sus usuarios.

A disposición del público en general, estos informes forman parte del acervo bibliográfico que puede consultarse tanto en las oficinas de la API Progreso como de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del IMT.

A solicitud de la API Progreso, se presentará un recuento de la información encontrada en estos reportes finales de investigación o de prueba, para poner de relieve la información obtenida por los investigadores del IMT en relación con el antiguo viaducto de arcos, así como las recomendaciones giradas a la API Progreso para mantener la confiabilidad estructural del antiguo viaducto de arcos a pesar de sus casi 70 años de servicio al puerto de Progreso.

2.1 Inspección 2002

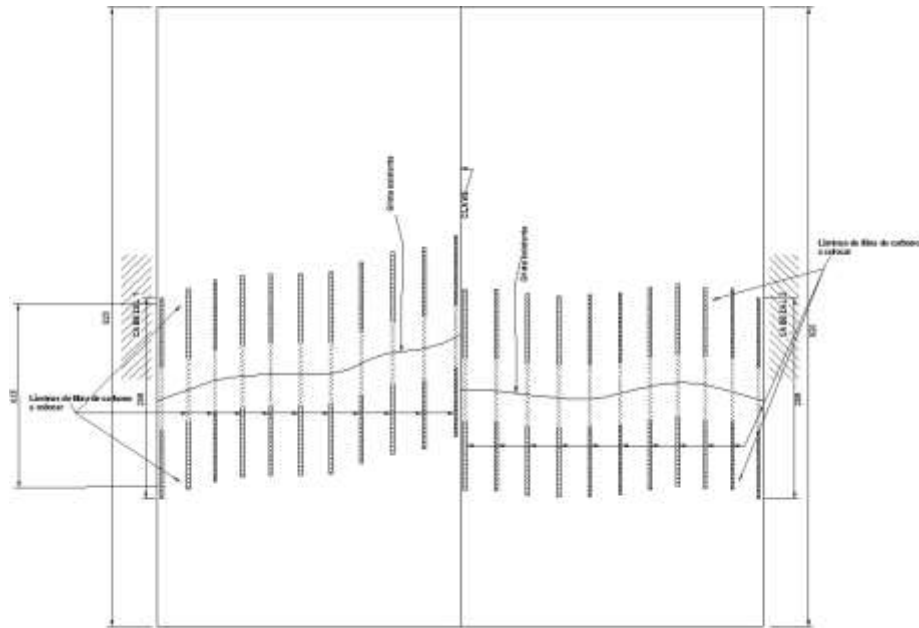
Esta inspección tenía como objetivo principal conocer las propiedades de los materiales usados en la construcción del viaducto de arcos y saber en qué etapa de su vida útil se encontraban (Torres *et al.*, 2002). Fue precisamente como parte de las tareas de esta inspección que se estudiaron las características físicas del concreto usado y el estado que guardaba por corrosión el acero inoxidable. El factor que más llamó la atención durante esta inspección, no obstante, fue el número de grietas estructurales observadas en los arcos del viaducto.

A partir de esta observación, se recomendó a la API Progreso realizar una inspección más detallada, arco por arco, para determinar cuántos mostraban estas grietas aparentemente estructurales. El estudio se prolongó hasta 2003 para realizar la inspección sugerida a detalle, junto con un levantamiento de daños (número de arcos agrietados) del viaducto de arcos. También se recomendó a la API Progreso eliminar las filas de espera en el acceso del viaducto de arcos, como se muestra en la figura 1.1, para aligerar el peso estático aplicado a los arcos. Estas filas podían llegar hasta 200 m mar adentro, es decir afectando a casi 15 arcos por estas cargas. Tras aceptarse la recomendación, se cambió la zona de revisión a la ampliación realizada fuera del viaducto de arcos, mar adentro, junto al edificio fiscal.

2.2 Inspección 2003

Este año se realizaron varias inspecciones en los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre (Torres *et al.*, 2003). En este periodo se realizaron los primeros levantamientos de ubicación de arcos agrietados, así como las primeras pruebas de carga del viaducto, para determinar su resistencia a las cargas aplicadas. En este año se encontraron 56 arcos con daños estructurales visibles y se recomendó el reforzamiento de los arcos y cabezales agrietados con compuestos de fibra de carbón (CFRP, por sus siglas en inglés). Se recomendó, asimismo, la realización de una prueba de carga a algunos de estos arcos —con daño y sin daño— para determinar el daño estructural del viaducto derivado de la presencia de estas grietas.

A fines de este año se aprobó la recomendación de reforzar los arcos dañados con CFRP y, con recursos disponibles de ese año fiscal, se pudieron reforzar los 56 arcos de manera localizada (figura 2.1).



Vista inferior de un arco fisurado

Figura 2.1 Sistema de refuerzo estructural usado en 2003 para reforzar grietas (fisuras) existentes de manera localizada

2.3 Inspección 2004

En este año se aprobó el presupuesto para la realización de la prueba de carga de tres arcos sobre playa, a fin de determinar la capacidad de carga del viaducto con las cargas actuantes ese año (Torres *et al.*, 2004; Fabela *et al.*, 2004). Estas pruebas se realizaron en julio y agosto y se determinó que los arcos estaban siendo afectados por esfuerzos en tensión que un arco no puede sostener por sí solo. Al carecer los arcos del viaducto antiguo de refuerzo de acero (por ser de concreto simple), estos esfuerzos en tensión explican la generación de las fisuras (grietas) en los arcos que, en algunos casos, se extienden a los cabezales. Por ello, se recomendó bajar la velocidad y el peso de los vehículos tipo tráiler con la intención de disminuir la formación de estas fisuras y evitar un colapso del viaducto de arcos (Torres *et al.*, 2004).

Otras actividades realizadas ese año fueron la inspección visual y la detección de nuevas fisuras sobre más arcos del viaducto (Fabela *et al.*, 2004), de ahí la recomendación a la API Progreso de efectuar un levantamiento ulterior de daños bajo los arcos para ubicar nuevas fisuras.

2.4 Inspección 2005

En este año se realizó una segunda prueba de carga a tres arcos: uno sobre playa y dos en mar, así como un levantamiento de daños en los arcos del viaducto. Con

este levantamiento se encontraron diecinueve (19) arcos más fisurados, por lo que se recomendó a la API que considerara un mayor presupuesto para reforzar con CFRP estos arcos dañados.

Como recomendación urgente, se avisó a la API Progreso que el viaducto mostraba daños considerables en el cabezal 35 (arcos 34 y 35) que, con base en reportes anteriores emanados de los trabajos de inspección del 2003 (Fabela *et al.*, 2005; Castro *et al.*, 2005), se recomendó reparar el cabezal y se entregaron las especificaciones para tal reparación. Lo anterior permite constatar que el daño mecánico en el concreto del cabezal 35 afecta la integridad estructural del muelle, lo que disminuye significativamente su capacidad de carga.

2.5 Inspección 2006

En el 2006 se realizó otro levantamiento de daños y se encontraron fisuras en cuarenta y ocho (48) arcos más del viaducto antiguo, lo que suscitó preocupación en el sentido de que los arcos seguían cediendo a las cargas aplicadas, de ahí el apremio a actuar sobre este fenómeno de las cargas que transitan sobre el viaducto. Hasta ese momento no se había efectuado ningún otro reforzamiento de arcos, aunque en dos años consecutivos se observó un aumento en el número de arcos fisurados, que anteriormente no se encontraban dañados. En este nuevo levantamiento de daños, por primera vez, se revisaron los arcos de la plataforma del antiguo edificio del muelle fiscal, y se encontraron fisuras en los arcos donde reciben directamente las cargas de los vehículos pesados y no en la zona donde cae el edificio. Así se corrobora que las cargas vehiculares son las responsables de estos daños a los arcos.

Además, se realizó una última prueba de carga en dos arcos mar adentro (31 y 32), donde se encontraba la discontinuidad del cabezal que causó preocupación el año anterior. De nueva cuenta se observó que los arcos reciben cargas descentradas de consideración que hacen que éstos reaccionen con esfuerzos internos de tensión que, a su vez, generan a la larga las fisuras en los mismos arcos. Por ello, se recomendó en la evaluación 2006 el apremiante reforzamiento de más arcos de los fisurados, para restituir su resistencia y que los refuerzos externos de CFRP reciban los esfuerzos de tensión en los arcos generados por las fisuras, y evitar formaciones de nuevas fisuras.

2.6 Inspección 2007

Después de encontrar cincuenta y ocho (58) arcos fisurados más que los encontrados el año anterior (2006), se hizo un llamamiento urgente a la API Progreso para tomar las medidas siguientes:

Tomando en cuenta que el volumen de obra a reparar es considerable, se propone a la API proceder a la rehabilitación por orden de prioridades definidas en función

de la capacidad económica de su ejercicio de restauración. A continuación, se listan las medidas prioritarias a seguir:

2.6.1 Propuesta 1: Máxima prioridad

Es recomendable que en un tiempo no mayor a un año se refuercen los arcos fisurados, siguiendo el mismo procedimiento que en 2003: reforzamiento localizado sobre fisuras existentes (figura 2.1). Se presentó el proyecto para esta etapa, junto con el plano constructivo, el catálogo de conceptos con volúmenes aproximados de obra y un antepresupuesto que serviría a la API Progreso para calcular los costos de los trabajos a licitar. Se planteó la reparación de 46 arcos como mínimo y se listaron los arcos que se necesitaban reforzar. Con estas reparaciones urgentes, se pronostica que el muelle podrá continuar con sus operaciones normales un periodo de cinco años más. Los costos estimados del reforzamiento localizado propuesto ascendieron a 5'004,320 pesos (costos correspondientes a 2007), y se calculó que los trabajos se efectuarían en un periodo de 3.5 meses.

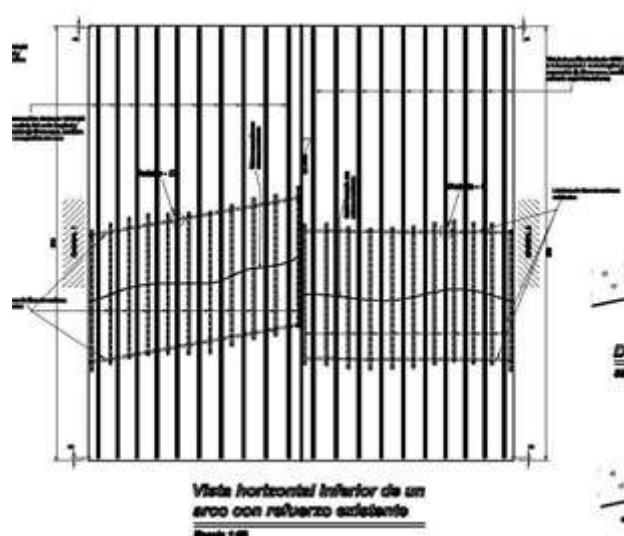


Figura 2.2 Sistema de refuerzo estructural usado en 2008 y 2009 para reforzar grietas (fisuras) existentes de manera generalizada

2.6.2 Propuesta 2: Prioridad alta

Una vez transcurrido este lapso de reforzamiento urgente, se recomienda someter todos los arcos del viaducto (alrededor de 145) al mismo sistema de reforzamiento con materiales compuestos base fibra de carbón, pero para evitar la formación de más fisuras, se propone en este proyecto la colocación de estos compuestos sobre todo en el ancho de los arcos (~9.5 m). En la figura 2.2 se presenta el proyecto para esta etapa. Se entregaría el plano constructivo, el catálogo de conceptos con volúmenes aproximados de obra y un antepresupuesto que podrá

servirle a la API Progreso para calcular el costo de los trabajos a licitar. Con estas reparaciones urgentes, se pronostica que el muelle podrá continuar con sus operaciones normales un periodo de entre 10 y 20 años más, siempre y cuando las cargas aplicadas actualmente no se incrementen más de un 30% del tránsito actual sobre el viaducto (dos vehículos pesados de 65 ton en cada dirección). Si las cargas sobrepasan este 30% propuesto, el periodo podría disminuirse a la mitad de lo pronosticado. Los costos estimados del reforzamiento localizado propuesto ascienden a 35'518,248 pesos, (costos correspondientes a 2007), y se calcula que los trabajos se realicen en un periodo de 5.5 meses.

2.6.3 Propuesta 3: Prioridad media

Como alternativa, se recomienda el tránsito de cargas pesadas sobre un viaducto alternativo al existente. Para ello se planteará el proyecto de un nuevo viaducto que cumpla con las condicionantes de carga estática y dinámica, así como de carga ambiental (huracanes, ambiente agresivo por corrosión). Esta propuesta queda fuera de los alcances de este proyecto, por lo que, de interesar a la API, se podría presentar una propuesta técnico-económica para la creación de un proyecto de viaducto alternativo que cumpla con los requerimientos de funcionalidad, capacidad de carga, resistencia a la corrosión, y factibilidad ambiental y estética (sin que rompa con el viaducto ya construido). Si a solicitud de la API se aprueba esta moción, se planteará la propuesta durante el primer trimestre de 2008.

Este año se plantea a la API Progreso la construcción de un viaducto alternativo, principalmente por observar que los arcos fisurados iban en aumento cada año, por lo que no se tenía otra opción más que trasladar los vehículos pesados a un viaducto alternativo y dejar este viaducto ya desgastado para el tránsito de vehículos ligeros.

2.7 Inspección 2008

Después de las recomendaciones del IMT a la API Progreso, de nueva cuenta se reforzaron con CFRP los arcos dañados por el método localizado (propuesta 1 del año 2007 y plano de la figura 2.1), por lo que la API Progreso solicitó al IMT fungir como revisor de la calidad de los materiales usados en el refuerzo urgente de los arcos, y los resultados de estas pruebas se presentaron en su momento en las referencias correspondientes (Torres *et al.*, 2008).

Durante los trabajos de refuerzo localizado, sin embargo, la API Progreso y el IMT se percataron de arcos que ya se habían reforzado con CFRP con el método localizado que ya mostraban fisuras nuevas en áreas donde no se había aplicado CFRP (figura 2.3). Esto explica por qué, durante el proceso de la obra, se cambió la especificación para reforzar los arcos a todo lo ancho, como se observa en la figura 2.2.



Figura 2.3 Formación de nuevas fisuras en los arcos donde el refuerzo externo tipo CFRP no alcanzaba a cubrir el arco

De esta manera, se inició el refuerzo estructural generalizado en los cuarenta y seis (46) arcos del viaducto y dieciséis (16) arcos de la plataforma. Este refuerzo se realizó durante los años 2008 y 2009, ya que la suficiencia presupuestal de la API Progreso solo contempló, en ese momento, el refuerzo localizado de cincuenta y cinco (55) arcos solamente.

Durante las inspecciones para supervisar la calidad de la instalación del refuerzo con CFRP, se encontró que el apoyo 34 (entre los arcos 34 y 35) seguía en proceso de movimiento a pesar de estar reforzado con dicho material. Después de un análisis exhaustivo, se determinó que este apoyo se encuentra en estado crítico de movimiento cinemático continuo, similar al mostrado en la figura 2.4.

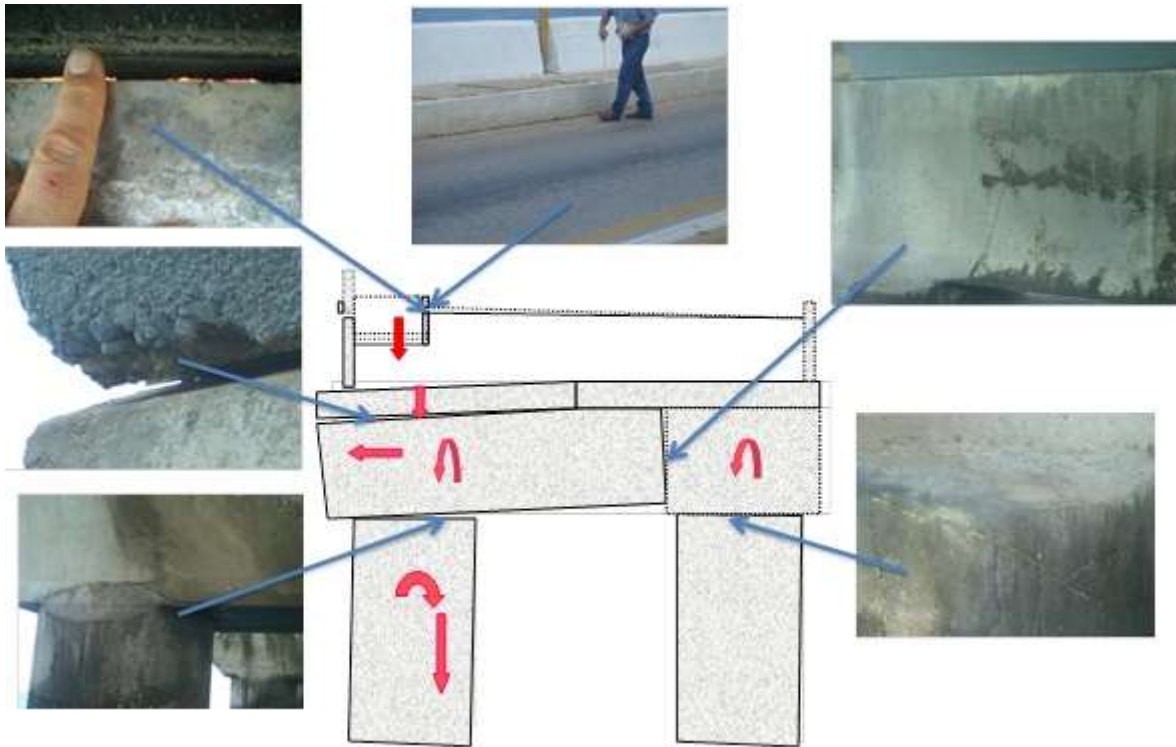


Figura 2.4 Movimiento observado en el apoyo 34, entre los arcos 34 y 35

Se cree que este movimiento lateral observado en el apoyo 34 obedece a un movimiento de la cimentación por las cargas descentradas sobre el viaducto, que alcanzan valores por encima de las 120 toneladas. Ello refuerza la necesidad de atender la recomendación denominada Propuesta 3, planteada en la inspección del año anterior (2007).

2.8 Inspección 2009

En este año se continuó el refuerzo estructural de arcos del viaducto y de la plataforma bajo las actuales oficinas de la API Progreso (antiguo edificio de la aduana fiscal), con el apoyo del IMT a la API y la supervisión de la calidad de las tiras de CFRP y la colocación de las mismas (Rendón *et al.*, 2009). Se insistió con las autoridades de Progreso para que consideraran como urgente la construcción de un viaducto alternativo o, en último caso, la disminución de las cargas actuantes en el viaducto antiguo hasta valores de 40 toneladas como máximo. Esta recomendación, obviamente, repercute en los costos de operación de las empresas transportistas y en el producto transportado, por lo que se siguió con los trámites dentro de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante para que se reconsiderase la construcción de este viaducto alternativo para cargas pesadas.

A pesar de la urgencia de reforzamiento que el apoyo 34 demostraba por el movimiento lateral continuo, aunado a que el apoyo 31 también mostraba este tipo de movimiento y modo de falla, no se resolvió nada en ese año.

2.9 Inspección 2010

En mayo y octubre de 2010, personal de la Subgerencia de Ingeniería de la API Progreso realizó dos inspecciones visuales al viaducto de arcos, aprovechando la visita de personal del IMT a Mérida por actividades externas a la API Progreso. El objetivo de estos recorridos rápidos (de entre tres y seis horas de duración) fue revisar si los refuerzos de CFRP no presentaban daños en el recubrimiento polimérico protector colocado y verificar que las tiras no se hubiesen separado del concreto en los arcos por la aparición de nuevas grietas. En ambos recorridos se percató que el sistema de refuerzo externo con CFRP no presentaba daño alguno, salvo manchas negras de hongos sobre el recubrimiento polimérico, sin afectación del recubrimiento o las tiras de CFRP.

2.10 Inspección 2011

En diciembre de este año se realizó una inspección visual rápida, y se encontró el apoyo 30 —reforzado en 2008—, con fisuras por carga por debajo de las tiras de CFRP colocadas (figura 2.5). Esto corrobora lo observado en 2008 en el apoyo 34: a pesar de estar reforzado con tiras de CFRP para que tomen los esfuerzos en momentos de que fisuras adicionales se formen, el viaducto sigue siendo afectado por las cargas pesadas que transitan sobre él.

Por ello, se insistió a las autoridades de la API sobre la urgencia de construir un nuevo viaducto, ya que se ha alcanzado la capacidad máxima del viaducto antiguo con las cargas aplicadas.



Figura 2.5 Nuevas fisuras observadas sobre el apoyo 30 del viaducto

2.11 Inspección 2012

En este año no se realizó evaluación alguna por falta de recursos de la API Progreso. Se tenía programada una prueba de carga de esta estructura, pero el recurso se canalizó a esta actividad en el muelle 6 del puerto de altura (Torres *et al.*, 2012).

2.12 Inspección 2013

En mayo de 2013, se realizó una inspección visual con personal de la Subgerencia de Ingeniería de la API Progreso (Torres *et al.*, 2013). Esta inspección, de nueva cuenta, tuvo por objeto la revisión de cada arco en cuanto al estado que se encontraban los refuerzos a base de las tiras de CFRP, así como las nuevas fisuras que pudieran haberse formado. La figura 2.6 muestra fotografías del apoyo 30 (arco 31) donde se observó una fisura recién formada.

El apoyo 30 muestra una fisura pasante, es decir, que se observa tanto en la cara sur (figura 2.5) como en la cara norte (figura 2.6) de su cabezal. Este tipo de daño sigue siendo de consideración al encontrarse en ambas caras del cabezal, aunque el refuerzo de CFRP colocado en 2008 funcionó como se esperaba. De no haberse colocados estos refuerzos externos de CFRP, este cabezal enfrentaría serios problemas, ya que la fisura formada habría comprometido la capacidad de carga de este apoyo al grado de poder llegar a una falla frágil de consecuencias catastróficas.

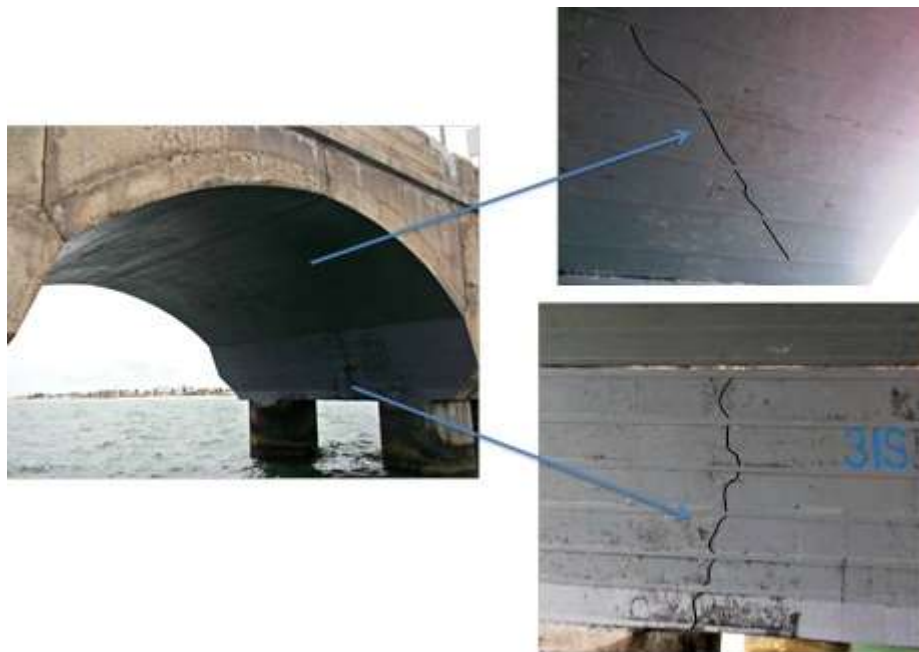


Figura 2.6 Fisuras encontradas en la inspección 2013 en el apoyo 30

3 Pruebas de capacidad estructural

Por otro lado, el muelle ha sufrido una considerable sobrecarga en los últimos 20 años, amén de los problemas de corrosión. Esto se debe a que, a finales de los años ochenta, el puerto se extendió 4.5 km, lo cual incrementó las cargas casi diez veces su valor original (figura 3.1).



Figura 3.1 Vista aérea del muelle Progreso actual

Como resultado de ese nivel de carga, han aparecido grietas estructurales en algunos de los 145 arcos y vigas, como se muestra en la figura 15. Entre 2004 y 2005 se llevaron a cabo pruebas de carga en seis arcos de la parte original del muelle. Las pruebas de capacidad estructural marcaron las pautas para definir el mejor procedimiento de rehabilitación o refuerzo estructural para incrementar la capacidad de carga de los arcos. A continuación, se describen las pruebas de carga realizadas y los resultados obtenidos. Para una explicación más detallada, refiérase a Fabela Gallegos *et al.* (2005).

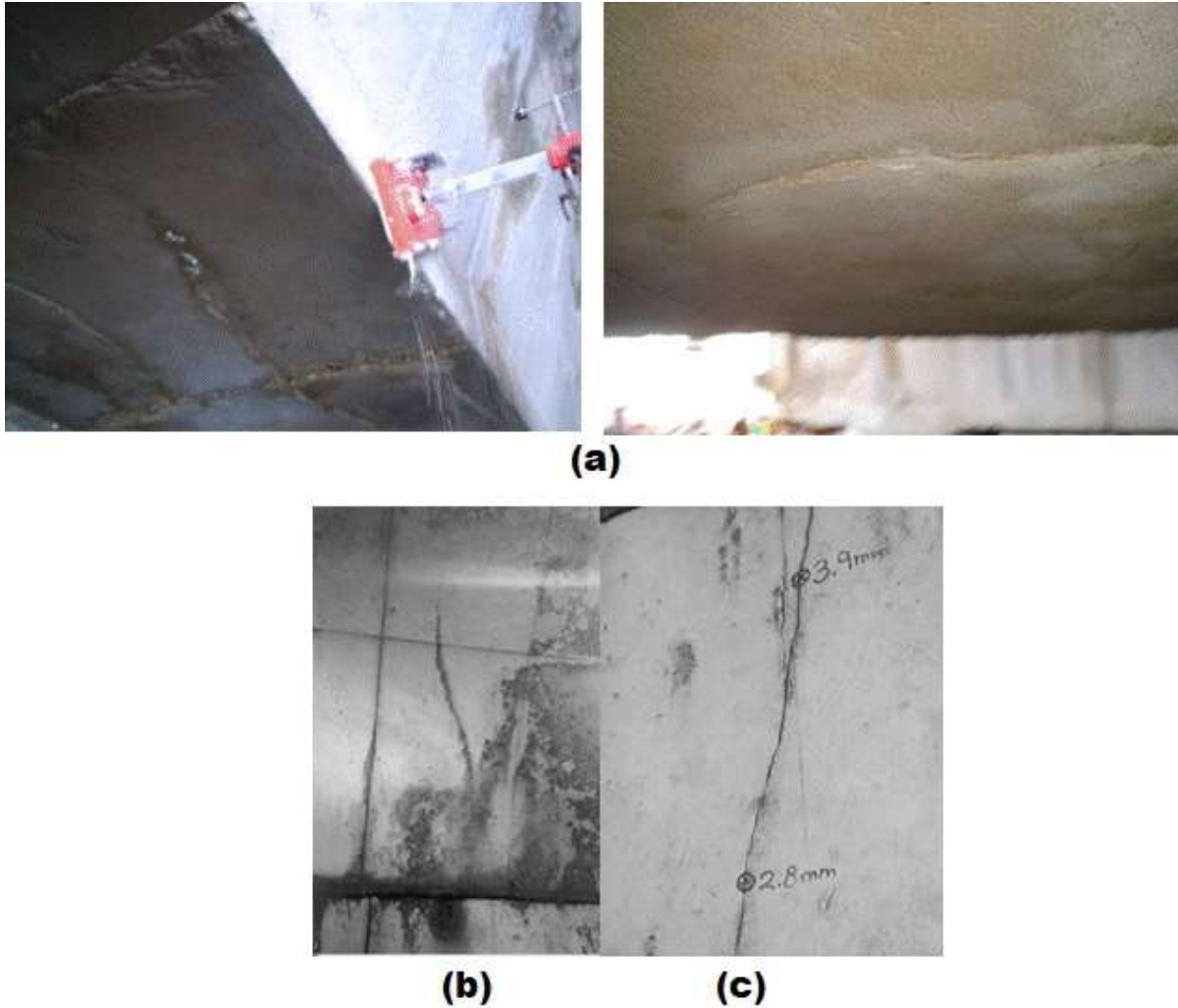


Figura 3.2 a) Evidencias de la corrosión del acero inoxidable en uno de los cabezales ubicados en la plataforma del muelle fiscal. Grietas estructurales típica observadas en b) arcos sin refuerzo estructural y c) vigas

3.1 Pruebas de capacidad de carga estáticas

La figura 3.3 muestra la instrumentación típica usada con extensómetros pegados directamente sobre la superficie del arco estudiado. Los extensómetros usados fueron de 120 mm de longitud con una resistencia eléctrica de 120 Ω y se conectaron a un sistema de adquisición de datos vía un sistema acondicionador enlazado a una computadora portátil. Las cargas verticales fueron aplicadas mediante los ejes traseros de un vehículo cargado y pesado tipo tráiler con plana.

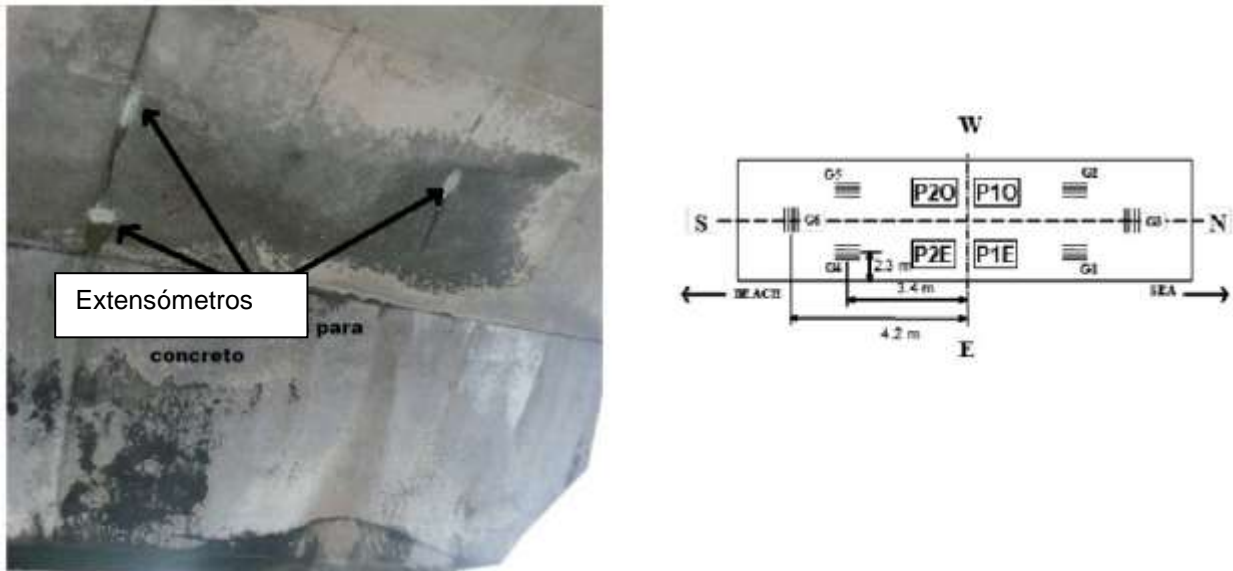


Figura 3.3 Posiciones de instrumentación de los extensómetros

Los vehículos empleados fueron combinaciones típicas de carga pesada de diversas capacidades, las cuales se pesaron en las pesadoras propiedad de las autoridades del puerto. Las cargas empleadas en los ejes traseros fueron de 105 y 236.5 kN para el primero y el segundo vehículos, respectivamente.

Las pruebas de cargas estáticas se realizaron en cada arco instrumentado haciendo pasar la carga conocida a muy baja velocidad hasta llegar a la posición deseada. Los puntos de carga se encuentran en la figura 16 (P1E, P1O, P2E y P2O). La figura 3.4 muestra valores típicos de deformación contra tiempo para uno de los arcos en la posición de carga P20 (236.5 kN carga). En la figura 3.4 se observa una tendencia bien definida, donde el extensómetro G4 (carril opuesto al de la posición de carga) experimenta altos valores de esfuerzos de deformación en tensión (esfuerzos positivos).

Los resultados mostraron tres etapas bien definidas: la primera cuando el vehículo se movía hacia la posición (maniobras de entrada); la segunda etapa cuando el vehículo estuvo estático, y la tercera etapa cuando el vehículo se movió a una posición de carga diferente (maniobras de salida). Cuando el vehículo se encontraba en movimiento, el extensómetro G4 registró valores pico entre 9 y 18 microdeformaciones en tensión (figura 3.4).

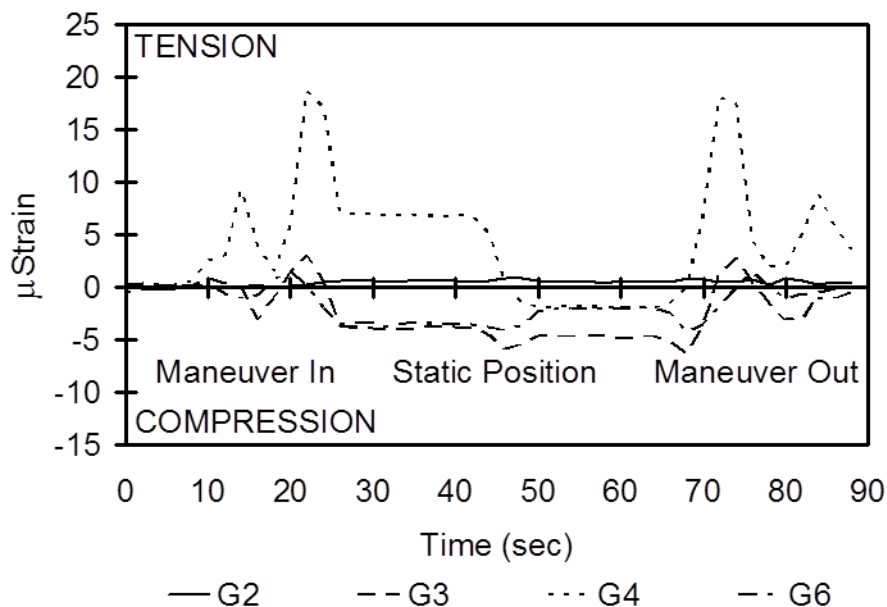


Figura 3.4 Resultado típico de deformación vs tiempo, obtenido de una prueba de carga estática

Cuando la carga era estática, sucedía lo contrario: en el extensómetro G4, se formaba una línea recta de 28 microdeformaciones en tensión. Este comportamiento se observó en todas las pruebas estáticas realizadas, e indica que, debido a una carga excéntrica, las deformaciones longitudinales del arco en el carril opuesto experimentaban esfuerzos de tensión longitudinales, los cuales pueden deberse a torsión.

Los extensómetros G3 y G6, perpendiculares a la dirección de la grieta, no presentaron deformaciones por tensión importantes, opuesto a lo esperado (las direcciones de las grietas observadas implicaban que los esfuerzos de tensión se encontraban en dirección transversal a los arcos). Otra observación importante de la figura 3.4 es que los picos de deformación obtenidos durante las maniobras fueron de casi el doble de los obtenidos cuando el vehículo estaba estático. Ese comportamiento llevó a analizar en detalle el efecto de las cargas en movimiento.

3.2 Pruebas de capacidad de carga dinámicas

Después de ejecutar las pruebas de cargas estáticas, se usó el mismo vehículo de 236.5 kN para la realización de las pruebas dinámicas. El vehículo pesado transitó varias veces a 30 km/h en cada carril (carril este y oeste) y también lo hizo en reversa a baja velocidad (5-10 km/h), siempre sin interferencia de otros vehículos.

El sistema de adquisición de datos se iniciaba justo antes de que el vehículo pasara sobre cada arco instrumentado y se apagaba cuando el vehículo regresaba a la posición original transitando en reversa.

La figura 3.5 muestra una gráfica típica adquirida durante un ciclo avance-reversa en el carril oeste. Otra vez, el extensómetro G4 presentó los valores de deformación más altos, corroborando los datos obtenidos durante las pruebas de carga estáticas.

Como puede observarse en la figura 3.5, los valores pico de deformación (extensómetro G4) variaron entre 9 y 21 microdeformaciones. El pico más alto —21 microdeformaciones— se obtuvo durante el tránsito en reversa, comparado con el valor obtenido en avance con 17 microdeformaciones. Otra diferencia observada fue que los datos de avance (a la velocidad más alta) presentaron un periodo más pequeño que el obtenido en reversa (a la velocidad más baja).

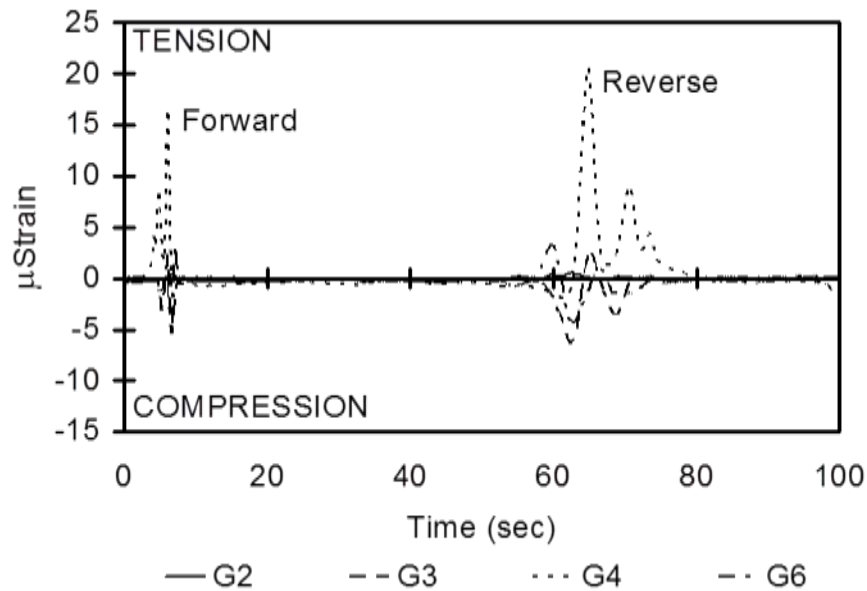
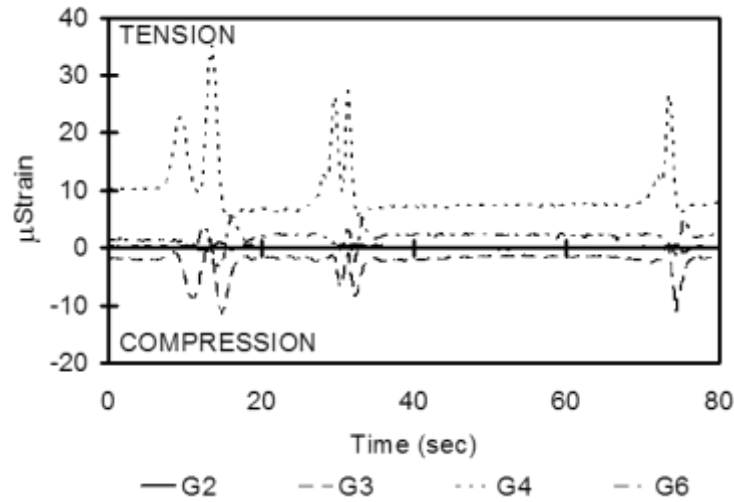


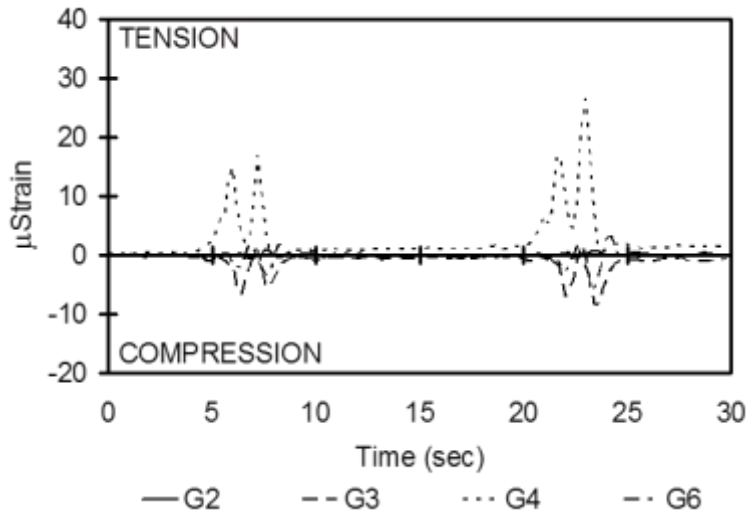
Figura 3.5 Resultado típico de deformación vs tiempo, obtenido de una prueba de carga dinámica

3.3 Pruebas de carga dinámicas al azar

Después de ejecutar las pruebas de carga controlada (estática y dinámica), el muelle se abrió a la circulación y el sistema de adquisición de datos continuó trabajando con cargas de vehículos en ambas direcciones y frecuencias al azar. La figura 3.6 muestra un conjunto de datos adquiridos durante esas pruebas. La figura 3.6a muestra las respuestas en deformación en los arcos instrumentados al pasar dos vehículos independientes. La figura 3.6b muestra la respuesta en deformación de un vehículo parado sobre la zona instrumentada en el arco en el carril oeste y otros tres vehículos pasando al azar en el carril este.



(a)



(b)

Figura 3.6 Resultado típico de deformación vs tiempo, obtenido de dos pruebas dinámicas de carga al azar: (a) muestra la respuesta en deformación en los arcos instrumentados al pasar dos vehículos independientes; (b) muestra la respuesta en deformación de un vehículo parado sobre la zona instrumentada en el arco en el carril oeste y otros tres vehículos pasando al azar en el carril este

4 Conclusiones

Con el presente trabajo, donde se explican los antecedentes de la construcción del antiguo viaducto de arcos del muelle de Progreso y los pormenores de las actividades de inspección llevadas al cabo desde el año 2001, es claro deducir que la construcción ha llegado al final de su vida de servicio para recibir cargas pesadas, por lo que es necesario eliminarlas de esta estructura emblemática.

Este viaducto ha sido reparado, reforzado y mantenido hasta el límite para seguir recibiendo estas cargas pesadas (>40 ton peso neto bruto). La conclusión principal de todos estos estudios realizados hasta la fecha es aligerar las cargas, por lo que se plantea la construcción de un nuevo viaducto donde pasen las cargas de vehículos tractocamiones pesados.

De los motivos expuestos se desprende la recomendación de construir un viaducto alternativo, paralelo al existente, como la mejor y única opción para que el puerto de altura de Progreso pueda continuar su operación recibiendo o descargando mercancía utilizando vehículos pesados que transiten de éste a la costa, y viceversa.

Bibliografía

1. Christensen, A. (1954). "Pier at Progreso in 50 years of civil engineering", Christiani & Nielsen: Copenhagen, Denmark).
2. Torres Acosta, A. A. y M. Martínez Madrid (2003). "Quinta inspección realizada al viaducto del muelle Progreso en 2003", reporte parcial del proyecto núm. ET-83-03EQ003 (ISO: I-E05-2003), Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
3. Torres Acosta, A. A. y M. Martínez Madrid (2003). "Tercera y cuarta inspecciones realizadas al viaducto del muelle Progreso en 2003", reporte parcial del proyecto núm. ET-83-03EQ002 (ISO: I-E03-2003), Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
4. Torres Acosta, A.A. y Martínez Madrid, M. (2003). "Primera Inspección Realizada al Viaducto del Muelle Progreso en 2003," Reporte Parcial del Proyecto No. ET-83-03EQ002, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
5. Torres Acosta, A. A. (2004). "Prueba de integridad estructural de los arcos del viaducto del antiguo muelle de Progreso ante carga de 235 ton", reporte parcial de investigación núm. 002/2004 del proyecto EE03/04: Evaluación del muelle de Progreso por efecto de la corrosión: 2a etapa, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
6. Fabela Gallegos, M., D. Vázquez Vega, R. Hernández Jiménez, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2004). "Prueba de integridad estructural de los arcos 5 y 12 del viaducto del antiguo muelle de Progreso", reporte parcial de investigación núm. 001/2004 del proyecto EE03/04: Evaluación del muelle de Progreso por efecto de la corrosión: 2a etapa, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
7. Fabela Gallegos, M., D. Vázquez Vega, O. Flores Centeno, R. Hernández Jiménez, A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2005). "Prueba de carga en arcos 4, 5, 6, 8, 35 y 36 del viaducto", primer informe parcial de investigación a la API Progreso, proyecto EE02/05: Estudio de la durabilidad del antiguo muelle fiscal y pruebas de carga de tres arcos del viaducto, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, diciembre.
8. Castro Borges, P., A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2005). "Análisis químico del concreto del muelle de Progreso", segundo informe parcial de

- investigación a la API Progreso, proyecto EE02/05: Estudio de la durabilidad del antiguo muelle fiscal y pruebas de carga de tres arcos del viaducto, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, diciembre.
9. Castro Borges, P., A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2005). "Levantamiento de daños de la plataforma del muelle de Progreso", primer informe parcial de investigación a la API Progreso, proyecto EE02/05: Estudio de la durabilidad del antiguo muelle fiscal y pruebas de carga de tres arcos del viaducto, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, diciembre 2005.
 10. Torres Acosta, A. A., P. Castro Borges y M. Martínez Madrid (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.
 11. Torres Acosta, A. A. y M. Martínez Madrid (2008). "Reporte parcial de prueba núm. 3 Proyecto EE 06/08: Pruebas de laboratorio de los materiales de la rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, octubre.
 12. Torres Acosta, A. A. y M. Martínez Madrid (2008). "Reporte parcial de prueba núm. 2 Proyecto EE 06/08: Pruebas de laboratorio de los materiales de la rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, agosto.
 13. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2009). Séptimo reporte parcial "Proyecto EE 17/09: Pruebas de laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, noviembre.
 14. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2009). Sexto reporte parcial "Proyecto EE 17/09: Pruebas de laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, octubre.
 15. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2009). Quinto reporte parcial "Proyecto EE 17/09: Pruebas de laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso", Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, septiembre.
 16. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2009). Cuarto reporte parcial "Proyecto EE 17/09: Pruebas de

- laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, agosto.
17. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid, M. (2009). Tercer reporte parcial “Proyecto EE 17/09: Pruebas de laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, julio.
 18. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2009). Segundo reporte parcial “Proyecto EE 17/09: Pruebas de laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, junio.
 19. Rendón Belmonte, M., J. Terán Guillén, A. A. Torres Acosta y M. Martínez Madrid (2009). Primer reporte parcial “Proyecto EE 17/09: Pruebas de laboratorio para la supervisión a los trabajos de rehabilitación del viaducto de arcos del puerto de Progreso”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, mayo.
 20. Torres Acosta, A. A. y P. Castro Borges (2012). Reporte final proyecto EI 05/12: “Metodología para la instrumentación y calificación de la capacidad de carga de una estructura: Muelle 6 de la API Progreso como ejemplo”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, abril.
 21. Torres Acosta, A. A. y M. Martínez Madrid (2013). “Informe de servicio núm. E012/MAT/2013: Evaluación visual y fotográfica de las reparaciones efectuadas en el muelle 6 y viaducto de arcos; cliente: API Progreso”, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, junio.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015