

Seguimiento y análisis del puente El Carrizo mediante monitoreo periódico

Luis Álvaro Martínez Trujano Francisco Javier Carrión Viramontes Juan Antonio Quintana Rodríguez Miguel Anaya Díaz Andrés Hernández Guzmán Germán Michel Guzmán Acevedo Héctor Miguel Gasca Zamora Jorge Alberto Hernández Figueroa José Manuel Machorro López

> Publicación Técnica No. 668 Sanfandila, Qro. 2022

> > ISSN 0188-7297

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna El 05/21 Seguimiento y análisis del puente El Carrizo mediante monitoreo periódico y fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte por: Luis Álvaro Martínez Trujano, Francisco Javier Carrión Viramontes, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Miguel Anaya Díaz, Andrés Hernández Guzmán, Germán Michel Guzmán Acevedo, Héctor Miguel Gasca Zamora, Jorge Alberto Hernández Figueroa y José Manuel Machorro López.

Se agradece el apoyo y facilidades brindadas por la M.I. Ingrid Pastor Torres, Subgerente Técnico de la Unidad Regional Mazatlán y al Ing. Fernando J. Burela Hernández, Superintendente de Conservación en la Unidad Regional Mazatlán, ambos de Caminos y Puente Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE).

Contenido

Página

Índi	ce de	e figuras	iii		
Índi	Índice de tablas ix				
Sin	opsis		xi		
Abs	stract		xiii		
Res	sume	n ejecutivo	xv		
Intr	oduco	ción	1		
1	Desc	cripción del puente El Carrizo	3		
	1.1	Sistema de monitoreo del puente El Carrizo	6		
2	Moni	toreo periódico del puente El Carrizo	15		
	2.1	Metodología	15		
	2.2	Mediciones en campo	16		
3	Anál	isis de la información	23		
4	Mod	elo matemático del puente El Carrizo	59		
	4.1	Método de elementos finitos	59		
	4.2	Desarrollo del MEF	60		
	4.3	Calibración del MEF	61		
5	Resultados65				
Cor	nclusi	ones	91		
Bib	liogra	fía	93		

Índice de figuras

	Pá	igina
Figura 1.1	Fotografía del puente El Carrizo	3
Figura 1.2	Plano del puente El Carrizo en vista de elevación	4
Figura 1.3	Plano del puente El Carrizo en vista de planta	4
Figura 1.4	Vista general de la sección doble voladizo del puente El Carrizo posterior al incendio	5
Figura 1.5	Daños en la superestructura de la sección doble voladizo del puente El Carrizo (vista en detalle desde el Cuerpo B lado Durango)	5
Figura 1.6	Ubicación de sensores en dovela de la sección doble voladizo	6
Figura 1.7	Sistema de adquisición de datos instalado en el puente El Carrizo	7
Figura 1.8	Diagrama de instrumentación del canal 1.1	9
Figura 1.9	Diagrama de instrumentación del canal 1.2	10
Figura 1.10	Diagrama de instrumentación del canal 1.3	10
Figura 1.11	Diagrama de instrumentación del canal 1.4	11
Figura 1.12	Diagrama de instrumentación del canal 2.1	11
Figura 1.13	Diagrama de instrumentación del canal 2.2	12
Figura 1.14	Diagrama de instrumentación del canal 3.2	12
Figura 1.15	Diagrama de instrumentación del canal 3.4	13
Figura 2.1	Vista general del gabinete con equipos de adquisición del puente El Carrizo	18
Figura 2.2	Interconexión de interrogador y multiplexor en el puente El Carrizo	18
Figura 2.3	Ubicación temporal de acelerómetros en el puente El Carrizo (vista elevación)	19
Figura 2.4	Ubicación temporal de acelerómetros en el puente El Carrizo (vista planta)	20
Figura 2.5	Colocación de conos viales para instalación de acelerómetros	21
Figura 2.6	Acelerómetro instalado en el cuerpo B, lado Durango	21

Figura 2.7	Acelerómetro instalado en el cuerpo B, lado Durango (vista lateral)	22
Figura 3.1	Respuesta dinámica típica en un sensor de deformación unitaria	23
Figura 3.2	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4AD (sesión 1)	24
Figura 3.3	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AD (sesión 1)	25
Figura 3.4	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AD (sesión 1)	25
Figura 3.5	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AD (sesión 1)	26
Figura 3.6	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AM (sesión 1)	26
Figura 3.7	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AM (sesión 1)	27
Figura 3.8	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AM (sesión 1)	27
Figura 3.9	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BD (sesión 1)	28
Figura 3.10	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BD (sesión 1)	28
Figura 3.11	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BD (sesión 1)	29
Figura 3.12	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BD (sesión 1)	29
Figura 3.13	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BM (sesión 1)	30
Figura 3.14	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BM (sesión 1)	30
Figura 3.15	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BM (sesión 1)	31
Figura 3.16	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BM (sesión 1)	31
Figura 3.17	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4AD (sesión 2)	32
Figura 3.18	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AD (sesión 2)	33
Figura 3.19	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AD (sesión 2)	33
Figura 3.20	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AD (sesión 2)	34
Figura 3.21	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AM (sesión 2)	34
Figura 3.22	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AM (sesión 2)	35

Figura 3.23	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4AM (sesión 2)	35
Figura 3.24	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AM (sesión 2)	36
Figura 3.25	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BD (sesión 2)	36
Figura 3.26	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BD (sesión 2)	37
Figura 3.27	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BD (sesión 2)	37
Figura 3.28	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BD (sesión 2)	38
Figura 3.29	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BM (sesión 2)	38
Figura 3.30	Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BM (sesión 2)	39
Figura 3.31	Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BM (sesión 2)	39
Figura 3.32	Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BM (sesión 2)	40
Figura 3.33	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AD (sesión 1)	41
Figura 3.34	Ajuste de distribución a tensión sensor EID4AD (sesión 1)	41
Figura 3.35	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AD (sesión 1)	42
Figura 3.36	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AD (sesión 1)	42
Figura 3.37	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AM (sesión 1)	43
Figura 3.38	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AM (sesión 1)	43
Figura 3.39	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AM (sesión 1)	44
Figura 3.40	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BD (sesión 1)	44
Figura 3.41	Ajuste de distribución a tensión sensor EID4BD (sesión 1)	45
Figura 3.42	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BD (sesión 1)	45
Figura 3.43	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BD (sesión 1)	46
Figura 3.44	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BM (sesión 1)	46
Figura 3.45	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BM (sesión 1)	47
Figura 3.46	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BM (sesión 1)	47
Figura 3.47	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AD (sesión 2)	48
Figura 3.48	Ajuste de distribución a tensión sensor EID4AD (sesión 2)	49
Figura 3.49	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AD (sesión 2)	49
Figura 3.50	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AD (sesión 2)	50
Figura 3.51	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AM (sesión 2)	50

Figura 3.52	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AM (sesión 2)	51			
Figura 3.53	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AM (sesión 2)				
Figura 3.54	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BD (sesión 2) 5				
Figura 3.55	Ajuste de distribución a tensión sensor EID4BD (sesión 2)	52			
Figura 3.56	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BD (sesión 2)	53			
Figura 3.57	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BD (sesión 2)	53			
Figura 3.58	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BM (sesión 2)	54			
Figura 3.59	Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BM (sesión 2)	54			
Figura 3.60	Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BM (sesión 2)	55			
Figura 3.61	Valor de referencia del sensor ESD1AD el 18 de agosto de 2021	56			
Figura 3.62	Vista de sección transversal de dovela	56			
Figura 3.63	Respuesta dinámica en el sensor ESD4AD ante un evento extraordinario	57			
Figura 3.64	Respuesta dinámica en el sensor EID4AD ante un evento extraordinario	57			
Figura 4.1	Modelo de elemento finito del puente El Carrizo (vista 1)	60			
Figura 4.2	Modelo de elemento finito del puente El Carrizo (vista 2)	60			
Figura 4.3	Comparativa de forma modal 1 entre MEF y datos experimentales	62			
Figura 4.4	Comparativa de forma modal 2 entre MEF y datos experimentales	63			
Figura 4.5	Comparativa de forma modal 3 entre MEF y datos experimentales	63			
Figura 5.1	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4AD	66			
Figura 5.2	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BD	66			
Figura 5.3	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1AD	67			
Figura 5.4	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1BD	67			
Figura 5.5	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1AM	68			
Figura 5.6	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1BM	68			

Figura 5.7	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4AM	69
Figura 5.8	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BM	69
Figura 5.9	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4AD	71
Figura 5.10	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4BD	71
Figura 5.11	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1AD	72
Figura 5.12	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1BD	72
Figura 5.13	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1AM	73
Figura 5.14	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1BM	73
Figura 5.15	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4AM	74
Figura 5.16	Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4BM	74
Figura 5.17	Valor de referencia de deformación del sensor ESD4AD	75
Figura 5.18	Valor de referencia de deformación del sensor ESD1AD	75
Figura 5.19	Valor de referencia de deformación del sensor ESD1AM	76
Figura 5.20	Valor de referencia de deformación del sensor ESD4AM.	76
Figura 5.21	Valor de referencia de deformación del sensor ESD4BD	77
Figura 5.22	Valor de referencia de deformación del sensor ESD1BD	77
Figura 5.23	Valor de referencia de deformación del sensor ESD1BM	78
Figura 5.24	Valor de referencia de deformación del sensor ESD4BM	78
Figura 5.25	Valor de referencia de deformación del sensor EID4AD	79
Figura 5.26	Valor de referencia de deformación del sensor EID1AD	79
Figura 5.27	Valor de referencia de deformación del sensor EID1AM	80
Figura 5.28	Valor de referencia de deformación del sensor EID4AM	80
Figura 5.29	Valor de referencia de deformación del sensor EID4BD	81
Figura 5.30	Valor de referencia de deformación del sensor EID1BD	81
Figura 5.31	Valor de referencia de deformación del sensor EID1BM	82

Figura 5.32	Valor de referencia de deformación del sensor EID4BM	82
Figura 5.33	Valor de referencia de inclinación del sensor ID4AD	83
Figura 5.34	Valor de referencia de inclinación del sensor ID4AM	83
Figura 5.35	Valor de referencia de inclinación del sensor ID7BD	84
Figura 5.36	Valor de referencia de inclinación del sensor ID4BM	84
Figura 5.37	Deformación por flexión en dovelas debido a carga viva	85
Figura 5.38	Centroide de la Dovela No 4 lado Durango del cuerpo A	86
Figura 5.39	Centroide de la Dovela No 4 lado Durango del cuerpo B	87
Figura 5.40	Centroide de la Dovela No 1 lado Durango del cuerpo A	87
Figura 5.41	Centroide de la Dovela No 1 lado Durango del cuerpo B	88
Figura 5.42	Centroide de la Dovela No 1 lado Mazatlán del cuerpo A	88
Figura 5.43	Centroide de la Dovela No 1 lado Mazatlán del cuerpo B	89
Figura 5.44	Centroide de la Dovela No 4 lado Mazatlán del cuerpo A	89
Figura 5.45	Centroide de la Dovela No 4 lado Mazatlán del cuerpo B	90

Índice de tablas

Pág	gina		
Módulo de energización			
Módulo de adquisición de datos	8		
Relación de actividades durante sesión de medición con sensores de fibra óptica			
Relación de actividades durante sesión de medición con acelerómetros inalámbricos	20		
Propiedades mecánicas de los elementos utilizados en el MEF 6			
Resultados modales de la calibración de MEF 6			
Valor estadístico de la media y límites de operación normal para 6 sensores superiores			
Valor estadístico de la media y límites de operación normal para 7 sensores inferiores			
Ubicación del centroide en metros para las dovelas del doble voladizo	86		
	Pág Módulo de energización Módulo de adquisición de datos Relación de actividades durante sesión de medición con sensores de fibra óptica Relación de actividades durante sesión de medición con acelerómetros inalámbricos Propiedades mecánicas de los elementos utilizados en el MEF Resultados modales de la calibración de MEF Valor estadístico de la media y límites de operación normal para sensores superiores Valor estadístico de la media y límites de operación normal para sensores inferiores		

Sinopsis

El Carrizo es considerado el segundo puente de mayor importancia en la autopista Durango-Mazatlán que, en 2018, sufrió un daño importante en su sección de doble voladizo a causa de un fuerte incendio originado por la volcadura de una pipa con combustible. Durante el trabajo de rehabilitación, posterior al incendio, se instaló un sistema de monitoreo para garantizar la seguridad de los usuarios, verificar la eficiencia de los trabajos de rehabilitación y continuar evaluando la integridad de la estructura en los siguientes años. En esta publicación, se describe el proceso de análisis y evaluación estructural del puente mediante los cuales se establecieron los límites de operación de los parámetros estructurales (deformaciones unitarias por carga viva, centroides e inclinaciones) para la sección de doble voladizo del puente El Carrizo. Para ello, se utilizó toda la información disponible por el monitoreo durante el proceso de rehabilitación y los datos recabados en sesiones periódicas de monitoreo realizadas en 2021. Complementariamente, durante las visitas programadas se instrumentó la estructura atirantada con sensores de aceleración, para con ello, se calibrar el modelo matemático del puente completo con el objetivo de determinar su condición estructural actual.

Abstract

El Carrizo is considered the second most important bridge on the Durango-Mazatlán highway, which in 2018, suffered significant damage to its double cantilever section due to a strong fire caused by the overturning of a fuel tanker. During the maintenance work, after the fire, a monitoring system was installed to guarantee the safety of the users, verify the efficiency of the rehabilitation works and continue the evaluation of the integrity of the structure in the following years. In this publication, the structural analysis and evaluation process of the bridge is described, through which the operating limits of the structural parameters were established (unit deformations due to live load, centroids and inclinations) for the double cantilever section of the El Carrizo Bridge. To do this, all the information available from monitoring sessions held in 2021 were used. Complementary, during the visits, the cable-stayed structure was instrumented with acceleration sensors to calibrate the mathematical model of the entire bridge with the aim of determining its current structural condition.

Resumen ejecutivo

El Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) tiene como objetivo la evaluación estructural de los puentes mexicanos instrumentados por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT). Para alcanzar tal objetivo es imperativo incluir estructuras previamente instrumentadas para aprovechar la inversión realizada y con ello, dar seguimiento a su comportamiento estructural. Uno de los puentes monitoreados por el CeMPEI es El Carrizo, el cual se instrumentó de manera permanente en la sección doble voladizo durante el primer trimestre de 2018, como parte de la emergencia provocada por el accidente de una pipa que transportaba combustible.

Como parte de la estrategia del CeMPEI, para dar seguimiento a la condición estructural del puente el Carrizo, en 2021 se efectuaron mediciones con el sistema de monitoreo, para procesar y analizar los parámetros estructurales de deformación unitaria e inclinación en las dovelas de la sección doble voladizo, así como aceleraciones en la sección atirantada. Posterior al análisis de la información del monitoreo, se establecieron los límites bajo condiciones de operación normal de la estructura, se obtuvieron los valores de referencia de los sensores de deformación unitaria, centroides e inclinaciones en dovelas instrumentadas. De manera paralela se desarrolló y calibró un modelo de elementos finitos de la estructura completa, a través del estudio de los registros de aceleración en la sección atirantada del puente El Carrizo.

Mediante el estudio efectuado se determinó que la estructura en su conjunto, se encuentra operando de acuerdo a lo esperado y en condiciones de seguridad estructural, de esta manera se garantiza la seguridad de los usuarios que transitan sobre el puente El Carrizo.

Introducción

La Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) cuenta con el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI), ubicado en el Instituto Mexicano del Transporte, mediante el cual se puede monitorear, procesar y analizar el comportamiento de parámetros estructurales de cada uno de los puentes instrumentados de la red federal carretera. El éxito del monitoreo está en el análisis e interpretación de la información de los sensores, la aplicación de metodologías de detección de daño y la implementación de planes de acción para conservar la integridad estructural, con lo que se garantiza la seguridad de los usuarios de las estructuras.

Para determinar la condición estructural de manera oportuna, que minimice los costos de mantenimiento, preserve la integridad del puente y garantice la seguridad de los usuarios, es importante el desarrollo de una estrategia de monitoreo, ya sea temporal o permanente, acorde a las particularidades de cada estructura, en la cual se procesen los datos de los sensores y mediante el análisis y evaluación de la información, se genere un plan de acción de corto, mediano y largo plazo, ante eventos o tendencias inusuales en los parámetros estructurales del puente o en situaciones extremas como accidentes viales. Para cumplir con estas expectativas es necesaria la comunicación y colaboración entre los responsables del monitoreo y las autoridades encargadas de la seguridad, el mantenimiento y conservación de la infraestructura carretera.

El Monitoreo de la integridad Estructural o SHM (Structural Health Monitoring, por sus siglas en inglés) es el proceso en el cual las estrategias de detección de daños son implementadas en las infraestructuras aero-espaciales, mecánicas y civiles [1]. Las primeras técnicas de monitoreo fueron efectuadas en las estructuras aeroespaciales, como naves espaciales y aeroplanos, por la necesidad de monitorear las condiciones imperantes en el vuelo y emitir alertas tempranas si se detectan fallas; con el objetivo de salvaguardar la vida humana.

Desde los años sesenta del siglo pasado ya se aplicaban métodos de pruebas dinámicas de vibración libre o forzada para estudiar el comportamiento dinámico de las estructuras con especial énfasis en los edificios [2]. En estos estudios de tipo académico se buscaba obtener los períodos naturales de oscilación y la razón de amortiguamiento. Sin embargo, el tema propiamente de monitoreo de la integridad de la infraestructural civil no tomó fuerza sino hasta los comienzos de los años noventa debido a varias razones:

- La necesidad de determinar el estado de deterioro de las estructuras civiles de gran envergadura, ya que algunas se aproximan a la etapa final de su vida útil.
- 2) En términos de gestión, manejo y mitigación de las amenazas de los desastres, una base de datos que provee información sobre el estado de las estructuras civiles pre y post-desastre es crucial para la planificación y la toma de decisiones de las autoridades.
- 3) Cada vez hay más estructuras en el mundo como los puentes de gran tamaño o con características especiales que constituyen líneas vitales de tránsito para muchas ciudades. Su operación no puede ser interrumpida y garantizar su funcionamiento es un asunto crítico. Es necesario, entonces, un sistema de monitoreo continuo para detectar daños en tiempo real e implementar medidas correctivas a tiempo antes de que el daño se agrave o se extienda.

Todos estos hechos impulsaron un gran esfuerzo a nivel internacional en la investigación y se han tenido avances en detección de daño, sistemas de monitoreo basados en sensores de fibra óptica, sensores inalámbricos, sensores innovadores que emplean nuevos métodos de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos de las estructuras, entre otros. Sin embargo, dada la complejidad que se presenta en las estructuras civiles, aún hay muchos retos por enfrentar y problemas por superar.

1. Descripción del puente El Carrizo

El puente El Carrizo conecta la ruta entre el Golfo de México y la Costa del Pacífico. se localiza en Concordia, Sinaloa sobre el km. 162+702 de la autopista de cuota Durango-Mazatlán. Este puente se considera como uno de los diez puentes atirantados de la Red Federal Carretera y el segundo más importante de la carretera en donde se sitúa. El puente fue diseñado por JESA Ingeniería y su construcción fue realizada por TRADECO Infraestructura con inicio en marzo de 2011 y se finalizó en marzo de 2013. El puente tiene una longitud total de 480 metros, con un claro principal de 217 metros. Está compuesto por tres tipos de estructuras: trabes tipo Nebraska, doble voladizo con vigas tipo cajón y una sección atirantada. La estructura con trabes tipo Nebraska postensadas tiene una longitud de 45 metros, la segunda estructura de 71 metros está formada por dovelas de concreto postensadas con sección transversal tipo cajón, en la cual, uno de sus lados sirve de apoyo para la estructura del atirantado y se encuentra trabajando en voladizo; finalmente, el tramo atirantado está compuesto por cuatro semi-arpas de 14 tirantes cada una de ellas, variando la cantidad de torones por tirante desde 22 hasta 43 elementos, la parte inferior del tablero está constituido por dovelas metálicas y en total tiene una longitud de 364 metros. El puente tiene un total de 487 metros de longitud, tomando en cuenta los apoyos, con un ancho de 18.4 metros y una altura máxima de 226 metros desde el desplante hasta la parte superior de la pila [3]. La figura 1.1 ilustra el puente El Carrizo desde el lado Durango.



Figura 1.1 Fotografía del puente El Carrizo

Las figuras 1.2 y 1.3 muestran el plano del puente El Carrizo en vista de elevación y planta, respectivamente.



Figura 1.2 Plano del puente El Carrizo en vista de elevación



Figura 1.3 Plano del puente El Carrizo en vista de planta

El viernes 12 de enero de 2018 se suscitó un daño considerable en la superestructura del puente El Carrizo, en la sección de doble voladizo, como consecuencia de un accidente vial sobre el puente, en donde, se volcó e incendió el segundo remolque de un vehículo de carga que transportaba diésel. La volcadura provocó el derrame de aproximadamente 34 mil litros de combustible que tardaron aproximadamente 6 horas en extinguirse [4].

La figura 1.4 muestra una vista aérea general del puente dañado, mientras que en la figura 1.5 se observa una vista en detalle sobre la zona dañada de la estructura. Ambas figuras corresponden a la estructura de doble voladizo.



Figura 1.4 Vista general de la sección doble voladizo del puente El Carrizo posterior al incendio



Figura 1.5 Daños en la superestructura de la sección doble voladizo del puente El Carrizo (vista en detalle desde el Cuerpo B lado Durango)

Posteriormente, personal de CAPUFE y Dirección General de Servicios Técnicos determinaron necesario abrir la circulación lo antes posible, por lo que se aprobó un plan de acción en dos etapas. La primera etapa consistió en rehabilitar el doble voladizo, efectuando la remoción y recuperación del acero de refuerzo y el concreto dañado en los cajones, la reparación y reforzamiento de los diafragmas, así como el postensado de cuatro cables adicionales y la fabricación de una superficie de rodamiento que sirvió de carril por cada cuerpo en ambas vigas tipo cajón, para de manera provisional, dar circulación antes del 23 de marzo de 2018. La segunda etapa se enfocó en la rehabilitación y adición de las piezas de las vigas transversales de acero del tablero, así como la losa de concreto con el puente parcialmente en servicio, con el objetivo de llevarlo a la condición previa antes del siniestro.

1.1 Sistema de monitoreo del puente El Carrizo

En 2018, durante las etapas de apertura parcial y rehabilitación del puente El Carrizo, el Instituto Mexicano del Transporte, a través del Grupo de Monitoreo Estructural, realizó la instrumentación con sensores de fibra óptica y monitoreo continuo, en tiempo real, de la sección del puente doble voladizo así como el diseño y ejecución de dos pruebas de carga, la primera para garantizar la capacidad estructural del paso provisional antes de su apertura al tránsito y la última prueba de carga, al finalizar las actividades de rehabilitación del doble voladizo, para asegurar la condición y seguridad estructural del puente [5].

Para el monitoreo continuo se instalaron de manera permanente sensores de deformación unitaria tipo extensómetros, en ambos cuerpos, para medir las deformaciones unitarias en las dovelas No.1 y No. 4 tanto de lado Durango como de lado Mazatlán, siendo un par de sensores por cada dovela. Adicional, se instalaron inclinómetros y sensores de temperatura. La figura 1.6 muestra la ubicación de sensores en la dovela 4 del cuerpo A lado Durango.



Figura 1.6 Ubicación de sensores en dovela de la sección doble voladizo

Actualmente, el sistema de monitoreo temporal del puente El Carrizo consta de dos módulos: uno para la energización y otro la adquisición de datos. El primero provee energía eléctrica de manera temporal a los equipos de medición. El segundo, es el encargado de medir, registrar, procesar y almacenar la información proveniente de los sensores de fibra óptica.

Para la adquisición de datos se requiere de un ordenador para procesar y almacenar la información registrada por los sensores instalados en la estructura. La información se recibe en la computadora a través de un equipo de interrogación y otro equipo de multiplexión para sensores de fibra óptica. El interrogador traduce los cambios de longitud de onda en parámetros como: deformaciones unitarias, inclinaciones y cambios de temperatura; mientras que el multiplexor expande los cuatro canales nativos del sistema en 16 (dieciséis) canales funcionales. La figura 1.7 muestra una distribución esquemática de los equipos que conforman al sistema de adquisición de datos.



Figura 1.7 Sistema de adquisición de datos instalado en el puente El Carrizo

Los sensores de deformación para concreto son dispositivos que se utilizan para medir el comportamiento dinámico del puente, relacionar las deformaciones con las cargas de los vehículos y medir los cambios de deformación por temperatura durante el día o estación del año. La información proporcionada por estos sensores es fundamental para la calibración de modelos de elementos finitos, así como la implementación de técnicas de detección de daño.

Los inclinómetros tienen la finalidad de dar seguimiento al nivel de inclinación de las pilas durante el tiempo e identificar cuando hay un cambio significativo posterior a algún evento crítico, como pude ser un sismo o accidente.

Mediante los sensores de temperatura se obtiene información de los gradientes térmicos para correlacionar tales cambios, con las deformaciones en la estructura [6].

En las tablas 1.1 y 1.2 se enlistan la cantidad de equipos, nombre, descripción de los componentes, marca, modelo y condición de la instalación, de los módulos de energización y de adquisición de datos, respectivamente.

Cantidad	Nombre	Descripción	Marca	Modelo	Instalación
2	Batería 12 V	Batería 12 V tipo ciclado profundo con capacidad de 55 Ah	Optima	D34/78	Temporal
2	Batería 12 V	Batería 12 V tipo AGM con capacidad de 110 Ah	Powersonic	PS- 121100B	Temporal
1	Inversor de voltaje	Equipo que convierte energía de 12 V en corriente directa (CD) a 120 V de corriente variable (AC)	Samlex Power	PST- 600-12	Temporal

Tabla 1.1 Módulo de energización

Tabla 1.2 Módulo de adquisición de datos

Cantidad	Nombre	Descripción	Marca	Modelo	Instalación
1	Ordenador portátil	Equipo de cómputo para registro y almacenamiento de datos del monitoreo	Dell	Latitude	Temporal
1	Interrogador FBG	Equipo de adquisición de datos de fibra óptica de 4 canales con frecuencia de adquisición máxima de 1000 Hz	Micron Optics	sm-130	Temporal
1	Multiplexor FBG	Equipo que divide el haz de luz de los canales del interrogador para tener 16 canales	Micron Optics	sm-041	Temporal
16	Sensor de deformación unitaria en concreto	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto	Micron Optics	os3600	Permanente
4	Sensor de inclinación	Sensor empleado para medir inclinaciones	FBG Tech	TI-310	Permanente
4	Sensor de temperatura	Sensor empleado para medir temperatura	Micron Optics	os4300	Permanente

En total, se encuentran instalados de manera permanente 24 sensores en la sección doble voladizo del puente El Carrizo, los cuales se distribuyeron en ocho canales de adquisición. En donde, los canales 1.1, 1.2 y 2.1, contienen sensores instalados en el cuerpo A; mientras que los canales 1.3, 1.4, 2.2 y 3.4, incluyen sensores colocados en el cuerpo B.

Las figuras 1.8 a 1.15 representan los diagramas de instrumentación del puente El Carrizo. En cada figura se ilustra en la parte superior izquierda una vista de elevación de la sección doble voladizo indicando la zona instrumentada y a la derecha, una tabla con la relación de los sensores incluidos en el canal. Mientras que, en la parte inferior izquierda se muestra una vista del detalle de la zona instrumentada, en donde se visualiza el color y número de cable de fibra óptica utilizado para cada canal, con su respectiva identificación de acuerdo a la norma TIA-598-C [7], y a la derecha la simbología para la interpretación del diagrama.



Figura 1.8 Diagrama de instrumentación del canal 1.1



Figura 1.9 Diagrama de instrumentación del canal 1.2







Figura 1.11 Diagrama de instrumentación del canal 1.4



Figura 1.12 Diagrama de instrumentación del canal 2.1



Figura 1.13 Diagrama de instrumentación del canal 2.2



Figura 1.14 Diagrama de instrumentación del canal 3.2



Figura 1.15 Diagrama de instrumentación del canal 3.4

2. Monitoreo periódico del puente El Carrizo

El puente El Carrizo se instrumentó de manera permanente con el fin de conocer la condición estructural en las etapas de rehabilitación de 2018, sin embargo, una vez instrumentado se incluyó dentro de las estructuras que el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) evalúa periódicamente bajo condiciones de tránsito normal, para determinar la condición estructural en la que se encuentra el puente El Carrizo.

Con el objetivo de evaluar la condición estructural del puente para proponer límites bajo condición de operación normal de la estructura, en el año 2020 se inició el proyecto El 02/20 "Monitoreo estructural del puente el Carrizo". En el proyecto se planeó realizar mediciones periódicas en el puente El Carrizo durante el año 2020 pero derivado de las indicaciones en la circular DG-02/2020 del IMT, a causa de la propagación del brote de neumonía denominado Coronavirus COVID-19, el 27 de abril de 2020 se decidió suspenderlo, y finalmente cancelarlo a causa de la reducción en un 75% el presupuesto del IMT, incluyendo la partida presupuestal prevista para viáticos, derivado del Decreto Presidencial.

Finalmente, en 2021 se llevó a cabo el monitoreo del puente El Carrizo, como parte del proyecto El 05/21 "Seguimiento y análisis del puente El Carrizo mediante monitoreo periódico". El proyecto se planteó con los siguientes objetivos: evaluar la condición estructural de la sección doble voladizo bajo condiciones de operación normal para establecer los límites de operación de los parámetros estructurales de la sección doble voladizo y determinar las frecuencias naturales y formas modales de la sección atirantada para el desarrollo y calibración de un modelo matemático del puente El Carrizo.

2.1 Metodología

La ejecución del proyecto consiste básicamente en seis actividades principales:

- Generación de la base de información, en la cual, se integró la información del análisis y la evaluación de los valores de deformación unitaria por carga viva, centroides y ángulos de inclinación obtenidos al finalizar la rehabilitación del puente en 2018, con ello, se obtuvieron valores de referencia (*baseline*) de los parámetros estructurales de interés;
- 2) Desarrollo del plan de monitoreo temporal, en el cual, se incluyó la gestión con CAPUFE de los permisos para los acceso y mediciones en la estructura, las fechas y número de sesiones de medición durante 2021, el personal y los preparativos de equipos para los registros en la sección

doble voladizo, así como la configuración complementaria de la instrumentación para la sección atirantada;

- Realización de las mediciones en el puente, por cada sesión de medición en 2021 se obtienen los registros de los sensores de fibra óptica y los datos de aceleración en el tablero del tramo atirantado;
- 4) Ejecución del análisis de la información del monitoreo y evaluación de la integridad del puente, posterior a las mediciones en campo, en gabinete, se efectuó el procesamiento de los datos de los sensores de fibra óptica, así como de los acelerómetros sobre el tablero de la sección atirantada;
- 5) Desarrollo y calibración del modelo matemático del puente El Carrizo con los planos del puente y los datos obtenidos en campo.
- 6) Establecimiento de los límites de operación de cada uno de los parámetros estructurales con los datos del monitoreo periódico y el modelo calibrado de elementos finitos.

2.2 Mediciones en campo

Con el fin de determinar el comportamiento estructural del puente El Carrizo, se realizaron dos sesiones de mediciones en campo durante el año 2021. La primera, se llevó a cabo del 11 al 13 de mayo de 2021 y la segunda del 17 al 19 de agosto de 2021. Los registros del sistema de monitoreo de fibra óptica en la sección doble voladizo se realizaron durante 6 horas continuas por cada día de medición. En la tabla 2.1 se muestra la relación de actividades realizadas durante los registros del sistema de monitoreo de fibra óptica del puente El Carrizo.

Actividad	Hora	Descripción	Duración
A1	9:00 h	Llegar al puente El Carrizo.	-
A2	9:10 h	Efectuar bandereo y colocación de conos viales para desviar el tránsito del carril de baja al carril de alta velocidad del Cuerpo A.	10 min
A3	9:20 h	En el carril de baja velocidad del cuerpo A, se coloca un vehículo tipo pick-up para descargar los equipos de 15 min medición.	
A4	9:35 h	Remover conos viales y banderero del sitio.	5 min
A5	9:40 h	Trasladar el vehículo tipo pick-up fuera de los cuerpos de circulación de la autopista.	
A6	9:40 h	Instalación de equipos para el comienzo de mediciones del puente en la sección doble voladizo.	30 min
A7	10:10 h	Registro de mediciones del puente en la sección doble 6 ho	
A8	16:10 h Remover equipos de medición, colocación de conos viales y banderero para desviar el tránsito del carril de baja al carril de alta velocidad del Cuerpo A, para subir los equipos de medición al vehículo.		15 min
A9	16:25 h	Remover conos viales y banderero del sitio.	5 min
A10	16:30 h	Retirarse del puente.	-

Tabla 2.1 Relación de actividades durante sesión de	e medición con sensores de fibra óptica
---	---

En la figura 2.1 se ilustra una vista general del gabinete instalado de manera permanente en 2018, al finalizar la rehabilitación de la estructura, dentro del gabinete se observan los equipos colocados temporalmente durante la primera sesión de mediciones de los módulos de energización y adquisición de datos del puente El Carrizo.


Figura 2.1 Vista general del gabinete con equipos de adquisición del puente El Carrizo

La figura 2.2 muestra una vista en detalle de la interconexión entre el interrogador (parte superior) y multiplexor (parte inferior) de fibra óptica durante las mediciones realizadas en la sección de doble voladizo.



Figura 2.2 Interconexión de interrogador y multiplexor en el puente El Carrizo

Cada sesión de medición en la sección doble voladizo se efectuó a una frecuencia de muestreo de 125 Hz para cada uno de los sensores instalados. El sistema almacena la información en el disco duro del ordenador en archivos de dos minutos de duración. Posteriormente se realiza el análisis de la información.

Adicional a la instrumentación permanente, se instalaron de manera provisional acelerómetros en el tablero del puente en el tramo atirantado para registrar las aceleraciones y con ello, identificar frecuencias naturales y modos de vibrar de la estructura.

Las figuras 2.3 y 2.4 indican la ubicación de los acelerómetros instalados temporalmente (círculos en color rojo), para el registro de las vibraciones en la sección atirantada del puente en vista de elevación y planta, respectivamente.

La nomenclatura asignada a los acelerómetros en la sección atirantada consta de tres elementos, el primero hace referencia al cuerpo A o B; el segundo al lado Durango o Mazatlán; y finalmente, al número del tirante en donde se instaló el sensor.



Figura 2.3 Ubicación temporal de acelerómetros en el puente El Carrizo (vista elevación)



Figura 2.4 Ubicación temporal de acelerómetros en el puente El Carrizo (vista planta)

Las actividades consideradas para la medición de aceleraciones en la sección atirantada del puente, se ilustran en la tabla 2.2.

Actividad	Hora	Descripción	Duración
B1	10:30 h	Configuración de acelerómetros inalámbricos y pruebas de alcance de medición.	30 min
B2	11:00 h	Señalamiento para desviar el tránsito del carril de baja al carril de alta velocidad del cuerpo A, en la sección atirantada.	5 min
B3	11:05 h	Instalación de acelerómetros inalámbricos en el parapeto del puente del cuerpo A, en la sección atirantada.	15 min
B4	11:20 h	Señalamiento para desviar el tránsito del carril de baja al carril de alta velocidad del cuerpo B, en la sección atirantada, para instalar acelerómetros inalámbricos.	5 min
B5	11:25 h	Instalación de acelerómetros inalámbricos en el parapeto del puente del cuerpo B, en la sección atirantada.	15 min
B6	11:40 h	Registro de aceleraciones.	120 min
B7	13:40 h	Señalamiento para desviar el tránsito del carril de baja al carril de alta velocidad del cuerpo B, en la sección atirantada, para retirar los acelerómetros inalámbricos.	5 min
B8	13:45 h	Remover acelerómetros inalámbricos del parapeto del puente cuerpo A, en la sección atirantada.	15 min
B9	14:00 h	Retirarse del tramo atirantado del puente.	-

Tabla 2.2 Relación de actividades durante sesión de medición con acelerómetrosinalámbricos

En la figura 2.5 se observa al personal de apoyo de CAPUFE durante la actividad B2 denominada "Señalamiento para desviar el tránsito del carril de baja al carril de alta velocidad del cuerpo A, en la sección atirantada", mientras se colocan conos viales para el desvío de la circulación al carril de alta velocidad del cuerpo A para la instalación de los acelerómetros en la sección atirantada del puente.



Figura 2.5 Colocación de conos viales para instalación de acelerómetros

En la figura 2.6 se muestra un acelerómetro con identificación BD11 instalado en parapeto metálico cercano al tirante 11 del cuerpo B, lado Durango, durante el registro de aceleraciones de la sección atirantada del puente El Carrizo.



Figura 2.6 Acelerómetro instalado en el cuerpo B, lado Durango

La figura 2.7 ilustra la ubicación del acelerómetro BD10, colocado sobre el parapeto metálico del puente de la sección atirantada, cercano al tirante 10 del cuerpo B, lado Durango durante el registro de aceleraciones en el tablero de la sección atirantada del puente El Carrizo.



Figura 2.7 Acelerómetro instalado en el cuerpo B, lado Durango (vista lateral)

Durante las actividades en campo no se requirió el cierre total de la circulación vial en el puente, únicamente se desvió el tránsito vehicular durante la carga-descarga de equipos de medición en la sección doble voladizo, así como durante la instalación-retiro de acelerómetros en la sección atirantada.

3. Análisis de la información

La información recabada en cada visita técnica fue analizada. Primero se realizó el análisis de los sensores de deformación unitaria, éstos presentan una mayor sensibilidad por el paso de vehículos de carga, mayormente de camiones de autotransporte, los cuales provocan efectos a tensión y compresión en las fibras de las dovelas instrumentadas [8].

La figura 3.1 muestra la respuesta dinámica típica de un sensor de deformación por el paso de un vehículo, se puede observar en la figura, el valor a compresión y tensión registrado por el sensor. Para obtener la magnitud de la deformación por carga viva, el valor de deformación asociado a la línea de referencia es removido.

Por cada día de medición y por cada sensor, se obtuvieron las amplitudes máximas de deformación de cada archivo almacenado. Posteriormente, las amplitudes registradas en cada sesión, compuesta por tres días continuos de medición, se concatenaron en un vector de datos para generar un histograma. Los fenómenos a tensión y los efectos a compresión de las cargas dinámicas se analizaron por separado.

Es preciso mencionar que, para efectuar el análisis, se utilizó el valor absoluto de las amplitudes máximas con el fin de obtener el mismo tipo de distribución de probabilidad entre los efectos a tensión y compresión.



Respuesta típica de extensómetro a la carga viva

Figura 3.1 Respuesta dinámica típica en un sensor de deformación unitaria

En seguida, se realizó un ajuste de distribución de probabilidad al histograma de datos, utilizando como criterio el menor error chi-cuadrado para el ajuste de bondad.

Se obtuvo que la distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa representa mejor el comportamiento a tensión y compresión de las cargas vivas en las zonas instrumentadas de las dovelas de la sección doble voladizo.

Finalmente, con la distribución elegida, se calculó el valor de la media de deformación unitaria, tanto a tensión como a compresión, así como los límites superiores e inferiores bajo condición de operación normal de la estructura. El límite superior para efectos a tensión, se obtiene al agregar al valor de la media de deformación unitaria a tensión, 2.5 desviaciones estándar obtenidas del promedio de las desviaciones estándar de los registros a tensión en el periodo evaluado. De forma similar, el límite inferior para efectos a compresión, se genera al restar al valor de la media de deformación unitaria a compresión, 2.5 desviaciones estándar obtenidas del promedio de las desviaciones estándar de los registros a compresión, se genera al restar al valor de la media de deformación unitaria a compresión, 2.5 desviaciones estándar calculadas del promedio de las desviaciones estándar de los registros a compresión para el mismo periodo [9,10].

Las figuras 3.2 a 3.16 muestran los histogramas con gráficas de barra en color azul y ajuste de distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa con línea color naranja, del vector de amplitudes de deformación unitaria a compresión para la sesión 1 de mediciones, que corresponden al periodo del 11 de mayo de 2021 al 13 de mayo de 2021. En el eje de abscisas se indica la deformación unitaria en microdeformaciones ($\mu\epsilon$), mientras que el eje de ordenadas, la frecuencia de la distribución de probabilidad (adimensional).







Figura 3.3 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AD (sesión 1)



Figura 3.4 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AD (sesión 1)



Figura 3.5 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AD (sesión 1)



Figura 3.6 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AM (sesión 1)



Figura 3.7 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AM (sesión 1)



Figura 3.8 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AM (sesión 1)



Figura 3.9 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BD (sesión 1)



Figura 3.10 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BD (sesión 1)



Figura 3.11 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BD (sesión 1)



Figura 3.12 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BD (sesión 1)



Figura 3.13 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BM (sesión 1)



Figura 3.14 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BM (sesión 1)



Figura 3.15 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BM (sesión 1)



Figura 3.16 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BM (sesión 1)

Las figuras 3.17 a 3.32 muestran el histograma, con gráfica de barras en color azul, y respectivo ajuste de distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa, línea color naranja, del vector de amplitudes de deformación unitaria a compresión para la sesión 2 de mediciones, que corresponden al periodo del 17 de agosto de 2021 al 19 de agosto de 2021. En el eje de abscisas se indica la deformación unitaria en microdeformaciones ($\mu\epsilon$), mientras que el eje de ordenadas, la frecuencia de la distribución de probabilidad (adimensional).



Figura 3.17 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4AD (sesión 2)



Figura 3.18 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AD (sesión 2)



Figura 3.19 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AD (sesión 2)



Figura 3.20 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AD (sesión 2)



Figura 3.21 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1AM (sesión 2)



Figura 3.22 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1AM (sesión 2)



Figura 3.23 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4AM (sesión 2)



Figura 3.24 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4AM (sesión 2)



Figura 3.25 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BD (sesión 2)



Figura 3.26 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BD (sesión 2)



Figura 3.27 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BD (sesión 2)



Figura 3.28 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BD (sesión 2)



Figura 3.29 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD1BM (sesión 2)



Figura 3.30 Ajuste de distribución a compresión sensor EID1BM (sesión 2)



Figura 3.31 Ajuste de distribución a compresión sensor ESD4BM (sesión 2)



Figura 3.32 Ajuste de distribución a compresión sensor EID4BM (sesión 2)

Las figuras 3.33 a 3.46 muestran el histograma, con gráfica de barras en color azul, y respectivo ajuste de distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa, con línea color naranja, del vector de amplitudes de deformación unitaria a tensión para la sesión 1 de mediciones, que corresponden al periodo del 11 de mayo de 2021 al 13 de mayo de 2021. En el eje de abscisas se indica la deformación unitaria en microdeformaciones ($\mu\epsilon$), mientras que el eje de ordenadas, la frecuencia de la distribución de probabilidad (adimensional).



Figura 3.33 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AD (sesión 1)



Figura 3.34 Ajuste de distribución a tensión sensor EID4AD (sesión 1)



Figura 3.35 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AD (sesión 1)



Figura 3.36 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AD (sesión 1)



Figura 3.37 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AM (sesión 1)



Figura 3.38 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AM (sesión 1)



Figura 3.39 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AM (sesión 1)



Figura 3.40 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BD (sesión 1)



Figura 3.41 Ajuste de distribución a tensión sensor EID4BD (sesión 1)



Figura 3.42 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BD (sesión 1)



Figura 3.43 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BD (sesión 1)



Figura 3.44 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BM (sesión 1)



Figura 3.45 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BM (sesión 1)



Figura 3.46 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BM (sesión 1)

Las figuras 3.47 a 3.60 muestran el histograma, con gráfica de barras en color azul, y correspondiente ajuste de distribución de probabilidad tipo Gauss Inversa, con línea color naranja, del vector de amplitudes de deformación unitaria a tensión para las mediciones de la sesión 2, que corresponden al periodo del 17 de agosto de 2021 al 19 de agosto de 2021. En el eje de abscisas se indica la deformación unitaria en microdeformaciones ($\mu\epsilon$), mientras que el eje de ordenadas, la frecuencia de la distribución de probabilidad (adimensional).



Figura 3.47 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AD (sesión 2)



Figura 3.48 Ajuste de distribución a tensión sensor EID4AD (sesión 2)



Figura 3.49 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AD (sesión 2)



Figura 3.50 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AD (sesión 2)



Figura 3.51 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1AM (sesión 2)



Figura 3.52 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1AM (sesión 2)



Figura 3.53 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4AM (sesión 2)



Figura 3.54 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BD (sesión 2)



Figura 3.55 Ajuste de distribución a tensión sensor EID4BD (sesión 2)



Figura 3.56 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BD (sesión 2)



Figura 3.57 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BD (sesión 2)


Figura 3.58 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD1BM (sesión 2)



Figura 3.59 Ajuste de distribución a tensión sensor EID1BM (sesión 2)



Figura 3.60 Ajuste de distribución a tensión sensor ESD4BM (sesión 2)

Mediante el monitoreo periódico del puente El Carrizo se efectuó el seguimiento histórico del valor de referencia bajo condición de operación normal, del comportamiento estructural de la sección doble voladizo, a través de los parámetros estructurales (deformación e inclinación) en tres periodos de tiempo [11]. El primero, posterior al finalizar las actividades de mantenimiento mayor del puente El Carrizo, del 21 de agosto de 2018 al 19 de septiembre de 2018. El siguiente periodo corresponde a la sesión 1 de mediciones, del 11 de mayo de 2021 al 13 de mayo de 2021. Finalmente, el último conjunto de datos pertenece a la sesión 2, mediciones efectuadas del 17 de agosto de 2021 al 19 de agosto de 2021.

El sistema de adquisición realiza muestreos a una frecuencia de adquisición de 125 Hz, por consiguiente, cada 8 milisegundos se registra un nuevo valor en cada sensor. La información adquirida se concatena en archivos de dos minutos con un total de 15,000 valores por cada sensor. Para el análisis del valor de referencia, por cada sensor, inicialmente se obtiene el promedio de cada archivo de dos minutos de información y posteriormente, con la información previa se calcula el promedio diario de los registros de dos minutos.

La figura 3.61 muestra, a manera de ejemplificar lo descrito previamente, el comportamiento estructural del sensor ESD1AD por efecto térmico de las 9:30 a.m. a las 3:00 p.m. del día 18 de septiembre de 2021. Los círculos en color negro representan el valor promedio de deformación unitaria de cada archivo de dos minutos, vector con 15 000 elementos, y la línea segmentada en color naranja el valor de referencia calculado mediante el promedio del conjunto de datos del día.



Figura 3.61 Valor de referencia del sensor ESD1AD el 18 de agosto de 2021

Como parte del seguimiento a los parámetros estructurales, se obtuvo valor del centroide en las dovelas instrumentadas. En la figura 3.62 se visualiza una sección transversal de una dovela típica de la sección doble voladizo, en donde se incluyen la ubicación de los sensores de deformación unitaria, así como la línea de centroide teórico [12].



Figura 3.62 Vista de sección transversal de dovela

Para ello, primero se identifican los eventos extraordinarios por cargas vivas, los cuales son los registros de deformación unitaria que se encuentran fuera de los límites superiores e inferiores a tensión y compresión bajo condición de operación normal, obtenidos de los registros posteriores al fin del mantenimiento mayor en

2018 y las dos sesiones de medición en 2021, la primera en mayo y la segunda en agosto. Se obtiene el centroide de la sección de la dovela analizada al aplicar la ecuación 3.1 en los registros de eventos extraordinarios por carga viva.

$$c = \left(\frac{|\varepsilon_2|}{|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|}\right)(h) \tag{3.1}$$

En donde, *c* representa el centroide, ε_1 es la amplitud máxima de deformación unitaria a tensión para la zona superior, ε_2 es la amplitud mínima a compresión para la parte inferior y *h* la altura, siendo 2.79 m y 2.49 m para las dovelas No. 1 y No. 4, respectivamente.

En las figuras 3.63 y 3.64 se observa la respuesta dinámica debido a un evento extraordinario por tránsito vehicular suscitado el 12 de mayo de 2021, en los sensores de deformación instalados en la dovela 4, lado Durango del cuerpo A, tanto en la parte superior de la dovela, amplitud máxima a tensión indicado con recuadro en color rojo, como en la parte inferior de la dovela, efecto a compresión mostrado en recuadro color azul, respectivamente.



Figura 3.63 Respuesta dinámica en el sensor ESD4AD ante un evento extraordinario



Figura 3.64 Respuesta dinámica en el sensor EID4AD ante un evento extraordinario

4. Modelo matemático del puente El Carrizo

4.1 Método de elementos finitos

Originalmente introducido por Turner en 1956, el método de elementos finitos (MEF) representa una técnica computacional para aproximar soluciones de una gran variedad de problemas del mundo real con dominios complejos sujetos a condiciones de frontera generales [13]. En el MEF, el continuo o cuerpo en estudio tal como un sólido, líquido o gas, está representado como un conjunto de subdivisiones pequeñas llamadas elementos finitos. Estos elementos se consideran interconectados en puntos llamados nodos, los cuales usualmente yacen en las fronteras de los elementos donde los elementos adyacentes se consideran conectados. Al usar propiedades esfuerzo-deformación del material del que se compone la estructura, se puede determinar el comportamiento (respuesta estructural) de un nodo, en función de los términos de las propiedades de los elementos de la estructura.

El conjunto total de ecuaciones que describen el comportamiento de cada nodo deriva en una serie de ecuaciones que se expresan usualmente en forma matricial en la ecuación 4.1.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{P\}$$
(4.1)

Donde [*M*], [*C*] y [*K*] son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente. Estas matrices contienen la información de las propiedades del material de la estructura (parámetros estructurales). El {*u*} es el vector de desplazamiento, cuyas derivadas {*u*} y {*ü*} son los vectores de velocidad y aceleración, respectivamente, y {*P*} es el vector de fuerzas. Por otra parte, la ecuación 4.2 describe el comportamiento dinámico de un sistema no amortiguado:

$$[M]{\ddot{u}}+[K]{u}={P}$$
(4.2)

Al considerar la ecuación 4.2 como homogénea (vibración libre) y adoptar una solución para $u(t)=\{\hat{u}\}e^{i\omega t}$, dado que el movimiento es armónico, se obtiene un problema de valores y vectores característicos, reducido a la ecuación 4.3.

$$[[K] - \omega^2[M]] \{ \hat{u} \} = 0 \tag{4.3}$$

Donde los valores propios ω son las frecuencias naturales del sistema y { \hat{u} } son los vectores propios asociados a cada frecuencia natural, conocidos como formas modales [14].

4.2 Desarrollo del MEF

El modelo desarrollado consta de 10,281 nodos, las vigas, piezas puente, pilones, travesaños y tirantes fueron modelados utilizando 3,532 elementos tipo *frame* mientras que la losa y la torre principal fueron modeladas utilizando 9,463 elementos tipo *shell*. Las figuras 4.1 y 4.2 muestran la representación gráfica del modelo de elemento finito del puente.



Figura 4.1 Modelo de elemento finito del puente El Carrizo (vista 1)



Figura 4.2 Modelo de elemento finito del puente El Carrizo (vista 2)

La tabla 4.1 muestra las propiedades mecánicas utilizadas en para la calibración del modelo de elemento finito.

Propiedad mecánica	Valor		
Densidad del acero	7850 kg/m ³		
Densidad del concreto	2400 kg/m ³		
Módulo de elasticidad del concreto	30 GPa		
Módulo de elasticidad del acero	210 GPa		
Módulo de elasticidad del acero (tirantes)	195 GPa		

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas de los elementos utilizados en el MEF

4.3 Calibración del MEF

La calibración del modelo de elementos finitos del puente El Carrizo se efectuó a través del análisis modal. En el análisis tradicional, se requiere la medición de la respuesta estructural, así como de la fuerza de excitación con el objetivo de obtener las funciones de respuesta en frecuencia (FRF), de las que se pueden obtener los parámetros modales de la estructura. No obstante, para estructuras civiles de gran tamaño, es difícil conseguir los medios de excitación contralada con la magnitud suficiente para excitar la estructura, esto aunado a la necesidad de cerrar la estructura al tráfico. Una alternativa cada vez más popular es utilizar los medios naturales de excitación como: el flujo vehicular, el viento, el oleaje o los sismos, lo que se conoce como pruebas de vibración ambiental. La gran ventaja de este tipo de pruebas es su relativo bajo costo, debido a que no es necesario cerrar la estructura al tráfico, ni de conseguir medios controlados de excitación.

La idea fundamental dentro del análisis modal operacional es que las excitaciones naturales de la estructura se aproximen a las características de un ruido blanco, es decir, que tengan una energía sobre las frecuencias naturales de la estructura, o al menos, que excite el rango de frecuencias de los modos de interés [15].

El método utilizando para estimar los parámetros modales para la calibración del MEF fue el método de Welch, donde la señal analizada consta de seis minutos de datos adquiriendo a una frecuencia de 64 Hz. La señal es dividida en segmentos de 10 segundos, a cada segmento se le aplica una ventana de tipo Hanning y es correlacionado (Cross Power Spectrum mediante FFT) utilizando un sensor de referencia.

La tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos del análisis modal experimental y del modelo de elementos finitos una vez calibrado, el porcentaje de diferencia de las frecuencias y el criterio de aseguramiento modal (MAC), utilizado como parámetro para calibración del MEF.

Modo	Frecuencia experimental (Hz)	Frecuencia MEF (Hz)	Diferencias (%)	MAC (%)	
1	0.269	0.280	4.0	99.8	
2	0.564	0.613	8.7	96.7	
3	0.775	0.789	1.9	98.5	
4	1.185	1.084	-8.4	95.9	
5	1.30	1.194	-8.5	85.7	
6	1.511	1.367	-9.5	95.5	
7	1.885	1.967	4.4	97.4	
8	2.462	2.534	2.9	98.6	
9	3.450	3.080	-10.7	82.5	

Tabla 4.2 Resultados modales de la calibración de MEF

Las figuras 4.3 a 4.5 muestran una comparativa entre las formas modales obtenidas mediante los datos experimentales y las calculadas con el modelo de elemento finito del puente El Carrizo, para los tres primeros modos de vibración de la estructura.



Figura 4.3 Comparativa de forma modal 1 entre MEF y datos experimentales



Figura 4.4 Comparativa de forma modal 2 entre MEF y datos experimentales





5. Resultados

La tabla 5.1 muestra el resultado obtenido del cálculo de los límites inferiores y superiores por efectos a tensión y compresión en la dovelas instrumentadas por la parte superior, calculado a través de los registros generados al finalizar la rehabilitación en 2018, agosto y septiembre, así como del par de sesiones de medición efectuadas en 2021, mayo y agosto.

Sensor	Media compresión	Media tensión	σ compresión	σ tensión	Límite inferior	Límite superior
ESD4AD	-1.92	4.87	0.34	1.04	-2.76	7.47
ESD1AD	-2.38	6.16	0.26	1.45	-3.04	9.77
ESD1AM	-1.26	2.42	0.21	0.39	-1.77	3.40
ESD4AM	-1.04	1.31	0.08	0.12	-1.24	1.62
ESD4BD	-1.81	2.50	1.53	1.40	-5.64	6.00
ESD1BD	-1.66	4.45	0.28	0.76	-2.35	6.34
ESD1BM	-1.33	1.56	0.78	0.18	-3.28	2.01
ESD4BM	-1.44	2.53	0.09	0.59	-1.67	4.00

Tabla 5.1 Valor estadístico de la media y límites de operación normal para sensoressuperiores

A continuación, en las figuras 5.1 a 5.8 se presentan los valores de la media estadística de deformación unitaria a tensión y compresión, provocada por las cargas vivas (tránsito vehicular), así como los límites superior e inferior bajo condición de operación normal en los sensores ubicados en la parte superior de las dovelas instrumentadas.



Figura 5.1 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4AD







Figura 5.3 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1AD



Figura 5.4 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1BD



Figura 5.5 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD1AM







Figura 5.7 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4AM



Figura 5.8 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor ESD4BM

La tabla 5.2 presenta los resultados obtenidos del cálculo de los límites inferiores y superiores por efectos a tensión y compresión en la dovelas instrumentadas por la parte inferior, calculado a través de los registros obtenidos al término de la rehabilitación en 2018, agosto y septiembre, así como del par de sesiones de medición efectuadas en 2021, mayo y agosto.

Sensor	Media compresión	Media tensión	σ compresión	σ tensión	Límite inferior	Límite superior
EID4AD	-3.77	1.69	1.11	0.25	-6.55	2.30
EID1AD	-2.73	1.35	0.93	0.14	-5.06	1.70
EID1AM	-1.68	1.02	0.38	0.07	-2.64	1.20
EID4AM	-1.11	0.94	0.06	0.12	-1.25	1.24
EID4BD	-2.20	1.20	0.55	0.10	-3.58	1.45
EID1BD	-1.95	1.14	0.26	0.13	-2.59	1.46
EID1BM	-1.66	1.10	0.44	0.28	-2.76	1.79
EID4BM	-1.30	1.05	0.39	0.32	-2.27	1.86

Tabla 5.2 Valor estadístico de la media y límites de operación normal para sensoresinferiores

A continuación, en las figuras 5.9 a 5.16 se presentan los valores de la media estadística de deformación unitaria a tensión y compresión, provocada por las cargas vivas (tránsito vehicular), así como los límites superior e inferior bajo condición de operación normal en los sensores ubicados en la parte inferior de las dovelas instrumentadas.



Figura 5.9 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4AD



Figura 5.10 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4BD



Figura 5.11 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1AD







Figura 5.13 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1AM



Figura 5.14 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID1BM



Figura 5.15 Valor estadístico de la media por cargas vivas en sensor EID4AM





Las figuras 5.17 a 5.24 muestran, por cada día en las tres sesiones de mediciones, el valor de referencia en microdeformaciones unitarias de los extensómetros instalados en la parte inferior de las dovelas No. 4 y No. 7 de la sección doble voladizo del puente.



Figura 5.17 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4AD



Figura 5.18 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1AD



Figura 5.19 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1AM



Figura 5.20 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4AM



Figura 5.21 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4BD



Figura 5.22 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1BD



Figura 5.23 Valor de referencia de deformación del sensor ESD1BM



Figura 5.24 Valor de referencia de deformación del sensor ESD4BM

Las figuras 5.25 a 5.32 ilustran, por cada día en las tres sesiones de mediciones, el valor de referencia en microdeformaciones unitarias de los extensómetros instalados en la parte inferior de las dovelas No. 4 y No. 7 de la sección doble voladizo del puente.



Figura 5.25 Valor de referencia de deformación del sensor EID4AD



Figura 5.26 Valor de referencia de deformación del sensor EID1AD



Figura 5.27 Valor de referencia de deformación del sensor EID1AM



Figura 5.28 Valor de referencia de deformación del sensor EID4AM



Figura 5.29 Valor de referencia de deformación del sensor EID4BD



Figura 5.30 Valor de referencia de deformación del sensor EID1BD



Figura 5.31 Valor de referencia de deformación del sensor EID1BM



Figura 5.32 Valor de referencia de deformación del sensor EID4BM

Las figuras 5.33 a 5.36 muestran, por cada día en las tres sesiones de mediciones, el valor de referencia, en grados sexagesimales del plano XZ, que corresponde a los cuatro sensores de inclinación instalados en la parte inferior de las dovelas No. 4 y No. 7 de la sección doble voladizo del puente.



Figura 5.33 Valor de referencia de inclinación del sensor ID4AD



Figura 5.34 Valor de referencia de inclinación del sensor ID4AM



Figura 5.35 Valor de referencia de inclinación del sensor ID7BD



Figura 5.36 Valor de referencia de inclinación del sensor ID4BM

Con la información del modelo de elementos finitos del puente el Carrizo y los datos de deformación por carga viva de los extensómetros inferior y superior de cada una de las dovelas instrumentadas, se dio seguimiento al valor del centroide de las dovelas del cuerpo A y B. En la figura 5.41 se muestra el esquema de deformación por flexión.



Figura 5.37 Deformación por flexión en dovelas debido a carga viva

En la tabla 5.3 se observan los resultados de los datos experimentales correspondiente a eventos extraordinarios registrados en las ocho dovelas durante las dos sesiones de medición en 2021, así como los valores ideales obtenidos a través del modelo matemático.

Fecha	Eventos extraordinarios	D4AD	D4BD	D1AD	D1BD	D1AM	D1BM	D4AM	D4BM
Valor ideal		1.34	1.34	0.74	0.74	1.26	1.26	0.92	0.92
12-sep-18	19	1.34	1.44	0.79	0.72	1.18	1.38	1.13	0.74
13-sep-18	23	1.34	1.44	0.80	0.71	1.17	1.37	1.13	0.73
14-sep-18	28	1.21	1.39	0.77	0.71	1.15	1.42	1.04	0.78
15-sep-18	23	1.18	1.43	0.74	0.71	1.13	1.43	1.10	0.72
17-sep-18	9	1.37	1.34	0.79	0.68	1.15	1.28	1.05	0.74
18-sep-18	21	1.22	1.38	0.79	0.72	1.15	1.35	1.11	0.76
11-may-21	11	1.26	1.67	0.57	0.64	0.90	1.85	1.13	0.39
12-may-21	55	1.21	1.66	0.56	0.68	0.81	1.77	1.06	0.44
13-may-21	29	1.13	1.62	0.55	0.60	0.84	1.84	1.09	0.40
17-ago-21	21	1.29	1.46	0.61	0.76	0.85	1.63	1.01	0.56
18-ago-21	20	1.19	1.43	0.57	0.83	0.79	1.71	0.98	0.61
19-ago-21	16	1.30	1.50	0.63	0.77	0.84	1.67	1.08	0.56

Tabla 5.3 Ubicación del centroide en metros para las dovelas del doble voladizo

En las figuras 5.42 a 5.48, se ilustra el valor del centroide calculado así como el valor ideal, en metros, para las dovelas instrumentadas de la sección doble voladizo del puente El Carrizo.







Figura 5.39 Centroide de la Dovela No. 4 lado Durango del cuerpo B



Figura 5.40 Centroide de la Dovela No. 1 lado Durango del cuerpo A



Figura 5.41 Centroide de la Dovela No. 1 lado Durango del cuerpo B



Figura 5.42 Centroide de la Dovela No. 1 lado Mazatlán del cuerpo A



Figura 5.43 Centroide de la Dovela No. 1 lado Mazatlán del cuerpo B



Figura 5.44 Centroide de la Dovela No. 4 lado Mazatlán del cuerpo A


Figura 5.45 Centroide de la Dovela No. 4 lado Mazatlán del cuerpo B

Conclusiones

En esta publicación se analiza el comportamiento estructural del puente El Carrizo a través del seguimiento de sus parámetros estructurales con un monitoreo periódico utilizando el sistema de instrumentación instalado en la sección doble voladizo, y el análisis de su comportamiento dinámico (modos y frecuencias naturales de vibración) de la sección atirantada del mismo puente.

Con la información registrada al finalizar los trabajos de mantenimiento en 2018 y las dos sesiones de medición efectuadas en 2021, se establecieron los límites bajo condiciones de operación normal para deformación por carga viva, se obtuvieron valores de referencia de los centroides y las deformaciones unitarias e inclinaciones en las dovelas instrumentadas de la sección doble voladizo del puente El Carrizo.

Con el análisis de los datos del sistema de monitoreo y del modelo matemático calibrado de la estructura, se concluye que a tres años del mantenimiento mayor realizado al puente El Carrizo, continúa operando con los mismos rangos de seguridad que los encontrados en la prueba de carga realizada en 2018 y que el comportamiento dinámico de la estructura es el esperado bajo condiciones de operación normal. Por lo tanto, se pude concluir que la condición estructural del puente El Carrizo no ha cambiado y aún conserva los mismos factores de condición y, con ello, se garantiza la seguridad de los usuarios que transitan por la estructura.

Bibliografía

[1] Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, S.W., Nadler, B.R. & Czarnecki, J.J. (2004). A review of structural health monitoring literature form 1996-2001 (LA-13976-MS), *Los Alamos National Laboratory*, 5-6.

[2] Cheng, Y. (2013). Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrico, Programa de infraestructura del transporte, *Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales*, 7-9.

[3] Quintana-Rodríguez, J.A., Hernández-Figueroa, J.A., Martínez-Trujano, L.A., Machorro-López, J.M., Guzmán-Acevedo, G.M., Gasca-Zamora, H.M., Anaya-Díaz, M., Valenzuela-Delgado, I., Montes-Zea, M., Hernández-Guzmán, A., Carrión-Viramontes, F.J. & Martínez-Madrid, M. (2018). Reporte final de actividades y resultados: Monitoreo estructural durante los trabajos de rehabilitación del puente El Carrizo, *Instituto Mexicano del Transporte*, Sanfandila, Qro., México, 6-7.

[4] El Sol de Mazatlán (2021). A seis años de su apertura, la autopista Mazatlán-Durango deja mucho que desear. Publicación en línea. Recuperado de <u>https://www.elsoldemazatlan.com.mx/local/a-seis-anos-de-su-apertura-la-</u> <u>autopista-mazatlan-durango-deja-mucho-que-desear-4273098.html</u>

[5] Quintana-Rodríguez, J.A., Hernández-Figueroa, J.A., Martínez-Trujano, L.A., Guzmán-Acevedo, G.M., Gasca-Zamora, H.M., Anaya-Díaz, M., Valenzuela-Delgado, I., Carrión-Viramontes, F.J. & Martínez-Madrid, M. (2018). Reporte de actividades y resultados: Pruebas de carga y monitoreo continuo durante la rehabilitación estructural del puente El Carrizo, *Instituto Mexicano del Transporte,* Sanfandila, Qro., México, 10-11.

[6] Quintana-Rodríguez, J.A., Carrión-Viramontes, F.J., Martínez-Trujano, L.A., Anaya-Díaz, M., Hernández-Figueroa, J.A., Gasca-Zamora, H.M., Valenzuela-Delgado I. & Hernández-Guzmán, A. (2018). Actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Río Papaloapan, *Publicación Técnica IMT* No. 524, Sanfandila, Qro., México, 15-19.

[7] PROMAX (2021). Código de colores de la fibra óptica. Publicación en línea. Recuperado de <u>https://www.promax.es/downloads/docs/pdf/tabla-colores-fibra-optica.pdf</u>

[8] Quintana-Rodríguez, J.A., Carrión-Viramontes, F.J., Martínez-Trujano, L.A., Hernández-Figueroa, J.A., Gasca-Zamora, H.M., Anaya-Díaz, M., Valenzuela-Delgado I., Guzmán-Acevedo G.M. & Hernández-Guzmán, A. (2020). Monitoreo y evaluación estructural en tipo real del puente Río Papaloapan, *Publicación Técnica IMT* No. 592, Sanfandila, Qro., México, 20-22.

[9] Martínez-Trujano, L.A., Quintana-Rodríguez, J.A., Arroyo-Ramírez, B., Carrión-Viramontes, F.J., Crespo-Sánchez, S., Hernández-Figueroa, J.A., Bonilla-Ureña V.M., Gasca-Zamora, H.M. & Hernández-Guzmán, A. (2016). Sistema Inteligente y protocolos de actuación para monitoreo de puentes, *Publicación Técnica IMT* No. 464, Sanfandila, Qro., México, 49-59.

[10] Quintana-Rodríguez, J.A., Carrión-Viramontes, F.J., Martínez-Trujano, L.A., Hernández-Figueroa, J.A., Gasca-Zamora, H.M., Anaya-Díaz, M., Valenzuela-Delgado I., Guzmán-Acevedo G.M. & Hernández-Guzmán, A. (2020). Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real del puente Mezcala, *Publicación Técnica* IMT No. 591, Sanfandila, Qro., México, 40-46.

[11] Anaya-Díaz, M., Quintana-Rodríguez, J.A., Carrión-Viramontes, F.J., Martínez-Trujano, L.A., Hernández-Figueroa, J.A., Gasca-Zamora, H.M., Guzmán-Acevedo G.M. & Hernández-Guzmán, A. (2020). Monitoreo y evaluación de los parámetros estructurales del puente Mezcala, *Publicación Técnica* IMT No. 597, Sanfandila, Qro., México, 4-6.

[12] Quintana-Rodríguez J.A., Hernández-Figueroa J.A., Martínez-Trujano L.A., Machorro-López J.M., Guzmán-Acevedo G.M., Gasca-Zamora H.M., Anaya-Díaz M., Valenzuela-Delgado I., Montes-Zea M., Hernández-Guzmán A., Carrión-Viramontes F.J. & Martínez-Madrid M. (2018). Reporte de actividades y resultados: Monitoreo estructural durante los trabajos de rehabilitación del puente El Carrizo mes de septiembre, Sanfandila, Qro., México, 51-59.

[13] Madenci, E. & Guven, I. (2006). *The Finite Element and Applications in Engineering using ANSYS* (pp. 15-16). United States of America: Springer.

[14] Anaya-Díaz, M., Quintana-Rodríguez, J.A., Carrión-Viramontes, F.J., Martínez-Trujano, L.A., Hernández-Figueroa, J.A., Gasca-Zamora, H.M., Valenzuela-Delgado I., Montes-Zea M.A. & Hernández-Guzmán, A. (2018). Calibración y ajuste de los parámetros estructurales del modelo matemático del puente Mezcala para su evaluación estructural, *Publicación Técnica* IMT No. 530, Sanfandila, Qro., México, 11-14.

[15] Anaya-Díaz, M., Quintana-Rodríguez, J.A., Carrión-Viramontes, F.J., Martínez-Trujano, L.A., Hernández-Figueroa, J.A., Gasca-Zamora, H.M., Guzmán-Acevedo G.M. & Hernández-Guzmán, A. (2021). Monitoreo y evaluación estructural del puente Mezcala, *Publicación Técnica* IMT No. 635, Sanfandila, Qro., México, 13-19.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo" Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México. C.P. 76703 Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610 Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

http://www.imt.mx/