

Estudio del período de vibración de puentes de concreto en Panamá

Study of vibration period for concrete bridges in Panama

Stephania M. Rodríguez^{1*}, José M. Gallardo², Osvaldo A. Araúz³

^{1, 2, 3}Grupo de investigación: Salud Estructural de Puentes, Universidad Tecnológica de Panamá

¹stephania.rodriguez@utp.ac.pa, ²jose.gallardo@utp.ac.pa, ³osvaldo_02_507@hotmail.com

Resumen— El comportamiento estructural de los puentes puede verse afectado por el paso del tiempo y el flujo vehicular, por lo que es importante contar con sistemas de monitoreo estructural que alerten sobre posibles daños, y provean indicativos sobre la necesidad de llevar a cabo medidas de mantenimiento y reparación. En este documento se presenta un estudio del comportamiento dinámico de dieciséis (16) puentes de concreto en la República de Panamá. Durante esta investigación, se monitoreó la frecuencia de vibración de los puentes utilizando sensores económicos ensamblados en placas tipo Arduino. Como resultado del monitoreo se encontró una fuerte correlación entre la longitud de los puentes y sus respectivos períodos de vibración; así, independientemente del tipo de viga que forma parte de la estructura del puente, el periodo de vibración puede ser estimado en función de las luces del puente. Adicionalmente, se identificó puentes que muestran un comportamiento que se aleja de la tendencia general.

Palabras claves— frecuencia, identificación estructural, puente, vibración.

Abstract— Structural integrity of bridges are affected by age and by traffic. Structural monitoring systems that can detect the presence or the possibility of damage can provide useful information on the when to conduct maintenance and repair. The vibrational frequencies of sixteen concrete bridges in Panamá were monitored using inexpensive sensors assembled from Arduino plates.

The results of the study indicate a strong correlation between bridge length and period of vibration which was independent of the type of beams used in construction. Additional study was made on the few bridges which did not follow this pattern.

Keywords— frequency, structural identification, bridge, vibration.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 25 de agosto de 2016

Fecha de Aceptación: 12 de abril de 2017

1. Introducción

Al monitorear el comportamiento dinámico de los puentes, se puede detectar potenciales daños; estimando así el nivel de salud estructural. Los cambios en la respuesta a excitaciones dependen de la naturaleza, localización y la severidad del daño, por lo que el monitoreo dinámico continuo en las estructuras ayuda a detectar, localizar y cuantificar el daño; y así llevar a cabo un mantenimiento proactivo y estimación del nivel de salud estructural [1].

En este proyecto, la señal registrada experimentalmente es adquirida, por el sensor que se conecta a la estructura, como respuesta a una excitación inducida, o a las fuerzas ambientales a las que está expuesto el puente.

El campo de estudio dinámico predictivo está mostrando un progreso rápido [2], en cuanto a los temas de mantenimiento de obras de infraestructura vial.

La infraestructura de puentes carreteros panameños se estima en más de 60 años de servicio, en los cuales el flujo vehicular se ha incrementado al igual que la capacidad de carga por vehículo. Muchos de los puentes con afectaciones estructurales están ubicados en lugares apartados del interior del país, lo que dificulta darles el mantenimiento requerido y garantizar que no los utilicen camiones con carga excesiva.

"En Panamá se estima un inventario de 1882 puentes vehiculares y 206 puentes peatonales, con unos 56 889.61 y 6670.31 metros lineales, respectivamente. De los cuales en la última década han colapsado más de 15 puentes en diferentes provincias del país." [3]

Con esta investigación se desea establecer una línea base o de referencia sobre el comportamiento dinámico de estos puentes, de manera que en el futuro se involucren más puentes y se dé un seguimiento de aquellos que ya son parte del estudio, dando paso a una actualización continua de la información la cual requiere de un manejo, filtrado e interpretación adecuada de la señal registrada, con la intención de predecir fallas y las causas de las mismas.

2. Programa experimental

Este estudio incluye resultados del análisis de 16 puentes de concreto que se encuentran en la carretera panamericana. Estos puentes son un subgrupo de los puentes estudiados [4], en donde se incluyen 6 puentes con estructura de acero y 16 puentes con estructura de concreto, iniciando desde el río Chico en el distrito de Boquerón; hasta el río Tolé, ubicado en el distrito de Tolé (ver figura 1).

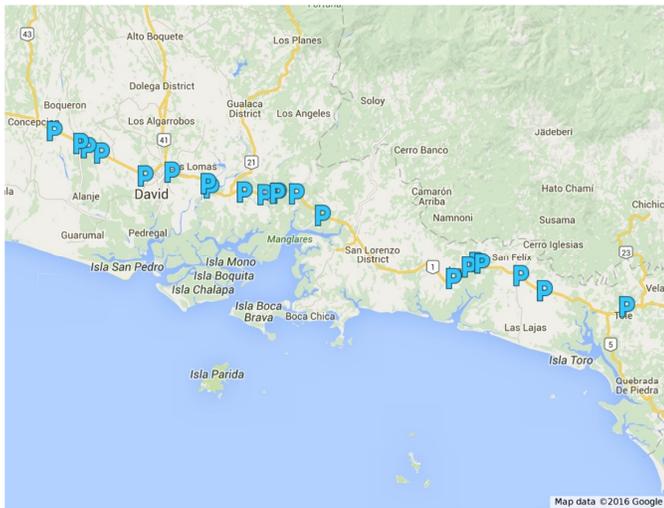


Figura 1. Puentes estudiados por Araúz y Rodríguez (2016).

En cada puente se registró el tipo de estructura, características geométricas, año de fabricación y observaciones relacionadas con el estado de la estructura. En la figura 2 se muestra un esquema de las dimensiones registradas como parte del estudio.

Adicionalmente, para registrar la vibración, cada puente se instrumentó utilizando un acelerómetro (ver figura 3). La configuración del sistema de monitoreo de aceleraciones se detalla en la sección 2.1. Las aceleraciones registradas corresponden a la vibración de

la estructura al ser sometida al tráfico vehicular de carga pesada que se presenta de manera diaria en estas vías.

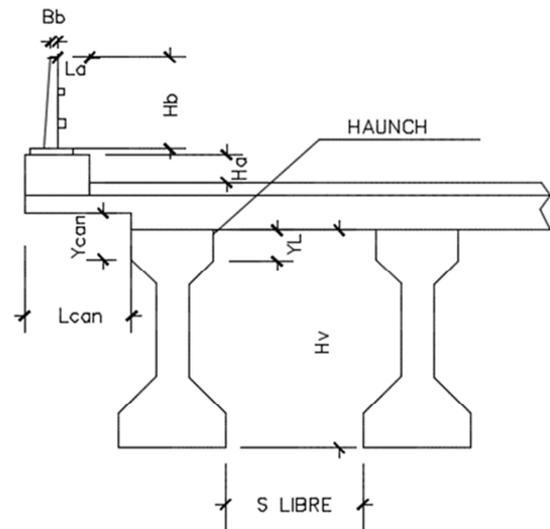


Figura 2. Representación geométrica de los datos tomados en campo.



Figura 3. Acelerómetro durante el monitoreo.

2.1 Sistema de monitoreo de aceleraciones

Durante las pruebas en campo se utilizaron dos equipos para monitorear las vibraciones, colocados en el punto medio y en un cuarto de la luz de cada puente. Cada equipo está formado por una placa Arduino Uno, un sensor ADXL335 (acelerómetro) y una computadora portátil conectada a la placa Arduino mediante cable USB. En la figura 4 se muestran el acelerómetro y la placa Arduino utilizados.

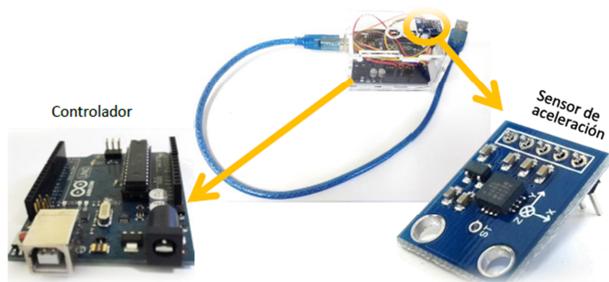


Figura 4. Microcontrolador Arduino Uno y sensor acelerómetro ADXL335.

La conexión USB entre la placa Arduino y la computadora portátil (*software* disponible en <http://www.arduino.cc>) se utilizó para para transmitir datos, cargar códigos y como fuente de poder para el microcontrolador. Los datos de aceleración se registraron cada 5 milisegundos, utilizando una velocidad de transmisión de 38400 bits por segundo, y se almacenaron en un archivo de texto separado por comas para luego ser analizado en hojas de cálculo de Excel. Descripciones más detalladas sobre la configuración del sistema se pueden encontrar en Araúz y Rodríguez [4].

2.2 Postprocesamiento

Para identificar los modos principales y espectros de frecuencia – amplitud, se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) a los datos de aceleración. Se utilizó la FFT debido a que es una herramienta que permite hacer un análisis rápido y confiable de los datos, puntos que eran de interés debido a la gran cantidad de puentes a instrumentar. La FFT se aplicó a una zona concreta de los datos, o ventana de tiempo, en la cual se observa un registro de aceleraciones típico de la vibración amortiguada (ver figura 5).

Mediante el análisis se obtiene el contenido de frecuencias vibratorias del puente. Para la mayoría de los puentes se puede observar claramente un valor máximo que ocurre en frecuencias bajas (distintas de cero), el cual se interpreta como el primer modo de vibración del puente. Por ejemplo, en la figura 6 se muestra el contenido de frecuencias del nuevo puente sobre el río Chico, para el cual se determinó un primer modo de vibración de 1.66 Hz.

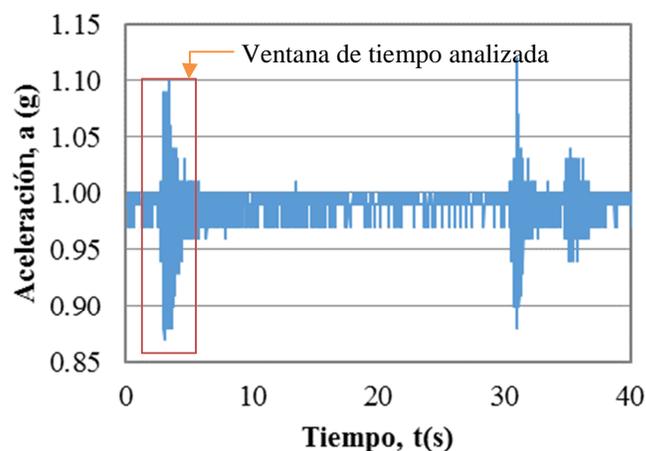


Figura 5. Aceleración y tiempo de la prueba para el puente sobre el río Chico.

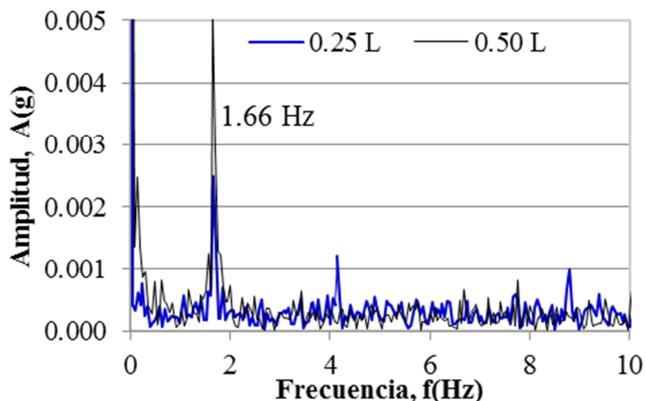


Figura 6. Contenido de frecuencia obtenido para el nuevo puente sobre el río Chico. Longitud 80.20 m.

3. Resultados

Con los datos geométricos de las estructuras, registrados en la bitácora del monitoreo, se clasificó los puentes según la sección transversal de las vigas que forman parte de su estructura. Durante este estudio se incluyó las siguientes categorías:

- AASHTO IV,
- NU (puentes con vigas NU190, NU160, y NU90),
- Vigas especiales (puentes con vigas Cajón o Losa Sólida).

En la figura 7 se muestra la cantidad de puentes registrados por categoría (tipo de viga). En la figura 8 se muestra la cantidad de puentes según el año de fabricación (para los puentes que no cuentan con una placa indicando el año de construcción se incluyó la categoría de “desc.”).

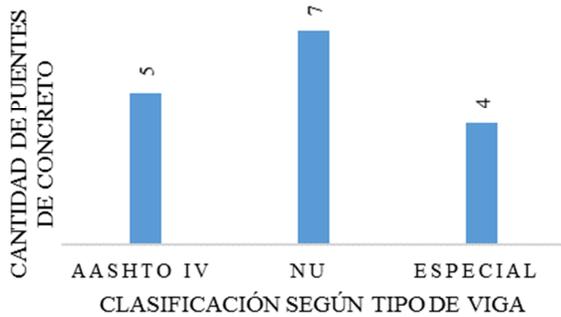


Figura 7. Cantidad de puentes respecto a su tipo de estructura.

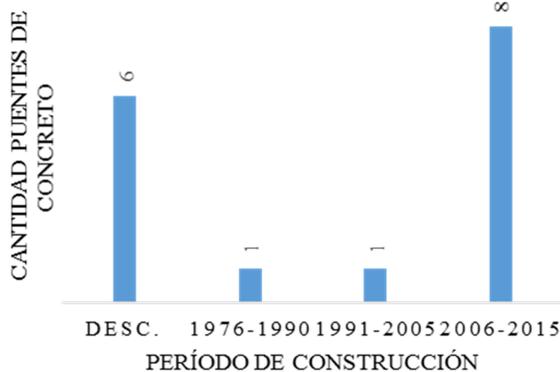


Figura 8. Cantidad de puentes respecto a su año de construcción.

Las frecuencias obtenidas para cada puente se presentan en la tabla 1. Adicionalmente, en esta tabla se presenta el código propuesto para los puentes (conformado por los últimos seis dígitos de las coordenadas del puente en sistema UTM), la luz del puente y el período de vibración del puente.

3.1 Análisis de resultados

La vibración de un puente depende de muchas variables, por lo cual, su estudio exhaustivo es complejo. Sin embargo, el estudio de la vibración libre de una viga prismática homogénea simplemente apoyada, con comportamiento lineal elástico, es significativamente más sencillo, y depende solamente de tres parámetros (1) la rigidez flexionante (EI), (2) la masa por unidad de longitud (m), y (3) la longitud de la viga (L).

Tabla 1. Valores de longitud, frecuencia natural y períodos

	Código	Puente sobre:	[tramo] Luz (m)	f (Hz)	T (s)
PUENTES CON VIGA TIPO AASHTO	P324440-939760	Río Chico	[a]18.50	6.10	0.16
			[b]45.70	2.29	0.44
			[c]16.00	5.71	0.17
	P330300-936810	Río Chirigagua	36.00	2.83	0.35
	P332610-935900	Río Platanal	38.00	2.98	0.34
	P340130-931970	Quebrada san Cristóbal	25.60	2.83	0.35
PUENTES CON VIGA TIPO ESPECIAL	P350970-930610	Río Brazo de Gómez	35.00	3.32	0.30
	P324430-939780	Río Chico (nuevo puente)	80.20	1.66	0.60
	P329010-937560	Río Caimito	16.30	5.86	0.17
	P351520-929900	Río Chiriquí	90.00	1.27	0.79
	P370750-925160	Río Corrales	[f]15.00	6.35	0.16
			[e]20.00	6.44	0.15
			[d]25.00	2.4	0.41
			[c]25.00	2.64	0.38
			[b]20.00	6.88	0.14
			[a]15.00	6.79	0.15
PUENTES CON VIGA TIPO NU	P362980-928910	Quebrada Chorchita	40.90	2.49	0.40
	P363190-928970	Quebrada Gallinas	20.60	5.08	0.20
	P396070-916160	Río Juay	38.00	2.78	0.36
	P397420-917090	Río Galiqué	40.00	2.44	0.41
	P398270-916800	Río Dupí	[b]38.25	2.73	0.37
			[a]23.50	6.20	0.16
	P405010-914650	Río San Félix	[a]38.25	2.83	0.35
			[b]27.00	5.22	0.19
			[c]27.00	4.49	0.22
[d]38.25			2.73	0.37	
P409100-912060	Río Santa Lucía	45.00	2.34	0.43	

Durante este estudio, para puentes de concreto, se propone verificar el efecto del más simple de estos parámetros, la longitud del puente.

Al verificar la relación entre la longitud de los puentes de concreto, y la frecuencia de vibración de los mismos, se notó una tendencia a la disminución de la frecuencia de vibración con el aumento de la longitud del puente, independientemente del sistema estructural (tipo de viga) del puente (ver figura 9). Esta tendencia concuerda con la teoría de vibración de vigas, y es el comportamiento esperado si se aislara el efecto de la longitud. El hecho de que la tendencia sea clara, aun cuando se trata de varios puentes con diversas secciones transversales, indica que la longitud del puente es el parámetro que más efecto tiene sobre la vibración de los 16 puentes estudiados.

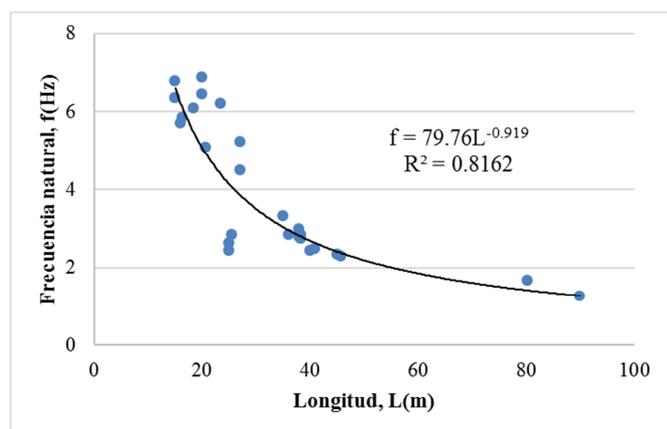


Figura 9. Longitud vs frecuencia. Datos de estructuras de concreto (n=27).

En la figura 10 se muestra la correlación entre la longitud y el periodo de vibración del puente (T), el cual es un parámetro conveniente, ya que se observó una correlación lineal con la longitud del puente. La ecuación que relaciona los parámetros de longitud y periodo, para la muestra global de los puentes de vigas de concreto, se estimó como:

$$T_E = 1s \left(\frac{L}{100 m} \right) \quad (1)$$

Donde T_E representa el periodo esperado y L la longitud de las luces.

De esta relación y las muestras, se obtiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.83$; lo cual representa la fracción de variación total de los periodos medidos que puede ser explicado por medio de este

modelo lineal con origen 0,0. Representando así la bondad de ajuste de este modelo de regresión, siendo esta representativa para valores por encima de 0.70 [5].

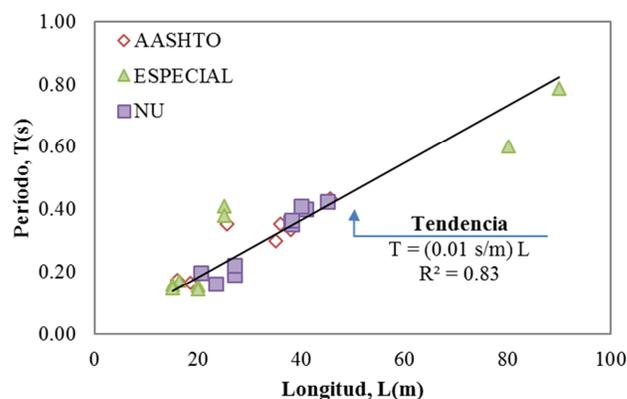


Figura 10. Período de vibración vs longitud (n = 27).

3.2 Período máximo esperado

Algunos tipos de deterioro estructural causan la reducción de la rigidez de los puentes, lo cual a su vez resulta en un aumento del periodo de vibración natural de los puentes. En el análisis, algunos de los puentes presentan periodos de vibración inferiores a la tendencia general, esto debido a que el comportamiento del puente depende de muchas variables que pueden presentar variación similar a la de una distribución estándar. En la figura 12 se observa que el puente P370750-925160 presenta un periodo de vibración de 0.14 s (30% por debajo de la tendencia). Entre los principales factores que influyen en este comportamiento pueden estar: una alta rigidez del concreto utilizado, un cambio en las condiciones de apoyo (pérdida de la condición de apoyo simple), o simplemente que se haya utilizado una viga con una rigidez mayor a la utilizada en otros puentes de similar longitud; sin embargo, se requiere de una evaluación profunda del puente para determinar cuál (o cuáles) de los factores han causado esta tendencia.

La desviación observada para algunos puentes, los cuales muestran periodos mayores a lo esperado, puede deberse a diversas causas, entre estas está el daño estructural. En las figuras 11, 12 y 14 se muestran los periodos de los puentes obtenidos experimentalmente. En rojo se muestran los datos de puentes cuyos periodos se desvían considerablemente de la tendencia general. Para determinar los rangos aceptables de varianza de los valores de respuesta dinámica de las estructuras, se

propone el cálculo un valor que se considerara como el período máximo esperado (PME), como se describe a continuación:

- Para cada puente se calcula un factor que establece el radio de los períodos de los sistemas estructurales tomados durante el monitoreo, entre el valor de la ecuación lineal de tendencia general de los puentes, así:

$$\bar{F}_{e/t} = \frac{\text{valor experimental}}{\text{tendencia}} = \frac{T_{\text{observado}}}{1s\left(\frac{1}{100\text{ m}}\right)} \quad (2)$$

- Del grupo de valores $F_{e/t}$, obtenidos para todos los puentes, se calcula el promedio ($\bar{F}_{e/t}$) y el coeficiente de variación (COV_F). Estos parámetros sirven de referencia para identificar períodos que se alejan de la tendencia, ya que aproximadamente el 84% de los valores de $F_{e/t}$ (si consideramos una distribución normal) se registrarán por debajo de:

$$(1 + COV_F) \cdot \bar{F}_{e/t} \quad (3)$$

- Período Máximo Esperado: La ecuación de esta nueva línea de tendencia, se puede describir utilizando el coeficiente de variación del factor $F_{e/t}$, como sigue:

$$PME = (1 + COV_F) \cdot T_E \quad (4)$$

Los resultados del planteamiento anterior se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Valores estadísticos

Función	Valor
$\bar{F}_{e/t}$	0.97
COV_F	0.23
$(1 + COV_F)$	1.23

Utilizando el procedimiento propuesto para la determinación del período máximo esperado y reemplazando, se obtiene:

$$PME = 1s\left(\frac{L}{80\text{ m}}\right) \quad (5)$$

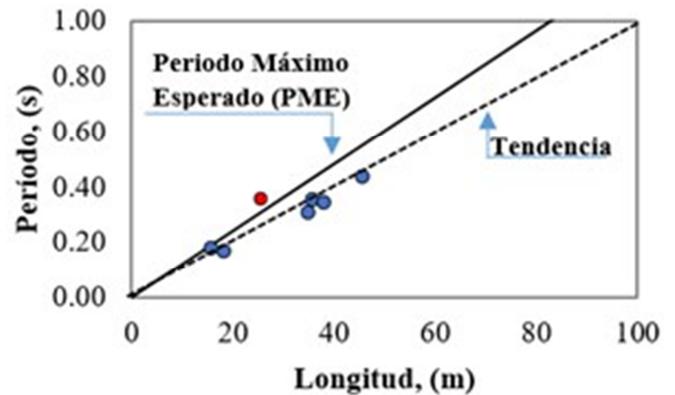


Figura 11. Período de vibración vs longitud - puentes con viga AASHTO IV (n = 7).

En la figura 11 se observa que uno de los puentes con viga tipo AASHTO muestra un período de vibración que se aleja más de una desviación estándar del comportamiento promedio de los puentes estudiados; específicamente, P340130-931970 muestra un período mayor al período máximo esperado (PME). Adicionalmente, el período de vibración del puente P324440-939760[c], es marginalmente inferior al PME.

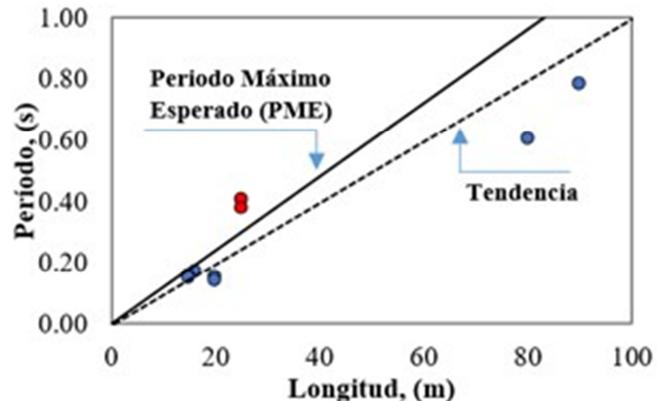


Figura 12. Período de vibración vs longitud - puentes con vigas especiales (n=9).

Para los sistemas de vigas especiales, las luces internas del P370750-925160 marcan valores por encima del límite superior de respuesta dinámica para los períodos (ver figura 12).

El PME no debe ser utilizado como un indicador definitivo de daño, sin embargo, este parámetro puede ayudar a seleccionar los puentes que deben ser evaluados estructuralmente para establecer si existe daño, y cuál es la capacidad de carga del puente.

En la figura 13 y 14 se observan el estado actual de los puentes que presentan período por encima del PME. A simple vista no se observa un daño significativo; sin embargo, tomando en cuenta la desviación de la frecuencia se consideran como candidatos para estudios más profundos sobre la capacidad del puente.



Figura 13. Vista bajo el Puente 340130-931970.



Figura 14. Vista bajo el puente 370750-925160.

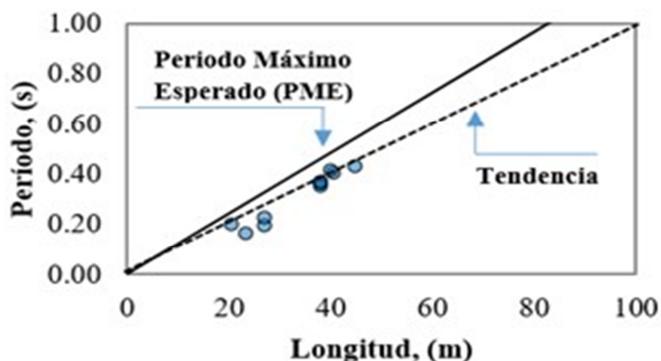


Figura 15. Período de vibración vs longitud - puentes con viga NU (n = 11).

Tabla 3. Valores Medida/Tendencia por tipo de viga

	Código	Medida/Tendencia
PUENTES CON VIGA TIPO AASHTO	P324440-939760	[a]0.9
		[b]0.9
		[c]1.0
	P330300-936810	1.0
	P332610-935900	0.9
	P340130-931970	1.4
PUENTES CON VIGA TIPO ESPECIAL	P350970-930610	0.9
	P324430-939780	0.7
	P329010-937560	1.0
	P351520-929900	0.9
	P370750-925160	[f]1.0
		[e]0.8
		[d]1.6
		[c]1.5
		[b]0.7
		[a]1.0
PUENTES CON VIGA TIPO NU	P362980-928910	1.0
	P363190-928970	1.0
	P396070-916160	0.9
	P397420-917090	1.0
	P398270-916800	[b]1.0
		[a]0.7
	P405010-914650	[a]0.9
		[b]0.7
		[c]0.8
		[d]1.0
	P409100-912060	0.9

Los puentes con sistemas de vigas tipo “Nebraska University” (NU) marcan períodos por debajo del PME (ver figura 15). Estos puentes son de reciente construcción en la vía interamericana.

3.3 Factor Medida/Tendencia

Se establece un factor los períodos de los sistemas estructurales tomados durante el monitoreo, entre el valor de la ecuación lineal de tendencia del gráfico para las luces de cada sección del puente; para determinar los rangos aceptables de varianza de los valores de respuesta dinámica de las estructuras.

4. Conclusiones

Como parte de este estudio se puede concluir lo siguiente:

1. El monitoreo de aceleraciones en 16 puentes de concreto permitió estimar la frecuencia natural de vibración de los mismos.
2. Se observó una fuerte correlación ($R^2 = 0.83$) entre la longitud y el período de vibración de los puentes de concreto estudiados, aún para secciones con diferentes propiedades y métodos constructivos.
3. El período de los puentes de concreto estudiados se puede estimar como $T_E = 1 s \left(\frac{L}{100 m} \right)$.
4. En algunos puentes se observó períodos de vibración alejados de la tendencia general, específicamente, los puentes P340130-931970 y P370750-925160 cuentan con un período de vibración mayor al período máximo esperado (PME). Por otro lado, el período del puente P324440-939760 es muy similar al PME, alejándose así de la tendencia general.
5. La medición de frecuencias de vibración de puentes se puede llevar a cabo utilizando equipos de bajo costo (e.d. placas Arduino).

5. Recomendaciones

Basado en los resultados de este estudio, se puede recomendar:

1. Continuar con la evaluación de frecuencias de vibración de otros puentes en Panamá, con el fin de robustecer la tendencia estadística; y darle seguimiento a los puentes que ya fueron estudiados durante este proyecto, con el fin de crear una base de datos para analizar cambios que pueda sufrir la estructura a través del tiempo.
2. Implementar mejoras al equipo utilizado en el sistema de monitoreo de frecuencias naturales en

puentes, tales como la utilización de sistemas de transferencia de datos por medio de sistemas inalámbricos, el cual pueda monitorearse a través de celulares o computadoras portátiles.

3. Evaluar a fondo la estructura de los puentes de concreto que presenten períodos de vibración superiores al PME.

6. Agradecimiento

Agradecemos al Dr. José Rolando Serracín por su apoyo técnico en el uso de sistemas Arduino. También agradecemos al Lic. Alex Matus por brindar su apoyo al proyecto y al equipo de conductores del Centro Regional de Chiriquí: Sr. Alvinio Villarreal, Sr. César Sitton y Sr. Juan Castillo; por la ayuda brindada. Agradecemos a su vez al Ing. José Aníbal Castillo, Director Regional del MOP, por permitarnos realizar estas pruebas en los puentes de la región chiricana.

7. Referencias

- [1] W. Rücker, F. Hille and R. Rohrmann, "Guideline for the assessment of existing structures," Federal Institute of Materials Research and Testing , Germany , 2006.
- [2] C. R. W. K. Farrar, "An introduction to structural health monitoring," Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 10, pp. 303-315, 2007.
- [3] "Puentes antiguos y en mal estado son peligro latente," Diario Panamá América, 27 Julio 2013.
- [4] O. A. Araúz and S. M. Rodríguez, Identificación estructural de puentes basado en la vibración (tesis de pregrado), Universidad Tecnológica de Panamá , 2016.
- [5] O. Castejón, "Diseño y análisis de experimentos," 2011. [Online]. Available: <http://www.uru.edu/fondoeditorial/libros/pdf/manualestatistix/>.
- [6] O. Salawu, "Detection of Structural Damage through changes in frequency: a review," Elsevier Sciences, vol. 19, no. 9, pp. 718-723, 1997.
- [7] G. K. C. P. Hyunjun Jung, "Impact Factors of Bridges based on natural frequency for various superstructure types," KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 17, no. 2, pp. 458-464, 2013.
- [8] D.-S. J. N.-S. K. J.-G. Y. Chul-Young Kim, "Effect of vehicle mass on the measured dynamic characteristics of bridges from traffic-induced vibration test," Society of Experimental Mechanics , vol. 4359, no. 2, pp. 1106-1111, 2001 .