

PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL REALIZADAS EN DOS PUENTES VEHICULARES UBICADOS EN ZONA SÍSMICA

H. HERNÁNDEZ BARRIOS¹, C. ARCE LEÓN², I. HUERGO RÍOS³

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, hugohernandezbarrios@yahoo.com.mx

² Unidad de Investigación Multidisciplinaria, FES Acatlán, México, arce@acatlan.unam.mx

³ Programa de Doctorado en Ingeniería, UNAM, CDMX, México, ing.huergo@hotmail.com

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas de vibración ambiental de dos importantes puentes vehiculares ubicados en la zona de la costa del Pacífico mexicano, muy cerca de la zona epicentral donde se han producido eventos sísmicos de considerable magnitud. Se trata de los puentes Infiernillo I e Infiernillo II.

El puente Infiernillo I tiene una longitud de 325 m y está formado por ocho tramos; El puente Infiernillo II tiene una longitud de 525 m, y está formado por cinco tramos. Los resultados experimentales se comparan con los obtenidos mediante un modelo numérico, con un rango de variación de los tres primeros períodos de vibración y un valor de amortiguación estructural del 7%. La importancia del Puente Infiernillo II es que es el primer y único puente aislado de base con dispositivos multirrotacionales en México

Palabras clave: vibración ambiental, puentes mexicanos, aislamiento, zona sísmica

Summary This paper presents the results of the environmental vibration tests of two important vehicle bridges located in the zone of the Mexican Pacific coast, very close to the epicentral zone where seismic events of considerable magnitude have taken place. These are the Infiernillo I and Infiernillo II bridges.

The Infiernillo I bridge has a length of 325 m and is formed by eight sections; The Infiernillo II bridge has a length of 525 m and is formed by five sections. The experimental results are compared with those obtained by means of a numerical model, with a range of variation of the first three periods of vibration and a structural damping value of 7% being enchanted. The importance of the Infiernillo II Bridge is that it is the first and only base-isolated bridge with multi-rotational devices in Mexico

Keywords: Environmental vibration, Mexican bridges, isolation, seismic zone.

1. Introducción

El estado de Michoacán se encuentra en la costa del Pacífico mexicano: una zona altamente sísmica debido a su proximidad a la Placa de Cocos. La carretera Siglo XXI es vital para la movilidad de los bienes importados y exportados en el país. Se extiende desde el puerto de Lázaro Cárdenas hasta la ciudad de Morelia. A lo largo de ella se han construido cuatro puentes vehiculares, cuya importancia radica en los vehículos que circulan sobre ellos.

Este trabajo presenta el estudio de dos de estos puentes: El Infiernillo I y El Infiernillo II. Se realizaron ensayos de vibraciones ambientales con el fin de determinar las características dinámicas y su riesgo sísmico en el futuro.

2. Puente Infiernillo II

El Puente Infiernillo II cruza sobre el río Balsas y está ubicado en el kilómetro 133.9 de la carretera Siglo XXI, sobre la central hidroeléctrica Infiernillo. Su longitud es de 525 metros y está formado por 5 tramos. Cada sección está formada por un marco de acero de dos arcos (Figura 1) con un claro de 102 metros y una altura máxima de 15.96 metros. El tablero está formado por un sistema del tipo losa-acero que trabaja junto a una losa de 0.18 metros de espesor.

La subestructura está formada por seis soportes/estribos de concreto reforzado colados en sitio: cuatro están hechos de pilotes y los dos en los puntos finales están hechos de estribos de sección variable. Las pilas están formadas por secciones rectangulares de 8.5 x 3.5 metros de sección hueca y espesor de 0.40 y 0.60 metros. En la parte superior de las pilas hay un cabezal de concreto armado de sección variable

El Puente Infiernillo II fue el primer puente en México equipado con sistema de aislamiento multirrotacional tipo EradiQuake (EQS) (Figura 2).

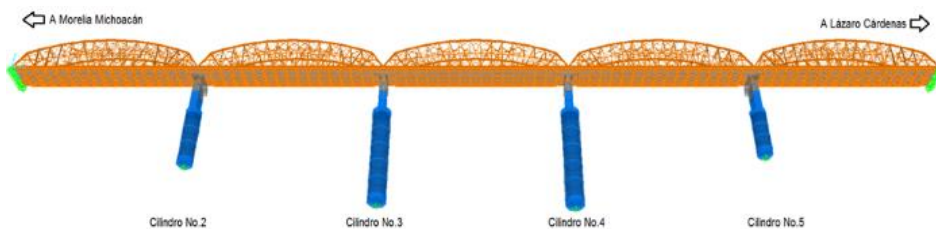


Figura 1 Modelo Analítico del puente Infiernillo II



Figura 2 Aislador EQS

Se desarrolló un modelo numérico del Puente Infiernillo II para determinar sus propiedades dinámicas de manera analítica, los resultados se muestran en la (Tabla 1)

Tabla 1 Periodos y frecuencias modales del Puente Infiernillo II

Modo	Período (s)	Frecuencia (Hz)
1	2,9782	0,3358
2	2,8961	0,3453
3	2,8237	0,3541
4	2,7075	0,3694
5	2,6535	0,3769
6	2,6440	0,3782
7	2,6064	0,3837
8	2,4730	0,4044

3. Puente Infiernillo I

Tiene 325 metros de largo y está formado por ocho tramos. Las dos secciones centrales tienen dos armaduras de acero estructural como arcos (Figura 3). Cada armadura es de 102 metros de claro con una altura máxima de 15.96 metros. El sistema de piso se encuentra resuelto con acero estructural integrado con una losa maciza de 0.18 metros de espesor.



Figura 3 Puente Infiernillo I

Se desarrolló un modelo numérico del puente para determinar sus formas modales y sus períodos característicos. La Tabla 2 muestra los resultados del análisis numérico y la Figura 4 muestra su primera forma modal.

Tabla 2 *Periodos y frecuencias modales del Puente Infiernillo I*

Modo	Período (s)	Frecuencia (Hz)
1	0.5357	1.8667
2	0.5350	1.8691
3	0.4006	2.4963
4	0.3549	2.8176
5	0.3076	3.2515
6	0.2608	3.8350
7	0.2091	4.7816

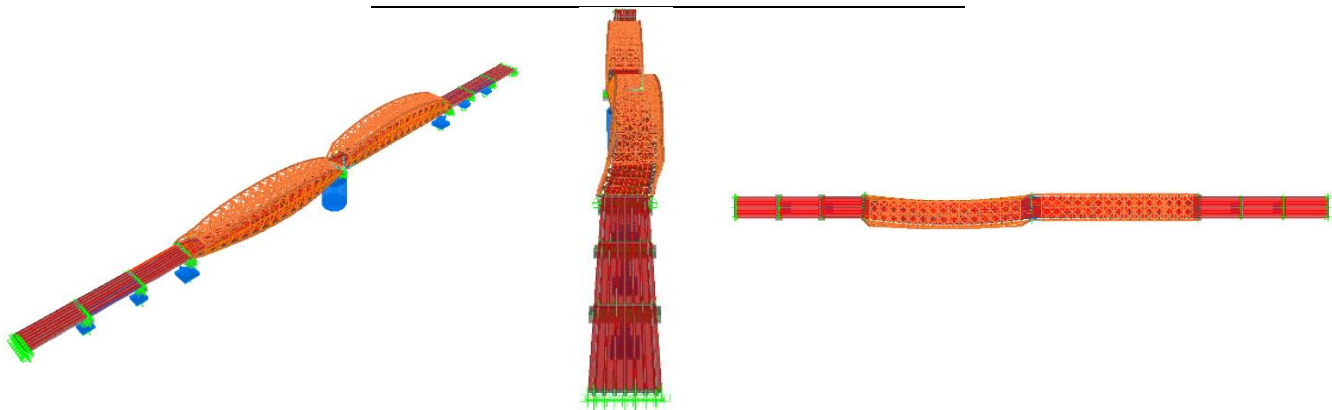


Figura 4 Modelo Analítico del Puente Infiernillo I

4. Ensayos de vibraciones ambientales

Las pruebas de vibración ambiental se realizaron con 4 acelerómetros triaxiales FBA EpiSensor Kinemetrics, tres digitalizadores Makalu Kinemetrics para 18 canales y 6 cables blindados de 30 metros de largo. La Figura 5 muestra el equipo. El tiempo medio de funcionamiento de las señales grabadas fue de 300 s con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. La señal se interpretó con rutinas desarrolladas en el software MATLAB [1]. Se corrigió la línea de base y se eliminó el ruido con un filtro pasa de banda entre 0,1 Hz y 10 Hz.



Figura 5 Acelerómetros EpiSensor

Las frecuencias de vibrar del sistema se obtuvieron a partir de espectros promedio de Fourier en los que se eliminó de la señal fuente las frecuencias no deseadas.

La amortiguación modal se evaluó en todas las señales a través de la técnica de ancho de banda [2]. Este método consiste en determinar un punto final en el espectro de Fourier de la señal que corresponda a $1/\sqrt{2}$ la frecuencia resonante, es decir, el máximo local de las frecuencias con las que se desea trabajar [3]. Posteriormente, se calcularon los valores medios de la amortiguación modal para cada una de las pruebas de vibración ambiental.

4.1 Resultados pruebas Puente Infiernillo II

Una vez realizadas las pruebas de vibración ambiental para el Puente Infiernillo II, se procesaron las señales. La Figura 6 muestran los espectros de amplitud espectral media de Fourier de las pruebas realizadas en las direcciones longitudinal y transversal.

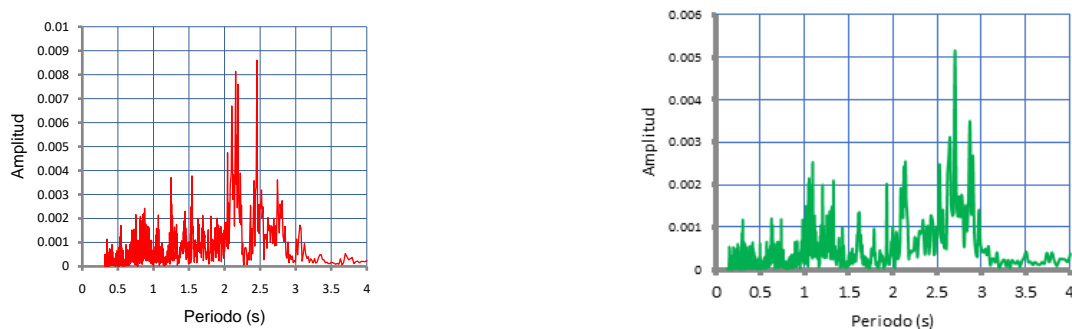


Figura 6 Espectros de amplitudes de Fourier

Los períodos vibratorios mostrados en la Tabla 3 se obtuvieron de las pruebas experimentales y se comparan con los obtenidos con el modelo numérico.

Tabla 3 Periodos de vibración del Puente Infiernillo II

Modo	Período (s)	
	Numérico	Prueba
1	2.97	2.45
2	2.89	2.19
3	2.82	2.16
4	2.71	2.11

Se puede observar que existe una diferencia relativa del 18% entre los resultados obtenidos de las pruebas y los resultados obtenidos del modelo numérico.

La Figura 7 muestra el equipo utilizado para las pruebas.



Figura 7 Pruebas de vibración

4.2 Resultados, pruebas Puente Infiernillo I

Como se observan frecuencias dominantes con una marcada amplitud en los espectros de Fourier, es de utilidad hacer cocientes espectrales de cada sensor respecto al número uno, ubicado sobre un soporte y, por lo tanto, con menor vibración. En seguida, se obtienen cocientes espectrales medios para cada medición. La Figura 8 muestra los cocientes espectrales en dirección longitudinal y transversal, respectivamente.

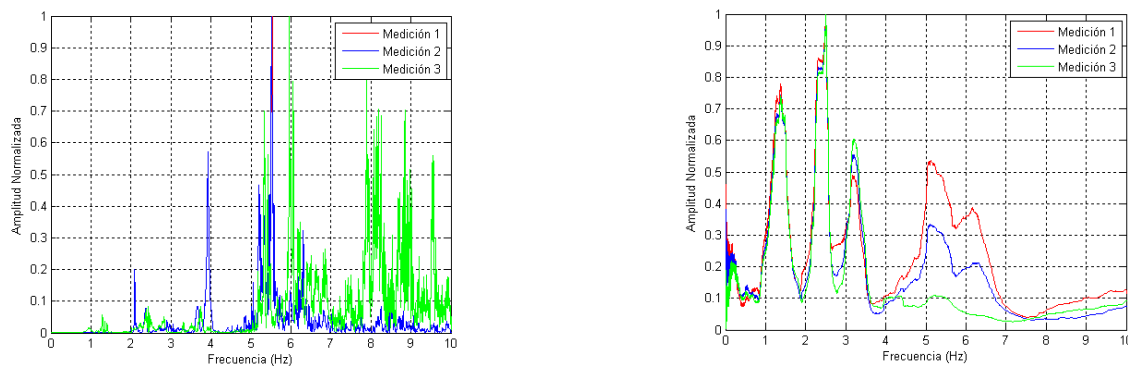


Figura 8 Cocientes espectrales, longitudinales y transversales

La Tabla 4 contiene los períodos de vibración promedio obtenidos de las pruebas de vibración ambiental y los obtenidos a través del modelo numérico.

Tabla 4 Períodos de vibración del Puente Infiernillo I

Modo	Período (s)	
	Numérico	Prueba
1	0.5357	0.73
2	0.5350	0.41
3	0.4006	0.40
4	0.3549	---

Como se puede observar, existe una diferencia relativa del 26% entre los períodos de vibración obtenidos experimentalmente y los obtenidos a partir del modelo numérico.

En cuanto a la relación de amortiguamiento calculada durante los ensayos, la Tabla 5 muestra el valor medio de amortiguamiento de la primera forma modal en la dirección longitudinal, transversal y vertical, respectivamente.

Tabla 5 amortiguamiento estructural, Puente Infiernillo I

Dirección	Amortiguación %
Longitudinal	1.19
Transversal	4.97
Vertical	3.12

5. Conclusiones

En este trabajo se realizaron pruebas experimentales de vibración ambiental en dos puentes vehiculares ubicados en una zona altamente potencialmente sísmica en México. Se realizaron los modelos numéricos de ambos casos con el fin de determinar las formas modales y sus respectivos periodos de vibración para poder compararlos con los obtenidos directamente de los ensayos de vibraciones ambientales. También se calculó el amortiguamiento estructural.

Los resultados indican que existe un margen de error del 18% entre el periodo fundamental obtenido experimentalmente y el numérico, en el caso del Puente Infiernillo II.

En el caso del Puente Infiernillo I, la diferencia entre ambos períodos de vibración es del orden del 26% y un valor de amortiguación estructural relativamente bajo, del orden del 1.19%.

Con estos valores, es posible realizar un estudio de riesgo sísmico en el sitio donde se encuentran estas estructuras.

6. Referencias

- [1] MathWorks, Inc. - 2017 -MathWorks, Inc. Natick, MA, USA
- [2] Wenzel, H. Pichler 2005. Ambient Vibrations Monitoring: Wiley, a John Wiley and Sons, Ltd, Publication.
- [3] Chopra, Anil K. *Dinámica Estructural*. Pearson Educación; 2014.

