

APLICACIÓN DE UNA TÉCNICA DE DETECCIÓN DE DAÑO EN EL PUENTE RÍO PAPALOAPAN

Introducción

Para administrar el mantenimiento de los puentes de la red federal de carreteras, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) cuenta con el Sistema de PUentes de MÉXICO (SIPUMEX), que se desarrolló a principios de la década de los 90's y forma parte del modelo integral de gestión para la conservación de las carreteras federales libres de peaje. El objetivo del SIPUMEX es programar la atención oportuna de los puentes en función de los recursos disponibles; con esto se logra una administración más eficiente de los recursos financieros y se incrementan los niveles de servicio de la red de carreteras. La operación para la gestión de puentes se basa en la calificación que otorgan técnicos especializados basados en una inspección visual detallada. En general, esta calificación en un valor promedio ponderado de la calificación que se otorga a los diferentes elementos del puente, según su condición e importancia. Una vez calificados todos los puentes, se realiza un análisis para determinar el programa de mantenimiento de acuerdo al nivel de deterioro observado, los recursos disponibles y la importancia del puente.

Aún cuando el SIPUMEX ha demostrado su eficacia por casi 20 años, la antigüedad promedio de los siete mil doscientos treinta y un puentes que conforman la red federal de carreteras, rebasa los treinta y nueve años y éstos han sufrido un deterioro en el tiempo que no se ha cuantificado ni se conoce su

capacidad estructural actual. Adicionalmente, el tipo de vehículo de carga utilizado para el diseño de la mayoría de los puentes es muy diferente al recomendado actualmente por los códigos y por tanto, el peso considerado quedó por debajo de los pesos que actualmente circulan sobre los puentes. Finalmente, con base en estudios más recientes se ha encontrado que el efecto de las cargas vivas es diferente a lo considerado inicialmente y el efecto en el deterioro es mayor, sin que esto esté totalmente cuantificado o evaluado.

Con fundamento en lo anterior, una actualización del SIPUMEX utilizando los desarrollos tecnológicos más recientes en materia de evaluación y diagnóstico estructural es muy conveniente; con ello, se podrán tener calificaciones más objetivas que no tan sólo consideren las inspecciones visuales, sino también puedan tener una evaluación de la capacidad de carga estructural del puente y se

CONTENIDO

APLICACIÓN DE UNA TÉCNICA DE DETECCIÓN DE DAÑO EN EL PUENTE RÍO PAPALOAPAN	1
ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE REDES CARRETERAS	11
GLOSARIO	16
PROYECTOS EN MARCHA	17
PUBLICACIÓN	18
EVENTOS ACADÉMICOS	18

cuenta con datos suficientes e históricos para poder hacer una predicción de vida remanente. Con esto, no sólo se incrementan los índices de confiabilidad estructural de los puentes, sino también se puede tener una administración más efectiva de los recursos financieros disponibles.

Actualmente existen estrategias de evaluación estructural que permiten detectar defectos o daño en puentes que no pueden ser descubiertos por las inspecciones visuales. El desarrollo de estas herramientas requiere de un manejo eficiente de la información y del desarrollo de modelos de evaluación, algunos con posibilidades para utilizarse en evaluaciones en tiempo real con monitoreo remoto. Derivado de esto, se proponen dos estrategias de evaluación estructural de puentes dentro de un sistema de gestión; el primero, enfocado a los puentes grandes e importantes, utilizando instrumentación permanente con monitoreo remoto a través del Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI). La segunda estrategia, enfocada a la mayoría de los puentes que son chicos y medianos, mediante pruebas normalizadas, estáticas y dinámicas, realizadas por un laboratorio móvil siguiendo procedimientos sencillos que proporcionen datos para establecer la condición estructural de los mismos. Sin embargo, para poder establecer este nivel de desempeño por cada puente, se requiere de metodologías específicas de inspección, detección, evaluación de daño, y para estimar la confiabilidad estructural de cada puente.

Actualmente las únicas técnicas globales no destructivas reconocidas que pueden funcionar como herramientas para la inspección, detección y evaluación de daño, son aquellas basadas en vibraciones mecánicas[1,2], ya sea utilizando las componentes de alta frecuencia como en el caso de la propagación de ondas[3] o, las componentes de baja frecuencia como en los casos de análisis modal[4], método por subdominio inverso[2], cambio en las frecuencias

naturales[5] y sus derivados. Aún cuando estas herramientas son fundamentales para el análisis de la información, todas ellas están basadas en modelos matemáticos utilizando principalmente el método de elemento finito, por lo que la precisión y utilidad de las mismas, dependerá del grado de representación del fenómeno físico.

El Método de Búsqueda Global (MBG), es una técnica de evaluación no destructiva del tipo global basada en la propagación de ondas de alta frecuencia[3]. EL MBG es un método innovador cuyo análisis se fundamenta en la evaluación de fenómenos transitorios en el tiempo, y cuya ventaja radica en el análisis de las ondas propagadas en intervalos cortos de tiempo, permitiendo una mayor facilidad para la detección de daño asociado a cambios en las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura[3]. A diferencia de las vibraciones, cuya sensibilidad se relaciona con el lugar de aparición del daño y la cantidad de sensores colocados en la estructura para relacionar los modos de vibrar con el daño, el MBG plantea soluciones donde se puede extender o contraer la distancia entre los sensores en la estructura, lo cual, disminuye o aumenta la sensibilidad del método cuando es necesario, esto, con el fin de ubicar el daño en la estructura. Su originalidad le permite ser un método de fácil aplicación y evaluación y por lo tanto, factible para ser utilizado como parte de las herramientas del CMPEI.

Aprovechando los trabajos de mantenimiento por el reemplazo de los elementos de anclaje superior en el Puente Río Papaloapan, se aplicó el MBG con el fin de probar su utilidad como una herramienta para la detección de daño. En este trabajo, se presentan los resultados analizados y se determina la factibilidad de incorporar al MBG como una solución para la inspección, detección y evaluación de daño del CMPEI.

Metodología para detección de daño

La metodología empleada para la ubicación de daño en estructuras, se basa en la hipótesis de que la respuesta dinámica (aceleración, velocidad o desplazamiento) de un punto de la estructura en el tiempo, contiene información de las propiedades mecánicas, geométricas y físicas de la misma. Para poder recabar esta información, es necesario producir un movimiento en la estructura y a través de la colocación de sensores de aceleración, velocidad o desplazamiento se registra la respuesta dinámica. En síntesis la metodología aplicada por el MBG se puede dividir en 5 fases[6]:

Fase I: Se modela la estructura con el método de Elemento Finito (EF)

Para calibrar un modelo de elemento finito es necesario que los parámetros estructurales (propiedades mecánicas, ubicación geométrica, propiedades físicas, etc.) tengan valores apropiados, similares, o casi iguales a los del modelo físico; de tal forma que la respuesta dinámica del modelo EF sea igual o con poca variación respecto a la respuesta del modelo físico[7].

La calibración del modelo de EF es de vital importancia para el éxito de la aplicación de la metodología, si un modelo no puede representar el comportamiento dinámico y estático de la estructura, es imposible asociar cambios de un parámetro estructural con daño.

Fase II: Instrumentación

Para obtener la respuesta dinámica del modelo físico, es necesario utilizar sensores que midan el movimiento de la estructura en un punto determinado (desplazamiento, velocidad o aceleración), estos, son colocados en la estructura de acuerdo a un protocolo de

pruebas previamente diseñado con base en el comportamiento dinámico del modelo de Elemento Finito.

Fase III: Excitación y medición de las respuestas dinámicas

Se produce un movimiento en la estructura a partir de un golpe, generalmente se libera una masa desde una altura determinada, y, el registro de la fuerza de impacto es almacenado en función del tiempo que dura el evento en conjunto con los movimientos registrados en los sensores colocados en la estructura. El registro de la fuerza se utiliza como entrada en el modelo de EF para reproducir la respuesta dinámica y los registros del movimiento de los sensores, son comparados con los generados por el modelo de EF.

Fase IV: Evaluación de la función error

Se comparan los registros del movimiento de los sensores colocados en la estructura con los generados por el modelo de EF calibrado, y se obtiene una medida de la diferencia entre ambas señales. La función de error se utiliza para cuantificar esa diferencia.

Fase V: Método secuencial de Búsqueda Global (MBG)

Para ubicar el daño, se aplica un esquema de búsqueda sistemática en la que se varían los parámetros estructurales del modelo; para variar estos parámetros, primero, es necesario identificar aquellos que pueden variar y posteriormente, definir el intervalo de variación. Una vez hecho esto, se simula cada condición de prueba, se comparan con las respuestas de la estructura real con daño y se obtiene un valor que cuantifica la diferencia entre ambas señales. Finalmente, el daño se asocia con los parámetros que minimizan la diferencia entre las señales del modelo de EF y las experimentales.

Procedimiento experimental

El Puente Río Papaloapan se localiza en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Minatitlan, en el Tramo: entronque Cosamaloapan – entronque Los Tuxtlas, en el estado de Veracruz, se construyó en el año de 1994 y se puso en servicio en abril de 1995, es del tipo atirantado con un claro de 203 m y una longitud total de 407.21 m. El puente tiene 112 tirantes distribuidos en 8 semi-arpas con 14 tirantes cada una, las semi-arpas se identifican de la 1 a la 8 según se indica en la figura 1, y los tirantes se enumeran del 1 al 14, iniciando del más corto al más largo.

Para la calibración de los parámetros estructurales del modelo de EF del Puente Río Papaloapan, se diseñaron dos conjuntos de pruebas dinámicas; el primer conjunto, incluyó el monitoreo de las tensiones de los 112 tirantes del puente bajo cada uno de los 20 escenarios de remoción y rehabilitación de los elementos de anclaje superior (botellas)[8] más una prueba final con el puente rehabilitado[3]. El segundo grupo de pruebas, fue para obtener a partir de una prueba de impacto en condiciones controladas, las respuestas dinámicas de aceleración en diferentes puntos del puente. Para ello, se instrumentó el puente

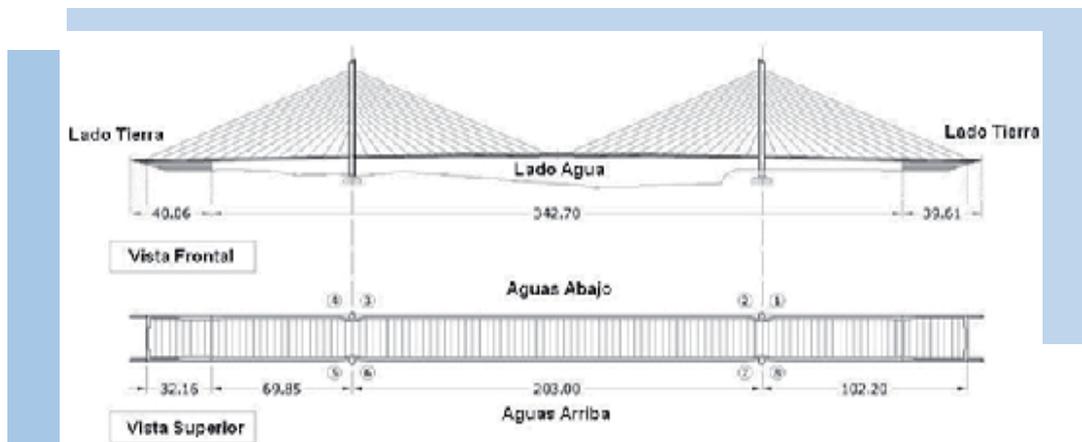


Figura 1
Vista de frente y superior del puente Río Papaloapan

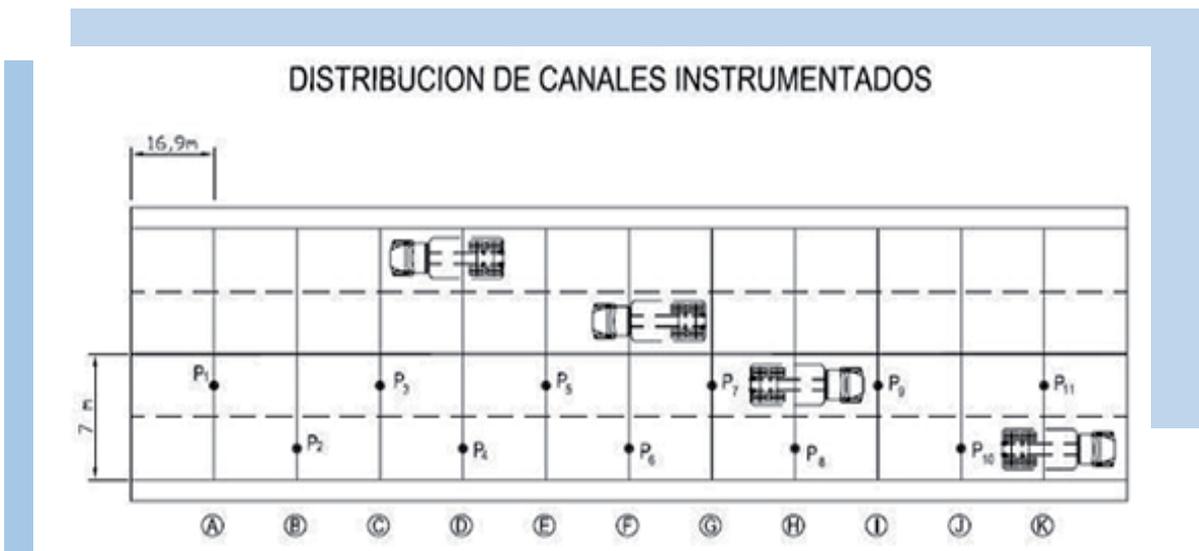


Figura 2
Arreglo Experimental para las pruebas dinámicas controladas

con 11 acelerómetros de baja frecuencia en los carriles del cuerpo A, entre las torres 2 y 3, a un tercio y dos tercios de la longitud total de estos carriles; en la figura 2, se muestra un esquema de la posición de los sensores. La excitación del puente, a diferencia del primer grupo de pruebas, se hizo sin tráfico, utilizando el equipo de impacto Dynatest (figura 3). En este caso, este equipo libera desde una altura establecida, una masa conocida la cual produce una excitación controlada sobre el puente.

Para las pruebas dinámicas, se utilizó una frecuencia de muestreo de 2000 datos por segundo, por un periodo de 2 segundos, por lo que al final, se obtuvieron 4000 datos por canal de muestreo. Las pruebas experimentales se desarrollaron de la siguiente forma:

- a) Instrumentación del puente
- b) Control del tráfico; el tráfico se detuvo en ambas direcciones
- c) Inicio del programa de adquisición de datos
- d) Aplicación de la carga de impacto
- e) Recolección de las respuestas dinámicas del puente



Figura 3
Equipo Dynatest para realizar las pruebas dinámicas

En total, se realizaron 30 pruebas dinámicas sobre el puente en dos diferentes etapas de rehabilitación. La primera se realizó cuando se terminó la sustitución de las botellas de las arpas 1, 2, 3 y 4 y se removió la carpeta asfáltica de los carriles del cuerpo A. La segunda se llevó a cabo cuando las veinte botellas fueron rehabilitadas y aún sin la carpeta asfáltica. En ambos conjuntos de pruebas el arreglo y la metodología experimental utilizada fue la misma. En resumen, se obtuvo información de diez pruebas dinámicas con las arpas 1, 2, 3 y 4 rehabilitadas, diez pruebas dinámicas con las arpas 1, 2, 3 y 4 rehabilitadas pero sin el tirante 1 del arpa 7, y diez pruebas más con el puente totalmente rehabilitado.

Calibración del modelo de elemento finito

Para la construcción, calibración y simulación de los eventos estáticos y dinámicos del puente Río Papaloapan, se utilizó el paquete de elemento finito StaDyn versión 4.54[7,9], el cual, fue desarrollado en el Departamento de Aeronáutica de la Universidad de Purdue. La calibración del modelo de EF se desarrolló en 4 etapas:

- 1) Elaboración del modelo geométrico que se realizó a partir de los planos estructurales.
- 2) Asignación de las propiedades del material a través de datos técnicos recopilados en campo.
- 3) Ejecución de pruebas experimentales en campo para conocer la respuesta dinámica de la estructura o de algunos de sus componentes estructurales.
- 4) Ajuste del modelo de EF a partir de pruebas experimentales y la respuesta dinámica o estática del modelo elemento finito.

Para la construcción del modelo de EF del puente, se utilizaron 8224 elementos y 4693

nodos. En promedio se utilizaron 12 elementos a lo ancho del puente en una longitud de 23.1 m y 580 elementos a lo largo del puente en una longitud de 407.2 m, adicionalmente se utilizaron alrededor de 1200 elementos para representar los 112 tirantes y las cuatro torres. Para representar la respuesta dinámica del puente, se utilizaron elementos tipo placa para el tablero y las traveses laterales, elementos tipo viga para las costillas y torres; y elementos tipo barra para los tirantes. Respecto a las condiciones de frontera, las cuatro torres se consideraron empotradas, se restringió el movimiento en la dirección z en los estribos de las semi-arpas lado tierra que se encuentran cercanos al tirante 10 (semi-arpas 1, 4, 5 y 8), el apoyo con dirección a la Tinaja se consideró simplemente apoyado, mientras que el apoyo con dirección a Minatitlan se consideró un apoyo móvil. Por último, para representar los cambios de densidad a lo largo del tablero se agregó masa al puente en algunos nodos del tablero de acuerdo a la tabla de niveles y espesores proporcionada por Caminos y Puentes Federales y de Ingresos Conexos (CAPUFE). En la figura 4, se observa una vista del modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan.

elemento estructural que representa. De los 26 materiales, 20 fueron utilizados para representar los 112 tirantes; parámetros estructurales como la densidad, el módulo de elasticidad, y el módulo de rigidez, se consideraron constantes para los 112 tirantes (tabla 1), mientras que las áreas y momentos de inercia cambiaron de acuerdo al número de torones de los que estaban formados los tirantes de sujeción[3].

Tabla 1
Propiedades Mecánicas de los tirantes de sujeción del Puente Río Papaloapan

Módulo de elasticidad	Módulo de rigidez	Densidad
200 GPa	70,2 GPa	8800 kg/m ³

Los 6 materiales restantes se utilizaron para representar el tablero, las vigas longitudinales, el parapeto, las torres, y las vigas transversales (costillas), estas últimas con 2 materiales. Para todos los materiales mencionados se partió del hecho de que se encuentran sin daño, y que cada uno de los elementos estructurales se puede englobar dentro de un solo material, no obstante, si en el futuro se detecta algún daño que afecte a una región específica del puente, éste se puede modificar por un material que adopte la degradación en las propiedades mecánicas, asimismo, si alguna región es reforzada, se puede proceder a modificar un conjunto de elementos que representen un nuevo material que tome las nuevas propiedades mecánicas.

Para calcular las áreas y momentos de inercia del tablero, vigas transversales, vigas longitudinales, torres y parapeto, se utilizó información de los planos del puente, y para los valores de los parámetros estructurales desconocidos se utilizaron las respuestas dinámicas de las pruebas experimentales con las botellas rehabilitadas utilizando un algoritmo de solución de problemas inversos

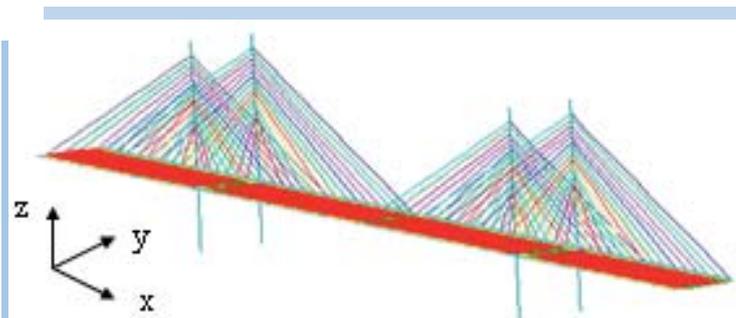


Figura 4
Modelo de Elemento Finito del puente Río Papaloapan

Para representar el comportamiento estático y dinámico del puente, fue necesario ajustar las propiedades de los materiales con los que está fabricado; para ello, se utilizaron 26 caracterizaciones de material, cada una con propiedades mecánicas de acuerdo al

StrIdent[7,9]. Los valores de los módulos de elasticidad y rigidez, así como la densidad se muestran en la tabla 2.

Tabla 2
Parámetros estructurales calculados de problemas inversos y directos

	Tipo de elemento	Módulo de elasticidad E (GPa)	Módulo de Rigidez G (GPa)	Densidad (kg/m ³)
Vigas Longitudinales (anclaje de tirantes)	Placa	61,84	22	2643
Parapeto	Placa	66,24	22	2324
Tablero	Placa	61,4	22,5	2480
Vigas transversales (costillas)	Placa	70,83	21	2320
Torres	Viga	57	20	2400
Vigas Transversales (costillas)	Viga	56,48	25,56	2277
Cables	Cable	200	70,2	8800

En la última etapa de la calibración, se realizó un proceso iterativo agregando masa en algunas secciones del puente, en las cuales, el perfil del espesor del tablero se cambió para poder dar la curvatura al puente establecida en el diseño, por cada simulación los datos de la tensión resultante del cable se compararon con las tensiones experimentales del modelo no lineal hasta que se obtuvo una variación que no excedió del 11%. Una vez calibrado el modelo de elemento finito se obtuvieron las resultantes de las tensiones de los 112 tirantes del puente considerando únicamente cargas muertas y se compararon con las tensiones obtenidas a partir de pruebas experimentales del modelo no lineal del puente rehabilitado[10].

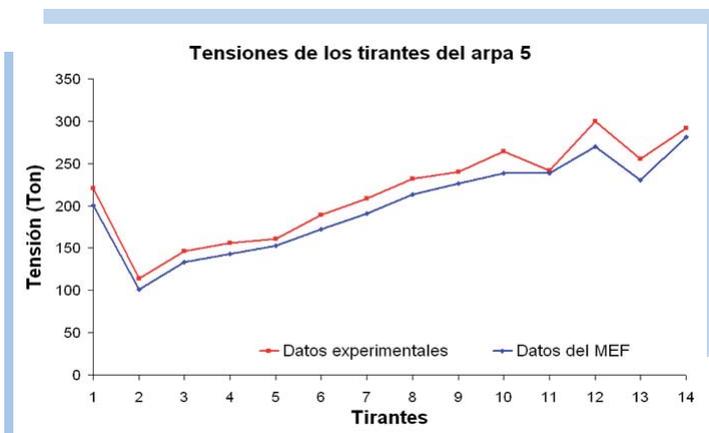


Figura 5
Parámetros estructurales calculados de problemas inversos y directos

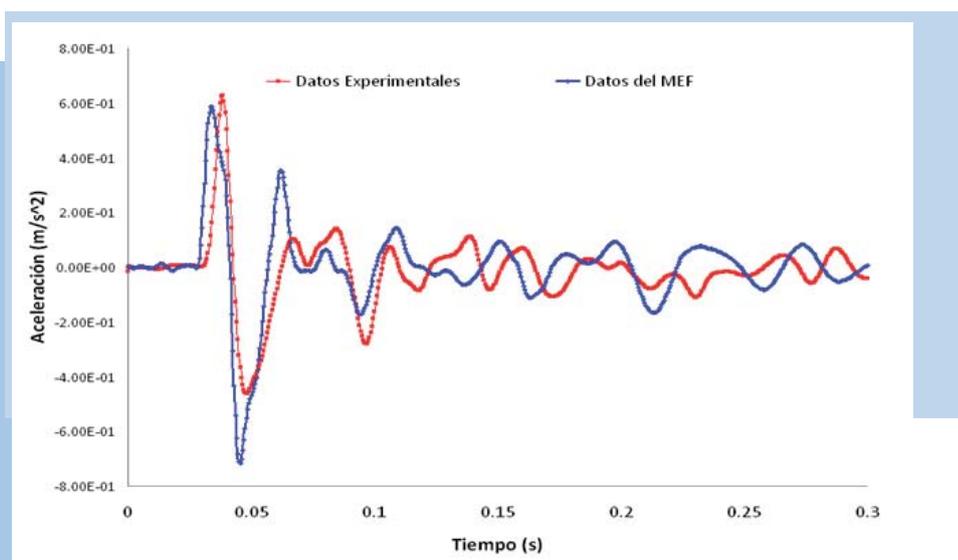


Figura 6
Respuesta dinámica experimental y del modelo de EF

La Figura 5 muestra la comparación entre las tensiones del arpa 5 del puente rehabilitado y las tensiones calculadas por el modelo de elemento finito del Puente calibrado para el arpa 5.

Calibrados todos los parámetros estructurales del modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan, se realizó una comparación entre las respuestas dinámicas del modelo de elemento finito y las experimentales, las cuales se muestran en la figura 6.

Identificación de daño

Para identificar el daño se utiliza el MBG, el cual, analiza y evalúa una condición de daño planeada. La condición consiste en la identificación del tirante 1 de la semi-arpa 7, el cual, fue removido para realizar el mantenimiento del anclaje superior. Para realizar las pruebas de identificación de daño, se utilizaron las señales de los sensores 8, 9, 10 y 11, el lugar donde se excitó la estructura fue en la intersección de los sensores 9, 10 y 11 (figura 2).

Los parámetros de búsqueda del MBG fueron en dos direcciones, el primero, considerando cambios en el Módulo de Elasticidad de los elementos alrededor de cada uno de los 112 tirantes del puente, y el segundo, generando escenarios de daño obteniendo el comportamiento dinámico del puente sin cada uno de los 112 tirantes.

La figura 7, muestra la variación de las respuestas dinámicas del sensor 11, el eje de las ordenadas representa el valor de la variación de las respuestas dinámicas experimental y del MEF, mientras que el eje de las abscisas representa el número de posición del tirante de izquierda a derecha tal como se encuentran en el puente Río Papaloapan, por ejemplo; el tirante 1 de la semi-arpa 6, es representado por la posición 15. Se observan

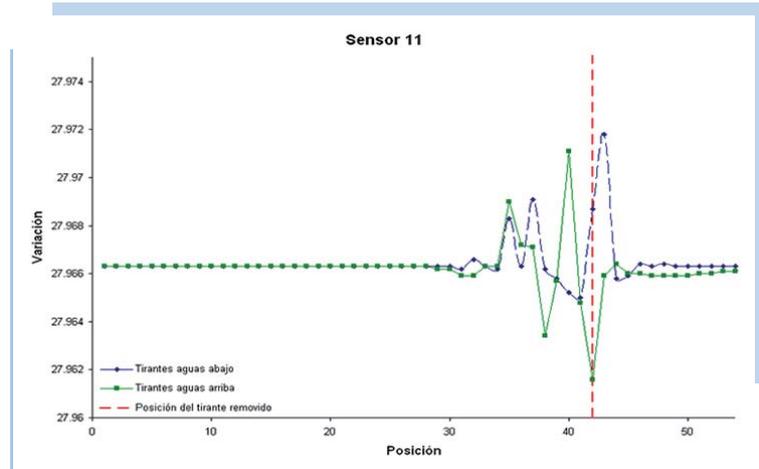


Figura 7
Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 11

tres curvas, la primera, representada por cuadrados verdes, son las posiciones de los tirantes aguas arriba, la segunda, representada por los rombos azules, son las posiciones de los tirantes aguas abajo, la tercera y última curva, es un línea recta que representa la posición del tirante removido. Para el sensor 11, la variación de las respuestas dinámicas es minimizada en la posición 42, el cual corresponde a los tirantes aguas abajo que coincide con el escenario real.

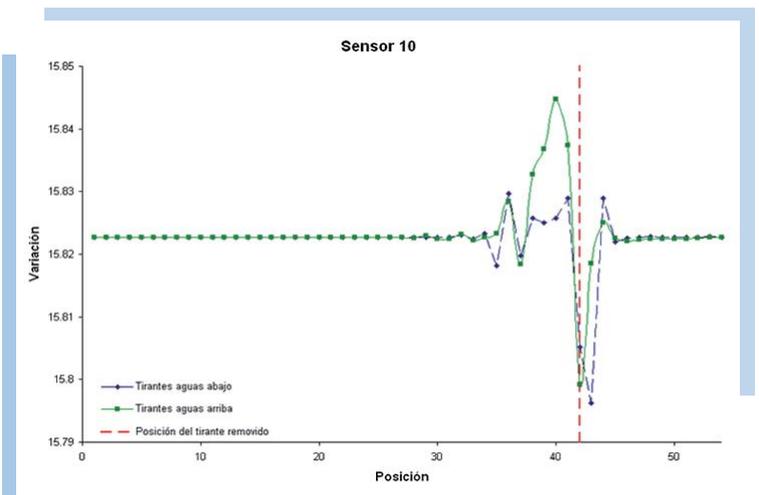


Figura 8
Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 10

En la figura 8, se puede ver la variación de las respuestas dinámicas obtenida para el sensor 10, lo primero que se observa, es que la posición que minimiza al daño no corresponde al escenario real, el lugar mostrado por el gráfico pertenece al tirante 1 de la semi-arpa 1, el cual es un tirante que se encuentra aguas abajo contiguo al gemelo del tirante removido. El segundo valor que minimiza la función de daño, es el que corresponde al escenario real; sin embargo, es interesante notar que hay una zona de daño detectada por el sensor 10 que muestra a tres tirantes que minimizan la variación de las respuestas dinámicas en mayor grado que el resto de los tirantes, y todos ellos están cercanos o tienen relación con el tirante removido. Si el sensor 10 es comparado con respecto al sensor 11, se observa que hay una mayor sensibilidad en el sensor 10, esto se debe a que el lugar del impacto es mucho más cercano al sensor, alrededor de 4 m, a diferencia del sensor 11 que fue colocado a 17 m, además el sensor 10 está a poca distancia de las vigas longitudinales del puente que soportan los cables atirantados.

correcto, e inclusive los datos muestran que en la posición que corresponde al escenario de daño no hay daño.

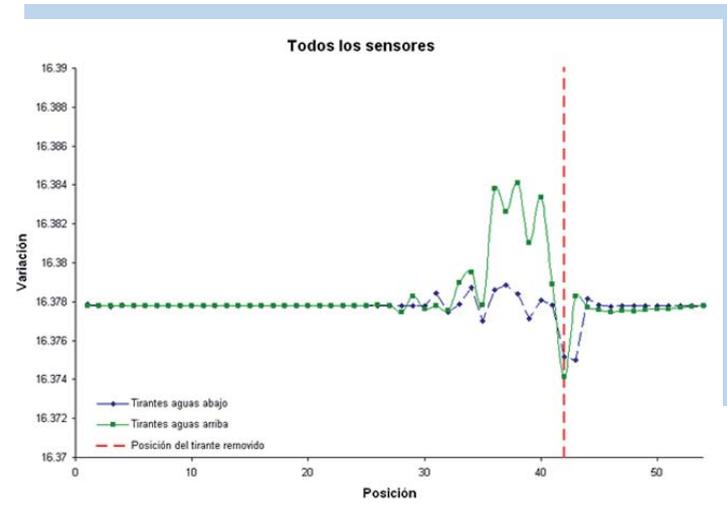


Figura 10
Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 8

La figura 10, corresponde a las variaciones generadas para el sensor 8, en ésta gráfica se puede ver que el escenario de daño es encontrado adecuadamente, nuevamente se observa que se minimiza la función de daño, al igual que para el sensor 10, principalmente en tres tirantes. De los análisis de los sensores 8 y 10, se observa que hay una mayor sensibilidad

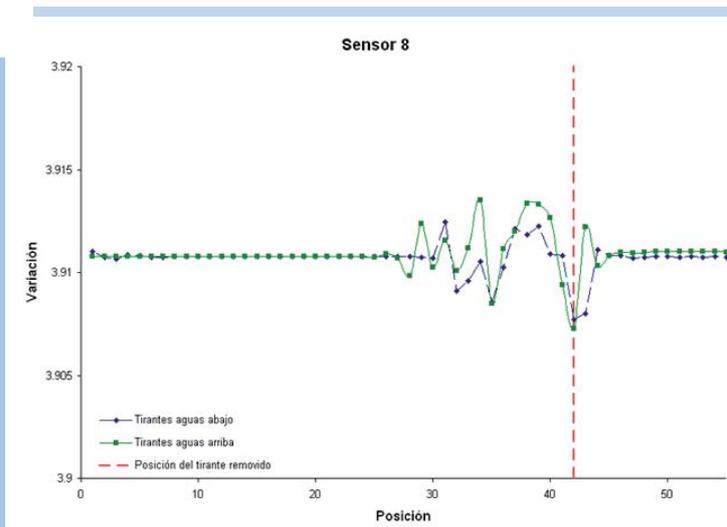


Figura 11
Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generadas por todos los sensores

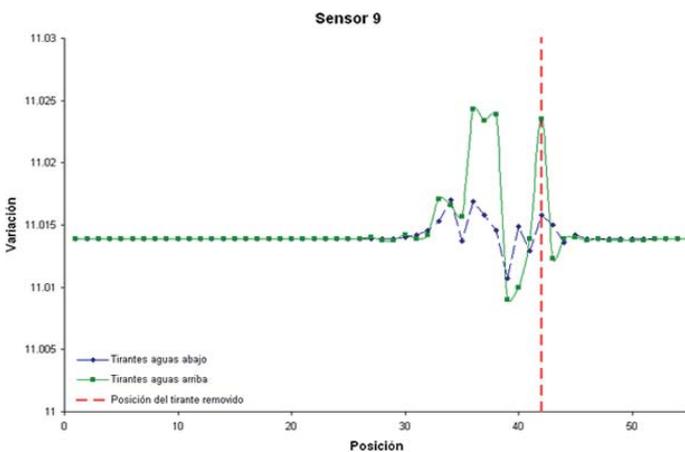


Figura 9
Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 9

Con respecto a los datos proporcionados por el sensor 9 (figura 9), a diferencia de los sensores anteriores que localizan el lugar apropiadamente, no puede localizar el lugar

para ubicar el daño con los sensores más cercanos a las vigas longitudinales.

Por último, en la figura 11, se observa la variación de las respuestas dinámicas calculadas por la combinación de los 4 sensores. Se aprecia que la condición de daño corresponde a la real ya que la función minimiza para el tirante 1 de la semi-arpa 1, así como al tirante 1 y 2 de la semi-arpa 2 que corresponden al tirante retirado, así como a su gemelo y el contiguo de éste situados aguas abajo.

Conclusiones

El Método de Búsqueda Global demostró que puede ser una herramienta útil para la detección y evaluación del daño. La sensibilidad del Método depende de tres aspectos fundamentales: 1) la calibración del modelo de elemento finito de la estructura, 2) la cercanía de los sensores respecto al lugar de excitación y el daño, y 3) el nivel del ruido registrado en las pruebas experimentales[3].

El Método de Búsqueda Global ha demostrado tener la capacidad de ser incorporado dentro los esquemas de detección de daño del centro de monitoreo y estructuras inteligentes. Otra ventaja del MBG es que puede ser utilizado para volver a calibrar el modelo de elemento finito, ya que una vez detectado un daño, si éste no ha sido reparado, se incorpora su representación con el detrimento de los parámetros estructurales y cuando es reparado, es posible modelar los cambios para determinar la nueva condición estructural.

Referencia

1. Aktan A. E., Grimmelsman, K. A., *Structural identification: Analytical Aspects*, Journal of Structural Engineering, 127(7), pp. 817-829, 1999.
2. Carrión-Viramontes F. J., *Aplicación de las Funciones Intermedias en Tiempo Frecuencia al Análisis de Sistemas Sujetos a Vibración*, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería División de Postgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro, 2002.

3. Quintana J. A., *Análisis del Método de Búsqueda Global para la Detección de Daño y Monitoreo Estructural de Puentes*, Tesis de Doctorado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad profesional Adolfo López Mateos, México D. F., 2009.

4. Ewins D. J., *Modal Testing, Practice and Application*, 2nd edition, Research Studies Press LTD, Hertfordshire, England, 2000.

5. Salawu H. J., *Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review*, Engineering Structures, 19(9), pp 718-723, 1997.

6. Quintana J. A., *A Global Search Method for Damage Detection in General Structures*, Tesis de Maestría, Astronautics and Aeronautics Department, Purdue University, U. S. A., 2004

7. J. F., "Modern Experimental Stress Analysis", Wiley and Sons, New York, 2004.

8. Carrión F. J., López J., Quintana J. A. Orozco P. R., Martínez M., Fabela M., Hernández J., Vázquez V., Terán J., *Asesoría para la rehabilitación y estudio de integridad de los elementos de anclaje superior del Puente Río Papaloapan*, Instituto Mexicano del Transporte, Reporte Interno, EE 01/04, Sanfandila, Querétaro, México, 2009.

9. Doyle J.F., *Wave Propagation in Structures*, 2/E. Springer-Verlag, New York, 1997.

10. Carrión-Viramontes F. J., López-López J. A., Quintana-Rodríguez J. A., Lozano-Guzmán., *Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge*, Experimental Mechanics, 2007.

QUINTANA Juan
jaquintana@imt.mx
CARRIÓN Francisco
carrion@imt.mx
MORENO José
jmoreno@imt.mx
LÓPEZ Alfredo
jalopez@imt.mx
GUTIÉRREZ Alejandra
agutierrez@imt.mx

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE REDES CARRETERAS

Introducción

Desde los años noventa se ha mostrado interés por realizar investigación en las áreas de confiabilidad y vulnerabilidad de redes carreteras; dicho interés se ha incrementado después de eventos tales como el terremoto de 1995 en Kobe, Japón y por los atentados terroristas del 11 de Septiembre, 2001, en la Ciudad de Nueva York, EE. UU. (Di Gangi y Luongo, 2005; Husdal, 2006; Jenelius et al. 2006).

La confiabilidad de una red de carreteras se ha definido como la probabilidad de que uno o más de sus tramos funcionen de acuerdo a una serie de variables operativas estándar (Husdal, 2004). Por lo que la estimación de la probabilidad de fallas en las redes carreteras es abordada en estudios de confiabilidad de redes.

Sería deseable que se determinara la confiabilidad de redes de transporte en países en vías de desarrollo, sin embargo, es poco factible financieramente realizar un estudio geográfico integral y una ubicación detallada de los riesgos en cada tramo de una red extensa, así como determinar su probabilidad de ocurrencia (Taylor y D'Este, 2003a). Debido a la poca factibilidad económica del enfoque anterior, se ha justificado el realizar otro tipo de estudios relacionados con la vulnerabilidad de las redes de transporte, en donde se enfocan a las consecuencias de las fallas.

Por lo antes dicho, la mayoría de los autores (Lleras-Echeverri et al., 2001; Berdica, 2002a; Jenelius et al., 2006; Tampère et al., 2007) que se han enfocado a estudiar la vulnerabilidad

de las redes, coinciden en que el término vulnerabilidad debería enfocarse a los efectos de las amenazas sobre la infraestructura de transporte; sin embargo el concepto de vulnerabilidad de redes carreteras todavía no cuenta con una definición acabada y, mucho menos con una expresión matemática aceptada (Husdal, 2006).

El concepto de vulnerabilidad se ha relacionado con las consecuencias observables en la red debidas a la falla de un tramo carretero, independientemente de su probabilidad de ocurrencia; es decir, se ubica en el nivel de funcionamiento del sistema de transporte, y en especial en la medición de los posibles cambios en la conectividad o costo generalizado provocados por un rango amplio de causas, tales como fluctuaciones en las condiciones de tráfico (congestionamiento recurrente) y fluctuaciones en la capacidad debido a eventos anormales tales como los desastres naturales, clima adverso, disturbios, accidentes vehiculares, ataques terroristas, etcétera.

En los últimos nueve años, se han realizado varios estudios para el desarrollo de medidas de vulnerabilidad de redes carreteras en países como Australia (Taylor y D'Este, 2003a, 2003b, 2004; Taylor et al. 2006); Bélgica (Tampère et al. 2007); Canadá (Scott et al. 2006); Colombia (Lleras-Echeverri y Sánchez-Silva, 2001); Estados Unidos de Norteamérica (Murray-Tuite y Mahmassani, 2004; Sohn, 2006); Holanda (Schreuder et al. 2008); Italia (Di Gangi y Luongo, 2005) y Suecia (Berdica, 2002b; Berdica y Eliasson, 2004; Jenelius et al., 2006). La mayoría de los trabajos abordan el análisis de vulnerabilidad de redes carreteras enfocándose a las posibles consecuencias de

las fallas de los tramos en la red, midiendo dichas consecuencias en términos de la variación en el índice de accesibilidad de ciertos centroides importantes (localidades, plataformas logísticas, etcétera) o en términos del aumento del tiempo total de viaje en el sistema carretero analizado.

La principal utilidad de medir la vulnerabilidad de redes carreteras e identificar los tramos críticos para su funcionamiento, estriba en proporcionar a los planificadores y tomadores de decisiones, una de las herramientas necesarias para priorizar la rehabilitación y el mantenimiento de los tramos carreteros así como la construcción de tramos redundantes y, como resultado, optimizar recursos, obteniendo beneficios sociales y económicos.

Debido a que en México no se habían llevado a cabo estudios sobre vulnerabilidad de redes carreteras, desde el año 2006 se ha trabajado en la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial (USIG) del Instituto Mexicano del Transporte para desarrollar una metodología que permita identificar los tramos críticos de la Red Federal de Carreteras en México. Los proyectos realizados bajo dicha línea de investigación son los siguientes: Desarrollo de una metodología para el análisis espacial de la vulnerabilidad de redes carreteras y aplicación a un caso de estudio (Gradilla, 2006); Análisis de conectividad desde una perspectiva de vulnerabilidad de redes carreteras (Gradilla, 2007); Integración y aplicación de una metodología para la identificación de tramos críticos en la Red Federal de Carreteras, con base en un Sistema de Información Geográfica (Gradilla, 2008).

Los avances obtenidos en dichos proyectos permitieron identificar los tramos críticos de la Red Federal de Carreteras, definidos estos últimos como aquellos que provocarían el mayor aumento del tiempo de viaje en toda la red así como las mayores afectaciones en la

conexión de los tramos de la red. Pero en el trabajo aquí presentado se incluye un nuevo factor a la modelación, que consiste en tomar en cuenta la duración de la obstrucción de los tramos durante la simulación para medir el grado de importancia que tiene cada tramo para el funcionamiento de la red. Además de lo anterior, se agrega la medición del grado de exposición para cada estado de la República Mexicana.

Metodología

Importancia del tramo

La importancia de un tramo se mide con el incremento en el tiempo de viaje vehicular que se da cuando un tramo está cerrado para su funcionamiento, en relación con el tiempo de viaje en condiciones normales (si el tramo estuviera abierto). La severidad del incremento en el tiempo de viaje entre dos nodos depende del flujo vehicular que existe entre ellos. La importancia de un tramo mide la capacidad del sistema carretero para proveer transporte con eficiencia social y económica, cuando la demanda es la más alta. En el nivel más básico, se considera un origen i , un destino j y el cierre del tramo k . El incremento total del tiempo de viaje para los usuarios, o el equivalente en vehículos, para viajar entre los pares Origen-Destino (i, j) durante el cierre, es denotado por ΔT_{ij}^k . La importancia I del tramo k se define entonces como el incremento total en el tiempo de viaje vehicular de todos los pares Origen-Destino, i.e.,

$$I(k) = \sum_i \sum_{i \neq j} \Delta T_{ij}^k \quad (1)$$

Suposiciones generales

El cierre de un segmento carretero de longitud unitaria, elegido aleatoriamente, representa el evento básico que fundamenta las medidas regionales de vulnerabilidad aquí propuestas. Se utilizan las consecuencias esperadas de dicho evento para representar la vulnerabilidad, a largo plazo, del sistema

carretero. El enfoque está basado en dos suposiciones: primero, se asume que la probabilidad de cierre está relacionada con la longitud del tramo carretero, por lo que los tramos con la misma longitud tendrán la misma probabilidad de quedar obstruidos totalmente independientemente del tipo de carretera que sea. Es verdad que la cantidad del tránsito que pasa por el tramo, el tipo de carretera y otras características de los tramos, así como lo que está a su alrededor, podrían influir en las probabilidades de cierre. Por lo que el enfoque aquí propuesto es general y no impide que se haga un refinamiento posterior del modelo de probabilidad, que sea acorde con la información disponible de las relaciones de dichos factores.

En segundo lugar, sólo se consideran los cierres de un solo tramo a la vez, basado en la suposición de que es el incidente más común y que las variaciones regionales de tales eventos son también bastante representativas. Algunas veces los tramos localizados cerca de cada tramo, en cuestión, se ven afectados y cerrados por el mismo tipo de evento; por ejemplo, durante una inundación o un terremoto. Sin embargo, el número de combinaciones de los tramos que tendrían que ser considerados cuando se estudia la obstrucción de más de un tramo a la vez, vuelve problemático el cálculo computacional para grandes redes. En cualquier caso, los cierres simultáneos de dos tramos apartados podrían ser considerados como independientes y ser estudiados por separado, obstruyendo un tramo a la vez.

Exposición regional

Tal como se realizó en Jenelius (2009a), en el presente trabajo se utiliza la exposición total esperada (ET) como una medida de exposición regional, misma que representa el incremento total esperado del tiempo de viaje vehicular para todos los viajes que se inician en la región durante el cierre del tramo.

Como su nombre lo indica, la exposición total esperada representa los costos socioeconómicos esperados para la región, debido a que los cambios en el tiempo de viaje son generalmente un componente dominante en las evaluaciones económicas. Por lo tanto, la exposición podría ser de interés para autoridades estatales, que están preocupadas por el bienestar y la eficiencia de su región. Cabe señalar que para traducir los tiempos de viaje en unidades monetarias, se debería utilizar algún valor del tiempo apropiado para México.

El tiempo de cierre de un tramo, hasta que la situación del flujo vehicular regresa al estado inicial (un estado totalmente funcional), es denotado por τ , y la demanda promedio de viaje (vehículos) por unidad de tiempo es denotada por x_{ij} . Si una región es denotada por r , l_k es la longitud del tramo k y $W_k = l_k / \sum_k l_k$ es la probabilidad de cierre del tramo k , entonces la exposición total esperada, ET , de la región r es:

$$ET(r) = \sum_k W_k \sum_{i \in r} \sum_{i \neq j} \Delta T_{ij}^k \quad (2)$$

Modelo del tiempo de viaje

Para calcular las medidas de importancia y exposición, se requiere modelar cómo el tiempo de viaje se ve afectado por el cierre de una carretera. El modelo que aquí se utiliza se tomó de Jenelius (2009b) y es aplicable a grandes redes, principalmente sin graves problemas de congestión; donde el tiempo de cómputo y el consumo de memoria para su cálculo son problemas importantes. En particular, se asume que el cierre de un tramo no afecta el tiempo de viaje de otro tramo. En áreas con alta densidad poblacional, el modelo subestima los retrasos causados por el cierre de un tramo. Por otro lado, la posibilidad de cambiar de modo de transporte o de destino podría ser mayor en áreas urbanas, lo que compensaría dicho efecto.

Suponga que el tramo k , localizado a lo largo de la ruta más corta (asumida como única) entre el origen i y el destino j , es cerrado para todo el tránsito a las $t=0$ y es reabierto a las $t=\tau$. Se asume que la demanda de viaje de i a j es x_{ij} vehículos por unidad de tiempo, constante e inelástica. Durante el cierre del tramo, podría no haber rutas alternas de i a j , o haber al menos una. Si no hay rutas alternas, lo mejor que un usuario podría hacer es esperar hasta que el tramo k sea reabierto. De ahora en adelante, un tramo de este tipo será llamado tramo cortante. Debido a que se asume una demanda de viaje constante a través del tiempo, un usuario que desea partir durante el cierre del tramo, se retrasará en promedio $\tau/2$ unidades de tiempo. La demanda total durante el cierre es $x_{ij}\tau$ y el incremento total en el tiempo de viaje durante este periodo es:

$$\Delta T_{ij}^k = \frac{x_{ij}\tau^2}{2} \quad \text{si } k \text{ es un tramo cortante} \quad (3)$$

Si existen rutas alternas, un usuario puede escoger la nueva ruta más corta o esperar hasta que el tramo k sea reabierto. Entonces ΔT_{ij}^k denota la diferencia en el tiempo de viaje entre la ruta original más corta y la nueva ruta, la cual se asume que es conocida por los usuarios. El retraso para un usuario que desea marcharse en algún tiempo $t \in [0, \tau)$ será $\min(\Delta T_{ij}^k, \tau - t)$. Si $\Delta T_{ij}^k \geq \tau$, todos los usuarios que desean partir durante el cierre retrasarán sus viajes, lo que da el mismo resultado de un tramo cortante. Si $\Delta T_{ij}^k < \tau$, sólo los usuarios que desean partir después $t = \tau - \Delta T_{ij}^k$ se beneficiarán del retraso de su viaje, en lugar de haber tomado otra ruta. Por lo que el incremento total del tiempo de viaje vehicular, en cualquier caso es:

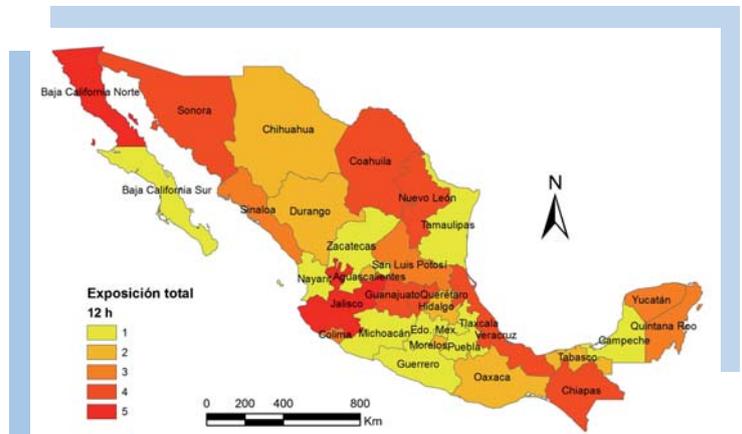
$$\Delta T_{ij}^k = \begin{cases} \frac{x_{ij}\tau^2}{2} & \text{Si } \Delta T_{ij}^k \geq \tau, \\ x_{ij} \Delta t_{ij}^k \left(\tau - \frac{\Delta T_{ij}^k}{2} \right) & \text{Si } \Delta T_{ij}^k < \tau, \end{cases} \quad (4)$$

De acuerdo a las fórmulas anteriores, el beneficio de las rutas alternativas cortas se incrementará con la duración del cierre τ , debido a que las consecuencias serán lineales en τ , mientras que serán cuadráticas en τ si no hay rutas alternas cortas. Por lo que, la duración del cierre en general afectará la importancia relativa de diferentes tramos.

Aplicación de la metodología

Para aplicar la metodología antes descrita, se utilizó la información referenciada geográficamente del Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte 2007/08¹, misma que fue editada exhaustivamente para tener una red completamente conectada.

A continuación se muestran algunos resultados a manera de ejemplo. En la Figura 1 se pueden observar los resultados obtenidos para el cálculo de la exposición total esperada para cada estado del país, en donde se modeló el cierre de cada tramo durante 12 horas; el nivel de exposición se dividió en cinco niveles, siendo el nivel 5 el de mayor exposición.

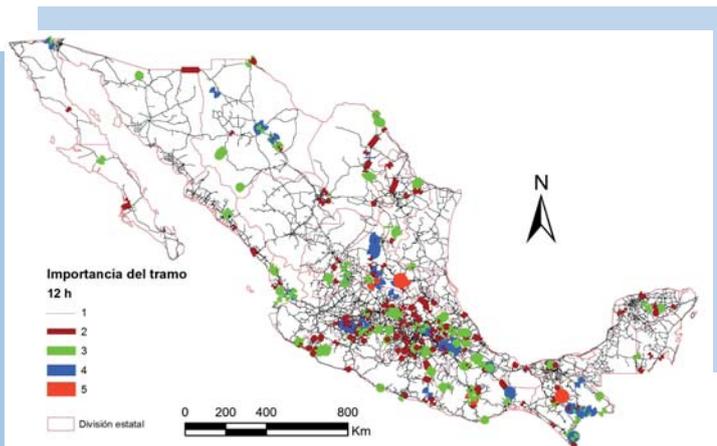


Fuente: Elaboración propia

Figura 1
Regional Total, para una duración de cierre de 12 horas

¹Realizado por la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial del Instituto Mexicano del Transporte, en coordinación con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Por otro lado, en la Figura 2, se muestra el nivel de importancia para cada tramo, modelado también para un cierre total de cada tramo por un tiempo de 12 horas. El nivel de importancia también se dividió en cinco niveles, el nivel 5 representa los tramos de mayor importancia; es decir, entre más alto sea su nivel más crítico será el tramo para el funcionamiento de la red de carreteras, en caso de que quede totalmente obstruido.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2
Importancia de los tramos, para una duración de cierre de 12 horas

Referencias

- Berdica, K. (2002a). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done, *Transport Policy*, Vol. 9, pp. 117–127.
- Berdica, K. (2002b). *Vulnerability: A model-based case study of the road network in Stockholm. TraVIS for Roads: Examples of Road Transport Vulnerability Impact Studies*, Tesis doctoral, TRITA-INFRA 02-029, KTH, Stockholm.
- Berdica, K. y Eliasson, J. (2004). Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective, *Second International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*, ed. A. Nicholson and A. Dantas, Christchurch, New Zealand, pp. 89–94.
- Buriol, L. S., Resende, M. G. C. and Thorup, M. (2004). Speeding up dynamic shortest path algorithms. Technical Report TD-5RJ8B, AT&T Labs. September 2003, revised August 2004.
- Cherkassky, B. V., Goldberg, A. V. and Radzik, T. (1993). *Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation*. Technical report 93-1480, Computer Science Department, Stanford University.
- Di Gangi, M. y Luongo, A. S. (2005). Measures of network vulnerability indicators for risk evaluation and exposure reduction. *Environmental Health Risk III*, Wessex Institute of Technology, UK.
- Gradilla Hernández, L. A. (2006). Desarrollo de una metodología para el análisis espacial de la vulnerabilidad de redes carreteras y aplicación a un caso de estudio, informe del proyecto No. VI-08/06, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
- Gradilla Hernández, L. A. (2007). Análisis de conectividad desde una perspectiva de vulnerabilidad de redes carreteras, informe del proyecto No. VI-17/07, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
- Gradilla Hernández, L. A. (2008). Integración y aplicación de una metodología para la identificación de tramos críticos en la Red Federal de Carreteras, con base en un Sistema de Información Geográfica, informe del proyecto No. VI-15/08, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
- Husdal, J. (2004). Reliability and vulnerability versus Costs and Benefits. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability*, Queenstown and Christchurch, New Zealand, pp. 180-186.
- Husdal, J. (2006). *Transport Network Vulnerability - which terminology and metrics should we use?* NECTAR Cluster 1 Seminario, Molde, Norway, May.
- Jenelius, E.; Petersen, T. y Mattsson, L.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A*, Vol. 40, pp. 537-560.
- Jenelius, E. (2009a). Network structure and travel

patterns: Explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, in press.

Jenelius, E. (2009b). Considering the user inequity of road network vulnerability. *Journal of Transport and Land Use*, in press.

Lleras-Echeverri, Germán y Sánchez-Silva, Mauricio (2001). Vulnerability analysis of highway networks, methodology and case study. *Institution of Civil Engineers, Transport*, Vol. 147, pp. 223-230.

Murray-Tuite, P. y Mahmassani, H. (2004). Methodology for determining vulnerable links in a transportation network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1882, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 88-96.

Schreuder, M.; Tamminga, G. y Kraan, M. (2008). Vulnerability of a National Road Network, 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

Scott, D. M.; Novak, D.; Aultman-Hall, L. y Guo, F. (2006). Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, Vol. 14, pp. 215-227.

Sohn, J. (2006). Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach. *Transportation Research Part A*, Vol. 40, No. 6, pp. 491-506.

Tampère, C.; Stada, J.; Immers, B.; Peetermans,

E. y Organe, K. (2007). Methodology for identifying vulnerable sections in a national road network, 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January.

Taylor, M. A. P. y D'Este, G. M. D. (2003a). Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical elements of transport infrastructure. Artículo presentado en el "26th Australasian Transport Research Forum", Wellington, New Zealand, 1-3 octubre 2003.

Taylor, M. A. P. y D'Este, G. M. D. (2003b). Network vulnerability: An approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. *The network reliability of transport. Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)* eds M. G. H. Bell and Y. Iida, pp. 23-44. Pergamon, Oxford, England.

Taylor M. A. P. y D'Este, G. M. (2004). Critical infrastructure and transport network vulnerability: developing a method for diagnosis and assessment, *Second International Symposium on Transportation Network Reliability*, ed. A. Nicholson and A. Dantas, Christchurch, New Zealand, pp. 96-102.

Taylor M. A. P.; D'Este, G. M. y Sekhar S. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, Springer, Vol. 6, pp. 267-291.

GRADILLA Angélica
lgradilla@imt.mx
JENELIUS Erik
jenelius@infra.kth.se

GLOSARIO

Artículo 1:

Daño Estructural: Detrimento en la capacidad carga de una estructura, respecto a su condición inicial o de diseño, por efectos externos o ambientales.

Respuesta Dinámica: Es la medición en desplazamiento, velocidad, aceleración o deformación, como función en el tiempo en un punto determinado, ante una excitación por carga viva.

Método de Búsqueda Global: Método del tipo global para la detección de daño en

una estructura, basado en el análisis de las respuestas dinámicas experimentales, respecto a las de un modelo matemático.

Artículo 2:

Confiabilidad: confiabilidad de la red puede entenderse como el grado de estabilidad de la calidad del servicio que el sistema ofrece.

Exposición total esperada: el incremento total esperado del tiempo de viaje vehicular para todos los viajes que inician en la región durante el cierre del tramo.

Tramo crítico: aquel tramo que causa los mayores efectos negativos en el funcionamiento del sistema de transporte cuando se ve obstruido.

PROYECTO EN MARCHA

Estudios en modelos hidráulicos para definir el proyecto constructivo de la prolongación del rompeolas de Ensenada, B.C.

A raíz de la construcción en años anteriores de una nueva terminal aledaña al espigón del Gallo, en el interior del puerto de Ensenada, se originó agitación significativa que ha provocado inseguridad en las actividades del puerto, además la API Ensenada definió un nuevo trazo del canal de acceso al puerto, realizando en el 2009 trabajos de dragado de construcción. Dichas acciones demandan el estudio de los problemas de agitación de oleaje que se presentan en el interior del puerto, por una parte por la presencia de la estructura de protección de la nueva terminal portuaria construida en el área aledaña al espigón del Gallo, y por otra parte, resulta necesario estudiar los posibles problemas de sedimentación del canal de acceso que se pueden presentar por el nuevo trazo del mismo.

Los objetivos que se pretenden lograr con el presente estudio son los siguientes:

- Realizar medición sistemática de la agitación de oleaje continua, mediante la instalación de una boya medidora de oleaje frente a la bocana del Puerto y mediante la instalación de un ológrafo escalar con capacidad de medir las corrientes con sensor tipo Doppler en el área aledaña a la terminal portuaria de contenedores.
- Realizar simulaciones numéricas de refracción y de agitación de oleaje para tres diferentes

escenarios, uno en condiciones actuales y dos escenarios que contemplen dos posibles longitudes de prolongación del rompeolas.

- Definir el proyecto ejecutivo de prolongación del rompeolas y presupuesto preliminar de construcción de dicho proyecto.

Los trabajos realizados hasta la fecha, son los siguientes:

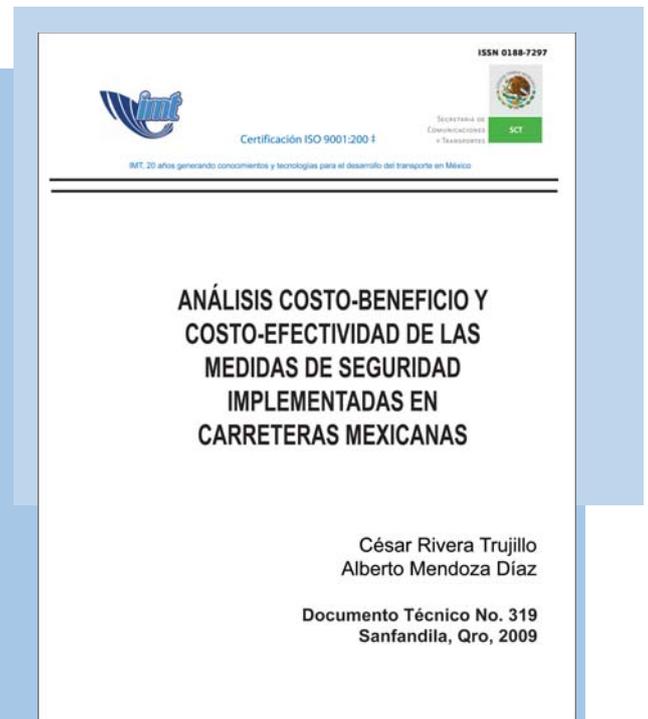
- La API Ensenada, realizó los trabajos de campo (batimetría, seccionamientos de playa y granulometrías) necesarios para la realización de las modelaciones numéricas.
- El IMT realizó la caracterización del clima medio y extremal del oleaje en la zona exterior del Puerto.
- El IMT realizó las modelaciones numéricas de refracción de oleaje normal, extremal y de agitación de oleaje para las condiciones actuales y de proyecto.
- El IMT realizó los términos de referencia y proyectos para la construcción de los modelos hidráulicos de estabilidad bidimensional y tridimensional, así como los términos de referencia y los proyectos para la construcción de los modelos hidráulicos de agitación de oleaje.

PUBLICACIÓN

Análisis costo-beneficio y costo-efectividad de las medidas de seguridad implementadas en carreteras mexicanas

La **PUBLICACIÓN TÉCNICA 319** presenta una revisión de las principales metodologías empleadas para evaluar medidas de seguridad vial en carreteras. A través del análisis costo-beneficio y costo-efectividad, el trabajo identifica las mejores medidas de seguridad vial implementadas en Carreteras Federales de México, durante el periodo 2001-2005.

Esto se efectúa con base en una muestra que comprende los proyectos de mejoramiento desarrollados por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT (DGST) para un conjunto de sitios conflictivos en Carreteras Federales, e implementados por la Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT (DGCC), dentro del Programa Nacional de Atención a Puntos de Conflicto. Asimismo, utilizando el método del capital humano, se actualiza el valor estadístico de la vida y de los heridos para el caso de México.



Se puede consultar de forma gratuita en la página del Instituto: <http://imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt319.pdf>

EVENTOS ACADÉMICOS

Taller de evaluación de las capacidades superficial y estructural de pavimentos

El pasado 17 al 21 de mayo de 2010, dicho Curso Internacional fue llevado a cabo en las Instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte en Sanfandila, Querétaro. La coordinación académica del curso estuvo a cargo del Dr. Paul Garnica Anguas.

Tuvo como objetivo proporcionar a los asistentes las habilidades teóricas y

prácticas necesarias, para poder supervisar e interpretar los resultados de las mediciones de regularidad superficial, fricción y deflexiones en pavimentos.

El curso se diseñó para todos aquellos profesionales con responsabilidades directamente relacionadas con la evaluación y preservación del desempeño de los pavimentos a lo largo del tiempo.

Instituto Mexicano del Transporte



Tuvo una asistencia de 31 participantes, de los cuales varios provinieron de los Centros SCT Tabasco y Nuevo León; también de las empresas ICA Infraestructura, Geosol S.A. de C.V., Estudios y Proyectos VOP S.A. de C.V., Proyecto Civil Integral S.A. de C.V., Proyectos Laboratorios y Asesorías S.A., VIATEST S. de R.L. de C.V., CEC Querétaro, PACCSA Ingeniería S.A. de C.V., Servicios de Consultoría en Infraestructura Vial S.A. de C.V., GEOSOL S.A. de C.V., PROYSECC Ingeniería S.A. de C.V., Operación y Conservación de Autopistas Concesionadas S.A. de C.V., AUDINGMEX S.A. de C.V., Ing. Teodoro Albarran Pliego S.A. de C.V., Gestión Servicios y Consultoría para la Obra Pública S.A. de C.V., Constructora Majer S.A. de C.V., Autovía Necaxa - Tihuatlán S.A. de C.V., Servicios de Consultoría en Infraestructura Vial S.A. de C.V., Red de Carreteras de Occidente, SAPIB de C.V., Evaluación Integral de Obras Civiles S.A. de C.V.

La temática que se trató en dicho curso fue:

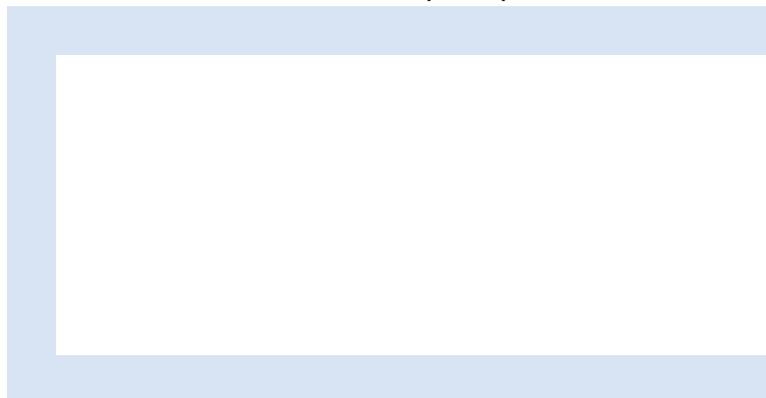
- Filosofía del diseño y evaluación de pavimentos.
- La regularidad superficial. Mediciones de los Índices de Perfil, IP, y de Regularidad Internacional, IRI.
- El coeficiente de fricción. Uso del Péndulo Británico y Mu-meter.
- La capacidad estructural. Mediciones y formas de evaluación con el Deflectómetro de Impacto, FWD.
- Los parámetros de calidad superficial y capacidad estructural para la Gestión de Pavimentos.

Los profesores que impartieron el Curso Internacional fueron Alfonso Pérez Salazar, José A. Gómez López, Rodolfo Téllez Gutiérrez, Ricardo Solorio Murillo, todos ellos investigadores del IMT.



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
APARTADO POSTAL 1098
76000 QUERÉTARO, QRO
MÉXICO

Registro Postal
Cartas
CA22-0005
Autorizado por Sepomex



POR AVIÓN
AIR MAIL