



DETECCION DE DAÑO EN PUENTES MEDIANTE UN MODELO EXPERIMENTAL

M.Samuel Molina Menache¹, Rolando Salgado Estrada², Sergio A. Zamora² Castro y Elsa G. Lagunes Lagunes²

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de estudios dinámicos realizados sobre un modelo a escala de un puente para fines de detección de daño. Para este fin se pretende aplicar varios métodos de detección de daño basado en vibraciones a partir de la respuesta dinámica obtenida, tanto de un análisis modal experimental como de un modelo numérico, ambos ensayados ante diferentes escenarios de daño. Los resultados encontrados en este trabajo permitirán realizar una propuesta de un procedimiento que permita la determinación de un método más racional para evaluar el comportamiento estructural de puentes.

ABSTRACT

This paper presents the preliminary results of dynamic studies carried out in a model scale bridge for the purpose to detect structural damage. To do that it is considered to apply several vibration based damage detection methods using the dynamic response from experimental tests and from a numerical model, both using several damage scenarios. The results found in this work will allow us to propose a procedure to determine a more rational method to evaluate the structural behavior of bridges.

INTRODUCCIÓN

La condición estructural de puentes en México y en el mundo, es un tema de vital importancia para la ingeniería estructural, ya que hoy en día el estado estructural de la mayoría de los puentes no es muy eficiente. La mayoría de los métodos de evaluación estructural de puentes son basadas en inspección visual y dependen del punto de vista ingenieril del evaluador. Es decir puede haber distintas opiniones acerca de la condición estructural de un puente, en la mayoría de las ocasiones ninguna de ellas está cerca de describir la condición estructural real de dicho puente. En México un gran porcentaje de puentes a nivel nacional, han sido clasificados como estructuralmente deficientes, puesto que han alcanzado su vida útil de servicio y no son sometidos a ningún proceso de rehabilitación estructural.

Nuevos métodos de detección de daño han sido propuestos desde finales del siglo XX; algunos de los más populares son aquellos que se basan en que los parámetros dinámicos de la estructura cambian con el daño estructural. Esta popularidad se debe al gran avance tecnológico en la invención de nuevos y más avanzados sensores y sistemas de adquisición de datos. En algunas evaluaciones estructurales realizadas en obras civiles, se ha comprobado que es posible utilizar el cambio de los parámetros dinámicos para determinar el daño en una estructura. (Cruz, 2012) La utilización de esta herramienta, permitirá determinar una metodología que maximice las posibilidades de detectar daño, y en consecuencia, evaluar su comportamiento estructural de forma más confiable.

¹Egresado Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Calzada A. Ruiz Cortines no. 455 C.P. 94294, Boca del Río, Ver. Teléfono (229) samuel_3m@hotmail.com

²Profesor, Universidad Veracruzana, Calzada A. Ruiz Cortines no. 455 C.P: 94294, Boca del Río, Ver. Teléfono: (229) 5665-9784; rosalgado@uv.mx; szamora@uv.mx; elagunes@uv.mx

DAÑO ESTRUCTURAL

DEFINICIÓN

En términos generales, el daño puede ser definido como *los cambios introducidos en un sistema que afecta negativamente a su rendimiento actual o futuro* (Sohn *et al.*, 2003). Esta definición plantea el daño basado en la comparación de dos estados diferentes del sistema, uno de los cuales representa un estado inicial, y a menudo es un estado sin daño. Esta propuesta se centra en el estudio de la identificación de daños en los sistemas estructurales, la definición de daño se limita a los cambios en el material y/o propiedades geométricas de estos sistemas que afectan negativamente el rendimiento de estos sistemas (Cruz, 2012).

CAUSAS DE DAÑO

Existe un gran número de casos documentados sobre fallas en puentes y sus componentes estructurales, cuyo origen se debe fundamentalmente a daños inducidos en servicio (ASM, 1998). Si bien es cierto que las causas son múltiples; es posible clasificarlas de manera general:

- Deformación plástica
- Deformación inelástica
- Pandeo
- Fatiga
- Fluencia
- Corrosión
- Fractura

Fallas por deformación plástica

Debido a que todas las estructuras se constituyen con materiales deformables, es importante considerar en el análisis estructural los cambios en las dimensiones que producen las cargas aplicadas. En general, los materiales se comportan en forma elástica cuando las fuerzas que actúan sobre ellos son pequeñas. El parámetro que rige el comportamiento de las deformaciones elásticas es la rigidez del material; y en el diseño generalmente se supone que las deformaciones se recuperan cuando se descarga, y el componente recupera su forma original. En general, estas fallas son por errores en el diseño.

Fallas por deformación inelástica

Cuando las fuerzas que se aplican a un componente estructural son excesivas, pueden sobrepasar el límite elástico del material (valor de cedencia), y provocar deformaciones permanentes en el mismo. Aunque las estructuras se diseñan para no sobrepasar estos límites, es posible que esto ocurra en las zonas de mayor concentración de esfuerzos. No todas las deformaciones permanentes conducen una fractura inmediata, pero es común que se conviertan en zonas débiles del puente donde la concentración de esfuerzos puede incrementar hasta generar grietas que posteriormente se conviertan en fracturas

Fallas por pandeo

Es una falla típica en vigas o placas sometidas a cargas de compresión. En este caso, se produce una inestabilidad estructural cuando las cargas de compresión generan deflexiones laterales, y subsecuentes momentos de flexión que conllevan en más deformaciones. El pandeo es una falla que cuando se presenta suele ser catastrófica.

Fallas por fatiga

Cuando una estructura se somete a cargas cíclicas se produce un efecto de deterioro en el material. El deterioro se inicia con defectos o micro-grietas que actúan como zonas de concentración de esfuerzos, para la aparición y propagación de grietas. La mecánica de la fractura ha desarrollado teorías para describir este fenómeno y, de hecho, es uno de los fundamentos básicos para establecer criterios de diseño e inspección no destructiva.



Fallas por fluencia

La fluencia ocurre cuando un elemento estructural se somete a cargas estáticas en periodos prolongados. Normalmente, cuando una carga se libera, las deformaciones elásticas del material se recuperan, pero las inelásticas permanecen, aun sin carga. En el caso aun cuando las cargas no sobrepasan los límites elásticos presentan deformaciones permanentes debido a que ocurren procesos de difusión y dislocación los cuales dependen del tiempo y la temperatura.

Fallas por corrosión

La corrosión es una degradación del material por ataque químico que se presenta en diversas formas -- galvánica (por el contacto de dos metales diferentes), picaduras, exfoliación, ataque inter-granular, o en combinación con la concentración de esfuerzos. Es un proceso altamente ligado con el tiempo que depende de las características del material y del medio ambiente (ASM, 1998).

Fallas por fractura

Una falla catastrófica en un puente ocurre cuando se presenta la ruptura de una o varias de sus partes. En la mayoría de los casos, las fallas por fractura se deben a sobrecargas, aunque existen algunos que son por defectos o grietas pre-existentes con niveles relativamente bajos de carga. La fractura de un material, típicamente presenta un comportamiento dúctil en el que se libera una gran cantidad de energía en forma de deformación permanente, por lo que es posible anticipar la falla mediante detección de deformaciones.

DAÑO EN PUENTES

Hablar de detección de daño en los puentes, hoy en día es un tema que ha recibido considerable atención en la literatura técnica. Algunos de los objetivos de la detección de daño en puentes son:

- Salvaguardar la integridad de los puentes
- Garantizar que el mantenimiento de la red de puentes se lleve de manera optima
- Jerarquizar las necesidades de los proyectos de rehabilitación y de la ejecución de las obras.
- Realizar la optimización de los presupuestos anuales
- Optimizar los criterios de evaluación para los proyectos de reparación de los puentes sean lo mas próspero posible

Se puede definir al término de detección de daños en puentes como: el conjunto de operaciones y trabajos necesarios para que un puente se mantenga con las características funcionales, resistentes, de confort (que los usuarios se sientan seguros al cruzarlo) e incluso las características estéticas con las que fue proyectado y construido, y se puede dividir este conjunto de operaciones y trabajos en evaluación y detección. (Atienza, 2004)

La detección de daños es una técnica en continua evolución y cada vez más utilizada. Es el resultado de los esfuerzos de los departamentos de ingeniería de diferentes empresas e instituciones en su continuo esfuerzo por obtener una reducción de los niveles de vibración, ruido y aumentar la expectativa de vida útil restante de los diferentes sistemas así como incrementar la eficiencia y seguridad de los mismos.

Para llevar a cabo un estudio de detección de daños en una estructura, algunas veces se suele realizar previamente un modelo que represente el comportamiento dinámico de la misma (*modelo matemático*), además de una *fase experimental* en la que se obtiene la respuesta dinámica de la estructura. En la Figura 1 se muestra una propuesta de cómo puede realizarse el proceso de detección de daño. (Atienza, 2004)

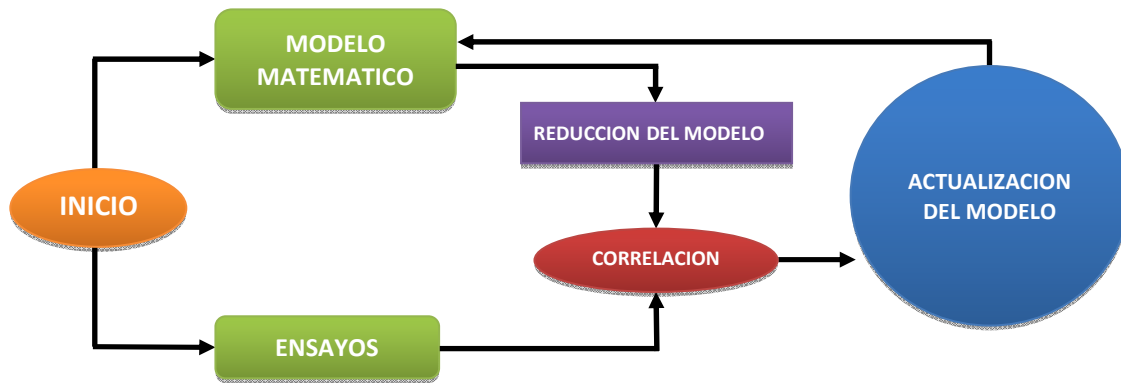


Figura 1 Propuesta de procedimiento de detección de daño (Atienza, 2004)

MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La implementación de estrategias de detección de daños en la ingeniería espacial, mecánica y civil es llamada Monitoreo del Comportamiento Estructural (SHM, por sus siglas en inglés) (Sohn *et al.*, 2003). Para garantizar la seguridad estructural, el SHM se ha convertido en un enfoque fiable, eficaz y económico para la supervisión del rendimiento estructural, detectar posibles daños y la toma de decisiones correspondientes al mantenimiento. Algunas técnicas de SHM se basan en las variaciones de las propiedades dinámicas (frecuencias y formas modales) antes y después del daño (Doebbling *et al.*, 1996), tal y como ya se mencionó anteriormente.

El proceso de SHM involucra la observación de un sistema en el tiempo utilizando periódicamente muestras de las mediciones de la respuesta dinámica de un conjunto de sensores, la extracción de características sensibles al daño en estas mediciones y el análisis estadístico de estas características para determinar el estado actual en el sistema. Después de los eventos extremos, como los terremotos o explosiones, SHM se usa para la detección rápida y tiene como objetivo proporcionar, en tiempo real, información fiable sobre la integridad de la estructura.

Dependiendo de las necesidades y los recursos de los administradores de la infraestructura, los datos del monitoreo estructural se pueden utilizar para alcanzar diferentes niveles de evaluación de daños de acuerdo a la clasificación de Rytter (1993), que se ven en la Figura 4, más adelante a cada nivel lo relacionaremos con: “métodos de nivel I, II, III y IV”.

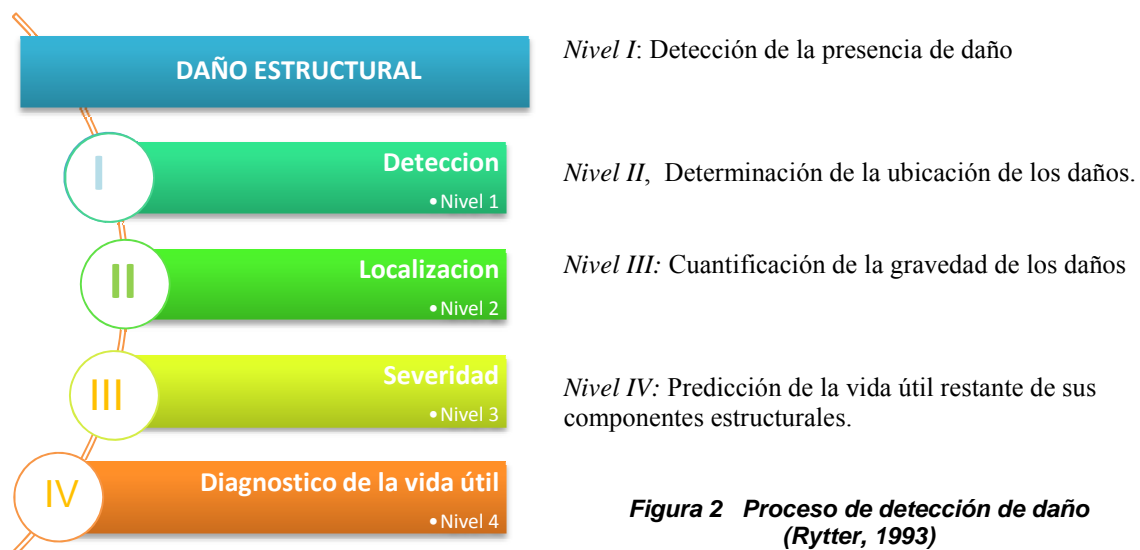


Figura 2 Proceso de detección de daño (Rytter, 1993)



Los retos actuales para el monitoreo del comportamiento estructural en puentes están siendo identificados como: contar con sensores distribuidos e integrados, la administración y almacenamiento de datos, extracción de datos y descubrimiento de conocimientos, métodos de diagnóstico, y la presentación de información útil y fiable a los propietarios de puentes /administradores para la toma de decisiones sobre el mantenimiento. Otro reto actual se basa en el objetivo común que consiste en detectar, localizar y evaluar el deterioro estructural en una etapa temprana, cuando las estrategias de mitigación pueden ser aplicadas de manera más eficiente

MODELO MATEMATICO

En el campo de la dinámica estructural, el análisis estructural se ha limitado a la obtención de las propiedades modales del sistema y las predicciones se comparaban frecuentemente con las formas modales obtenidas gracias a la experimentación. Para ello también existen una variedad de herramientas numéricas de correlación y de la misma forma existen algoritmos que permiten mejorar de forma sistemática los modelos de Elementos Finitos utilizando las propiedades dinámicas medidas, es lo que se llama “Sintonización de Modelos” (Güemes, *et al.*, 2003) donde su éxito dependerá de la calidad de las técnicas de extracción de los parámetros modales (proceso que inevitablemente produce imprecisiones y errores que se suman a los ya existentes).

Para poder comparar los resultados del modelo de elementos finitos con los del ensayo es necesario manejar modelos de tamaño reducido, muy inferiores a los modelos de desarrollo. Para esta tarea se utilizan las técnicas de reducción de modelos de elementos finitos.

TECNICAS EXPERIMENTALES

Estas técnicas experimentales se pueden referenciar como el problema inverso a la determinación de las características dinámicas de un modelo matemático, esto es, a través de la respuesta de un sistema se trata de inferir las ecuaciones del mismo, y por tanto las características físicas que lo determinan dinámicamente. Estas propiedades que definen al sistema, son los llamados parámetros modales.

El objeto principal de un análisis modal experimental es obtener los parámetros modales que caracterizan al sistema dinámico, estos parámetros, se pueden tomar a través de una serie de medidas, almacenadas de forma discreta, en los diferentes dominios (tiempo y/o frecuencia). Estas medidas se pueden procesar una a una, o bien, en grupos parciales o completos de manera simultánea. En cuanto a la forma de obtener la respuesta dinámica existen varias formas de excitación del sistema, típicamente se utilizan fuerzas excitadoras en diferentes puntos del sistema y se miden las señales de estas fuerzas, así como las respuestas vibratorias del sistema producidas en otros puntos

Diferentes algoritmos han permitido no solo mejorar el modelo de elementos finitos sino también permiten conocer el origen de las discrepancias entre el modelo y los resultados reales (Actualización del modelo numérico), en la Figura 4 se muestra un diagrama donde se pone de forma representativa la relación que existe entre un modelo matemático y el de técnicas experimentales.

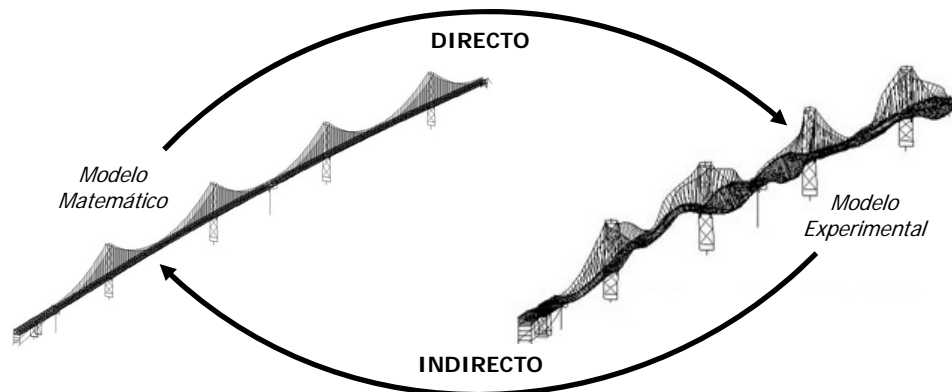


Figura 4 Relación entre modelo matemático y experimental (Güemes, 2003)

FUNDAMENTOS DE ENSAYES DINÁMICOS EXPERIMENTALES

El análisis modal experimental es el proceso para obtener los parámetros modales como las frecuencias, factores de amortiguamiento, vectores y escalas modales, por medio de un método experimental (Allemang, 1999). Estos parámetros modales pueden ser determinados por métodos analíticos como Análisis de Elemento Finito, en el cual se emplean algoritmos tales como eigenvalores y vectores de Ritz. Uno de los objetivos más importantes del Análisis Modal Experimental es la determinación del movimiento de las estructuras y últimamente la detección del daño y su evaluación estructural. Sin embargo, con frecuencia no se conocen con certeza las propiedades mecánicas de la estructura, por lo que los parámetros modales son determinados experimentalmente, que a su vez pueden servir como modelos para futuras evaluaciones y modificaciones estructurales. Principalmente el análisis modal experimental es usado para tratar problemas dinámicos, que no puede ser determinado por simple intuición, por métodos analíticos o por experiencia (Allemang, 1999).

Inicialmente el análisis modal experimental se empleó en la resolución de problemas dinámicos en la industria aeronáutica, con la llegada de las mini computadoras digitales y con el surgimiento de la Transformada Rápida de Fourier en los años 60s, la era moderna del análisis modal experimental inicio. El análisis modal experimental representa un importante campo interdisciplinario que trae consigo el acondicionamiento de señales y su interacción con equipo de ingeniería eléctrica, mecánica, vibraciones, acústica y los enfoques de estimación de parámetros de las matemáticas aplicadas (Allemang, 1999).

Para realizar un análisis experimental modal es necesario tomar en cuenta 4 consideraciones muy importantes.

La estructura se supone lineal.-La respuesta de la estructura a cualquier combinación de carga, simultáneamente aplicada, es la suma de las respuestas individuales de cada una de las fuerzas actuando solas. Cuando una estructura es lineal, su comportamiento puede ser caracterizado por un experimento de excitación controlado en la que las fuerzas aplicadas a la estructura tiene una forma conveniente para la medición y estimación de parámetros es similar a las fuerzas que se aplican a la estructura en un medio ambiente real.

La estructura varía con respecto al tiempo.-Por lo tanto los parámetros modales que serán determinados por cualquier proceso de medición y estimación dependerán del tiempo.



La estructura obedece el principio de reciprocidad de Maxwell.-Una fuerza P aplicada a un grado de libertad, provoca una respuesta en grados de libertad q que es la misma que la respuesta en p grados de libertad causada por la misma fuerza aplicada en q grados de libertad.

La estructura es observable.-Las mediciones de entrada y salida que son realizadas contienen suficiente información para generar un adecuado modelo de comportamiento de una estructura.

.La teoría de vibraciones aplicada al mundo experimental, envuelve un entendimiento más completo de como los parámetros estructurales como la masa, amortiguamiento y rigidez se relación con la función de respuesta de impulso (dominio del tiempo), la función de respuesta de frecuencia (Fourier, o dominio de frecuencia) y la función de transferencia (dominio de Laplace), para sistemas de uno o varios grados de libertad (Allemang, 1999).

Uno de los principios más importantes para el entendimiento del análisis experimental modal, es la comprensión de la relación que existe entre los diferentes dominios (tiempo, frecuencia, Laplace) que son usados para describir la dinámica de los sistemas estructurales. Estas relaciones, con respecto a un sistema estructural, son las transformadas (Fourier y Laplace), que reflejan la información contenida por las ecuaciones diferenciales que rigen en cada dominio. A medida que se considera el enfoque digital para la medición de datos, se pueden formar relaciones similares entre tiempo, frecuencia, z dominios, que reflejan la información contenida por las ecuaciones diferenciales que rigen en cada dominio. Estas relaciones pueden ser representadas por transformadas discretas (Transformada discreta de Fourier, Transformada Z). Para fines mecánico-estructurales, podemos utilizar el análisis modal experimental de diferentes maneras: modificando componentes mecánicos, especificando una respuesta modal, y determinando la subestructura, con el fin de obtener parámetros que nos lleven a diagnosticar el estado de la estructura para esto se requiere el monitoreo del sistema, el análisis y evaluación de la información monitoreada. A menudo, el análisis incluye la extracción de los parámetros modales usando los datos monitoreados. El diagnóstico puede involucrar el establecimiento de los cambios (gradual como súbita), patrones y tendencias de los parámetros del sistema (De Silva, 1999).

PROCEDIMIENTO INTEGRAL DE ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL

Para maximizar la posibilidad de detección de daño empleando métodos basados en vibraciones se recomienda seguir las siguientes recomendaciones durante el procesamiento de la respuesta dinámica:

- 1) Agrupar señales, asignar ventanas y filtrar las señales.
- 2) Calcular las funciones de transferencia usando FFT (Transformada Rápida de Fourier)
- 3) Calcular las funciones ordinarias de coherencia
- 4) Calcular la curva n funciones de transferencia para expresar:
- 5) Después extraer
 - Residuos
 - Frecuencias Naturales (amortiguamiento) ω
 - Factores de amortiguamiento ζ
 - Formar la matriz modal
- 6) Calcular
 - Matriz de masa:
 - Matriz de rigideces
 - Matriz de amortiguamiento
- 7) Calcular el sistema modal

MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO

Dentro de la ingeniería civil, para poder comprobar y detectar daño en estructuras, es necesario realizar pruebas, las cuales se pueden clasificar en *Destructivas* y *No Destructivas*. Las primeras son indicativas de su nombre: la estructura es destruida o dañada. Estas pruebas son raramente implementadas debido a los altos costos que representa; el segundo grupo se basa en el uso de ultrasonido, rayos-x, campos electromagnéticos, etc.

Básicamente en los métodos *No Destructivos* se pueden agrupar en métodos locales y globales. Los métodos locales inspeccionan la estructura en un área relativamente pequeña mediante el uso de ondas de ultrasonido, radiografías, campos electromagnéticos, etc. Estos métodos son muy sensibles y capaces de detectar daños aunque no es posible utilizarlos en lugares de difícil acceso.

Los métodos globales utilizan el hecho de que el daño en un punto específico provoca una reducción de la rigidez en ese lugar lo que tiene una influencia en el comportamiento global de toda la estructura en términos de tiempo y espacio. Por ejemplo, la reducción de la rigidez provoca una disminución de las frecuencias propias. Estos métodos, basados en las vibraciones de baja frecuencia, vigilan todo el sistema observando cambios en las frecuencias de resonancia, el aumento de la amortiguación o cambios en los modos de vibración por mencionar algunos parámetros dinámicos. Estos cambios se usan como las características extraídas de la información en bruto y permiten distinguir entre los estados sin daños y dañados de la estructura.

Sin embargo, estos cambios son demasiado pequeños para identificar exitosamente el daño en todos los casos. Por otra parte, factores ambientales como cambios de temperatura entre dos pruebas dinámicas puede dar lugar a diferencias en los parámetros dinámicos de la misma magnitud que los causados por el daño. En consecuencia, se requieren técnicas más avanzadas basadas en el control de vibraciones con el fin de amplificar estos pequeños cambios. Estos métodos de detección de daño basados vibraciones han ganado popularidad debido a los avances logrados en los métodos de análisis modal y en las tecnologías de monitoreo.

Los métodos de detección de daños basados en vibraciones también pueden clasificarse en métodos *lineales* y *no lineales* (Doebeling *et al.*, 1996). Los métodos lineales suponen que la estructura sigue siendo lineal después de que ocurra la falla. Normalmente esta condición se considera razonable a pesar de que la estructura exhibe un comportamiento no lineal después de sufrir daño. Este es el caso de una grieta abierta y los cambios causados en las condiciones de frontera. Por otra parte, los métodos de detección de daños no lineal se deben utilizar en el caso de grietas que abren y cierran, como su nombre lo indican estas grietas se abren y cierran durante el funcionamiento normal del puente lo cual provoca que deba considerarse una rigidez adicional cuando la grieta cierra. (Salgado, 2008)

La clasificación descrita previamente de los métodos de detección de daño aplicado en las estructuras se ilustra en la Figura 15. Este estudio se centra en los métodos que utilizan los parámetros de la vibración de las estructuras para encontrar indicios de daños.

Para una descripción detallada de los métodos de detección de daño empleados en SHM puede consultarse Cruz (2012).

PRONOSTICO DEL DAÑO

Dado que dentro del SHM antes mencionado la tecnología utilizada es cada vez más precisa y compleja, se puede integrar en un proceso más amplio: un pronóstico de daños (DP, por sus siglas en inglés). Esta se define como la estimación de vida útil restante de un sistema de ingeniería (Farrar *et al.*, 2003). Esta estimación se basa en los resultados de los modelos que desarrollan las predicciones del comportamiento. Además, información "más suave", tales como el "sentir" del usuario en el funcionamiento del sistema, será utilizado en la mayor medida posible en el desarrollo de soluciones de DP. En otras palabras, DP intenta predecir el rendimiento de la estructura mediante la medición del estado actual del sistema (es decir, SHM), la estimación



de los ambientes de carga para el futuro, la predicción a través de la simulación y la experiencia pasada de vida útil restante del sistema.

ESTUDIOS DE DETECCIÓN DE DAÑO EN PROTOTIPO DE PUENTE

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

Este prototipo se realizó con la finalidad de comprobar los métodos de detección de daño desarrollados a partir de las simulaciones dinámicas de puentes agrietados. En este modelo, la introducción de daño se realizó en las secciones metálicas mediante cortes de sierra con diferentes grados de severidad, localización y número. La respuesta dinámica será adquirida mediante ensayos ambientales utilizando para esto acelerómetros de alta sensibilidad (10 V/g) capaces de detectar aceleraciones sin necesidad de una fuente de excitación externa. El número de puntos de medición, frecuencias de muestreo y tiempo total de adquisición fueron obtenidos de un modelo estructural preliminar del modelo.

Este modelo consta de una malla metálica hecha a partir de secciones rectangulares huecas OR con las dimensiones mostradas en la Figura 5. Tales dimensiones fueron propuestas para obtener frecuencias de vibración en el rango de las encontradas en puentes con claros menores a 100 m. En este modelo se evaluará la capacidad de los métodos de detección de daño basados en vibraciones ante diferente número de puntos de medición. El daño se indujo al realizar cortes de sierra en los elementos transversales ante diferentes niveles de severidad.

MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico se realizó con la finalidad de poder obtener ver el comportamiento dinámico del prototipo del puente metálico, y mediante este modelo poder obtener los parámetros modales necesarios para la realización de los ensayos en el prototipo. Este modelo consta de elementos longitudinales OR 76x51x3.2 de Acero A36, y elementos transversales OR 51x2.8 de Acero A36. En la Figura 6 se muestra el modelo numérico empleado.

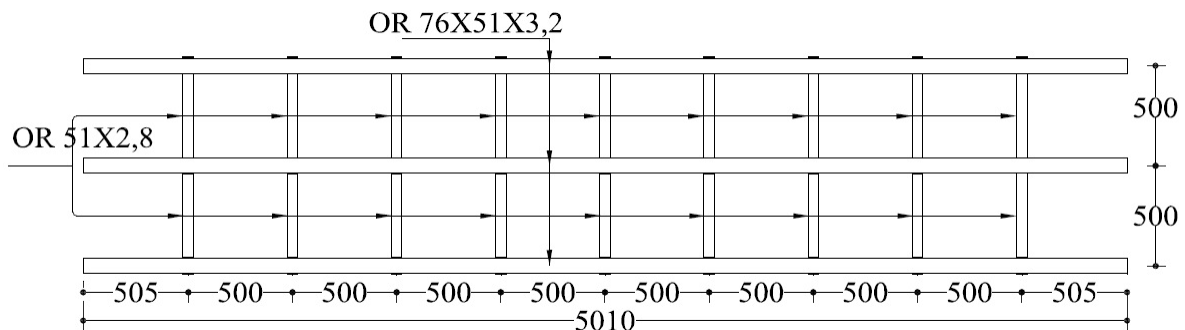


Figura 5 Planta Malla Metálica (Sin escala, Unidades: mm)

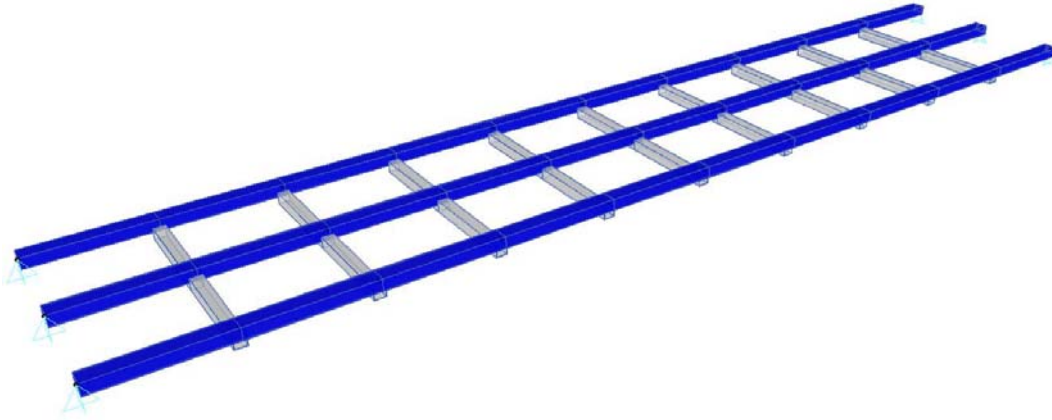


Figura 6 Modelo Numérico del Puente metálico.

ENSAYO DINÁMICO EXPERIMENTAL CON DAÑO

En este modelo, la introducción de daño se realizó en las secciones metálicas mediante cortes de sierra con diferentes grados de severidad, localización y número. El daño se realizó en los elementos transversales centrales, tal y como se muestra en la Figura 7.

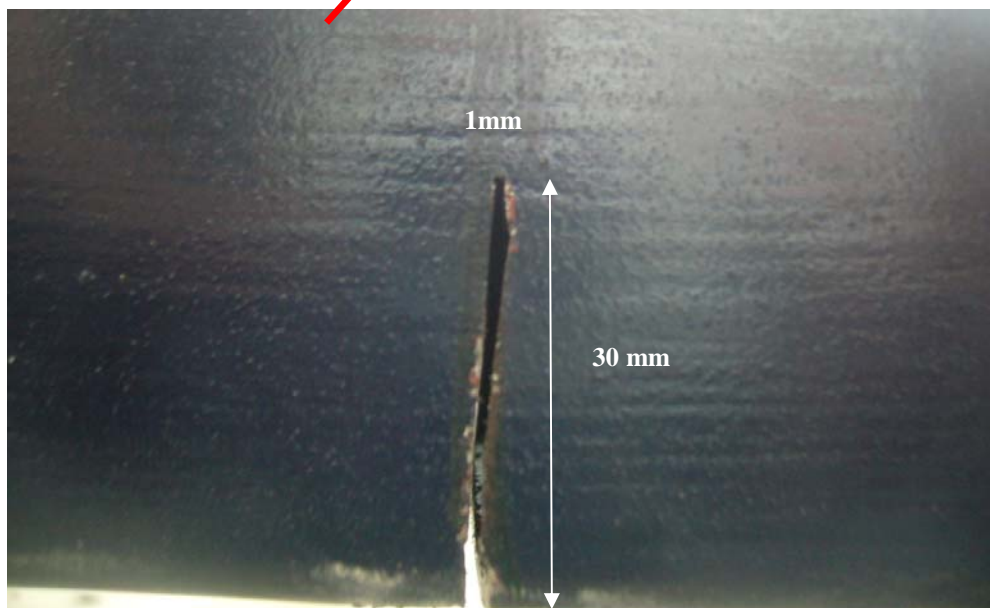
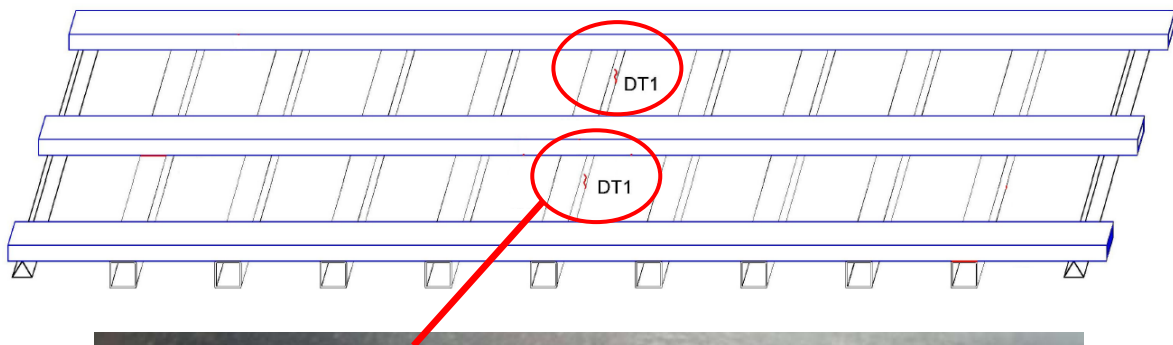
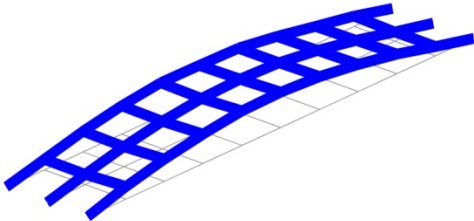
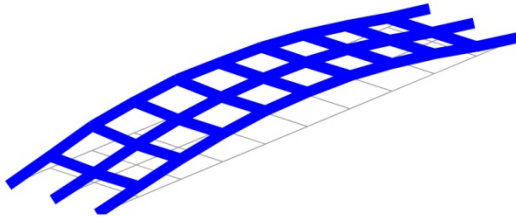
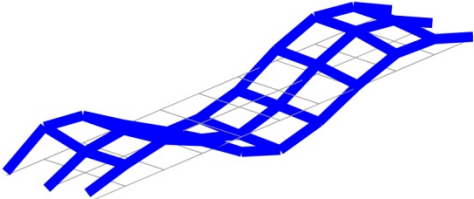
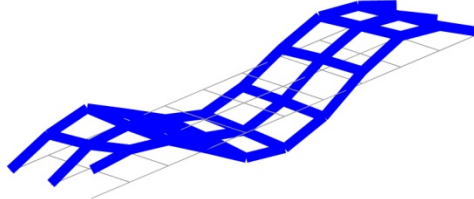
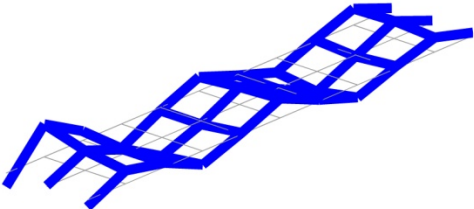
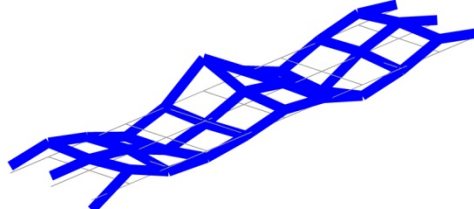


Figura 7 Malla metálica con localización de las grietas realizadas.

PRUEBAS DE DETECCIÓN DE DAÑO

Como primer paso en la aplicación de métodos de detección de daño, se realizó la comparación de frecuencias de vibración. En la Tabla 1 se realiza esta comparación en la cual podemos observar que el cambio de frecuencias producido por el daño infligido es mínimo por lo que no puede considerarse como un método confiable para determinar si la estructura tiene daño o no.

Tabla 1 Comparación de parámetros modales con y sin daño

Comparación formas modales	
Sin daño	Con daño
<p>Modo 1</p>  <p>$f = 6.15 \text{ Hz}$</p>	<p>Modo 1</p>  <p>$f = 6.26 \text{ Hz}$</p>
<p>Modo 2</p>  <p>$f = 52.07 \text{ Hz}$</p>	<p>Modo 2</p>  <p>$f = 50.37 \text{ Hz}$</p>
<p>Modo 3</p>  <p>$f = 144.90 \text{ Hz}$</p>	<p>Modo 3</p>  <p>$f = 141.50 \text{ Hz}$</p>

FUTUROS TRABAJOS A DESARROLLAR

Se realizará una segunda etapa de escenarios de daño de mayor severidad en el cual se evaluarán métodos más avanzados de detección de daño basados en vibraciones. Se realizarán dos prototipos adicionales de puentes. Uno de ellos tratando de representar un puente de sección compuesta y otro una armadura de puente. Los resultados de estos trabajos se publicarán en futuras comunicaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron ensayos dinámicos experimentales a un modelo de un puente metálico en dos estados estructurales diferentes. El primer estado fue en donde la estructura se encontraba en condiciones sin daño. El segundo estado analizado fue en el cual la estructura se encontraba en estado estructural con daño. Cada uno de estos ensayos realizados condujeron a resultados diferentes para cada estado de la estructura.

En el segundo ensayo dinámico, el cual se realizó cuando la estructura se encontraba bajo el daño inducido, pudimos determinar que estos parámetros dinámicos obtenidos variaban ligeramente con relación a los obtenidos en los ensayos dinámicos realizados a la estructura sin daño, especialmente en los modos 2 y 3.

De los resultados encontrados se puede deducir que los modos más susceptibles a detectar daño son aquellos en donde el daño inducido se encuentra en los puntos en donde la amplitud del modo es mayor. Sin embargo, como el daño fue realizado en los elementos transversales no hay una variación importante debido al daño en el primer modo debido a que su rigidez está concentrada en los elementos longitudinales. Es por eso que no se puede apreciar esta variación en las formas modales, a diferencia del segundo y tercer modo en los cuales los elementos transversales se encuentran más implicados en el comportamiento de cada uno de estos modos y es por eso que se puede apreciar esta variación en las formas modales en comparación con la formas modales obtenidas sin daño.

RECONOCIMIENTOS

Los primeros dos autores gustaría agradecer al Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP) por la beca y apoyo financiero otorgado durante la realización de este trabajo. Se agradece también a los estudiantes Fernando M. Brindis Motolinía y Ulises Zúñiga Velasco por el apoyo en la realización de los ensayos dinámicos. Finalmente agradecemos la colaboración de Gonzalo Barojas González y Jonathan Cruz Gómez quienes participaron activamente en la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

Allemang R. J. (1999), "**Vibrations: experimental modal analysis**". Apuntes de clase. Department of Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering. Universidad de Cincinnati. Cincinnati, Ohio, 1999.

Ancona, A.L. (2011). "**Evaluación de métodos de detección de daño en estructuras mediante el uso de vibraciones**". Tesis publicada de Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Veracruzana. Ver. México.

ASM, (1998). "**Corrosion**", 9th Ed, Vol. 13, ASM Metals Handbook.

Atienza, Ricardo (2004). "**Técnicas actuales aplicadas a la detección de daño**". Tesis no publicada de Ingeniería Aeronáutica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Madrid, España.

Chopra, A. K., (1995). "**Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**", Estados Unidos, Prentice Hall.



Clough, R. W., y J. Penzien. (2003). "**Dynamics of Structures**" Edit. McGraw-Hill 5ª Ed., Nueva York, Estados Unidos.

Cruz, G.J. (2012). "**Propuesta de un Procedimiento Integral para la Evaluación Estructural de Puentes**" Tesis licenciatura. Facultad de ingeniería Civil. Universidad Veracruzana. Ver., México.

De Silva, Clarence W (1999). "**Vibration: Fundamentals and Practice**". Ed. CRC Press.

Doebbling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., y Shevitz, D. W. (1996), "**Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems From Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review**" Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS.

Farrar, C.R., Sohn, H., Hemez, F.M., Anderson, M.C., Bement, M.T., Cornwell, P.J., Doebbling, S.D., Lieven, N., Robertson, A.N., y Schultze, J.F. (2003) "**Damage Prognosis: Current Status and Future Needs**" Los Alamos National Laboratory report, LA-14051-MS.

Güemes, A., López, J., Cuerno, C., Marco, V., (2003). "**Direct Updating Techniques Applied to Damage Detection in Spacecraft Equipment Panel**". Memorias del 4º Taller Internacional en Structural Health Monitoring. Stanford, Estados Unidos.

Molina, M.S. (2012), "**Propuesta de detección de daño en puentes usando modelo experimental**" Tesis licenciatura. Facultad de ingeniería Civil. Universidad Veracruzana. Ver., México.

Salgado, R.E., (2008) "**Damage detection methods in bridges through vibration monitoring: evaluation and application**", Tesis de doctorado, Universidad de Minho-ISISE. Departamento de Ingeniería Civil. Guimaraes, Portugal.

Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W. & Nadler, B.R. (2003) "**A Review of Structural Health Monitoring Literature**": 1996-2001, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.