

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES PARA LA EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS

Ruiz, Miguel E. y Cocco, Leonardo J.
Ingenieros Civiles

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
mruiz@efn.uncor.edu; lcocco@efn.uncor.edu

RESUMEN

Es conocida la importancia de evaluar el estado de conservación de estructuras con el objeto de realizar diagnósticos acertados y programar actividades de mantenimiento de manera eficiente. En este sentido, se han desarrollado diversas técnicas y equipos que permiten evaluar y monitorear el comportamiento de las estructuras. Dentro de las estructuras civiles se destacan los puentes, ya que presentan un elevado valor socio-económico debido a que son esenciales para la integración de una región y son obras de arte con elevado costo de construcción y reposición. Es por ello que se presta particular atención al estado de conservación de puentes a través de relevamientos y ensayos no destructivos que permiten inferir su estado de conservación. Entre esos ensayos se destacan los ensayos de carga dinámica, mediante el cual se miden las frecuencias naturales del tablero lo que permite evaluar su integridad a través de la comparación de los registros del ensayo con modelos teóricos. Sin embargo, los equipos requeridos para estos ensayos suelen ser costosos y de difícil adquisición en nuestro medio, por lo que se dificulta la aplicación general de esta técnica. Esta coyuntura motivó el desarrollo y construcción de un equipo de medición de aceleraciones de bajo costo y su implementación se llevó a cabo en el relevamiento de pasarelas peatonales de la Ciudad de Lima.

En este artículo se describe el equipo desarrollado y un caso de aplicación en donde se utilizó exitosamente. Los resultados de los ensayos se comparan con los obtenidos de modelos numéricos elaborados sobre la base de un relevamiento geométrico de la estructura.

ABSTRACT

Is a well-known fact the importance of evaluating the condition of a structure as a means to make accurate diagnoses and schedule maintenance activities efficiently. Regarding to that, various techniques and equipment to evaluate and monitor the behavior of structures have been developed. Within civil structures, bridges are considered very important assets, since they have a high socio- economic value.

They are essential for the integration of a region and present high cost of construction and replacement. This is one of the reasons that have motivated the development of different non-destructive tests used to evaluate the structure condition and monitoring its evolution with time. Dynamic load tests stand among others tests because of its simplicity, useful, and accurate results. The objective of dynamic tests is to determine the natural frequencies by registering deck free vibrations mobilized by applying small impact loads on specific locations along the deck. The assessment of its condition is performed by comparing field measurements to theoretical results (typically from numerical models of the bridge deck). However, the equipment required for these tests is costly and difficult to acquire, so the technique is not broadly used in our country. This situation motivated the development and construction of a low cost equipment for measuring accelerations to be used for the evaluation of bridge decks.

In this article, the developed equipment and its implementation to evaluate the condition of a pedestrian bridge are described. The test results are compared with those obtained from numerical models of the bridge.

INTRODUCCIÓN

La Ruta Panamericana atraviesa la ciudad de Lima en dirección Norte – Sur en un recorrido aproximado de 90 km. A lo largo de este recorrido, pueden observarse numerosos puentes vehiculares y peatonales cuyo uso es intensivo debido a la importante densidad poblacional de la ciudad y barrios aledaños.

Los puentes vehiculares y peatonales que se observan presentan distintas tipologías. Los puentes vehiculares observados fueron puentes de vigas de hormigón postesado y puentes losa, mientras que entre los puentes peatonales se encontraron puentes de vigas metálicas de alma llena, puentes de vigas de hormigón postesado, y puentes de vigas metálicas reticuladas. Todas estas obras de arte carecen de información básica como memoria de cálculo, estudios básicos, o planos conforme a obra. Esta falta de documentación motivó la ejecución de un relevamiento exhaustivo con el objeto de levantar la información requerida para evaluar en forma completa las estructuras.

De acuerdo a lo anterior, se propuso evaluar los puentes vehiculares y peatonales utilizando una metodología desarrollada en Argentina y ampliamente aplicada a diversas tipologías de puentes en ese país. Esta metodología se encuentra dentro del Sistema de Gerenciamiento y Mantenimiento de Puentes de la Dirección Nacional de Vialidad y puede encontrarse una descripción breve en Ruiz et al. (2013).

La primera parte del estudio se llevó a cabo durante los meses de octubre y noviembre de 2013 y abarcó el relevamiento, ensayos y evaluación de 13 puentes peatonales y 8 puentes vehiculares en un trabajo en conjunto de la firma Alamo Consult (Lima, Perú) y GCIS (Córdoba, Argentina) y de la cual participaron profesionales de la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú) y de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina). El resultado principal de este estudio fue una serie de informes de evaluación de las obra de arte estudiadas.

En este artículo se presentan los principales aspectos de las tareas desarrolladas, se describe la metodología aplicada y se ofrece a modo de ejemplo un caso de estudio resumido que permite apreciar los resultados que se obtienen y su importancia para la evaluación del estado de las estructuras.

ENSAYOS DE CARGA DINÁMICA

Los ensayos de carga dinámica se han utilizado en los últimos años en numerosos países en todo el mundo, para estudiar estructuras de puentes entre otras. A pesar de ello, la técnica sigue siendo objeto de numerosas investigaciones y se ha extendido al estudio de otras estructuras civiles (Cunha y Caetano, 2006). De acuerdo a la experiencia de los autores, la técnica del ensayo de carga dinámica ha penetrado en la práctica profesional de Sudamérica, aunque puede considerarse que aún se encuentra en etapa de desarrollo, principalmente debido a dos factores importantes. Uno de estos factores es la falta de conocimiento acabado de la técnica en los profesionales de nuestro medio (el tema puede considerarse avanzado para

ser incluido en cursos de grado de carreras de ingeniería). Esto hace que la técnica genere cierta desconfianza entre los profesionales de nuestro medio, debido a que no se conoce su precisión, validez, alcances o importancia. En contraste con esto los profesionales que se han involucrado en su estudio y aplicación promueven enfáticamente la técnica y su aplicación en actividades de rutina.

El otro factor que podría explicar el retraso en la implementación habitual de esta práctica es la falta o dificultad de disponer del equipamiento requerido. Debe señalarse en este punto que los equipos suelen ser importados, requieren de cierto mantenimiento, y es necesaria alguna capacitación para su uso. Además de ello, la interpretación de los resultados y su utilización correcta requiere del conocimiento de técnicas de procesamiento de señales y de dinámica estructural que normalmente no se enseñan en los cursos de grado estándar de las universidades de nuestro medio.

Estas consideraciones motivaron a los profesionales involucrados en este estudio a desarrollar un equipamiento de bajo costo y fácil utilización para la implementación de los ensayos de carga dinámica. El equipo y la técnica de ensayo se describen brevemente en este apartado. Una descripción más detallada puede encontrarse en Ruiz et al. (2013).

Ensayo de carga dinámica

El estudio de un puente mediante ensayos de carga dinámica se puede sintetizar en los siguientes pasos:

1. Diseño del ensayo: el primer paso consiste en analizar la estructura luego de una inspección ocular preliminar con el objeto de establecer la disposición de los sensores en el tablero, ubicar los puntos donde se ejecutarán los impactos, y evaluar la respuesta que puede esperarse de la estructura. En general se materializa en un documento llamado “protocolo de ensayo”.
2. Ejecución del ensayo: consiste en llevar a cabo el ensayo de acuerdo a los lineamientos establecidos en el punto anterior.
3. Procesamiento e interpretación de los resultados del ensayo: los resultados de las mediciones almacenadas se procesan en gabinete y se extrae la información relevante para su posterior análisis.
4. Elaboración y calibración de modelo numérico de la estructura: como se indica en Ruiz et al. (2013) el ensayo debe complementarse mediante modelos numéricos de las estructuras a estudiar. En este paso se elabora el modelo de la estructura a partir de planos de la estructura (si están disponibles) o del relevamiento geométrico de la misma. El modelo se calibra para representar adecuadamente el comportamiento dinámico de la estructura registrado durante el punto 2.
5. Evaluación de resultados: Los resultados de los puntos 2 y 4 se estudian en conjunto para arribar a conclusiones sobre el estado de conservación de

la estructura.

Para el caso concreto de relevamiento y evaluación de puentes en Ruta Panamericana se elaboró un protocolo de ensayo para todos los puentes peatonales y otro para los puentes vehiculares. Esta simplificación se llevó a cabo luego de una inspección inicial de las estructuras en donde se encontró que las características generales de estos dos grupos de obras de arte son relativamente uniformes y podían abordarse mediante una metodología en general similar. Más adelante en este artículo se ofrece la descripción detallada de un caso de estudio en donde se describen los cinco pasos señalados.

Equipamiento para el ensayo dinámico

Generalidades

Tal como se señalara anteriormente, el equipamiento para la ejecución de los ensayos de carga dinámica suele ser costoso y requiere de cierto entrenamiento para su uso. Debido a ello, se desarrolló un equipo propio que permite ejecutar el ensayo de carga dinámica, registrar los resultados y almacenarlos para su posterior procesamiento e interpretación.

En términos generales, el conjunto de instrumentos para la ejecución del ensayo de carga dinámica puede dividirse en dos partes: i) equipos para generar la excitación y ii) equipos para registrar la respuesta del puente.

El dispositivo para generar la excitación se ilustra en la Figura 1. Este aparato consiste en un soporte del cual se cuelga un peso determinado (establecido en el diseño del ensayo). El peso se cuelga de un gatillo que permite liberar la masa para que ésta impacte en el tablero. En general, debajo de la masa que se deja caer se colocan bolsas de arena para evitar que se dañe la superficie de rodamiento del puente.

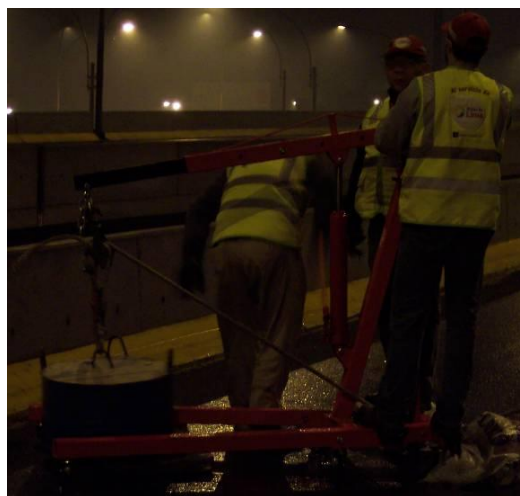


Figura 1. Guinche para la aplicación de impulsos sobre el tablero

Los equipos de medición utilizados se ilustran en la Figura 2. Allí se puede observar el equipo de adquisición de datos y sensores (acelerómetros) junto con la computadora portátil en la que corre el software de adquisición de datos. Este equipo registra y almacena las señales vibratorias que luego se procesan en un ordenador para su posterior análisis.



Figura 2. Sensores (acelerómetros) y Placa de Adquisición de Datos

Descripción del equipo de adquisición de datos

El equipo con el cual se registran y almacenan las vibraciones del puente excitadas con la masa indicada anteriormente se ilustró en la Figura 2. Este equipo cuenta con dos partes: los acelerómetros y la placa de adquisición u osciloscopio.

Los acelerómetros están constituidos por una placa de desarrollo MMA7361L, marca FreeScale. Esta placa permite registrar aceleraciones en tres ejes del espacio cuya banda de frecuencia es de 400 Hz para los ejes horizontales (X e Y) y de 300 Hz para el eje vertical (Z). El acelerómetro, capacitivo, trabaja con una alimentación de 3.3 V de corriente continua e incorpora filtros que reducen el ruido de la señal de salida. Esta placa es multipropósito y tiene aplicaciones en juegos, telefonía y computación.

La placa de adquisición de datos, al igual que el acelerómetro, es un elemento de desarrollo constituido por un controlador digital de señales equipado con periféricos que permiten conectarla a equipos de computadora para proveer alimentación eléctrica y almacenamiento de datos. Esta placa y los acelerómetros pueden conseguirse en www.freescale.com.

Los acelerómetros se conectan con la placa de adquisición a través de cables cuya longitud es de unos 10 m a 15 m aproximadamente. Esta longitud permite cubrir vanos de hasta 30 m de longitud con una disposición de los equipos. Los conectores de los cables son tales que estos pueden reemplazarse por otros de mayor longitud, lo que permite ampliar la longitud de los tramos a evaluar reduciendo los movimientos de los sensores en el tablero del puente.

La placa de adquisición de datos se programó para captar frecuencias de hasta 50 Hz debido a que en este rango se encuentran, en general, las frecuencias, de puentes carreteros y peatonales. Además, la resolución de las mediciones de la placa se estableció en 8 bit, lo que permite captar aceleraciones en el rango 0.16 m/s² a 20.2 m/s². De acuerdo a los ensayos realizados, estos límites son adecuados para la implementación del equipo en ensayos de tableros de puentes peatonales y vehiculares estándar. Para otras aplicaciones, sin embargo, deberá evaluarse si los rangos indicados son apropiados y modificarlos mediante reprogramación de la placa controladora. La placa se conecta a la computadora portátil a través de un puerto USB que permite la transmisión de datos y la energización del módulo.

Los acelerómetros se instalaron sobre bases metálicas pesadas apoyadas en tres puntos regulables en altura. Esto permite que los sensores registren efectivamente las vibraciones del tablero eliminando registros espurios que podrían surgir de un movimiento relativo entre el sensor y el tablero al producirse el impacto. Además, la regulación de los puntos de apoyo permite nivelar el acelerómetro para asegurar que los registros correspondan a aceleraciones en tres ejes ortogonales entre sí y que este sistema sea paralelo a los ejes del tablero del puente. Los sensores montados en las bases se ilustran en la Figura 3.



Figura 3. Sensores montados en bases metálicas

Descripción del programa de computadora para registrar los datos

El almacenamiento de los registros de los acelerómetros se lleva a cabo a través de un programa de computadora desarrollado especialmente para el equipo descrito anteriormente. El programa cuenta con una interfaz gráfica en donde se representan las mediciones y tiene controles que permiten restringir las mediciones a alguno o todos los ejes de cada uno de los acelerómetros.

El software está desarrollado en Visual Basic y corre en Windows XP o Windows

7 (ambos sistemas en 32 bit). Cada medición (correspondiente a un impacto de la masa sobre el tablero del puente que se ensaya) se registra a través del software que genera un archivo de datos y lo guarda en la computadora. En este archivo se escriben las aceleraciones enviadas por los acelerómetros para cada uno de los tres ejes del espacio. Estos archivos quedan listos para su proceso mediante planillas de cálculo Excel, MatLab o MathCad.

Estudio de casos

En este apartado se presentan dos estudios de caso para ilustrar la aplicación de la metodología de evaluación mediante ensayos de carga dinámica y relevamiento ocular y el equipo de desarrollo propio a un puente peatonal y un puente vehicular. En ambos casos se resumen los principales resultados obtenidos.

Caso I: Puente peatonal

Descripción de la estructura

El primer caso de estudio corresponde a un puente peatonal ubicado en la Ruta Panamericana Sur, cuya posición se indica en la Figura 4. Consiste en una estructura de cruce de dos tramos constituidos por un tablero de concreto apoyado sobre un entramado metálico.

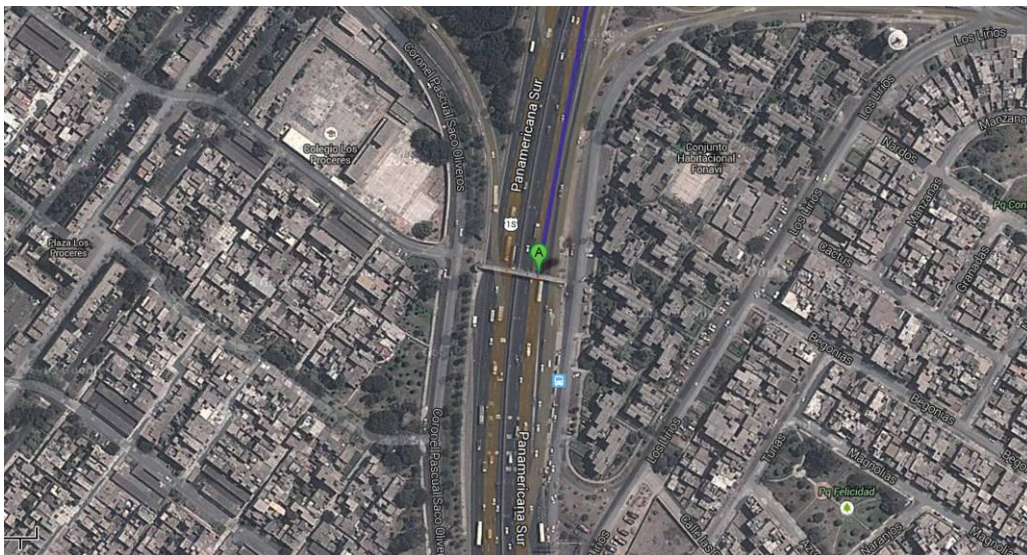


Figura 4. Ubicación de puente peatonal (Frente Colegio de los Proceres)

La longitud total de la pasarela es de 53.7 m, dividida en un tramo de 24.7 m y otro tramo de 29.0 m de longitud. El ancho total de la pasarela es de 2.0 m. La configuración estática de la estructura es de viga continua de dos tramos, apoyada en sus extremos y en el centro sobre pilas de hormigón armado, tal como se puede

apreciar en el esquema que se ilustra en la Figura 5.

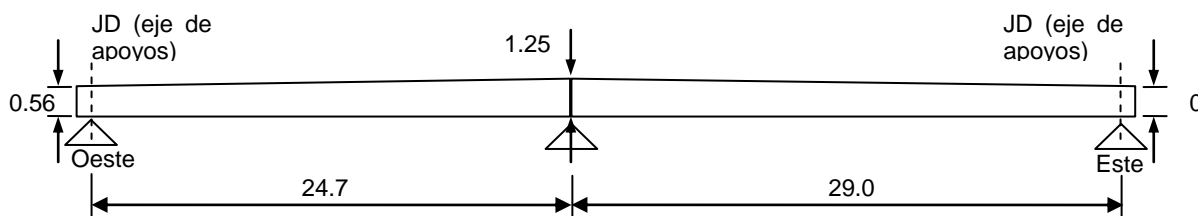


Figura 5. Esquema simplificado del puente peatonal

Las vigas principales del puente son de altura variable y sección “I” formadas por chapas soldadas. Estas vigas están vinculadas entre sí por elementos transversales formados por dos perfiles “C” de chapa plegada en frío, vinculados entre sí mediante una platabanda inferior. Estas vigas principales son de altura variable, tal como se ilustra en la Figura 5, de modo que en el centro del puente las propias vigas constituyen la baranda peatonal, mientras que en los extremos (donde la altura de las vigas disminuye) la baranda peatonal se completa con una estructura metálica soldada a las vigas. En ambas caras de las vigas principales se observan rigidizadores del alma, ubicados cada 1.0 m, aproximadamente, en los extremos y en el centro del puente y a 1.5 m, aproximadamente, en el tramo de las vigas principales.

Las vigas principales del tramo Este del puente presentan un refuerzo en alas superior e inferior materializado mediante una chapa soldada de 12.7 mm de espesor y 12.7 m de largo. El refuerzo comienza a los 2.9 m del apoyo Este del puente.

En los extremos del puente existen juntas de dilatación que desvinculan por completo las escaleras de concreto del tablero metálico. En la Figura 6 se ilustra el puente descrito.



Figura 6. Vista general del puente peatonal

Ensayos de carga dinámica

Como complemento de la inspección ocular y con el objeto de conocer las propiedades dinámicas fundamentales del puente peatonal se ejecutaron ensayos no destructivos para registrar sus frecuencias naturales de vibración. Esto se llevó a cabo utilizando acelerómetros y aplicando la metodología descrita anteriormente en este artículo.

El ensayo se ejecutó disponiendo los acelerómetros como se indica en la Figura 7, en donde también se ilustra la ubicación donde se dejó caer el peso para excitar el puente. Los impactos sobre el tablero se materializaron mediante la caída de una bolsa de arena de unos 20 kg de peso sobre el tablero en los puntos señalados y a una altura de 60cm.

Vale la pena señalar cómo la posibilidad de registrar aceleraciones con cuatro sensores al mismo tiempo permite registrar señales en varios puntos de la superficie del puente con un mínimo movimiento de sensores, equipamiento en general y operadores. El ensayo, de esta forma, puede ejecutarse con dos personas y se estima un tiempo aproximado de ejecución de media hora.

Los resultados de los ensayos son las frecuencias naturales de vibración, obtenidas luego del procesamiento y análisis de las señales. Estos resultados se muestran en la Tabla 1. Tal como se puede apreciar en esa tabla, sólo se han colocado para este caso las frecuencias naturales según el eje "Z" de los acelerómetros, ya que son las que definen el comportamiento del tablero. A modo de ejemplo, algunas de las señales que permiten obtener estos resultados se ilustran en la Figura 8.

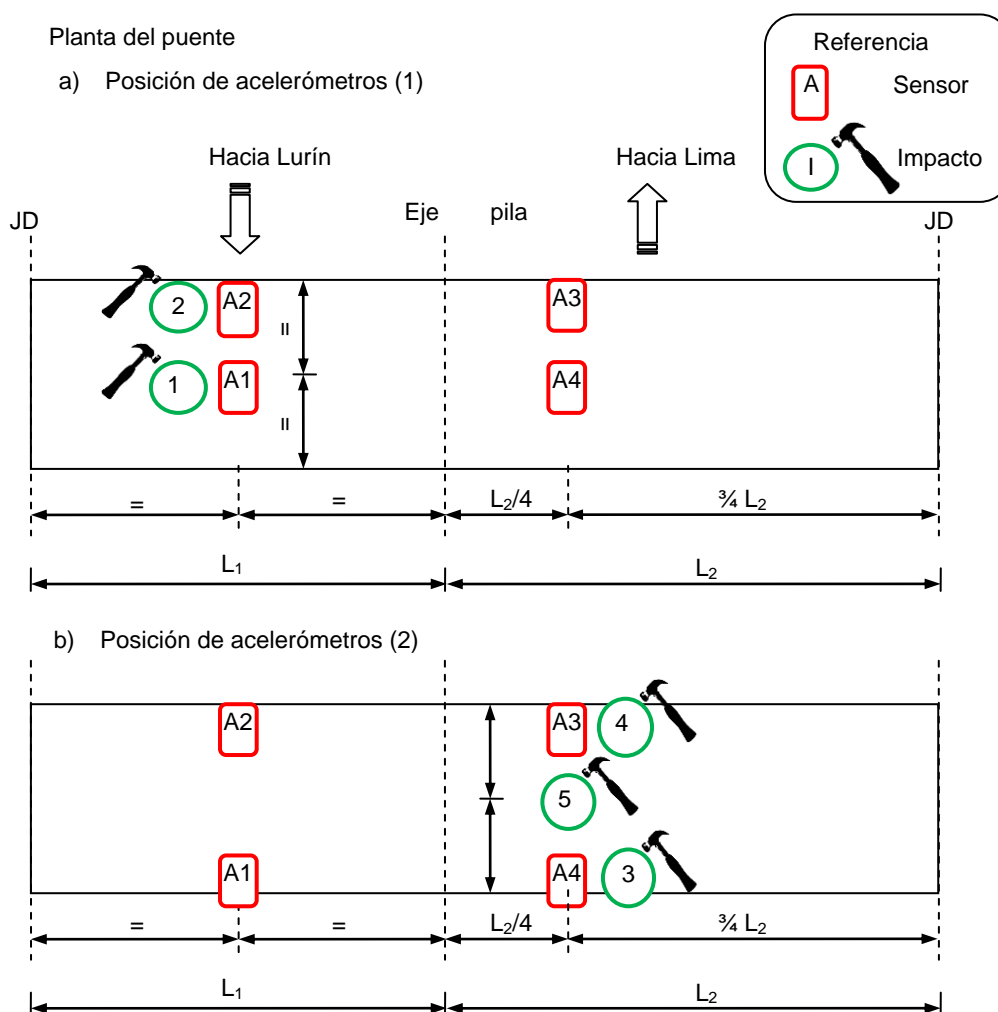


Figura 7. Vista general del puente peatonal

En la Figura 8 se ilustran los registros en el dominio de la frecuencia, en donde puede extraerse por inspección las frecuencias naturales debido a las amplificaciones que ocurren en las mismas. Cabe destacar que la obtención de las frecuencias proviene de un análisis en conjunto de todos los registros procesados y que corresponden a cada uno de los sensores y cada uno de los golpes dados al tablero. Este análisis permite eliminar, con ayuda del modelo numérico del puente, algunas frecuencias que podrían indicar la existencia de una frecuencia dominante.

Estas frecuencias naturales de vibración se comparan más adelante en este artículo con estimaciones teóricas obtenidas mediante un modelo numérico del puente.

Modo	Frecuencia
1	2.3
2	4.1
3	6.8

Tabla 1. Frecuencias naturales de vibración del puente peatonal

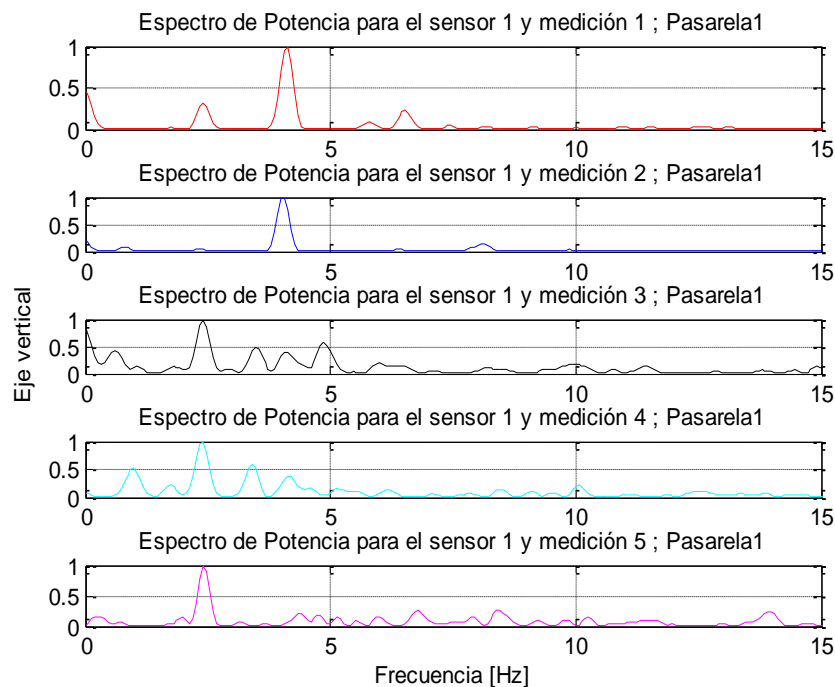


Figura 8. Señales procesadas para determinación de frecuencias naturales

Modelo numérico del puente

Con el objeto de evaluar la integridad de la estructura, se elaboró un modelo numérico del puente estudiado. Debido a la ausencia de documentación de la estructura, el modelo se construyó sobre la base de un relevamiento geométrico exhaustivo realizado antes de la ejecución de los ensayos de carga dinámica. Como se puede apreciar en la Figura 9, el modelo es simple y sólo se han utilizado elementos de viga para representar los elementos estructurales principales (vigas) y secundarios (transversales). Los elementos que no pertenecen al sistema estructural principal se incorporan al modelo como masas concentradas o distribuidas para lograr una adecuada representación del comportamiento dinámico del puente.

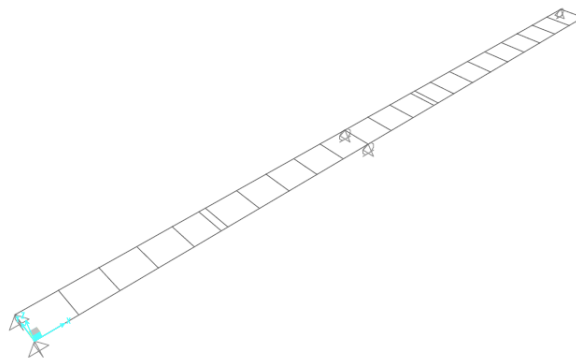


Figura 9. Modelo numérico del puente

El modelo numérico arrojó las frecuencias naturales que se recogen en la Tabla 2. Tal como se puede apreciar, las aproximaciones son muy buenas para las tres frecuencias obtenidas. En la Figura 10 se ilustran las formas modales asociadas a los tres primeros modos naturales de vibración del puente.

Modo	Frecuencia
1	2.8
2	4.1
3	6.1

Tabla 2. Frecuencias naturales de vibración del puente peatonal

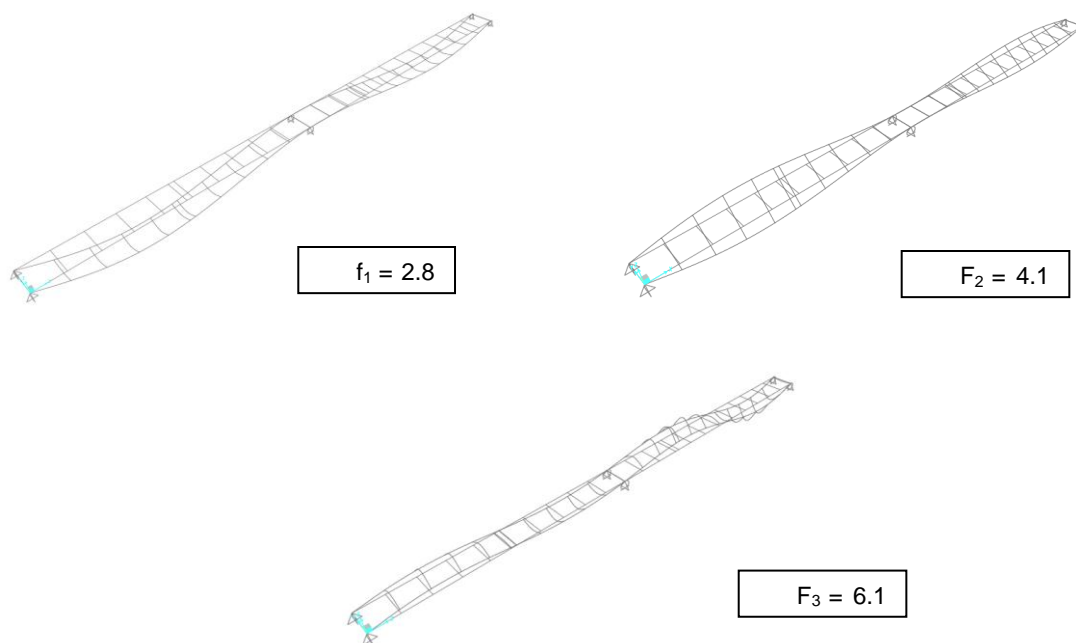


Figura 10. Primeras formas modales del puente

Los resultados obtenidos indican que hay una muy buena correspondencia entre el modelo y los registros de los ensayos. Para la calibración del modelo, sin embargo, sólo se aplicaron ajustes menores correspondientes a las masas de elementos no estructurales y revisión de geometría general de la estructura. La calibración del modelo permite inferir que el comportamiento de la estructura es normal, debido a que la representación numérica no involucró reducción de secciones o propiedades resistentes de los elementos estructurales.

Caso II: Puente vehicular

Descripción de la estructura

El puente vehicular que se describe consiste en una estructura de concreto reforzado de 6 tramos y forma parte de una intersección a distinto nivel que encausa

el tránsito de la ruta Panamericana y permite el acceso a colectoras y calles en las cercanías, tal como se ilustra en la Figura 11.



Figura 11. Ubicación del puente vehicular (Izaguirre)

Esta obra de arte se trata de un viaducto sobreelevado el cual consta de 6 tramos, cuatro de ellos (los centrales) de 32.50 m de longitud y dos tramos extremos de 15.69 m de longitud. Su esquema estático es el de una viga continua que abarca los cuatro tramos centrales y, en ambos extremos, un tramo isostático. Esto completa una longitud total de 161,38 m. El ancho total del puente es de 12.8 m. La longitud total del puente es de 162.55 m aproximadamente. Una vista general del puente se puede apreciar en la Figura 12.



Figura 12. Vista general del puente

La tipología de la estructura es la de puente de viga continua en la zona central, constituida por once vigas postesadas yuxtapuestas de modo tal que las alas inferiores están en contacto entre ellas generando el cierre continuo de la cara inferior que se aprecian claramente al pasar bajo la estructura. Todos los elementos longitudinales se vinculan entre sí a través de una losa sobre la cual se dispone la

carpeta de rodamiento asfáltica. En los tramos extremos que completan el puente, la tipología estructural es de una losa cajón multicelular (siete celdas) simplemente apoyada de concreto reforzado.

Ensayos de carga dinámica

El ensayo de carga dinámica de este puente se llevó a cabo a la medianoche, debido a que el intenso tránsito de la carretera en ese sector impedía el corte total de la circulación durante el día. La extensión del puente, además, obligó a realizar tres posiciones de ensayo, tal como se ilustra esquemáticamente en la Figura 13 y Figura 14. Los ensayos permitieron realizar registros de vibraciones de los tramos continuos (cuatro tramos centrales del puente) y de los tramos extremos simplemente apoyados.

a) Tramo isostático

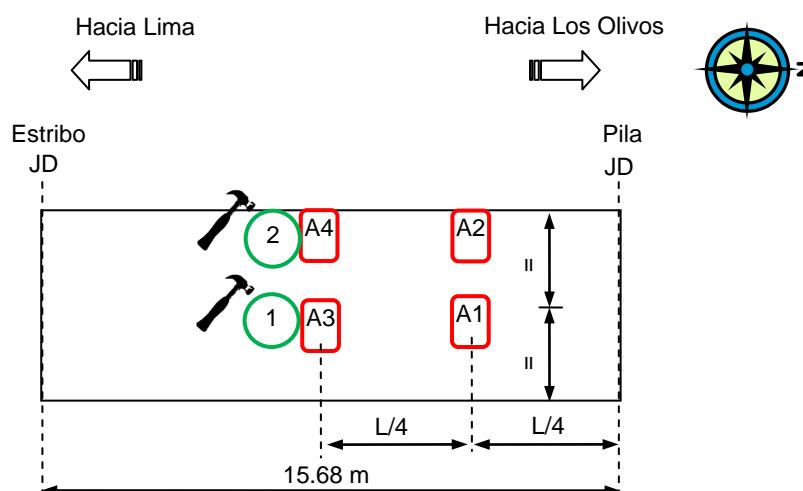


Figura 13. Disposición de sensores y puntos de impacto para el ensayo de los tramos del puente Izaguirre en Panamericana Norte. Ensayo en tramo simplemente apoyado.

b) Tramo 1 de sector continuo

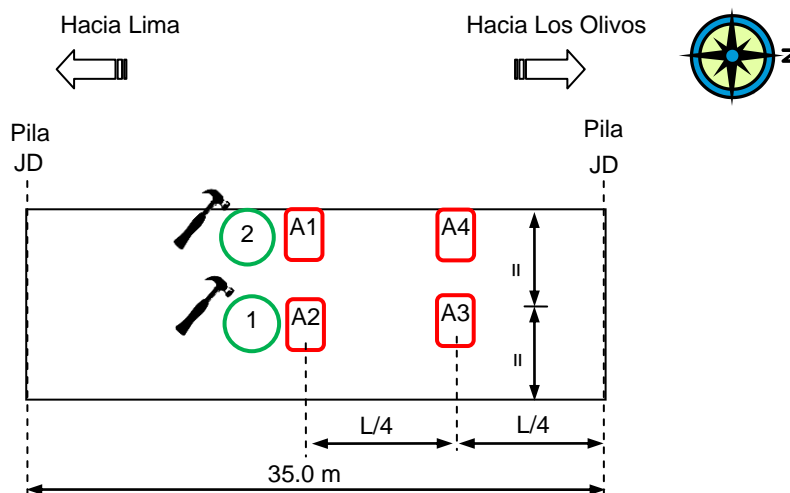


Figura 14. Disposición de sensores y puntos de impacto para el ensayo de los tramos del puente Izaguirre en Panamericana Norte. Ensayo en tramo continuo

El ensayo de este puente se llevó a cabo dejando caer un peso de unos 200 kg sobre el tablero del puente en los puntos indicados en los esquemas anteriores y de una altura de 1.20m. Para ello se utilizó el guinche ilustrado anteriormente en este artículo. Los resultados obtenidos para este puente se resumen en la Tabla 3y Tabla 4, en donde se indican las tres primeras frecuencias naturales de vibración de los tramos isostáticos y del sector central continuo.

Modo	Frecuencia
1	8.1
2	12.2
3	16.2

Tabla 3. Frecuencias naturales de vibración del tramo isostático

Modo	Frecuencia
1	3.7
2	6.0
3	10.3

Tabla 4. Frecuencias naturales de vibración de tramos continuos

Modelo numérico del puente

Al igual que el caso del puente peatonal descrito en el apartado anterior, se confeccionaron modelos numéricos para evaluar la integridad del puente. Aquí sólo se ilustra el modelo de los tramos isostáticos ya que las conclusiones y resultados del resto del puente son similares.

En la Figura 15 se ilustra el modelo numérico elaborado para estudiar los tramos

isostáticos del puente Izaguirre. Como puede observarse, se discretizó la estructura a través de sus vigas principales y el tablero mediante elementos transversales de geometría apropiada. Para la elaboración de este modelo se contó con planos generales de estructura.

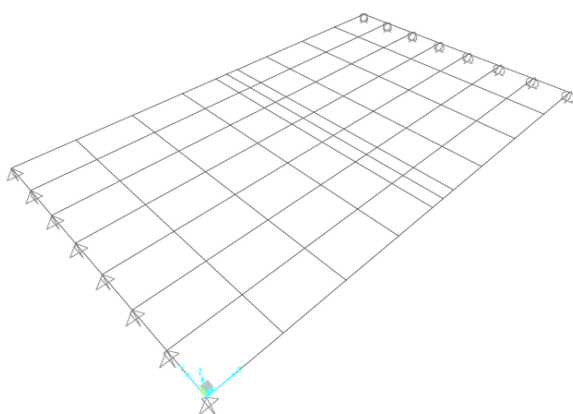


Figura 15. Modelo numérico del tramo isostático del puente Izaguirre

Los resultados del modelo se indican en la Tabla 5, atendiendo a las primeras tres frecuencias naturales de vibración registradas en los ensayos dinámicos. Como surge de la comparación de esta tabla con los valores de la Tabla 3, la correspondencia es buena, en particular para la primera frecuencia natural. Los ajustes en este caso fueron menores, y sólo tuvieron que ver con ajuste de masas de elementos no estructurales.

Modo	Frecuencia
1	8.5
2	10.3
3	17.2

Tabla 5. Frecuencias naturales de vibración del modelo numérico

La falta de información básica asociada a detalles constructivos como calidad de los materiales, tipo de aparatos de apoyo, vigas transversales, y espesores de losa condujo a adoptar estos resultados como valores finales. Sin embargo, se concluye que la correspondencia obtenida es buena para la información disponible para la elaboración y calibración del modelo y para el objeto del presente estudio. En la Figura 16 se ilustran las primeras tres formas modales obtenidas con el modelo numérico.

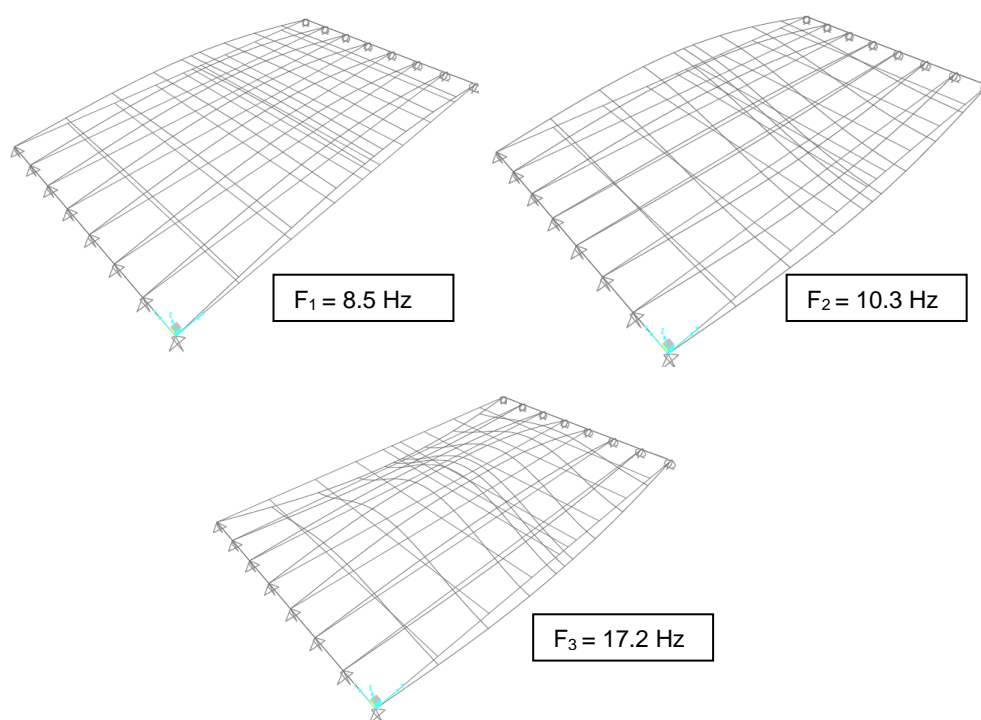


Figura 16. Formas modales del tramo isostático

Resumen y conclusiones

Este artículo presenta un resumen muy breve de la metodología empleada para relevar y evaluar los puentes sobre Ruta Panamericana en Lima. Debido a que la metodología de evaluación se ha publicado anteriormente, se puso énfasis en esta oportunidad en los resultados obtenidos en dos puentes estudiados (uno peatonal y otro vehicular). La extensión del trabajo es mucho mayor a la abarcada en este artículo, e involucró un total de 25 puentes vehiculares y 87 puentes peatonales.

Los resultados de los ensayos dinámicos, ejecutados con un equipo de desarrollo propio, y su comparación con resultados teóricos, permiten extraer las siguientes conclusiones acerca del estado de conservación de las estructuras:

- Las propiedades de los materiales constituyentes de la estructura principal se corresponde con las previsiones de proyecto, inspecciones previas o cantidades relevadas si no existiera información de base para su análisis.
- La geometría de los elementos principales del puente es adecuada y se corresponden con el proyecto de la estructura o con el relevamiento realizado.
- Los elementos principales se encuentran estructuralmente aptos para cumplir su función. En este sentido cabe destacar que la presencia de fisuras, oquedades o defectos a nivel local implicaría una reducción de rigidez que sería captada por los ensayos dinámicos y que, para calibrar el

modelo, debieran ser incorporados en el modelo. Sin embargo, la calibración de los modelos de los casos de estudio (y de otros casos estudiados) no indicó pérdida o reducción de la capacidad resistente teórica de los puentes.

- El modelo de elementos finitos verificado con los ensayos dinámicos, representa la estructura en su estado actual, por lo que puede utilizarse con confianza para el cálculo de esfuerzos internos de los elementos principales, realizar verificaciones seccionales, evaluar posibles modificaciones, refuerzos, o ampliaciones de la estructura, y estimar deformaciones de sus elementos principales.
- Los resultados de los ensayos se almacenan como medida de comparación de futuras inspecciones de modo tal que la repetición de las pruebas en el tiempo brindará una historia de evolución del estado de la estructura en su conjunto.
- El modelo elaborado como parte de esta metodología puede utilizarse, además, para realizar verificaciones seccionales y otras comprobaciones que resultan de interés, como la determinación de la capacidad de carga real de la estructura o su verificación para cargas extraordinarias (Ruiz et al. 2012).

Referencias

- Álvaro Cunha, y Caetano, E. (2006). "Experimental modal analysis of civil engineering structures". Sound and Vibration, 40(6), 12-20, 10.
- Freescale Semiconductor. Manuales de usuario de acelerómetro de tres ejes modelo MMA7361L. www.freescale.com
- Freescale Semiconductor. Manuales de usuario de placa de desarrollo MC56F8006. www.freescale.com.
- Ruiz, M. E., Cocco, L. J. y Gerbaudo, G. M. (2012). "Metodología para la determinación de la capacidad de carga de puentes metálicos antiguos y su aplicación a una estructura de 98 años de vida útil". Aceptado para publicación en 22° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, Argentina, Septiembre de 2012.
- Ruiz, M. E., Novillo, N., y Fragueiro, A. (2013). "Importancia Y Aplicación De Pruebas De Carga Dinámica En El Monitoreo Y Mantenimiento De Puentes". XII Congreso Internacional de Infraestructura Vial. Instituto de la Construcción y Gerencia, Lima, Perú. Agosto de 2013.