

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-05-2016

MONITOREO ESTRUCTURAL DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO GRANDE DE TÁRCOLES RUTA NACIONAL No. 34

Preparado por:
Unidad de Puentes



San José, Costa Rica
26 de agosto de 2016



Documento generado con base en el Art. 6 de la Ley 8114 y lo señalado
Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto
DE-37016-MOPT.



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

LanammeUCR



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

PITRA



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

1. Informe: LM-PI-UP-05-2016		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: MONITOREO ESTRUCTURAL DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO GRANDE DE TÁRCOLES RUTA NACIONAL No. 34		4. Fecha del Informe 26 de agosto de 2016
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen Este informe de monitoreo de la superestructura del puente sobre el río Grande de Tárcoles, en la Ruta Nacional No.34, es un producto del programa de monitoreo in situ de estructuras de puentes de la Unidad de Puentes del PITRA - LanammeUCR para evaluar la condición estructural de puentes ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional, en el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114. Se realizó una prueba de dinámica con cargas operacionales cuyos resultados son un insumo muy valioso en la toma de decisiones con respecto a la estructura evaluada.		
8. Palabras clave Puentes, Ruta Nacional No.1, Río Seco, Monitoreo.	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 47
11. Inspección e informe por: Ing. Pablo Agüero Barrantes Unidad de Puentes <hr/> Fecha: 23/05/2016	12. Inspección y revisión por: Ing. Yi Cheng Liu Kuan Unidad de Puentes <hr/> Fecha: 25/05/2016	
13. Revisado por: Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR <hr/> Fecha: 18/05/2016	14. Revisado por: Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador Unidad de Puentes <hr/> Fecha: 08/08/2016	15. Aprobado por: Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA <hr/> Fecha: 25/08/2016

Página intencionalmente dejada en blanco

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	OBJETIVOS.....	7
3.	ALCANCE DEL INFORME	7
4.	MARCO TEÓRICO	9
4.1.	<i>PRUEBAS DE CARGA.....</i>	9
4.2.	<i>ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL.....</i>	11
4.3.	<i>ENFOQUES Y FRECUENCIA DE MONITOREO.....</i>	12
4.4.	<i>MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....</i>	13
5.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	18
6.	ANTECEDENTES E INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	21
7.	CONDICIÓN DEL PUENTE	22
8.	MÉTODO EXPERIMENTAL DE LA PRUEBA DINÁMICA.....	24
9.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	30
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43
11.	REFERENCIAS.....	45

1. INTRODUCCIÓN

Durante la etapa de operación de una obra de infraestructura civil se requiere de la inspección periódica, trabajos de mantenimiento y hacer las reparaciones necesarias en casos que se detecten deterioro o daños en sus elementos. Dichas actividades garantizan el buen funcionamiento, seguridad e integridad a lo largo de la vida útil de la obra.

Las labores de inspección de puentes inician a un nivel básico de inspección visual. La Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR ha realizado fiscalización de estructuras de puentes incluyendo inspección visual desde el año 2010, con base en el Manual de Inspección de puentes del MOPT. A partir del año 2016 las inspecciones visuales de la Unidad de Puentes se realizan con base en la metodología desarrollada por la Unidad de Puentes y presentada en el informe LM-PI-UP-05-2015 (Muñoz-Barrantes, et. al. 2015).

Si los hallazgos de la inspección visual evidencian posibles daños o deterioro de la estructura se pueden recomendar análisis e inspecciones más detalladas, las cuales pueden comprender pruebas de carga estática y dinámica sobre el puente.

En el caso del puente sobre el río Grande de Tárcoles se colocó instrumentación y se realizaron mediciones de la respuesta dinámica del puente ante excitaciones ambientales, es decir, movimientos del puente causados por el paso del tránsito, y mediante la metodología de monitoreo basada en vibraciones, la cual puede considerarse como una versión avanzada de pruebas dinámicas tradicionales, permiten detectar daños o anomalías en el comportamiento mediante la identificación de cambios en los parámetros dinámicos de la estructura. El LanammeUCR, por medio de la Unidad de Puentes del PITRA, ha desarrollado e implementado, en nuestro país un sistema de monitoreo híbrido y portátil que permite registrar datos de aceleración inducida por las cargas ambientales a las que está sometida la estructura (Liu-Kuan, et. al, 2015). Estas metodologías surgen de la necesidad de contar con métodos y técnicas para la evaluación, monitoreo y detección de daños en puentes, por las que durante los últimos 20 años un área sumamente activa de investigación denominada

“Monitoreo de Salud Estructural” (Structural Health Monitoring, SHM por las siglas en inglés), ha tomado auge alrededor del mundo, donde se ha desarrollado e implementado novedosas técnicas para dichos propósitos.

Este informe de monitoreo y detección de daño de la superestructura del puente sobre el río Grande de Tárcoles, en la Ruta Nacional No.34, es un producto del programa de monitoreo de puentes en sitio de la Unidad de Puentes del PITRA - LanammeUCR para evaluar la condición estructural de puentes ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional, en el marco de las competencias asignadas mediante el artículo 6 de la ley 8114. El monitoreo estructural se realizó el día 3 de mayo del 2016.

2. OBJETIVOS

- a) Monitorear el puente con acelerómetros que registren vibraciones ambientales del puente inducidas por el tránsito vehicular. Las aceleraciones son registradas de forma sincronizada por un sistema de adquisición para su posterior análisis.
- b) Identificar los parámetros modales operacionales de la estructura utilizando los datos obtenidos en el campo y métodos estocásticos de sub-espacios.
- c) Proporcionar recomendaciones generales para mantenimiento y/o reparación.

3. ALCANCE DEL INFORME

Este informe de monitoreo estructural presenta los resultados obtenidos de los análisis modal experimental realizado al puente sobre el río Grande de Tárcoles en ruta No.34 (Costanera Sur). Dichos resultados se comparan con los resultados analíticos del modelo de elementos finitos del puente, y las estimaciones del grado de daño basadas en el ajuste del modelo analítico contra el modelo experimental, las cuales podría servir de base para la toma de decisiones en cuanto al planeamiento y futuro diseño de rehabilitación del puente.

Informe No. LM-PI-UP-05-2016	Fecha de emisión: 26 de agosto de 2016	Página 7 de 47
------------------------------	----------------------------------------	----------------

En el caso de las pruebas dinámicas, los registros de aceleración obtenidos corresponden a vibraciones ambientales, es decir, respuestas del puente ante cargas vehiculares operacionales aleatorias. La cantidad de formas modales operacionales que se puede identificar con los datos experimentales está limitada al comportamiento inducido por la carga vehicular en el periodo de tiempo que se realiza el muestreo de los datos.

Para efectos del análisis realizado no se evaluó el efecto de la fatiga en los materiales. El hecho de que el puente presente agrietamiento implica que ya se excedió el rango elástico del material, implica la realización de estudios más avanzados para evaluar la fatiga los cuales están fuera del alcance de este informe.

4. MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los principales temas relacionados con el alcance del presente informe.

4.1. Pruebas de carga

Una prueba de carga es la observación y medición de la respuesta de un puente sujeto a carga controlada y predefinida sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Las pruebas de carga pueden ser utilizadas para verificar el desempeño tanto de componentes como del sistema bajo la acción de una carga viva conocida proveyendo una alternativa de metodología para evaluación analítica de la capacidad de carga del puente (AASHTO, 2011).

Las pruebas de carga se clasifican en dos tipos: pruebas de diagnóstico y pruebas de capacidad. Las pruebas de diagnóstico son realizadas para determinar la respuesta del puente ante cargas o para validar procedimientos analíticos o modelos matemáticos. Son utilizadas para mejorar el conocimiento del ingeniero acerca del comportamiento del puente y reducir incertidumbres relacionadas con las propiedades del material, condiciones de frontera, contribuciones de la sección transversal, efectividad de reparaciones, influencia de daño y deterioro, y otras variables similares. Estas pruebas incluyen la medición de los efectos de la carga en uno o varios miembros críticos del puente y la comparación de éstos efectos con los calculados utilizando un modelo analítico.

Las pruebas de capacidad se utilizan para establecer la máxima carga segura sobre el puente, donde el comportamiento se encuentra en el rango lineal elástico. En este caso el puente es sujeto a cargas específicas y se realizan observaciones para determinar si el puente es capaz de soportar dichas cargas sin daño. Las cargas deben ser aplicadas en incrementos y el puente debe ser monitoreado para identificar de forma temprana cualquier indicio de agrietamiento o comportamiento en el rango no lineal.

Informe No. LM-PI-UP-05-2016	Fecha de emisión: 26 de agosto de 2016	Página 9 de 47
------------------------------	----------------------------------------	----------------

Las pruebas estáticas se realizan con cargas estacionarias para evitar inducir vibraciones en la estructura, a diferencia de las pruebas dinámicas donde se utilizan cargas que inducen vibraciones en el puente. Las pruebas de diagnóstico pueden ser estáticas o dinámicas. Las pruebas de capacidad son realizadas en su mayoría de forma estática.

Algunas ventajas de las pruebas de carga son:

- Proveen suficiente información para establecer un nivel de carga viva seguro para puentes existentes. En los casos de puentes donde no se dispone de información del proceso constructivo (planos “as-built”).
- En algunos casos los cálculos teóricos de capacidad de carga resultan en bajas cargas vivas permisibles y las pruebas no destructivas de carga pueden proveer una carga viva máxima permisible más realista.
- Puentes que han sido rehabilitados o reforzados a través de los años no pueden ser evaluados teóricamente de forma precisa debido a la interacción de varios elementos.
- Las pruebas de carga permiten confirmar la naturaleza de la distribución de carga. Los factores de distribución utilizados en diseño o en evaluación teórica de la capacidad de carga generalmente son aproximaciones conservadoras de la distribución real.
- El análisis de miembros estructurales con deterioro es complicado, en especial en miembros con deterioro avanzado. En este caso las pruebas de carga son una valiosa herramienta para identificar el comportamiento existente.
- Las pruebas de carga pueden ofrecer información del rango de esfuerzos y de los ciclos de carga actuando en el miembro.

4.2. Análisis modal operacional

El área de Monitoreo de Salud Estructural comprende la implementación e instalación, en forma temporal o permanente, de una amplia gama de tecnologías y sensores novedosos en puentes y la utilización de diferentes técnicas de procesamiento de señales, identificación de sistemas y modelos numéricos para determinar el estado de “salud” de las estructuras a partir de los datos recolectados in situ.

La metodología utilizada por la Unidad de Puentes del LanammeUCR se denomina “Monitoreo de Salud Estructural Basado en Vibraciones”, y el análisis modal operacional que se implementa aquí es uno de los análisis más importantes dentro de esta rama de monitoreo. Ésta consiste en la extracción e identificación de los parámetros dinámicos del puente, los cuales comprenden: las frecuencias naturales de vibración, el amortiguamiento y las formas modales operacionales del puente, a partir de las señales vibratorias recolectadas simultáneamente por múltiples sensores de vibración. En nuestro caso particular se utiliza acelerómetros colocados a lo largo del puente.

Cualquier variación en las propiedades mecánicas de la estructura induce cambios en los parámetros dinámicos mencionados. Dichos cambios, como aumento de la masa por sobrecapas de asfalto o variaciones en la rigidez de los elementos estructurales debido a deformaciones en el rango inelástico, afectan el comportamiento dinámico de la estructura y se reflejarían mediante cambios en los parámetros dinámicos.

Si existe una buena resolución espacial en cuanto a la distribución de sensores, y si el método de procesamiento de señales e identificación de parámetros dinámicos es lo suficientemente robusto como para extraer todos estos cambios a partir de las señales de vibración captadas, el monitoreo de la salud estructural y la identificación de daños sería factible midiendo únicamente las vibraciones de la estructura (Liu-Kuan, 2013).

Se define las formas modales operacionales de una estructura como las obtenidas a partir de las vibraciones inducidas por cargas ambientales. En el caso de estructuras de puentes vehiculares, las vibraciones ambientales más frecuentes son las inducidas por la carga vehicular y la carga de viento.

4.3. Enfoques y frecuencia de monitoreo

En el caso de puentes nuevos, lo ideal es realizar un monitoreo y análisis modal una vez concluida la construcción de la obra, para obtener un marco de referencia. Posteriormente, realizar monitoreo periódico dependiendo de la importancia de la obra (por ejemplo, cada 2 años). Cambios importantes entre los parámetros modales obtenidos en el monitoreo del estado inicial y cualquier monitoreo posterior son indicativo de daño probable.

Lo anterior también es recomendable para puentes que han sido reforzados o rehabilitados, para generar un registro histórico de la estructura reforzada. También se podría realizar un monitoreo antes del inicio de las obras de rehabilitación para evaluar el efecto de los trabajos de reforzamiento.

En el caso de puentes existentes que no se cuenta con el monitoreo inicial después de finalizar la construcción, la única forma para poder evaluar el estado de puente y estimar su grado de deterioro es comparar con un modelo estructural analítico. La modelación con elementos finitos es generada con base en la información disponible del puente como planos y especificaciones, y el modelo resultante es considerado como la condición ideal y “sana” del puente.

Sin embargo, el método de los elementos finitos es un método numérico y acarrea por sí mismo errores de modelación. Por esta razón, deben ser examinados diferentes niveles de refinamiento del modelo analítico, y realizarse un estudio de sensibilidad y convergencia en cuanto a los parámetros modales analíticos para tomar en cuenta el nivel de incertidumbre incurrido en este método.

En todos los casos anteriores (puente nuevo, reforzado o existente) se recomienda realizar un monitoreo cada vez que la estructura se vea sometida a un evento extremo significativo como un sismo o una crecida del río.

4.4. Método de Identificación de Sistemas

Para la correcta identificación de los parámetros dinámicos del puente, es necesaria la utilización de una técnica de identificación. Como los parámetros dinámicos son obtenidos a partir de múltiples registros de señales de vibración, recolectados por un sistema de adquisición de datos que sincroniza los registros simultáneos de aceleración, la técnica de identificación debe ser robusta y capaz de discriminar las señales de ruido e interferencias presentes en los registros.

El método de Identificación Estocástica del Subespacio (Stochastic Subspace Identification, SSI por sus siglas en inglés) es un método de identificación de sistemas lineales en el dominio del tiempo que ha ganado territorio en el ámbito de ingeniería civil por su robustez y eficacia. El método cuenta con una base matemática rigurosa y experiencias exitosas de su aplicación a diferentes tipos de obras de infraestructura civil que se puede encontrar en numerosas publicaciones técnicas internacionales (Liu-Kuan, et. al., 2012; Weng, et.al., 2008; Loh, et. al., 2012; Wei-Xin, et. al., 2004; Peeters, 2000; Pridman & Wilson, 2002; Basseville, et. al., 2001; Giraldo, et. al., 2009; van Overschee & de Moor, 1996).

El Método Estocástico Subespacial parte desde la ecuación de movimiento de un sistema dinámico invariante en el tiempo:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}_2\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{F}(t) = \mathbf{L}\mathbf{u}(t) \quad (2.1)$$

donde \mathbf{M} , \mathbf{C}_2 and $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ son las matrices de masa, amortiguamiento y de rigidez respectivamente. Además

$\mathbf{q}(t) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de desplazamiento en tiempo continuo.

$\dot{\mathbf{q}}(t)$ es el vector de velocidad.

$\ddot{\mathbf{q}}(t)$ es el vector de aceleración con la misma dimensión que el vector de desplazamiento.

$\mathbf{F}(t) \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de la excitación externa.

$\mathbf{L} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ es la matriz de ubicación de entradas de excitación externa al sistema.

$\mathbf{u}(t) \in \mathfrak{R}^m$ es el vector que describe m entradas como función del tiempo t .

n es el número de los grados de libertad y m es el número de entradas.

La ecuación (2.1) puede ser discretizada en el tiempo y luego de una serie de manipulaciones matemáticas con la hipótesis de que al sistema no se le puede conocer las excitaciones de entrada pero que estas pueden ser asumidas como ruido blanco, se puede llegar al modelo conocido como “el Modelo Estocástico de Espacio de Estados en Tiempos Discretos”:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+l} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k\end{aligned}$$

Donde $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t) = [\mathbf{q}_k^T \quad \dot{\mathbf{q}}_k^T]^T$ es el vector del estado discreto que contiene los desplazamientos y velocidades muestreados (discretos) en el punto k , y Δt es el intervalo de tiempo en el muestreo. $\mathbf{y}_k \in \mathfrak{R}^l$ representa las l mediciones discretas (es decir, l sensores) de salida del sistema. \mathbf{A} es la matriz del sistema, \mathbf{C} es la matriz de observación en tiempos discretos, y $\mathbf{w}_k \in \mathfrak{R}^{2n \times 1}$ y $\mathbf{v}_k \in \mathfrak{R}^{l \times 1}$ son asumidos como un ruido espacialmente blanco de media cero. La relación que hay entre la matriz \mathbf{A} en tiempos discretos y las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la ecuación del movimiento en tiempo continuo es la siguiente:

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c \Delta t}, \quad \mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2n \times 2n}$$

donde \mathbf{I} es la matriz de identidad.

La matriz de observación \mathbf{C} en el caso de que sólo hay mediciones de aceleración y después de la conversión a tiempos discretos se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -\mathbf{C}_a \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{C}_a \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_2 \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^{l \times 2n}$$

donde $\mathbf{C}_a \in \mathfrak{R}^{l \times n}$ es la matriz de ubicación de los sensores de aceleración sobre los grados de libertad de la estructura en vibración.

Del análisis de valores propios (eigenvalores) de la matriz \mathbf{A} se puede extraer la información de las frecuencias naturales de vibración así como los amortiguamientos de los modos excitados durante las mediciones; mientras que de la matriz de observación \mathbf{C} multiplicada por los vectores propios (eigenvectores) de la matriz \mathbf{A} se obtendrá la forma modal operacional observada en los puntos de medición. Por esta razón, mientras mayor sea la cantidad de puntos de medición, más resolución espacial se dispone de la forma modal operacional experimental.

El método de Identificación de Subespacios Estocásticos que se llamará SSI de ahora en adelante, consiste en un algoritmo numérico de varios pasos que permite extraer de las múltiples mediciones simultáneas las matrices \mathbf{A} y \mathbf{C} , y luego de ellos, los parámetros modales de interés. El método SSI conducido por covarianzas (SSI-COV) es el método aplicado para el análisis de este puente y se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 1.

Como SSI-COV es un método numérico basado en descomposición matricial, en el proceso se podría generar polos numéricos complejos y se podría encontrar también modos debido a señales de ruido en los registros, así como, aquellos correspondientes a modos no bien excitados o modos transitorios. La herramienta usada comúnmente para discriminar los polos físicos de los polos espurios se denomina el diagrama de estabilización. Se puede encontrar un estudio a fondo del uso de esta herramienta en Loh et. al (2012).

El método SSI-COV junto con la implementación de diagrama de estabilización es programado en MATLAB y ha sido utilizado en diversos trabajos de investigación, tal como en el análisis modal operacional de la torre de televisión de Cantón (China) de 600 m de altura (Liu-Kuan, et.al., 2012; Loh, et. al. 2013), como en un puente de arco (Loh, et. al. 2012).

Tanto las frecuencias naturales y las formas modales experimentales obtenidas con SSI-COV podrían servir de indicadores para cuantificar el daño, el primero indica la severidad del daño y el segundo su ubicación, cuando pueden ser comparados con una referencia. Además, cualquier anomalía en las formas modales experimentales puede señalar directamente zonas de daño sin necesidad de una referencia. Para la comparación de formas modales, se utiliza el “criterio de aseguramiento modal” (Modal Assurance Criterion, MAC por sus siglas en inglés), que en palabras sencillas mide el grado de correlación que hay entre dos vectores de formas modales:

$$MAC(u, v) = \frac{|u^T \cdot v|^2}{(u^T \cdot u)(v^T \cdot v)} \quad (2.2)$$

donde u es el vector de forma modal experimental y v es el analítico.

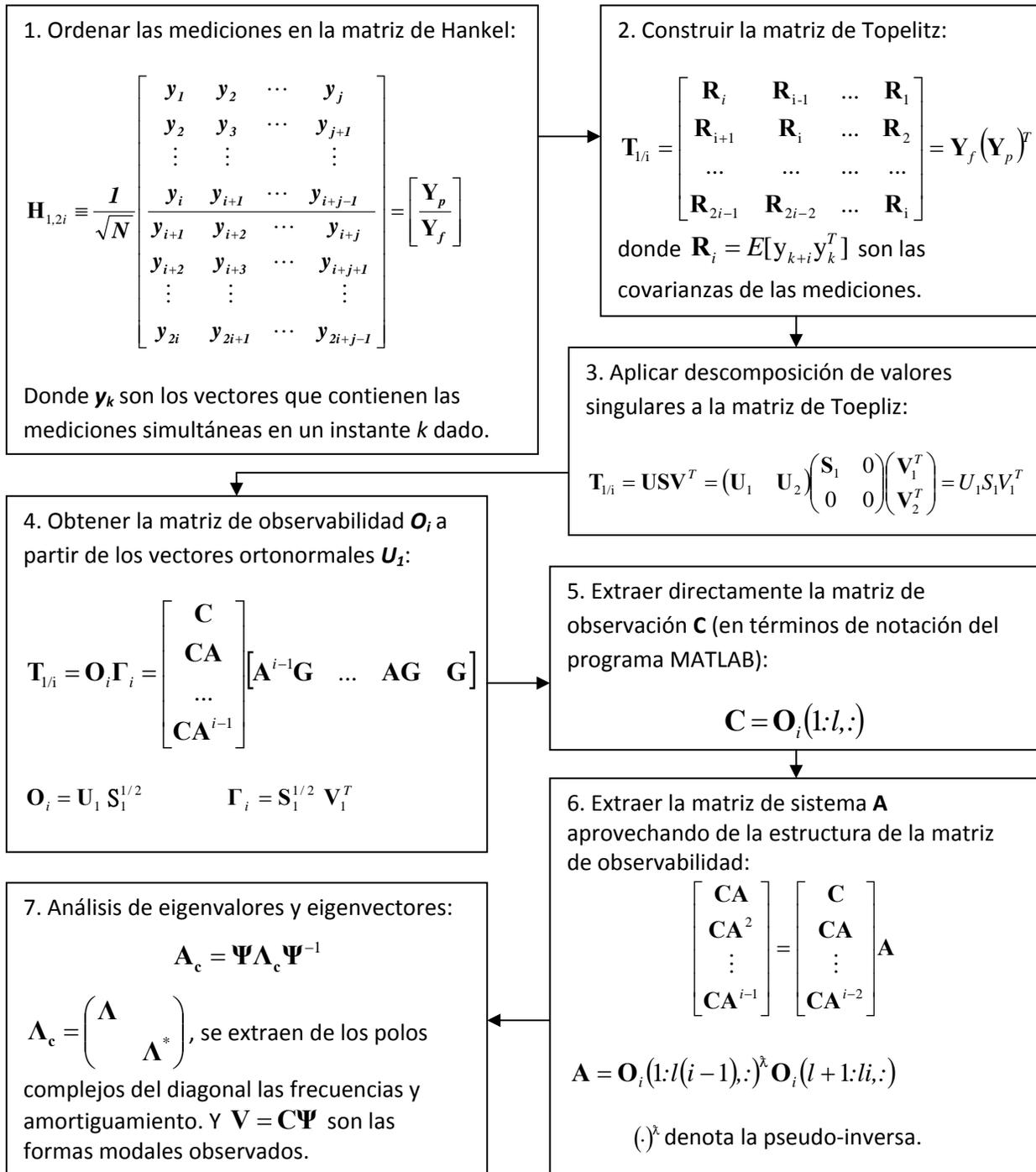


Figura 1. Diagrama de flujo del método SSI-COV

5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El puente monitoreado se ubica en la Ruta Nacional No.34 (Carretera Pacífica Fernández Oreamuno o Costanera Sur), en la sección de control 60170 y cruza el río Grande de Tárcoles. Desde el punto de vista administrativo, se ubica en el distrito Tárcoles, del cantón Garabito, en la provincia de Puntarenas. Sus coordenadas, en el sistema geográfico de ubicación, corresponden con: 9°47'56.6"N de latitud y 84°36'17.5" O de longitud. La figura 2 muestra la ubicación geográfica del puente.

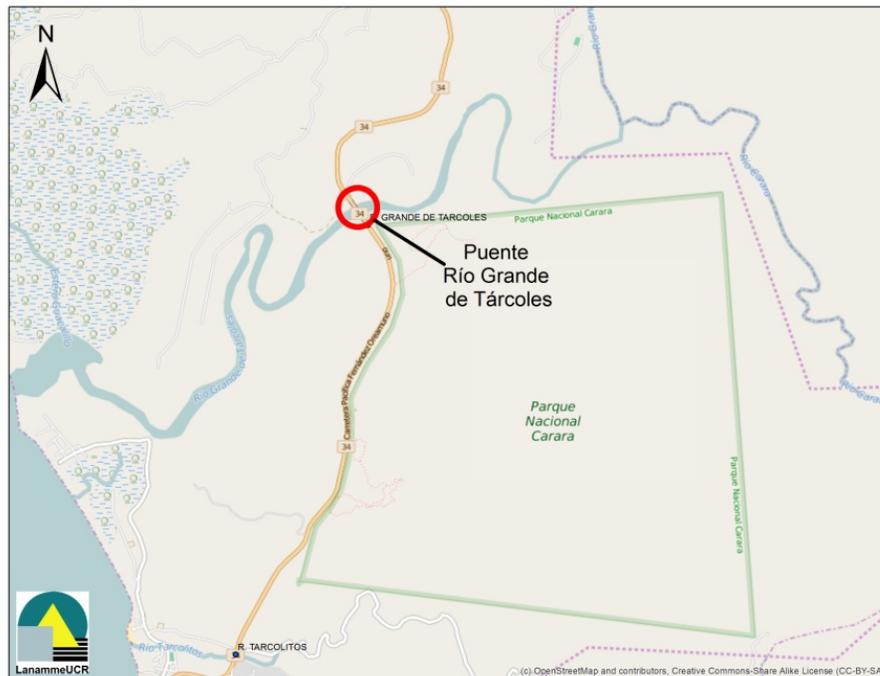


Figura 2. Ubicación del puente sobre el río Grande de Tárcoles.

La Tabla No. 1 resume las características básicas del puente y las figuras 3 y 4 presentan dos de las vistas principales del puente, la vista a lo largo de la línea de centro y una vista lateral respectivamente. La figura 5 muestra la identificación utilizada en este informe cuando se hace referencia a ciertos elementos del puente, la cual también coincide con la que se utiliza en los planos constructivos de 1974.

Informe No. LM-PI-UP-05-2016	Fecha de emisión: 26 de agosto de 2016	Página 18 de 47
------------------------------	----------------------------------------	-----------------

Tabla No. 1. Características básicas del puente.

Geometría	Tipo de estructura	Puente
	Longitud total (m)	341,4
	Ancho total (m)	10,08
	Ancho de calzada (m)	8,50
	Número de tramos	5
	Alineación del puente	Recta
	Número de carriles	2
Superestructura	Número de superestructuras	1
	Tipo de superestructura (elementos principales)	Superestructura tipo viga cajón continua de una celda de concreto preesforzado
	Tipo de tablero	Concreto (según planos el tablero es la losa superior del cajón)
Apoyos	Tipo de apoyo en bastiones	Bastiones 1 y 2: apoyos elastoméricos
	Tipo de apoyo en pilas	Pila 1, 2, 3 y 4: apoyos elastoméricos
Subestructura	Número de elementos	Bastiones: 2 Pilas: 4
	Tipo de bastiones	Bastiones 1 y 2, tipo marco de concreto reforzado
	Tipo de pilas	Pilas 1, 2, 3 y 4, tipo columna sencilla de concreto reforzado
	Tipo de cimentación	Bastiones 1 y 2: Tipo placa de cimentación sobre pilotes (según planos) Pilas 1, 2 y 3: tipo caisson (MOPT, 2007) o cilindro de concreto reforzado (según planos) Pila 4: Tipo placa de cimentación sobre pilotes (según planos)
Diseño y construcción	Año de diseño	1974
	Año de construcción	1978
	Especificación de diseño original	No se tiene información
	Carga viva de diseño original	No se tiene información
	Año de reforzamiento/rehabilitación	No se tiene información
	Especificación utilizada para el reforzamiento/ rehabilitación	No se tiene información
	Carga viva de diseño utilizada para el reforzamiento/ rehabilitación	No se tiene información



Figura 3. Vista a lo largo de la línea de centro.



Figura 4. Vista lateral.

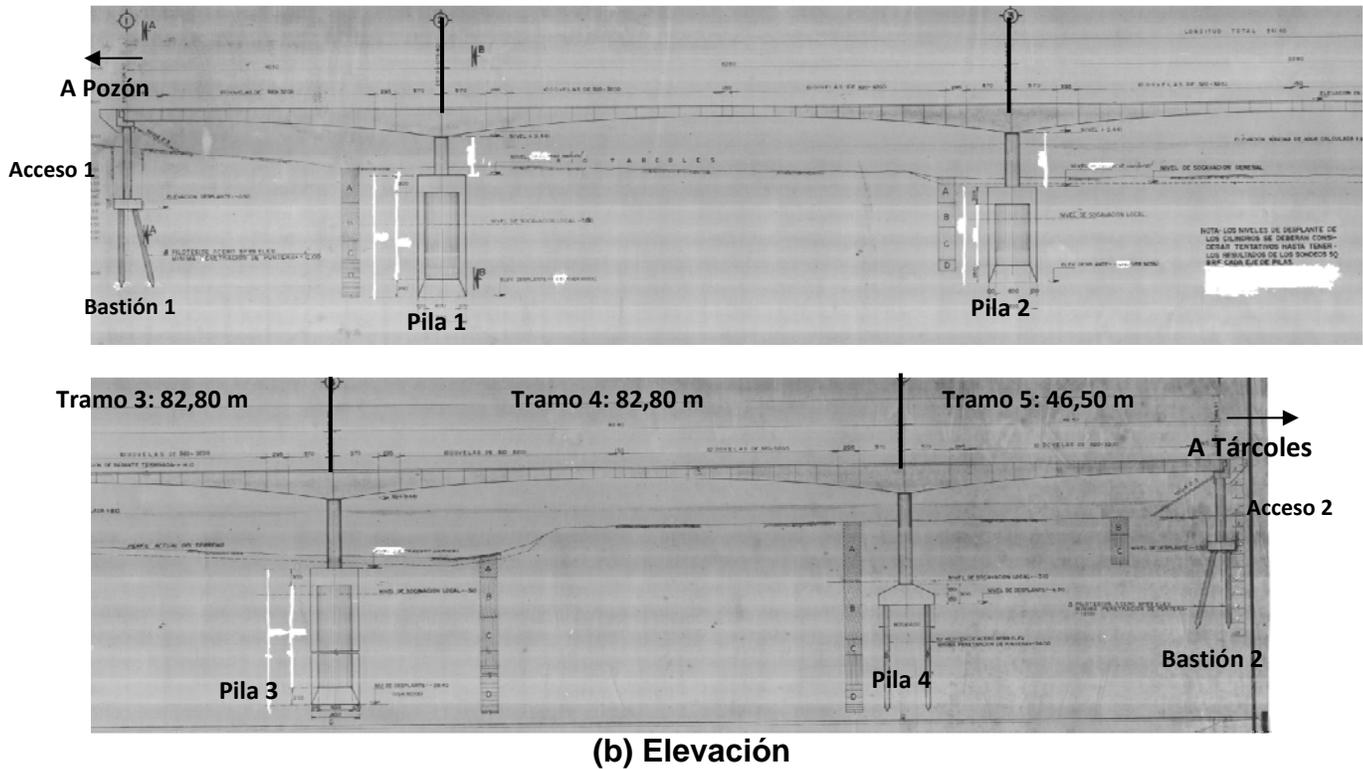


Figura 5. Identificación utilizada para el puente sobre el río Grande de Tárcoles.

6. ANTECEDENTES E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se cuenta con los planos del diseño original con fecha de diciembre de 1974. Los planos originales consisten en un juego de 19 láminas en total con los detalles constructivos los elementos estructurales del puente. No se cuenta con documentos relacionados con el proceso constructivo de la estructura ni con los planos como se construyó la obra (planos “as built”).

En el programa Sistema de Administración de Estructuras de Puentes del MOPT se puede acceder a la información de una inspección realizada el día 8 de junio del 2014 (MOPT,

2106). Dicha inspección se efectuó durante el contrato interadministrativo entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el CONAVI.

Otro antecedente de inspección del puente sobre el río Grande de Tárcoles se cuenta con la información de la inspección visual del puente presentada en el informe de fiscalización LM-PI-UP-PN01-2016 “Evaluación del la condición del Puente sobre el río Grande de Tárcoles Ruta Nacional No. 34” presentado por la Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR en abril del 2016 (Vargas-Alas; Villalobos-Vega, et. al., 2016). Dicha inspección fue realizada en febrero del 2016.

7. CONDICIÓN DEL PUENTE

En el informe LM-PI-UP-PN01-2016 (Vargas-Alas; Villalobos-Vega, et. al., 2016) se concluye que el estado del puente es ALARMENTE:

CATEGORÍA	CONDICIÓN	DESCRIPCIÓN	
		Integridad Estructural y Seguridad Vial	Necesidad de Atención
5	ALARMANTE	Situación crítica. La estabilidad del puente puede estar comprometida en un periodo de tiempo corto gracias a la progresión del daño. Procurar reparación o tratamiento inmediato para asegurar estabilidad y evitar daños irreversibles en los elementos	<u>Atención prioritaria.</u> Se debe señalar la condición estructural peligrosa del puente y los trabajos de reparación son prioritarios. Evaluar la capacidad estructural residual del puente para juzgar si es necesario restringir la carga permitida

debido a:

- a. La deformación permanente en los apoyos de las pilas del puente, el desprendimiento de láminas de refuerzo de acero en las pilas 1 y 3, y el aplastamiento de los apoyos de la pila 3.

También, se observaron los siguientes aspectos que indicarían una condición SERIA en el puente:

Informe No. LM-PI-UP-05-2016	Fecha de emisión: 26 de agosto de 2016	Página 22 de 47
------------------------------	----------------------------------------	-----------------

- b. El agrietamiento observado en las pilas y principalmente en la pila 3.
- c. Llave de corte sobre pila 3 con falla en el concreto por aplastamiento.
- d. Ausencia de acera y una gran cantidad de peatones observados durante las visitas al sitio durante el día, que podrían causar un accidente de tránsito sobre el puente.

En el informe LM-PI-UP-PN01-2016 (Vargas-Alas; Villalobos-Vega, et. al., 2016) se enumeran más daños observados durante la inspección visual del puente. En las figuras 6 y 7 se presenta, a modo de ejemplo, algunos de los daños observados en el puente.

En los Anexos del informe se incluye la información disponible en el SAEP (MOPT, 2016) sobre el estado del puente, la cual presenta la omisión de que no se inspeccionaron las pilas 2 y 3.

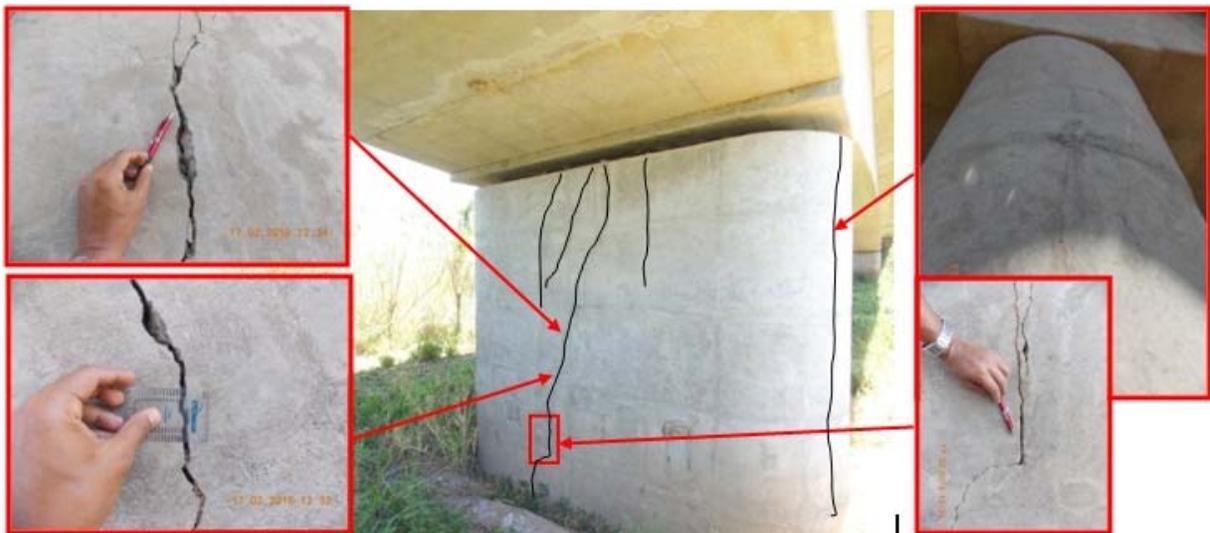


Figura 6. Agrietamiento y desprendimientos de concreto en cuerpo de pila 3



Figura 7. Apoyo sobre pila 3 con evidencia de falla por compresión, rotación y de cortante por deslizamiento entre capas

8. MÉTODO EXPERIMENTAL

A continuación se describirá de manera general el método experimental utilizado para realizar la prueba dinámica.

Se obtienen registros de aceleración inducida por las cargas operacionales sobre el puente en las direcciones vertical. En la figuras 8 y 12 se presenta la ubicación de sensores y unidades de adquisición de datos sobre las aceras del puente, sin interrupción del tránsito vehicular. En las figuras 9 y 10 se presenta la distribución de sensores colocados sobre la estructura del puente, para dos de las cuatro configuraciones utilizadas para monitorear toda la longitud del puente a manera de ejemplo.

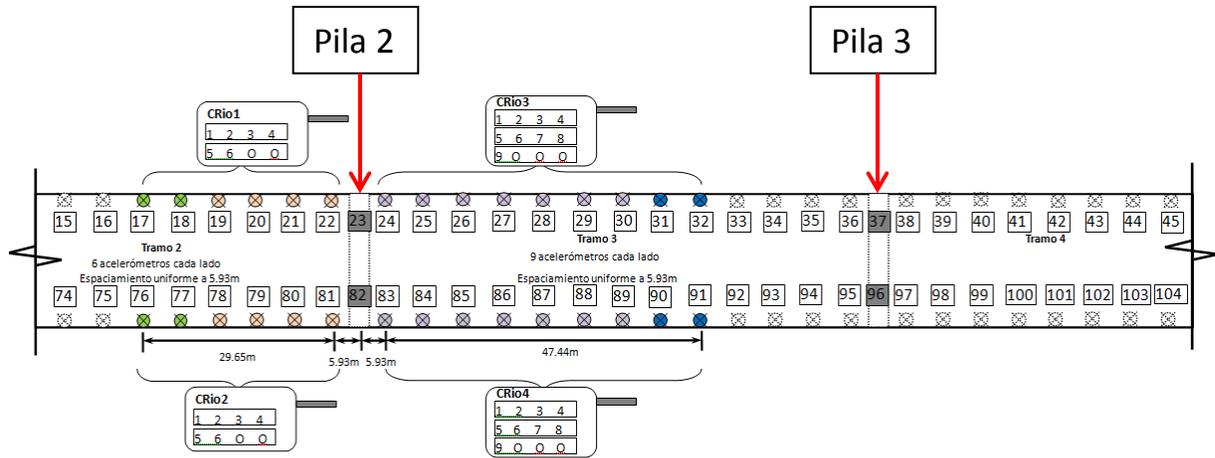


Figura 10. Distribución de sensores sobre el puente en la configuración 2

El sistema de adquisición de datos utilizado es un sistema portátil diseñado para monitoreo y evaluación de puentes sometidos a vibraciones, que consiste en 4 maletas que contienen en cada una de ellas una unidad de adquisición de datos con procesador en tiempo real, con sus módulos de GPS y de vibración, fuente de poder, y un nodo de señal inalámbrica para la comunicación entre el nodo de usuario y cada maleta.

Las unidades de adquisición de datos se comunican de forma inalámbrica con el nodo de usuario, mientras que los sensores lo hacen de forma cableada, siendo el sistema híbrido que se comunica cableado e inalámbricamente. Los datos capturados por las unidades de adquisición de datos son sincronizados por GPS, y el algoritmo de adquisición de datos y sincronización fue implementado y verificado previamente por el equipo investigador. La sincronización de los datos es esencial para poder implementar correctamente el método SSI, en la figura 22 se presenta un ejemplo de sincronización de datos de cuatro sensores de aceleración, conectados a las 4 unidades de adquisición independientemente e instalados en una estructura sencilla en oscilación libre en laboratorio para propósitos de validación del sistema (Liu-Kuan, et. al, 2015).

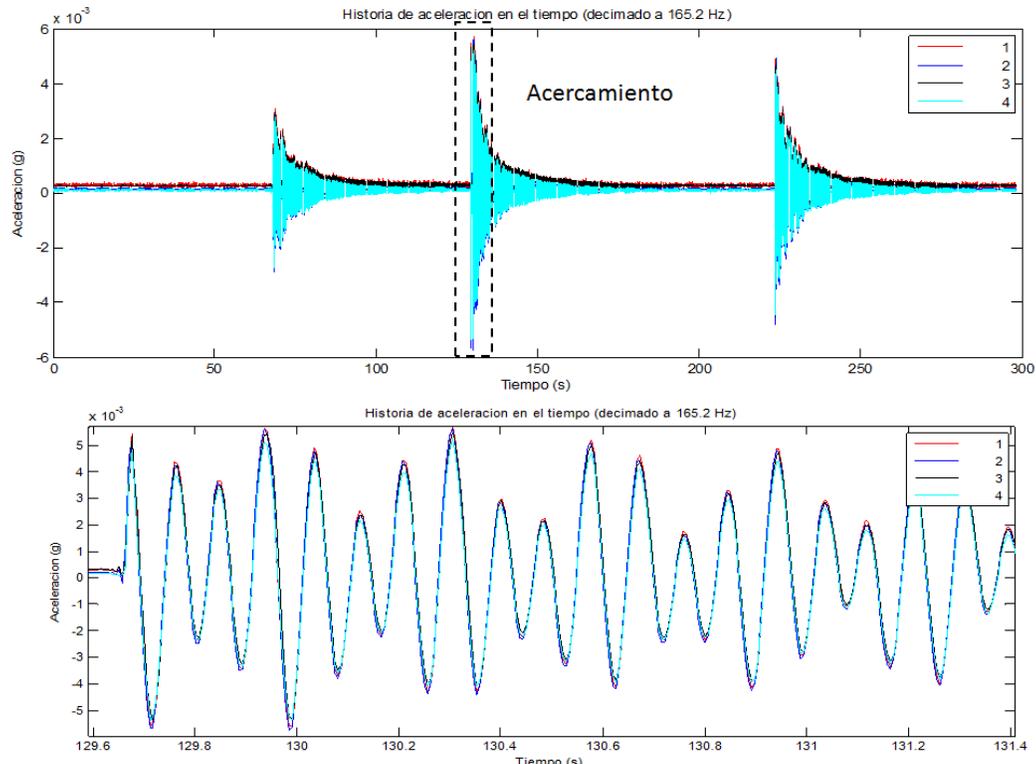


Figura 11. Registros de aceleración sincronizados de cuatro sensores de aceleración instalados sobre una estructura sencilla (Liu-Kuan, et. al, 2015).

La captura de datos se realiza por periodos definidos y divididos en bloques de 5 minutos para las cuatro configuraciones definidas y con el tránsito en operación (ver figuras 8, 9, 10 y 12). La tasa de muestreo en campo es de 1652 Hz (datos por segundo), y los datos obtenidos en campo son llevados a la oficina para su análisis, donde se obtienen las frecuencias y formas modales operacionales de la estructura. Los datos adquiridos deben ser revisados en forma exhaustiva canal por canal y pasar por filtros para estar en el rango de frecuencias que favorecen la identificación de los modos de vibración del puente. En caso de puentes con daños severos donde el comportamiento no-lineal inelástico es dominante, técnicas más avanzadas de pre-procesamiento puede ser requeridas para “linealizar” señales debido a la no-linealidad de la estructura y tratar de identificar un modelo “linealmente equivalente”.



Figura 12. Vista de superestructura con equipos sobre los bordillos. Nótese que el monitoreo no interrumpe el tránsito de vehículos.

Las frecuencias naturales de la estructura son determinadas a partir del diagrama de estabilización como el mostrado en la figura 13, a manera de ejemplo, el cual corresponde a la estructura sencilla utilizada en laboratorio (modelo de 3 pisos) para la validación de sistema de adquisición de datos. Únicamente aquellos modos (parámetros modales) que se estabilizan conforme aumenta el orden de la matriz de Toeplitz se tomarán en cuenta, caso contrario podría tratarse de modos transitorios o modos no bien excitados de los que no se obtendrá buena calidad y certeza en su identificación.

Además, en el fondo y superpuesto al diagrama de estabilización de la figura 13 se encuentra el resultado del método de “Descomposición en el Dominio de Frecuencias” (Frequency Domain Decomposition, FDD por sus siglas en inglés), el cual similarmente es un método de subespacios en el dominio de frecuencias que consiste en aplicar Descomposición de Valores Singulares de la matriz de densidad espectral cruzada. Los dos primeros valores singulares de la matriz descompuesta (representados con líneas azul y

verde) son graficados en conjunto con el diagrama de estabilización permitiendo así visualizar todavía mejor las señales adquiridas y sus componentes armónicos.

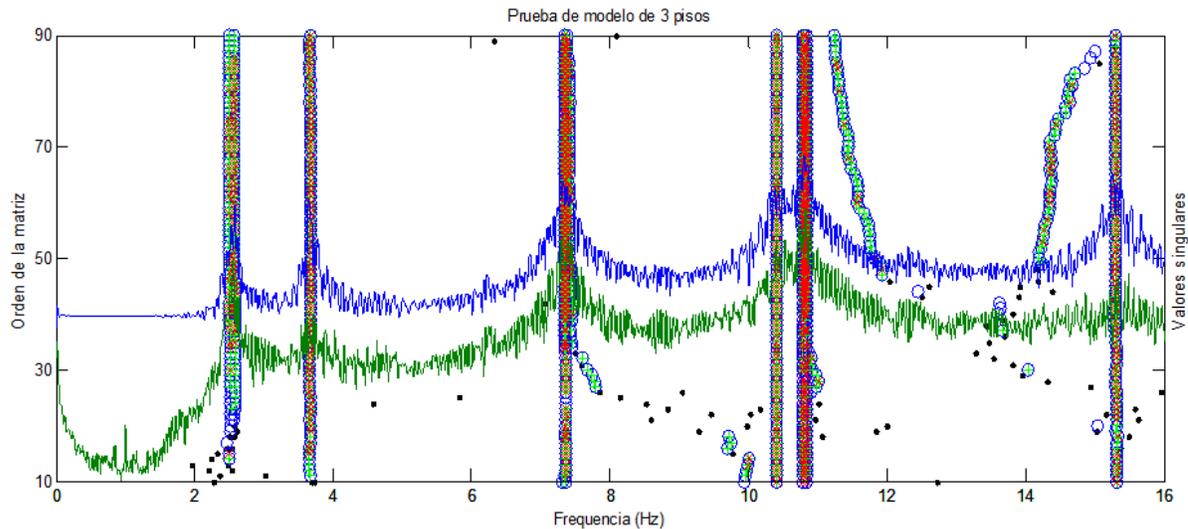


Figura 13. Diagrama de estabilización de frecuencias de una estructura sencilla (Liu-Kuan, et. al, 2015).

Cuando no se cuenta con mediciones experimentales del puente recién construido o en su estado “sano”, se tiene que adoptar un modelo analítico elástico de elementos finitos, construido con base en la geometría y especificaciones de los planos de construcción, como condición ideal para comparar con los resultados experimentales, y de esta forma localizar y cuantificar posible daño. Sin embargo, el método de los elementos finitos también podría acarrear error de modelación.

Una vez construido el modelo analítico, se procede a hacer análisis modal del modelo y comparar los resultados analíticos con las frecuencias y formas modales experimentales. Si se obtienen diferencias significativas entre los resultados experimentales y analíticos más allá del nivel de incertidumbre del modelado con elemento finito, es indicativo de daño en la estructura. Para determinar la pérdida en la rigidez de la estructura se debe “ajustar” manualmente el modelo de elementos finitos mediante la introducción de factores de reducción de la rigidez en diferentes regiones, hasta lograr minimizar el error que hay entre el modelo experimental y el modelo analítico. Este ajuste se realiza basado en criterios de

análisis estructural que permiten ubicar las zonas de mayor demanda de esfuerzos y por lo tanto, más propensos a daño. Finalmente, estos factores de reducción serían los indicadores del grado de daño que ha sufrido la estructura.

9. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 14 se presentan, a modo de ejemplo, los registros de aceleración vertical de 4 nodos del costado aguas arriba del puente en un periodo de 5 minutos, todos con la misma escala de aceleración, donde en el eje horizontal muestra el número de dato en el bloque y en el eje vertical se grafica la aceleración vertical en unidades de fracciones de la aceleración gravitacional “g”.

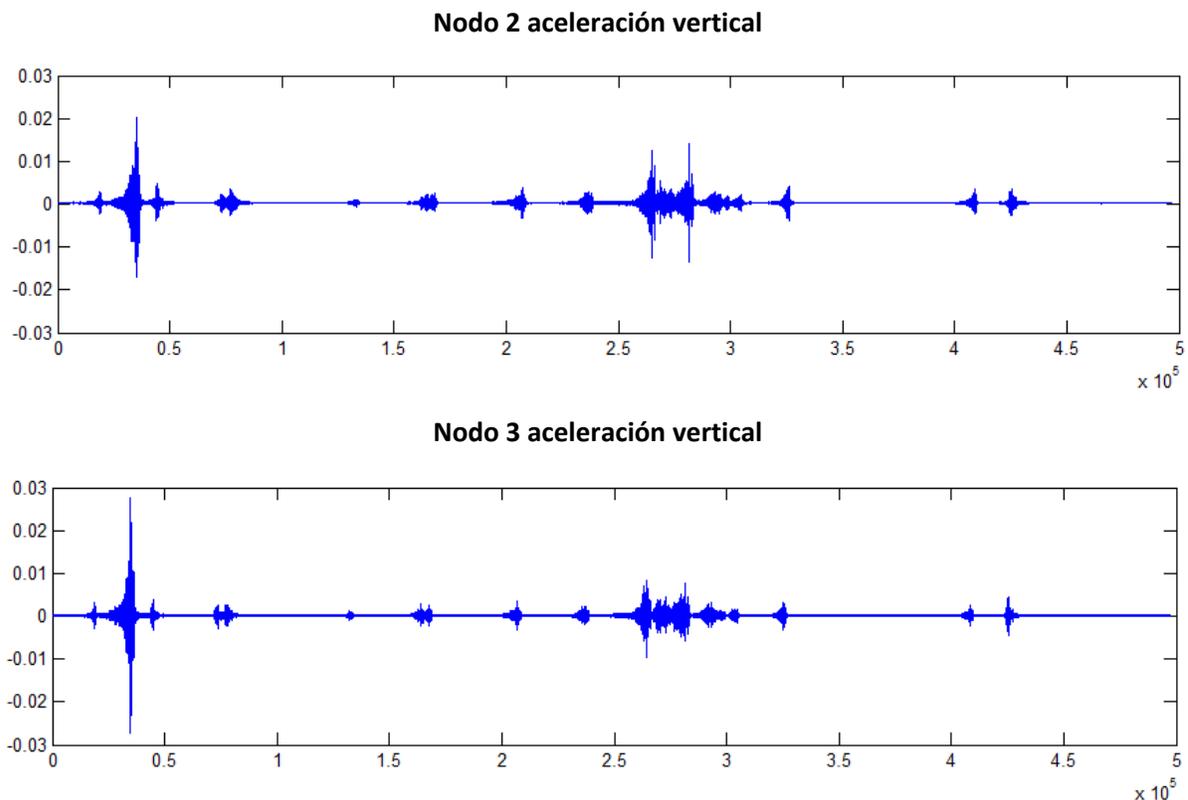
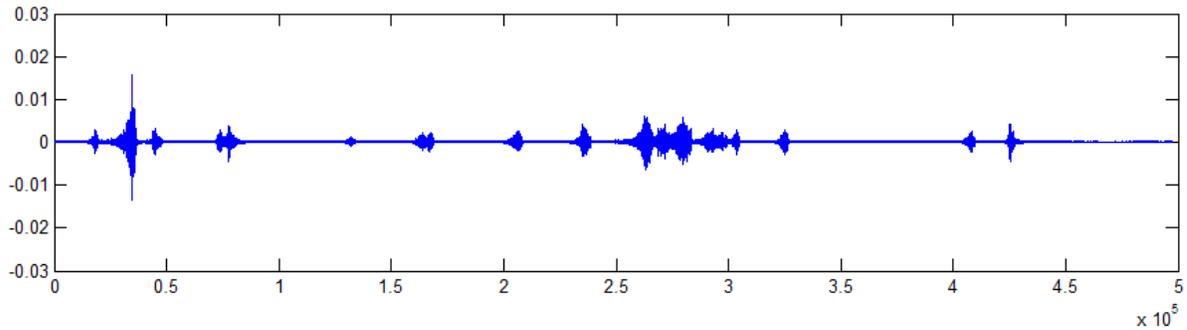


Figura 14. Registros de aceleración vertical del costado aguas arriba (config. 1 bloque 2).

Nodo 2 aceleración vertical



Nodo 3 aceleración vertical

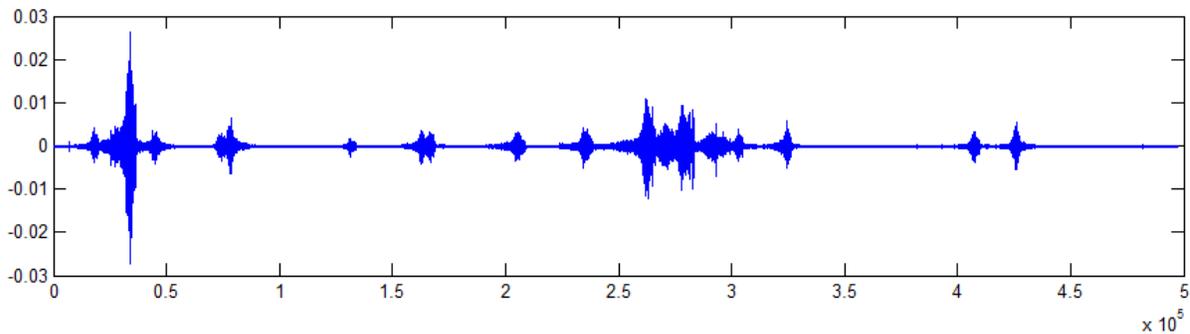


Figura 14 (continuación). Registros de aceleración vertical del costado aguas arriba (config. 1 bloque 2).

Cada bloque de 5 minutos de medición es utilizado como datos de entrada para el método SSI-COV. En la figura 15 se presenta el diagrama de estabilización resultado del análisis de distintos bloques de datos correspondientes a las 4 configuraciones (ver configuraciones 1 y 2 en las figuras 9 y 10), con una decimación de la frecuencia de muestreo hasta 8.26 Hz para facilitar la identificación de frecuencias bajas, y el orden del sistema a identificar se definió como 30. Adicionalmente, la figura 15 presenta los diagramas de Argand del primer modo identificado experimentalmente (modo 2), donde se puede observar que cada punto de observación de la forma modal operacional comparte casi la misma fase en el tiempo, permitiendo discriminar de modos locales, modos espurios y modos de transición.

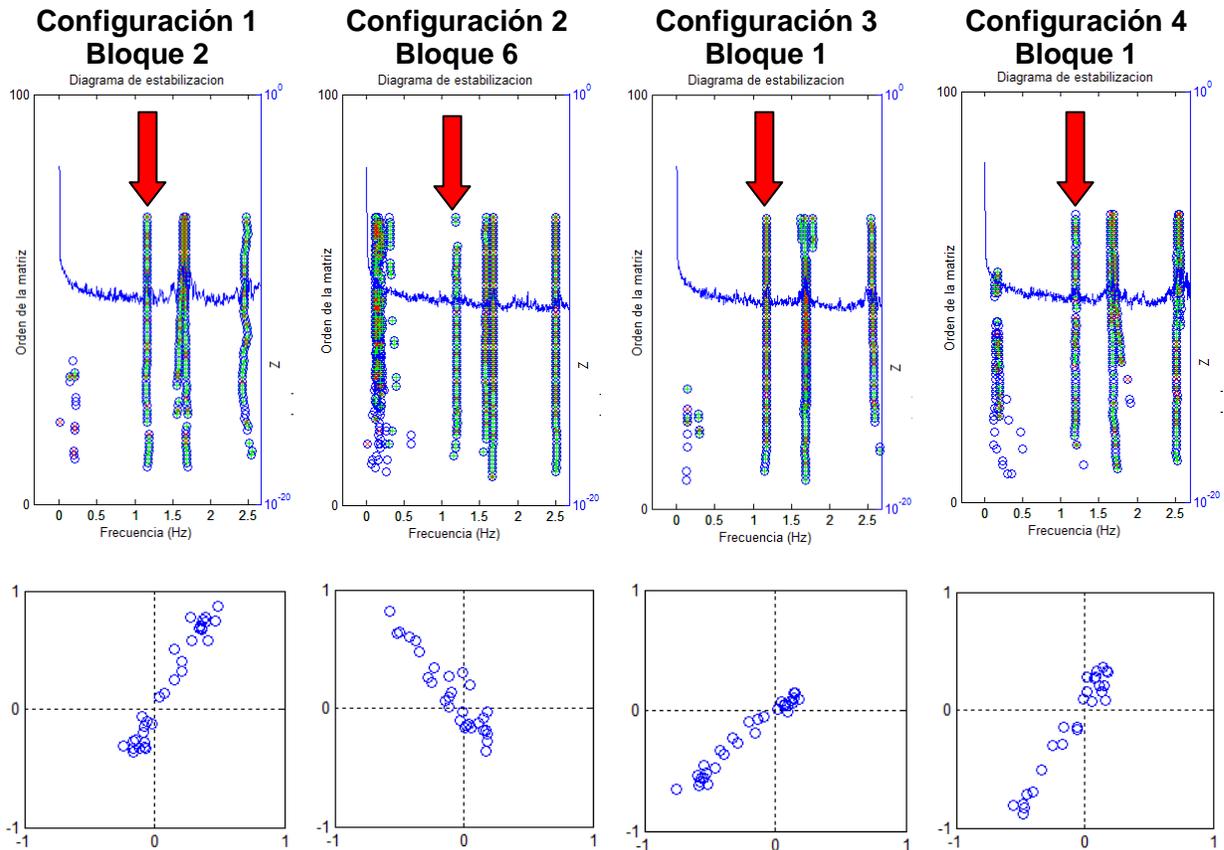


Figura 15. Diagramas de estabilización y de Argand correspondiente al modo 2, las flechas rojas indican el modo $f=1,1924$ Hz.

El criterio de estabilización utilizado para el análisis del puente sobre el río Grande de Tárcoles (Ruta No. 34) es considerar que las frecuencias son estables si existe menos de 1% de diferencia entre las calculadas por el orden de matriz $n-1$ y por el orden n , en cuanto a formas modales 3%, y con respecto a amortiguamiento 5%. Un círculo azul en el diagrama de estabilización indica modos con frecuencia estable; el círculo azul con una equis (x) roja indica que tanto la frecuencia como forma modal son estables; y si se tuviera, además de las anteriores, una cruz verde (+), indica que el amortiguamiento también es estable.

Debido a que no todos modos son excitados en un lapso de tiempo dado, se debe revisar todos los bloques de datos obtenidos en campo y discriminar los modos de acuerdo con su

frecuencia y forma modal, de forma que se puede obtener un rango de valores de frecuencias naturales obtenidas para un mismo modo. En la Tabla No. 2 se resume las frecuencias naturales identificadas. Nótese que dos de los modos identificados analíticamente con el modelo del elemento finito no fueron identificados de forma experimental. Lo anterior se debe a la aleatoriedad de las cargas que circulan sobre el puente en el momento de la toma de registros de datos de aceleración vertical. En el caso del modo de “flexión vertical 1” y “flexión vertical 6” no fueron identificados en ningún bloque analizado, mientras el modo “flexión vertical 8” fue identificado 20 veces pero únicamente en las configuraciones 1 y 2.

Tabla No. 2. Resumen de las formas modales operacionales identificadas.

MODO	Frecuencia (Hz)			Cantidad de veces identificado	Cantidad de configuraciones identificadas
	Mínimo (Hz)	Promedio (Hz)	Máximo (Hz)		
Flexión vertical 1	-	-	-	No	0
Flexión vertical 2	1,1616	1,1924	1,2737	20	4
Flexión vertical 3	1,6454	1,6770	1,7002	53	4
Flexión vertical 4	2,4534	2,5496	2,7568	49	4
Flexión vertical 5	2,8149	2,9162	3,0083	52	4
Flexión vertical 6	-	-	-	No	0
Flexión vertical 7	3,9242	4,0630	4,1449	35	4
Flexión vertical 8	4,4632	4,5448	4,6180	20	2

En la figura 16 se presenta las formas modales experimentales correspondientes a los diferentes modos de vibración identificados en las cuatro configuraciones en las que se muestreó datos de aceleración. En el caso del modo “flexión vertical 8” no se puede hacer un gráfico completo de la forma modal ya que sólo fue identificado en 2 configuraciones.

Cabe mencionar que las coordenadas de las formas modales experimentales de los nodos son extraídas directamente de los registros de aceleración por el método SSI-COV, no se

basa en un análisis con modelos analíticos, por lo tanto son uno de los resultados más importantes para la detección de daño.

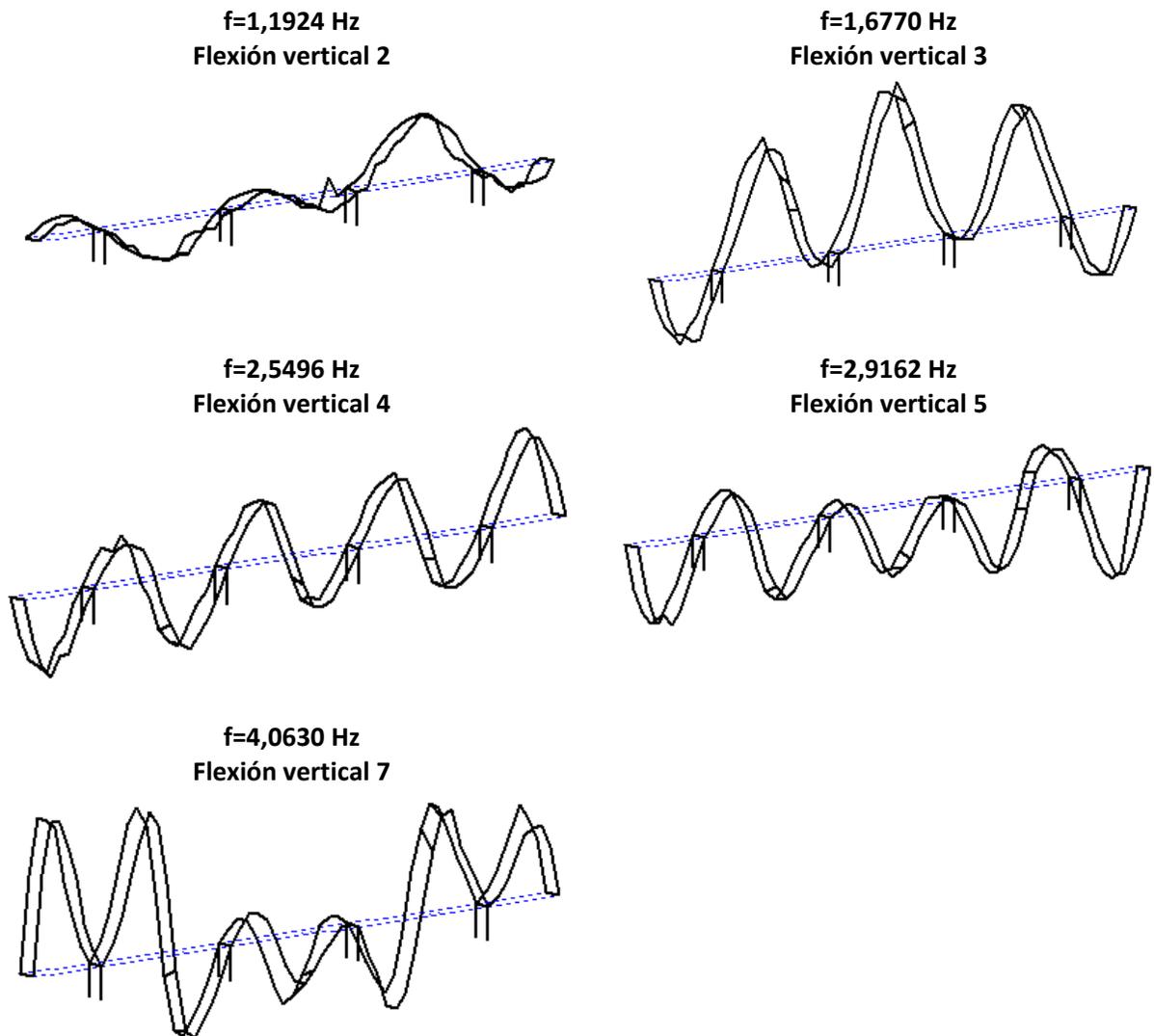


Figura 16. Formas modales experimentales identificadas.

10. RESULTADOS ANALÍTICOS

Con el fin de verificar los resultados experimentales y contar con una referencia adicional en el análisis de la superestructura del puente, se compararon los resultados de los parámetros modales obtenidos experimentalmente con los resultados obtenidos con base en modelos analíticos de la estructura.

Es importante indicar que se despreció aporte a la rigidez (aumento en momento de inercia de la sección transversal) de la carpeta asfáltica, únicamente se tomó en cuenta la masa de la misma para el análisis modal. Se despreció el aporte al momento de inercia de la sección del acero de postensión y del refuerzo normal y el aporte del concreto de la barrera vehicular. Por todas estas razones, se esperaría que las frecuencias naturales ideales del puente en su estado “sano” sean levemente mayores a las de los modelos analíticos.

El módulo de puentes del programa SAP2000 permite generar y discretizar la superestructura con la definición de una serie de parámetros de la sección transversal, variación del peralte y espesor de la losa, y la geometría de la misma, también permite diferentes niveles de detalle como modelar la superestructura como una viga espinal, utilizando elementos tipo “cascarón” (“shell” en inglés) y con elementos tipo “sólido” (“Solid” en inglés que consiste básicamente en elementos tetraédricos). En el caso de la subestructura es posible modelar únicamente con elementos tipo “marco” (“frame” en inglés).

En el caso la superestructura del puente sobre el río Tárcoles se construyó un modelo con elementos tipo barra, o sea un modelo espinal. Las propiedades mecánicas del concreto son determinadas con base en la resistencia a compresión a 28 días indicada en el plano de diseño. Se modeló la subestructura considerando las condiciones de apoyo de la superestructura sobre la subestructura. En la figura 17 se presenta el modelo analítico construido con el programa SAP2000.

La masa para el análisis modal de la estructura se basa en el peso propio de los elementos de concreto y la masa de la sobrecapa asfáltica suponiendo que ésta es uniforme a lo ancho de la calzada.

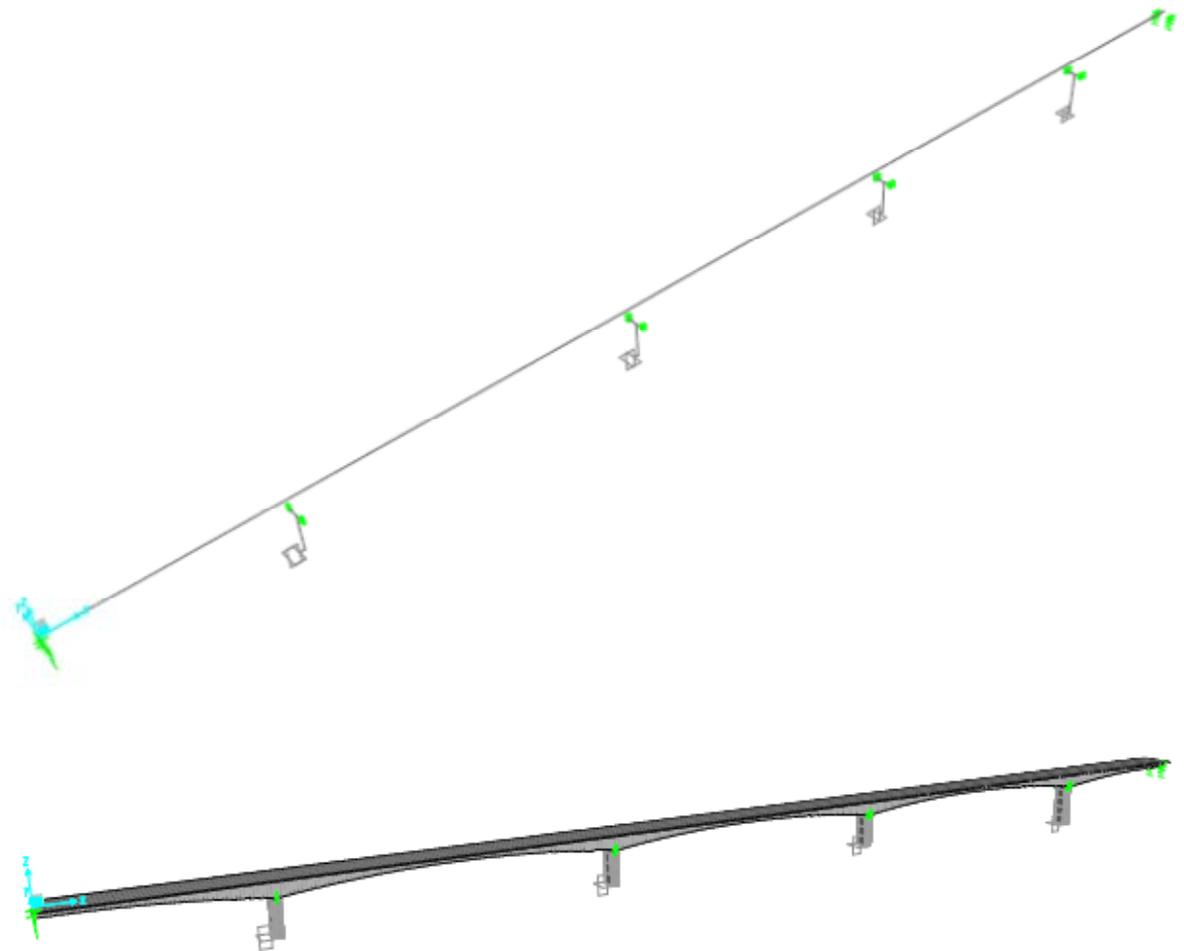


Figura 17. Modelo analítico espinal con elemento finito (arriba) y vista extruida (abajo).

En la tabla No.3 se presenta un resumen de las frecuencias correspondientes a los modos de vibración resultado del análisis con el método del elemento finito. Además se compara

Informe No. LM-PI-UP-05-2016	Fecha de emisión: 26 de agosto de 2016	Página 36 de 47
------------------------------	----------------------------------------	-----------------

con las frecuencias correspondientes a los modos experimentales presentados en la tabla No. 2, nótese que el máximo porcentaje de error de los valores de las frecuencias es de 9,35% correspondiente al modo de flexión vertical 4.

Finalmente, se presentan los valores del criterio de aseguramiento modal (MAC por las siglas en inglés de Modal Assurance Criterion) el cual es un valor que correlaciona las coordenadas modales de cada forma modal experimental identificada con la forma modal correspondiente determinada analíticamente con el método del elemento finito.

El valor del MAC puede variar entre cero, lo que indica que no existe correlación, hasta un valor de uno que implica una correlación total entre los modos analíticos y experimentales. En el caso del análisis realizado el menor valor del MAC presentado en la tabla 3 es de 0,901 para el modo de flexión vertical 7. En el caso del modo de flexión vertical 8 no se presenta el valor del MAC porque dicho modo solo fue identificado en 2 configuraciones por lo que no es posible calcular la forma modal completa.

Tanto los porcentajes de error de los valores de las frecuencias como los valores de MAC obtenidos se consideran aceptables por lo que los resultados experimentales y analíticos son indicativo del comportamiento dinámico del puente con las condiciones estructurales del día de la toma de datos.

Tabla No. 3. Resumen de las formas modales operacionales identificadas.

MODO	Frecuencia (Hz)			MAC Aguas arriba	MAC Aguas abajo
	Experimental (Hz)	Analítico (Hz)	Diferencia (%)		
Flexión vertical 1	-	0,7263	-	-	-
Flexión vertical 2	1,1924	1,1880	6,24	0,931	0,935
Flexión vertical 3	1,6770	1,5967	4,73	0,991	0,991
Flexión vertical 4	2,5496	2,3111	9,35	0,965	0,965
Flexión vertical 5	2,9162	2,8771	1,34	0,971	0,973
Flexión vertical 6	-	3,0896	-	-	-
Flexión vertical 7	4,0630	3,9435	2,94	0,922	0,901
Flexión vertical 8	4,5448	4,2394	6,72	-	-

En la figura 18 se presentan las formas modales analíticas obtenidas con el análisis con elemento finito correspondientes a las formas modales experimentales identificadas. En la figura 19 se presenta la comparación de las formas modales analíticas y experimentales normalizadas. La normalización de las formas modales permite identificar incongruencias entre los resultados analíticos y experimentales. En el caso de los gráficos de la figura 19 se puede observar que las coordenadas modales son del mismo orden de magnitud para todos los modos identificados.

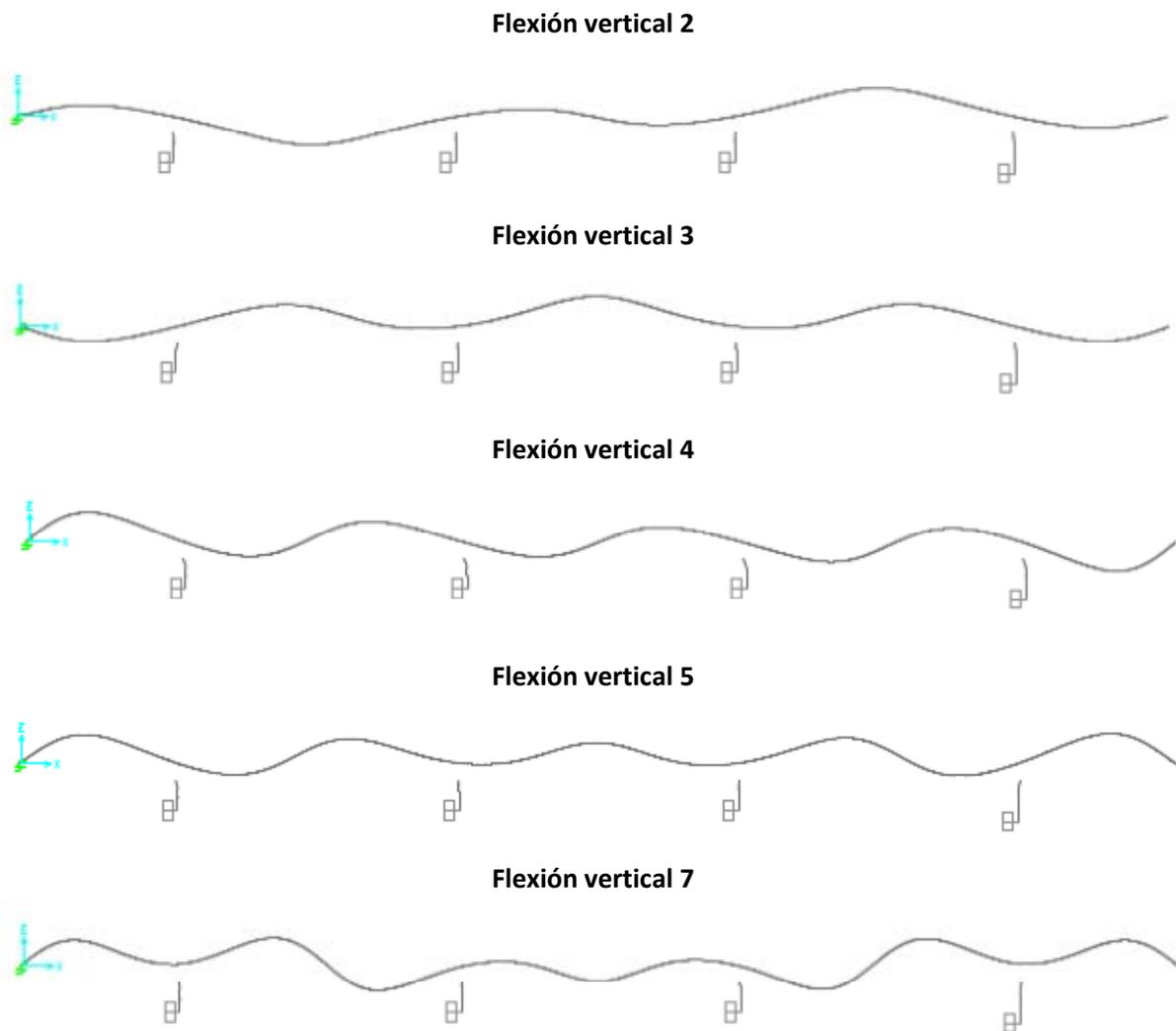


Figura 18. Formas modales analíticas.

Informe No. LM-PI-UP-05-2016	Fecha de emisión: 26 de agosto de 2016	Página 38 de 47
------------------------------	----------------------------------------	-----------------

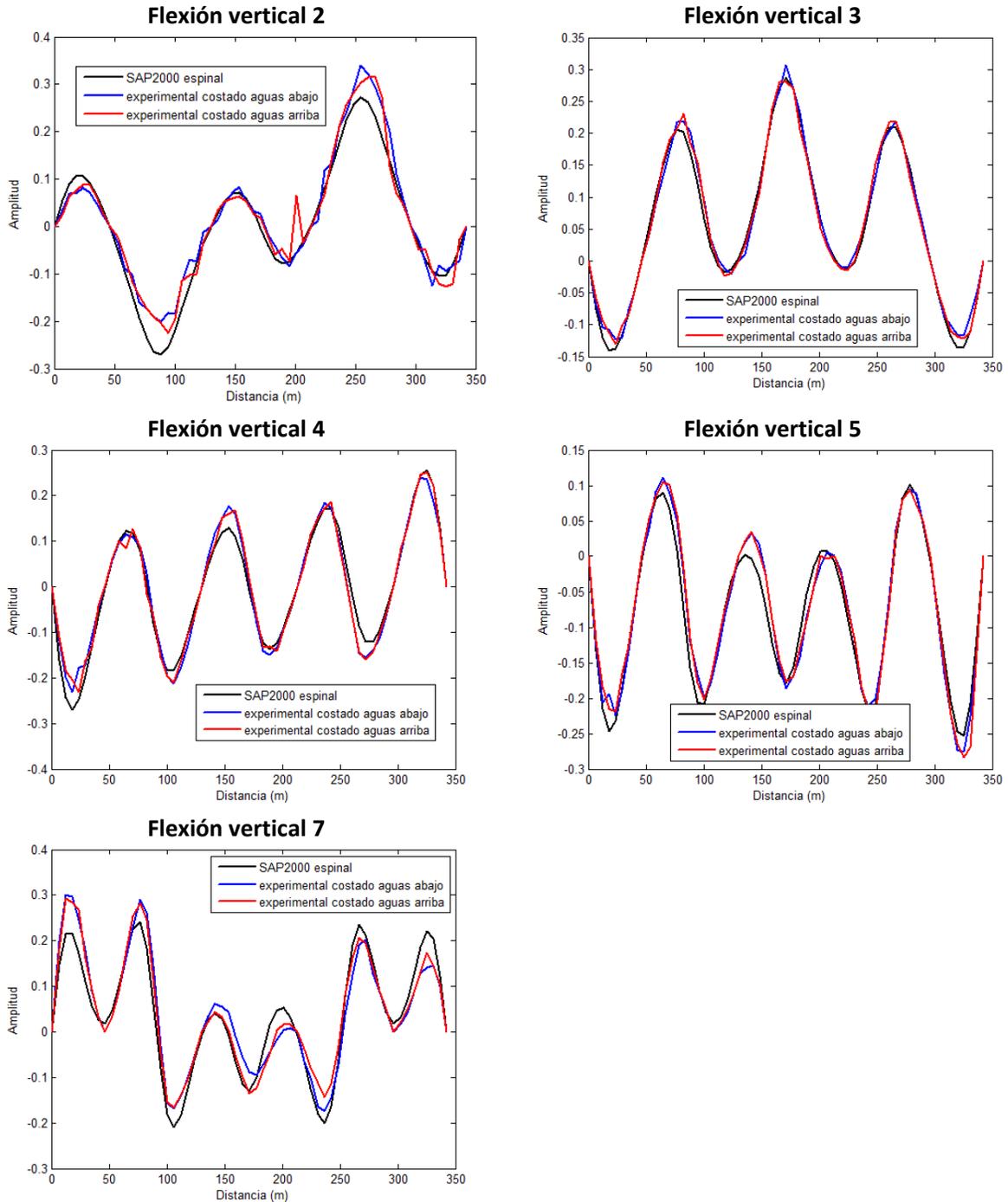


Figura 19. Comparación de las formas modales analíticas y experimentales, ambas normalizadas.

Los valores de las frecuencias obtenidas analíticamente son menores a los valores de las frecuencias obtenidas experimentalmente indicando que la estructura real es más rígida que la modelada con base en los planos de diseño. Debido a lo anterior, no se considera necesario realizar una calibración del modelo analítico para aumentar los valores del MAC y acercarlos a la condición de correlación total (MAC=1).

Al comparar las formas modales experimentales y analíticas se observan anomalías locales en el comportamiento de la estructura. Por ejemplo en el modo de flexión 2 costado aguas arriba se observa un comportamiento local en el tramo 3 cerca de la pila 3 (ver figura 20). Lo anterior puede atribuirse a contaminación con ruido en los datos de aceleración obtenidos en el sitio o a los daños observados durante la inspección visual presentados en el informe LM-PI-UP-PN01-2016.

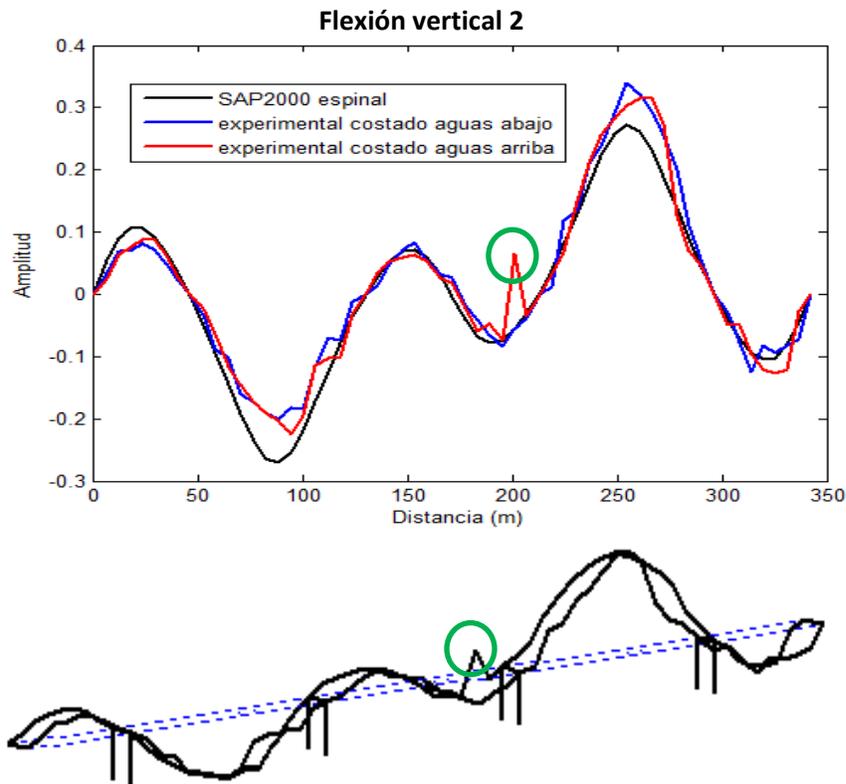


Figura 20. Anomalía local en el modo de flexión 2 ubicado en el tramo 3 costado aguas arriba.

En el resto de los modos se puede observar anomalías locales en el centro de la luz de los tramos 2, 3 y 4 (ver figuras 16 y 19).

Considerando el hecho de que las frecuencias modales experimentales son levemente mayores que las frecuencias analítica además de la concordancia entre las formas modales, los cuales indican que a nivel global la superestructura del puente no ha sufrido pérdidas significativas de rigidez y su comportamiento es cercano a la condición ideal del puente representado por el modelo de los elementos finitos. Sin embargo, la presencia de “picos” o cambios bruscos locales en la pendiente de la forma modal (la derivada de la pendiente de la deformada de la estructura corresponde a la curvatura, la cual es función de la rigidez de los elementos del puente) señalan posibles daños o fisuramientos, que en este caso, podrían

considerarse como daños menores dado que su grado de severidad (o el grado de pérdida de rigidez por la fisura) no ha llegado a reducir las frecuencias de oscilación por debajo de las de los elementos finitos. Sin embargo, es importante hacer una inspección visual detallada de las zonas donde se presenta los mencionados “picos” o cambios bruscos de pendiente en las formas modales en aras de hallar los fisuramientos correspondientes y proceder con la reparación de las mismas, para evitar que se infiltre agua por los mismos causando oxidación de las barras de refuerzo o de los tendones de postensión.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este informe se presentan los resultados del monitoreo de la superestructura del puente sobre el río Grande de Tárcoles ubicado en la Ruta Nacional No. 34 (Carretera Pacífica Fernández Oreamuno o Costanera Sur). Los resultados experimentales corresponden a una prueba de carga dinámica.

Con base en el análisis realizado y la información disponible se concluye lo siguiente:

- a. La Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR ha documentado varias deficiencias estructurales y en seguridad vial producto de la inspección visual del puente las cuales fueron comunicadas a la administración en el informe LM-PI-UP-PN01-2016. Los daños estructurales más significativos fueron observados en la **subestructura** del puente.
- b. Los resultados obtenidos tanto analítica como experimentalmente evidencian que la **superestructura** del puente no ha sufrido pérdida de rigidez importante con respecto a la condición ideal indicada en los planos de diseño.
- c. Las formas modales operaciones identificadas del puente evidencia anomalías modales puntuales atribuibles a agrietamiento en la superestructura tipo viga cajón observado durante la inspección visual de la estructura.

Por lo tanto, con el propósito de mejorar el estado de conservación de la estructura se recomienda a la Administración realizar las siguientes acciones:

1. Atender las recomendaciones del informe de inspección visual LM-PI-UP-PN01-2016 presentado por la Unidad de Puentes del LanammeUCR.
2. Realizar inspecciones visuales periódicas a la estructura mientras se realiza una intervención definitiva.
3. Realizar una prueba de carga dinámica después de que se hayan realizado las reparaciones indicadas anteriormente.

4. Realizar monitoreo periódico del puente con pruebas de carga dinámica. Si el puente es rehabilitado realizar una prueba de carga dinámica para establecer un punto de referencia que permita cuantificar el deterioro de la estructura mediante monitoreo estructural periódico.
5. Establecer un programa de mantenimiento que incluya entre otras labores la inspección periódica de la estructura realizada por profesionales expertos en puentes. Dicho programa debería incluir entre otras labores: mantenimiento de la demarcación vertical y horizontal, limpieza de bordillos, aplicación de un sistema de protección contra la corrosión, mantenimiento de juntas de expansión, mantenimiento de los apoyos, etc.

12. REFERENCIAS

1. Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., Shevitz, D. W. "Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review". LA-13070-MS Los Alamos National Laboratory (LANL).
2. Lui-Kuan, Y.C., Castillo-Barahona, R., Loria-Salazar, L.G. "Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de Instrumentación Inalámbrico". LM-PI-UP-02-2013. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Febrero, 2013.
3. Liu, Y.C.; Loh, C.H.; Ni, Y.Q. "Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition". Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 42:477-498. Wiley Online Library. June, 2012.
4. Weng et al. "Output-only modal identification of a cable-stayed bridge using wireless monitoring systems". Engineering Structures 30 (2008) 1820–1830.
5. Chin-Hsiung Loh, Ming-Che Chen and Shu-Hsien Chao. "Stochastic subspace identification for operational modal analysis of an arch bridge". Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, 834504 (April 26, 2012); doi:10.1117/12.912514.
6. Wei-Xin Ren and Zhou-Hong Zong. "Output-only modal parameter identification of civil engineering structures". Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4 (2004).
7. Peeters, Bart. "System Identification and Damage Detection in Civil Engineering". Ph.D. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven, December 2000.
8. Brad A. Pridham & John C. Wilson. "Subspace Identificación of Vincent Thomas Suspension Bridge". IMAC-XX: A Conference on Structural Dynamics, 2002
9. Basseville M., Benveniste A., Goursat M. "Output-Only Subspace-Based Structural Identification: From Theory to Industrial Testing Practice". Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 123, December, 2001.

10. Giraldo, Diego F.; Song, Wei; Dyke, Shirley J.; and Caicedo, Juan M.. "Modal Identification through Ambient Vibration: Comparative Study". J. Engrg. Mech. 135, 759 (2009).
11. Van Overschee, P. and De Moor, B. "Subspace Identification for Linear Systems: Theory - Implementation - Applications". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.
12. Chin-Hsiung Loh, Yi-Cheng Liu, Yi-Qing Ni. SSA-based stochastic subspace identification of structures from output-only vibration measurements. Smart Structures and Systems, Vol. 10, No. 4-5 (2012) 331-351.
13. Chin-Hsiung Loh, Yi-Cheng Liu, Tzung-Han Wu, Yi-Qing Ni. Variation of Modal Parameters of Canton Tower Under Different Earthquake excitations. Proceedings of the 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Hong Kong, 9-11 December 2013
14. Collins, M.P., Mitchell, D. "Prestressed Concrete Structures". Response Publications, Ontario, Canada, 1997.
15. Sauvageot, G. "Segmental Concrete Bridges". Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. CRC Press, Boca Raton, 2000.
16. Takács, P.F. "Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling". Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, The Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway, March, 2002.
17. Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. "Código Sísmico de Costa Rica (2002)". Editorial Tecnológica de Costa Rica. Tercera Edición, 2003.
18. Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica. "Lineamientos para el diseño Sismorresistente de Puentes". Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, UCR. 2013.
19. AASHTO. "The Manual of Bridge Evaluation". Second Edition. Washington, DC. 2011.

20. Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema de medición de desplazamiento en tiempo real mediante técnicas de procesamiento de imágenes digitales LM-PI-UP-06-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
21. Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Desarrollo y validación de un sistema portátil de monitoreo y evaluación de puentes LM-PI-UP-07-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
22. Lui-Kuan, Y.C, Agüero-Barrantes, P., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Monitoreo estructural de la superestructura No.2 del puente sobre el río Virilla Ruta Nacional No. 32 LM-PI-UP-PN12-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
23. Agüero-Barrantes, P., Lui-Kuan, Y.C, Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L.G. (2015). *Monitoreo estructural del puente sobre el río Seco Ruta Nacional No.1 LM-PI-UP-PN20-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
24. Muñoz-Barrantes, J., Vargas-Alas, L. G., Vargas-Barrantes, S., Agüero-Barrantes, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., et al. (2015). *Actualización de los criterios para la evaluación visual de puentes LM-PI-UP-05-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
25. Vargas-Alas, L. G., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., Loria-Salazar, L. G., et al. (2016). *Evaluación de la condición del puente sobre el río Grande de Tárcoles Ruta Nacional No. 34 LM-PI-UP-PN01-2016*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
26. MOPT. *Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP)*. http://saep.conavi.go.cr:9080/SAEP_CONAVI_Web/login.faces. Consulta del día 31 de marzo del 2016.