

MONITOREO DINÁMICO COMO INSTRUMENTO EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES SUSCEPTIBLES DE REFORZAMIENTO

Consuegra F.¹

RESUMEN

La infraestructura colombiana consta de una extensa red de puentes de los cuales muchos tienen más de cuarenta años de antigüedad. Dichos puentes a la luz de las necesidades presentes y futuras de la economía, requieren de minuciosa auscultación estructural para decidir prolongar su uso mediante la implementación de un sistema de reforzamiento o su reemplazo por estructuras nuevas. Entre las dificultades que debe enfrentar el Ingeniero Estructural a cargo de dicha decisión, está la limitada información disponible de planos y cantidades de refuerzo de los elementos estructurales, así como las calidades de los concretos que presentan alta dispersión a la luz de ensayos de compresión sobre núcleos extraídos. En la presente metodología se ha calibrado un modelo matemático usando el monitoreo dinámico de campo a fin de inferir las propiedades más relevantes de la estructura. Ensayos de vibraciones mediante el uso de acelerómetros fueron realizados en más de cuarenta puentes de concreto que hacen parte de la red vial nacional de primer nivel, buscando complementar la información de los puentes obtenida por métodos tradicionales. Este trabajo resume los hallazgos más importantes, los retos en el desarrollo de los ensayos y los factores que pudieran afectar la calibración de los modelos matemáticos.

Palabras claves: Identificación modal, ensayos de vibraciones, puentes, calibración de modelo matemático.

ABSTRACT

The Colombian infrastructure consists of a large system of bridges with many of them built more than forty years ago. Given the present and future needs for economy of the Country, such bridges require a detailed structural inspection and evaluation in order to decide whether the bridges may be reinforced or retrofitted to extend their service life or whether they should be replaced by new structures. The structural engineer in charge of such decisions must face the limited amount of information of old structures (drawing and plans, amount of reinforcement, etc.) and the large scatter in compressive strength tests of drilled cores obtained from the bridges. Small-amplitude vibrations from over forty concrete bridges were recorded using accelerometers in order to compare with the structural evaluation based on traditional methods. The general methodology consisted of calibration of a mathematical model to estimate the quality of existing concrete. This article summarizes the findings, challenges when performing the tests and factors that may affect the calibration of the mathematical models.

Keywords: Modal identification, vibration tests, bridges, calibration of a mathematical model.

¹ Ingetec S.A., fabianconsuegra@ingetec.com.co

El presente artículo hace parte de las memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, organizado por la Universidad Industrial de Santander (UIS) UPB Seccional Bucaramanga y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bucaramanga 29 al 31 de Mayo de 2013.

Introducción

El presente trabajo consiste en la comparación de frecuencias de vibración de los puentes medidas mediante monitoreo dinámico y estimadas a través de modelos matemáticos.

El monitoreo dinámico realizado en los puentes consistió en la colocación de acelerómetros de alta precisión (10.000mV/g) en combinación con un sistema de adquisición de datos de 24-bits para toma de datos al paso de vehículos durante periodos de tiempo de alrededor de un minuto. Bajo la presunción de un comportamiento elástico de los puentes, un Espectro de Fourier de los registros de aceleraciones (Oppenheim, et. al., 2005) permitió identificar las frecuencias principales de vibración de los puentes mediante el método de selección de picos ó “Peak Pick” conocido en la literatura (Allemang, 2002).

El nivel más básico de verificación de las observaciones de monitoreo dinámico de los puentes consiste en la comparación entre las propiedades dinámicas medidas en campo y aquellas estimadas para la misma estructura mediante un modelo idealizado: Calibración del modelo matemático. La frecuencia natural de un sistema dinámico de un grado de libertad (SDOF) con rigidez k y masa m está definida por la ecuación (Clough and Penzien, 1975):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

En la mayoría de aplicaciones en Ingeniería Estructural la masa del sistema se reconoce como una constante mientras que para el caso de concreto reforzado el parámetro de rigidez está sujeto a variación dependiendo de su estado de fisuración. La inercia de una sección de concreto reforzado disminuirá una vez se fisure en mayor o menor grado en función de su contenido de acero de refuerzo (Ferguson et. al., 1988). Alternativamente a un método simplificado de un grado de libertad como el de la ecuación (1), es una práctica generalizada el uso de un modelo tridimensional de elementos finitos para obtener las frecuencias de vibración de un sistema, el cual tendrá tantos grados de libertad como precisión se requiera. En la creación del modelo idealizado de la estructura real por cualquiera de las dos alternativas mencionadas, el Ingeniero debe conocer o en su defecto asumir, la geometría (secciones y luces), pesos o cargas muertas, la elasticidad del sistema (módulo de elasticidad), condiciones de borde, etc. Producto de una inspección minuciosa realizada en los puentes es posible determinar con adecuada precisión las variables mencionadas anteriormente. Sin embargo, el módulo de elasticidad (E) estimado según la ecuación (2) (Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, 1994), es el parámetro de mayor incertidumbre por el alto grado de dispersión observado en las resistencias f'_c de diferentes núcleos de una misma estructura.

$$E = 12500\sqrt{f'c} \quad [\text{kg-f/cm}^2] \quad (2)$$

En función de lo anterior la calibración del modelo matemático sirve como instrumento para obtener un valor de la resistencia del concreto de una estructura dada mediante el uso de la ecuación (2). Dicha calibración se establece al determinar el valor de módulo de elasticidad (ó resistencia a la compresión a través de la ecuación 2), que permite obtener una frecuencia natural del modelo igual a la observada en campo. A diferencia de los métodos estandarizados para estimar la resistencia del concreto (ASTM, 2004) que miden sobre puntos específicos de la estructura de dónde son extraídas las muestras, esta metodología evalúa la estructura a nivel global puesto que la frecuencia natural es un parámetro que responde a la elasticidad de todo el sistema en conjunto.

Comparación entre un modelo simplificado (SDOF) y modelo tridimensional

La Figura 1 muestra el modelo tridimensional construido en el programa Sap2000 (a) (Computers and Structures, 2003) y la sección utilizada para la conformación del modelo de un grado de libertad SDOF (b), usados para la estimación de la frecuencia natural de los puentes.

La conformación del modelo tridimensional fue hecha usando elementos tipo “frame” y “shell” para las vigas y la losa respectivamente. La condición compuesta de la sección de viga-T se garantizó imponiendo condiciones de “constraints” a cada par de nudos de viga y losa ubicados en la misma sección a lo largo del puente. La conformación de este modelo tridimensional permite todo tipo de irregularidades que pudiera tener la estructura real como espaciamiento de vigas y diferentes tipos de secciones para las vigas del puente. El modelo simplificado (SDOF) permite el cálculo de la frecuencia fundamental de la estructura bajo la consideración de un sistema continuo con inclusión de sólo deformaciones por flexión. La ecuación (3) permite el cálculo de la frecuencia fundamental bajo dicha modelación para los parámetros de longitud del puente L , módulo de elasticidad del material E , densidad del material ρ , área de la sección A y momento de inercia de la sección I . En la conformación de la sección se usó el ancho de ala especificado por la normativa (Código Colombiano de Puentes, 1994) como el ancho efectivo de la losa (b_{ef} en la Figura 1b) para cálculo de las propiedades de área e inercia.

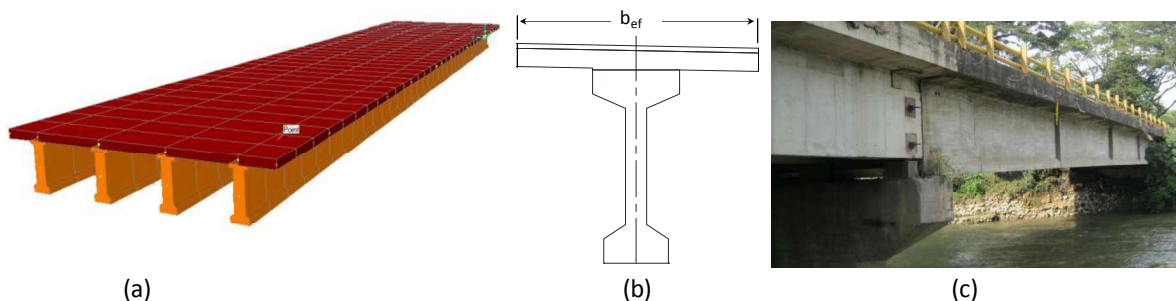


Figura 1. Modelos y Estructura Real. (a) Modelo tridimensional, (b) modelo simplificado SDOF, (c) Vista general de estructura.

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3)$$

Los dos tipos de modelos mencionados fueron usados para el caso del Puente número 20 de la Tabla 1 y que se muestra en la Figura 1c. Dicho puente tiene dos luces de 34m, cuatro vigas tipo I, espesor de losa de 20cm, carpeta asfáltica de 5cm y barandas metálicas con bordillo. La diferencia en frecuencias estimadas mediante el uso del modelo tridimensional y el modelo simplificado (al establecer la comparación para la luz mostrada en la Figura 1c), está alrededor de 1%, lo cual indica que para puentes con geometría regular (espaciamiento uniforme de vigas, espesores constantes de losas, idéntico tipo de vigas), el modelo simplificado (ecuación 3) puede ofrecer suficiente precisión sin la necesidad de la conformación de un modelo más complejo. La máxima diferencia observada para los otros puentes en que se comparó el resultado de frecuencias de los dos modelos fue del 10%. En vista de la buena correlación obtenida el modelo simplificado será usado para el estudio presentado en este artículo, con la claridad de que pudiera haber diferencias mayores a la mencionada para aquellos puentes que exhiben una geometría menos regular y que no han sido evaluadas hasta el momento del estudio. Secciones brutas fueron consideradas para todos los modelos en el cálculo de momento de inercia.

Frecuencias de vibración observadas en puentes existentes

Determinación de frecuencia fundamental de vibración

La Figura 2 muestra la localización de los acelerómetros para una luz del puente No. 12 de la Tabla 1. Tres acelerómetros (representados por cuadrados en la Figura 2) espaciados a un cuarto de la luz libre fueron instalados sobre uno de los costados para toma de datos al paso de los vehículos. El experimento fue repetido con los acelerómetros instalados sobre el otro costado del puente para verificación y comparación. Los datos fueron digitalizados a una tasa de 2000 muestras por segundo.

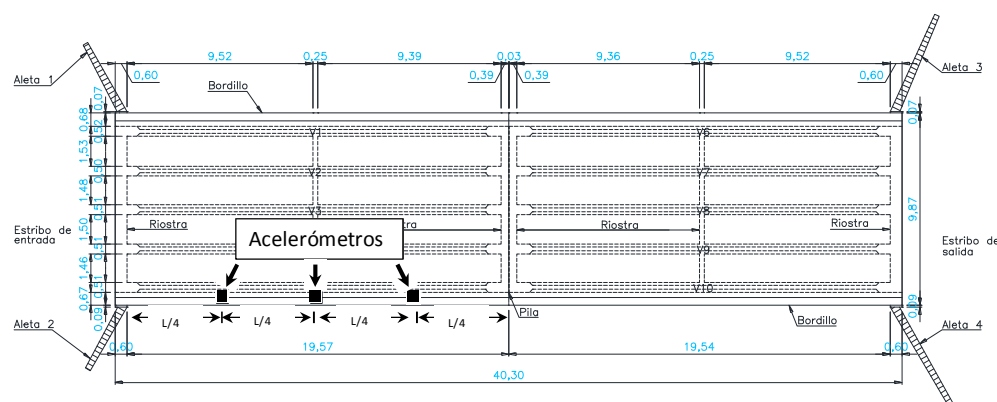


Figura 2. Ubicación de acelerómetros para monitoreo dinámico en el puente K27+000.

La Figura 3 muestra un registro de aceleraciones tomado al paso de los vehículos (a), su correspondiente espectro de Fourier (b) y la comparación de aceleraciones medidas en los tres puntos de la Figura 2 para una ventana de tiempo corta (c). Puede observarse que las vibraciones de mayor importancia se registran en los instantes que los vehículos pasan sobre el puente, los cuales son evidenciados por cambios repentinos en la magnitud de las aceleraciones. El Espectro de Fourier ("Fourier Spectrum Amplitude" por su nombre en inglés) muestra un pico de importancia alrededor de 6.5Hz que corresponde a la frecuencia fundamental del puente (Allemang, 2002), verificada con un modelo matemático de la estructura. Esta frecuencia también es evidenciada en la Figura 3c por el tiempo transcurrido entre dos picos consecutivos de aceleraciones. La comparación de dichas aceleraciones muestra que la magnitud máxima está a $L/2$ mientras que magnitudes menores registradas a $L/4$ y $3L/4$ son similares, lo cual puede ser entendido como la deformada del modo fundamental de una viga simplemente apoyada.

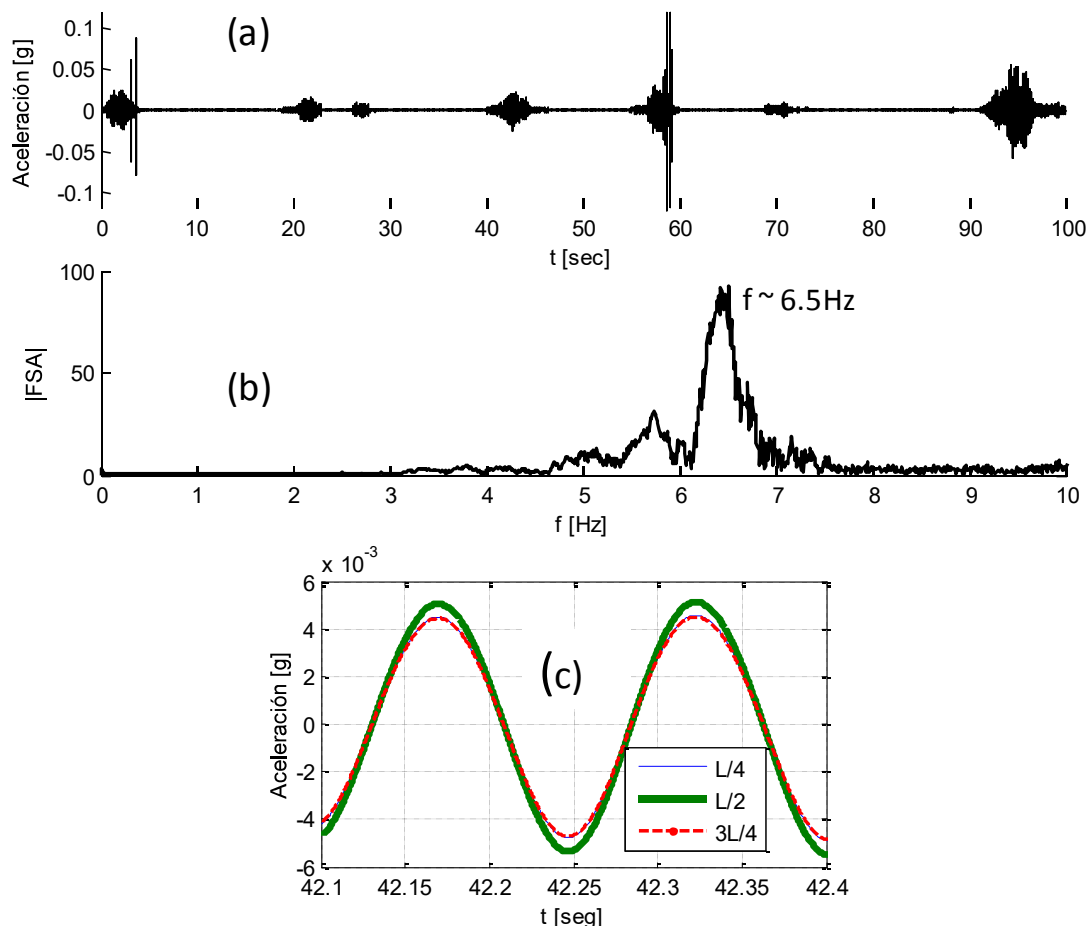


Figura 3. Registro de aceleraciones y Espectro de Fourier al paso de vehículos. (a) Registro de aceleración en $L/2$, (b) Espectro de Fourier, (c) Comparación de aceleraciones.

Comparación de frecuencias medidas y estimadas para puentes existentes