

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE LA VIBRACIÓN DE PUENTES ATIRANTADOS PEATONALES

PARAMETRIC STUDY OF VIBRATION ON PEDESTRIAN CABLE-STAYED BRIDGES

Manuel Jara Díaz¹, Luis F. Silva Gómez²,
Jorge A. Aguilar Carboney³

RESUMEN

Se identificaron los principales problemas asociados a las vibraciones transversales que se producen en puentes peatonales de tipo atirantado. Se compararon las frecuencias admisibles que se proponen en normas y especificaciones, tanto para el confort de los usuarios, como para evitar ampliaciones dinámicas excesivas. Mediante el estudio de un puente prototipo se identificaron las principales variables geométricas del puente que afectan las frecuencias horizontales y verticales de los puentes y las configuraciones modales correspondientes. Se analiza la relación entre las frecuencias transversales y los principales parámetros de la respuesta sísmica del puente, para la identificación de una posible condición de resonancia o de malestar en los peatones que transitan por el puente.

Palabras clave: Puente peatonal, puente atirantado, frecuencias horizontales, resonancia.

ABSTRACT

The aim of the paper is the assessment of transverse vibration problems on pedestrian cable-stayed bridges. The most important parameters associated to transverse vibration were identified. The objective is the evaluation of the range of recommen-

ded frequencies in codes and specifications of various countries to avoid the loss of comfort and the possible dynamic amplification produced by walking during bridge operation. A cable-stayed bridge prototype is proposed for the parametric study of the principal geometric characteristics of this type of structures in order to assess the potential dynamic amplification in the transverse direction. The relationship between the transverse frequencies and the principal parameters of the bridge seismic response are discussed for the identification of a possible resonance condition.

Keywords: Footbridge, cable stay bridge, horizontal frequencies, resonance.

INTRODUCCIÓN

Los puentes peatonales modernos tienden a ser cada vez más esbeltos, lo que ha dado origen a un mayor número de problemas de carácter vibratorio durante el tránsito de personas. El puente Milenio en Inglaterra (Fig 1) es un claro ejemplo de lo anterior; consiste en un puente peatonal metálico construido en la ciudad de Cambridge, Inglaterra, que empezó a bambolearse cuando se encontraba lleno de personas, el movimiento fue tan fuerte, que los peatones tenían que aferrarse a las barandillas, o dejar de caminar para mantener su equilibrio. Observaciones mostraron que la parte central se movió 70 mm aproximadamente (Aramayuo y Martel, 2017).

Otros puentes peatonales que han experimentado problemas de vibración ante el paso de personas son:

El puente sobre el río Erlach, en Suiza (Thór, 2011), que consiste en un arco de acero con una viga tipo cajón, con una longitud principal de 110 m. La máxima amplitud lateral de desplazamiento medida en 1972 fue de 25 mm. La frecuencia de vibración lateral fue de 1.12 Hz. La medida adoptada para so-

¹ Docente de la Facultad de Ingeniería. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México Email: mjarad10@gmail.com

² Estudiante de maestría- Facultad de Ingeniería. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México Email: lfsg147@gmail

³ Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas. Email: jaguilar@unach.mx

lucionar el problema fue la instalación de disipadores de vibración sintonizados.



Figura 1. Puente peatonal Milenio, Cambridge (www.dreamstime.com)

El puente Parque de Toda (Fig 2), que es un puente atirantado de acero (Thór, 2011), con claros de 45 m y 134 m, ubicado en Toda City Park, Japón. Tuvo problemas después de la apertura en 1989, en el que soportó una densidad máxima 1.0 - 1.5 personas/m². La máxima cantidad de peatones en el puente peatonal es de 2000. La máxima amplitud lateral fue de 10 mm en la plataforma peatonal, 300 mm en los cables y la frecuencia de vibración lateral fue 0.9 Hz (Fujino et al, 1993). Se solucionó el problema con la instalación de pequeños amortiguadores de líquido sintonizado en el interior del cajón.



Figura 2. Puente parque de Toda, Japón (Ortiz, 2013)

El puente Solferino en París, Francia, que es tipo arco, construido con acero y madera; los problemas dinámicos se suscitaron después de la apertura en diciembre del año 1999, con una frecuencia de vibración lateral de 0.69 Hz.

El puente del estadio del equipo de fútbol Rayados de Monterrey en el Estado de Nuevo León, México (Fig 3), también conocido como el puente bailarín, es un puente exclusivamente peatonal. Desde que se inauguró el estadio con capacidad para 51 mil espectadores, los aficionados han expresado malestar debido a que en su la parte del claro central, que comprende el paso de unos 100 metros de longitud que cruza sobre el río La Pastora, el puente se mueve hacia los lados (Campos, 2015). La gran densidad de personas que transitaba sobre el puente daba origen a vibraciones excesivas, que llegaron a ser captadas en video por los propios usuarios, ya que tenían que modificar su modo de caminar. El problema se solucionó con osciladores resonantes de masa colocados en las columnas (Alvarado, 2016).



Figura 3. Puente peatonal del estadio Rayados, Nuevo León, México
<http://www.posta.com.mx/nuevo-leon/abriran-puente-bailarin-juego-rayados-vs-chivas>

EFFECTOS DINÁMICOS EN Puentes PEATONALES

Cuando una persona camina sobre un puente peatonal se producen fuerzas dinámicas en las tres direcciones principales de la estructura: vertical, lateral y longitudinal. La magnitud de las aceleraciones y la amplitud del movimiento dependen de la frecuencia de paso del peatón, de su velocidad al caminar y de la longitud de cada uno de los pasos. Durante una caminata constante, sin interrupciones, se suele producir un movimiento periódico y, en caso de entrar en sintonía con las frecuencias de la estructura,

las fuerzas correspondientes también suelen ser periódicas, con respuestas que se incrementan con el tiempo.

En general, cuando se realiza un análisis de vibraciones en puentes peatonales se piensa que la vibración vertical es el movimiento principal, sin embargo, se ha observado en distintos puentes que los movimientos transversales suelen ser lo más importantes. Esto se debe a que los peatones ajustan su forma de caminar cuando se producen vibraciones verticales, debido a que el elevado amortiguamiento de las piernas y demás articulaciones reducen las vibraciones verticales y el centro de gravedad no se ve tan afectado por el movimiento que se produce en dicha dirección (Carchi y Orellana, 2015). Esta situación no se produce durante un movimiento horizontal, en el que el equilibrio de las personas se logra mediante un balanceo de su centro de gravedad, como se ilustra en la figura 4. Este movimiento lateral del centro de gravedad hace que el peatón sea más sensible al movimiento en la dirección transversal, lo que los lleva a caminar con los pies más separados. Para conservar el equilibrio, el centro de gravedad de una persona se desplaza lateralmente en un orden de 1 a 2 cm según Carchi y Orellana (2015), de manera que la fuerza que produce un peatón al caminar no solamente consiste en una componente vertical, sino que también presenta un movimiento en dirección horizontal (Fig 4). Se estima una carga horizontal del orden del 10% de la magnitud de la carga vertical, a partir de un número limitado de pruebas realizadas en plataformas que no se desplazan (Carchi y Orellana, 2015). Willford (2002), realizó algunos estudios del movimiento horizontal del Puente del Milenio y los resultados mostraron que cuando la amplitud del desplazamiento lateral de la cubierta del puente aumento de 0 a 30 mm, se generaba un incremento hasta del 10% de la carga dinámica horizontal con respecto a la carga estática vertical.

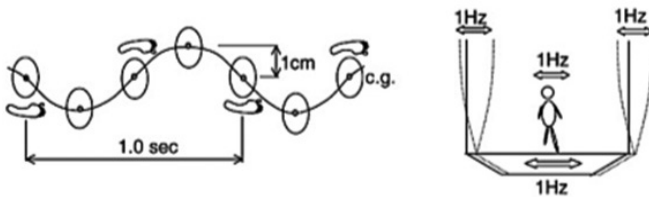


Figura 4. Mecanismo lateral de vibración
(Carchi y Orellana, 2015)

En el caso de un grupo de personas transitando sobre la estructura, se combinan una serie de variables que impiden que el efecto del grupo se considere exclusivamente como la suma del efecto de cada peatón. Entre las variables aleatorias que se presentan en un grupo de personas se pueden mencionar: el movimiento fuera de fase entre los individuos, la densidad de peatones por metro cuadrado, la velocidad de circulación de cada persona, el peso de cada peatón, la distribución no uniforme del grupo, la libre circulación en cada sentido y la relación de todos estos factores con las propiedades dinámicas del puente. El problema puede abordarse mediante algunas simplificaciones y la adopción de factores en términos de probabilidades.

FRECUENCIA DE PASO

Se considera que durante una caminata típica una persona da 2 pasos por cada segundo, es decir, las pisadas se producen con una frecuencia de 2 Hz. De acuerdo con Hauksson (2005), la frecuencia de vibración sigue una distribución normal de 2.0 Hz y una desviación estándar de 0.173 Hz. Cuando una persona camina lento su frecuencia de paso está comprendida entre 1.4 y 1.7 Hz. Cuando una persona camina rápido su frecuencia de paso se incrementa a valores entre 2.2 y 2.4 Hz. La frecuencia lateral está en el rango de 0.7 a 1.2 Hz debido a que se estima que la componente lateral de la fuerza se aplica a la mitad de la frecuencia de paso (Fig 5). Las frecuencias que se producen durante el trote o durante saltos están comprendidas entre 2.5 y 3.2 Hz y de 1.3 a 2.4 Hz respectivamente (Anderson y col., 2012). La posibilidad de que se produzcan saltos durante un tiempo superior a unas decenas de segundos, por ejemplo, durante manifestaciones o muestras de apoyo a alguna personalidad o durante algún evento, puede conducir a una situación catastrófica si las frecuencias del salto son semejantes a las del puente.

De acuerdo con lo anterior, es evidente la necesidad de evaluar adecuadamente las frecuencias de un puente peatonal para evitar que se produzca alguna amplificación dinámica producto de una sintonización con las frecuencias de la carga viva sobre la estructura. En vista de que la frecuencia natural de este tipo de estructuras depende de una serie de factores que incluyen, entre otros, la tipología estructural

ral, las características geométricas y condiciones de frontera, los materiales de construcción y la longitud de los claros, conducen a un problema de alta variabilidad que dificulta el procedimiento de diseño. Carchi y Orellana (2015) afirman que las pasarelas presentan una frecuencia vertical en el intervalo de 1.4 a 2.4 Hz y una frecuencia horizontal de 0.7 a 1.2 Hz. Se observa que las frecuencias al caminar son semejantes a la frecuencia natural que indican estos autores, lo que induciría vibraciones excesivas; por tal motivo, lo que recomiendan realizar un diseño que contemple las cargas dinámicas debidas al tránsito de peatones. Sin embargo, no se detalla el tipo de estructuras, ni las condiciones generales que llevan a los valores "típicos" de frecuencias de vibrar. En este trabajo se pretende estimar estas frecuencias para contribuir a un diseño que considere uno de los principales problemas a los que se enfrentan actualmente los puentes peatonales de tipo atirantado que se construyen actualmente.

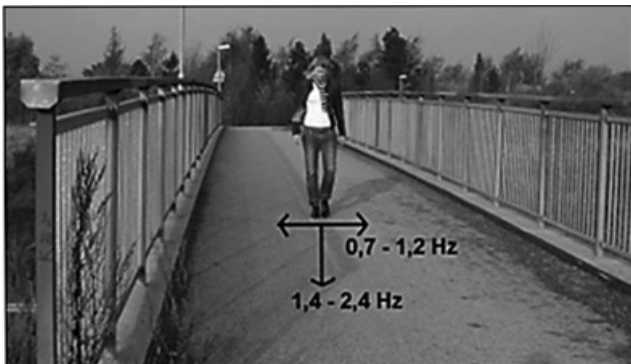


Figura 5. Frecuencias de las fuerzas verticales y laterales (Hauksson, 2005)

Por otro lado, existen normas internacionales que ofrecen información sobre los valores permisibles de diseño en cuanto a aceleraciones y frecuencias. Sánchez et al., 2011, muestran una recopilación de frecuencias estructurales de vibrar críticas de algunas normas en el mundo. De acuerdo con esta recopilación, se definen como vibraciones críticas en dirección transversal a las que se producen con una frecuencia de entre 0.5 y 2.5 Hz. Para la dirección vertical a frecuencias comprendidas entre 1.5 y 5 Hz. Por otro lado, Ortiz (2013), según Setra (2006), proporciona tablas (tablas 1 y 2) donde se calculan frecuencias y riesgos de resonancia a tomar en consideración.

Tabla 1. Rangos de riesgo de resonancia.

Rango 1:	Riesgo máximo de resonancia.
Rango 2:	Riesgo medio de resonancia
Rango 3:	Bajo riesgo de resonancia para las situaciones de carga estándar.
Rango 4:	Riesgo insignificante de resonancia. <small>Setra (2006) citado por Ríos (2013)</small>

Tabla 2. Rangos de frecuencias críticas en riesgos de resonancia (Hz) para vibración lateral.

Rango de frecuencias	0	0.3	0.5	1.1	1.3	2.5
Rango 1						
Rango 2						
Rango 3						
Rango 4						

Setra (2006) citado por Ríos (2013)

Algunos puentes han sido reforzados para evitar las vibraciones excesivas debidas a la acción dinámica producida por las personas, sin embargo, hay problemas que pueden ser resueltos desde el momento en el que se plantea el diseño de la estructura, lo cual conduce generalmente a soluciones más eficientes. En particular, las pasarelas de tipo atirantado suelen ser muy flexibles, con frecuencias de vibración muy bajas, lo que las hace susceptibles a movimientos que exceden los niveles de confort y de seguridad para los usuarios. Por tal motivo, es indispensable estimar la frecuencia de vibración transversal de puentes peatonales de tipo atirantado con distintas configuraciones geométricas, para evitar estructuras con respuestas cercanas a la frecuencia de vibración de los peatones que amplifiquen el movimiento a niveles inaceptables.

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE UN PUENTE PROTOTIPO

Los puentes peatonales típicos que se construyen en México normalmente llegan a librar claros entre 15 y 20 m aproximadamente, sin embargo, el incremento de flujo vehicular requiere ampliar y extender el número de carriles utilizados, por lo que los diseños convencionales tienen que ser reemplazados por otros que soporten claros más grandes. Además, la arquitectura urbana de las ciudades busca soluciones más atractivas a los puentes peatonales tradicio-

nales. En algunas ciudades el uso de puentes peatonales atirantados ya es un hecho, como se muestra en los puentes de la Figura 6.

La metodología propuesta para el estudio consiste en proponer un puente prototipo con base en las características de puentes atirantados existentes en México y el mundo, para el caso de puentes atirantados peatonales (Fig 7). La geometría del puente prototipo consiste en una estructura con un claro principal (L_p) de 106 m de longitud, con dos claros de compensación (L_c) de 22 m cada uno; el sistema de suspensión consiste en 2 torres en forma de H con altura total (H_t) de 30 m, sobre las cuales se anclan cables de acero de alta resistencia con 28.50 cm^2 de área efectiva. El tipo de atirantamiento elegido es en abanico distribuido en dos planos laterales. El gálibo o altura bajo el tablero es de 8 m y 22 m sobre él, para conformar los 30 m de altura total de las torres. Los fustes o postes de las torres tienen dimensiones de $3 \times 3 \text{ m}$ y $2 \times 2 \text{ m}$ en la parte inferior y superior del tablero respectivamente, considerando un $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$. Entre las torres en forma de H se colocó una viga de concreto de $120 \times 50 \text{ cm}$ para proporcionar rigidez transversal al puente, condición importante en zonas donde se presentan efectos de sismo y/o viento. La losa de concreto armado tiene un espesor de 30 cm y un ancho total de 6 m con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$. El tablero se encuentra suspendido en 40 cables y sin apoyarse directamente sobre la viga ("tablero flotando").

Para modelar los pilares se dividió la longitud total en tramos de 2 m de longitud, para estimar con mayor precisión los modos y formas de vibrar de la

estructura que si se considera una sola barra. Los apoyos se consideran empotrados. El tablero del puente se modeló mediante elementos finitos tipo shell cuadrados de $2 \times 2 \text{ m}$, ya que no se tiene la seguridad de que el tablero se comporte como un diafragma rígido. Los tirantes están a 6 m de separación, lo que da lugar a 6 tirantes en cada claro de compensación y 34 en el claro principal, con un total de 40 tirantes. Para calcular la tensión inicial que se asigna a cada tirante se aplica el método de la viga continua, es decir, primero se calculan las reacciones en cada punto donde se ubicarían los tirantes como si el desplazamiento vertical fuera cero. Posteriormente, se hacen los cálculos de la tensión mínima requerida y el área mínima de acero para que no se excedan los esfuerzos admisibles por resistencia y fatiga. Se agregó una carga viva de 514 kg/m^2 sobre la losa representando la carga peatonal y sobrecarga de 250 kg/m sobre las vigas longitudinales representando el peso de las barandas y de personas descansando sobre las mismas. Para poder reducir las deformaciones verticales y cumplir con el límite de un milésimo del claro para carga peatonal (AASHTO, 2007), se modifican las tensiones iniciales en los tirantes a través de un proceso iterativo de prueba y error. El modelo numérico del puente se muestra en la Figura 7.

Una vez definida la geometría y características del puente prototipo, se realizó un análisis paramétrico para las distintas variables que afectan las propiedades dinámicas de un puente con estas características. El objetivo es poder evaluar el impacto que tienen las variables seleccionadas para estimar los valores que conducen a una potencial cercanía con



(a)



(b)

Figura 6. (a) Puente en la Universidad Autónoma de Nuevo León (<http://www.info7.mx/>) (b) Puente USBI en la Universidad Veracruzana (<http://www.lospoliticosveracruz.com.mx/mas-de-1-mil-600-obras-en-4-anos/>)

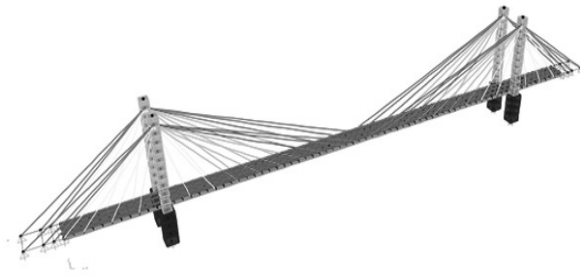


Figura 7. Modelo numérico del puente peatonal
(Elaboración propia)

las frecuencias de peatones en la dirección transversal. La ubicación y tensión inicial de los cables se adaptó en cada modelo con el propósito de cumplir con las flechas admisibles que se mencionan en el párrafo anterior. Las variables que se estudiaron son:

- Ancho del tablero $B = 3, 4, 5$ y 6 m ($B/L_p = 0.028$ a 0.057)
- Relación de esbeltez de las torres $L/r = 20.8, 29.7, 34.6, 41.6$ y 51.7
- Longitud del claro $L = 80, 100, 106, 120$ y 150 m (se conserva relación claro principal/claro de compensación)

- Relación del claro principal al claro de compensación $L_c / L_p = 0.2, 0.235, 0.25, 0.265$ y 0.3 en el puente prototipo.
- Espesor del tablero $t = 28$ a 35 cm de espesor de la losa
- Tipo de atirantamiento = abanico (1), arpa (2) y mixto (3)

DISCUSIÓN SOBRE LOS EFECTOS DE LAS VARIABLES ESTUDIADAS

Las gráficas siguientes (Fig 8) muestran el comportamiento de los dos primeros modos de vibrar en la dirección transversal que se producen cuando se modifican los parámetros anteriores. Se presentan sólo dos modos transversales porque son los que contribuyen mayormente a la respuesta. Los modos superiores movilizan una masa muy pequeña y no se consideró necesario incluirlos en las figuras. Es importante recordar que el movimiento vertical es de menor importancia, de acuerdo con lo que se explica en el apartado del comportamiento dinámico de los puentes peatonales, y no se aborda en la presente discusión.

La primera gráfica muestra la variación de la frecuencia con el ancho del puente. Los anchos de

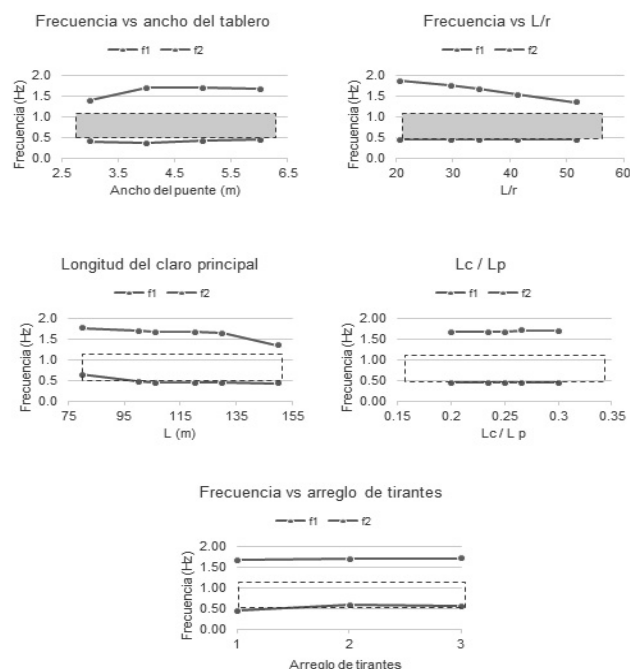


Figura 8. Relación de las frecuencias de los dos primeros modos de vibración en dirección transversal del puente con algunas de las variables estudiadas (Elaboración propia).

tablero seleccionados (3 a 6 m), conducen a frecuencias para el primer modo de vibración transversal entre 1.4 y 1.7 Hz, valores superiores al límite de riesgo máximo de resonancia en esa dirección (0.5 a 1.1 Hz), según los valores indicados en las tablas 1 y 2. La masa que se moviliza en el segundo modo de vibrar transversal es claramente inferior y las frecuencias de 0.4 son inferiores a los límites de riesgo máximo de resonancia. Al observar la tendencia de las frecuencias del primer modo, se estima que valores menores del ancho del puente pueden aproximarse al riesgo medio o máximo de resonancia. Anchos mayores ya no afectan el primer modo transversal y es interesante observar si el tipo de pila o apoyo entre tablero y pila conduzcan a modificaciones de interés en las frecuencias.

Al modificar la relación de esbeltez de las pilas, los valores de frecuencias transversales quedan entre 1.87 y 1.34 Hz, todas ellas fuera de la zona de riesgo de resonancia máximo o medio. Si se observa la tendencia, torres con mayor esbeltez que las propuestas puede conducir a un problema de resonancia.

La variación de la longitud del claro principal lleva a frecuencias entre 1.77 y 1.34 Hz. Los principales cambios de frecuencia se produjeron en la dirección vertical del tablero y en menor medida en la dirección transversal. Una vinculación distinta entre las torres y el tablero podrían llevar a variaciones más importantes que no fueron estudiadas en este trabajo y que se considera importante evaluar en siguientes estudios. El segundo modo transversal, para el puente de menor longitud, alcanza a entrar dentro de los límites de riesgo de resonancia.

La relación entre los claros de compensación y del claro principal no afectan de manera importante la frecuencia fundamental en la dirección transversal del puente, situación que se explica también por la ausencia de conexión entre torre y tablero. El arreglo de tirantes (última gráfica) no modifica la frecuencia transversal del puente. Se considera que el uso de un plano de tirantes, en lugar de los dos planos empleados en el estudio, lleva a variaciones importantes que deben ser consideradas en un estudio posterior.

Otro aspecto que merece atención es que el intervalo de frecuencias en el que se considera que se puede producir resonancia es amplio, pues abarca frecuencias que van desde 0.5 Hz ($T = 2$ s) hasta 1.3 Hz ($T = 0.77$ s), como se indica en la tabla 2 para

los niveles de riesgo máximo y medio. La amplitud de frecuencias que se consideran en riesgo dificulta que un puente peatonal, con las características de las que fueron consideradas en este trabajo, pueda caer dentro de la zona de riesgo de resonancia. Opciones distintas de estructuración pueden alejar más de la zona de resonancia a un puente atirantado peatonal y merecen estudiarse en una segunda etapa. Otra alternativa para alejarse de los límites de resonancia es el uso de masas sintonizadas o de disipadores de energía.

CONCLUSIONES

Los puentes peatonales modernos tienden a ser cada vez más esbeltos, lo que ha dado origen a un mayor número de problemas de carácter vibratorio durante el tránsito de personas.

Los peatones son más susceptibles a la vibración horizontal que a la vertical y se necesitan desplazamientos verticales de al menos 1 cm para que cause una molestia al peatón. Dado que las frecuencias transversales al caminar suelen estar entre 0.5 y 1.1 Hz, se debe evitar que el puente tenga su primera frecuencia transversal en ese intervalo.

Se compararon las frecuencias admisibles, tanto para el confort de los usuarios, como para evitar amplificaciones dinámicas excesivas, con las que se obtienen en puentes peatonales de tipo atirantado, mediante el análisis paramétrico de un puente prototipo. Se identificaron las variables que afectan las frecuencias horizontales de los puentes y las configuraciones modales correspondientes.

Anchos de tablero de 3 a 6 m, conducen a frecuencias para el primer modo de vibración transversal superiores al límite de riesgo máximo de resonancia en esa dirección. Se estima que valores menores del ancho del puente pueden aproximarse al riesgo medio o máximo de resonancia. Anchos mayores ya no afectan el primer modo transversal.

Relaciones de esbeltez de las torres (L/r) menores a 52 quedan fuera de la zona de riesgo de resonancia máximo o medio. Si se observa la tendencia, torres con mayor esbeltez que las propuestas puede conducir a un problema de resonancia.

La variación de la longitud del claro principal lleva a cambios de frecuencia principalmente en la dirección vertical del tablero y en menor medida en la dirección transversal. La relación entre los claros

de compensación y del claro principal no afectan de manera importante la frecuencia fundamental en la dirección transversal del puente, situación que se explica por la ausencia de conexión entre torre y tablero. El arreglo de tirantes tampoco modifica la frecuencia transversal del puente. Se considera que el uso de un plano de tirantes, en lugar de los dos planos empleados en el estudio, lleva a variaciones importantes que deben ser consideradas en un estudio posterior. También es necesario evaluar el efecto de una vinculación distinta entre las torres y el tablero ya que podrían llevar a variaciones más importantes en las frecuencias.

Otro aspecto que merece atención es que el intervalo de frecuencias en el que se considera que se puede producir resonancia es amplio, lo que dificulta que un puente peatonal, con las características de las que fueron consideradas en este trabajo, pueda caer dentro de la zona de riesgo de resonancia. El uso de masas sintonizadas o de disipadores de energía son alternativas que parecen atractivas para resolver el problema.

REFERENCIAS

- Aguilar, I. C., Moreno, M. (2005). Guía para el diseño de puentes peatonales colgantes analizado para construcción en casos de emergencia. México, D.F. Instituto Politécnico Nacional.
- Anderson, D. Gómez and P. Thomson, "Analysis of human-structure interaction in footbridges in Santiago de Cali," Santiago de Cali, 2012.
- Carchi, A. L., Orellana, P. A. (2015). Análisis dinámico de vibraciones bajo cargas peatonales para una pasarela en base a modelos matemáticos. Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Carrión, F. J., Hernández, J. R., Terán, J. (2005) Estudio experimental de un puente atirantado, evaluación de cables. Querétaro, México: Secretaria de Comunicaciones Y Transportes.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2003) Manual de Diseño de Puentes. Lima, Perú: Ministerio de transportes y comunicaciones.
- Flores, R. (2011) Estudio analítico del mecanismo de vibración inducido por el viento en los tirantes de un puente. Cd. Mx: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huergo, I.A. (2016) Control de vibraciones verticales en puentes peatonales mediante amortiguadores de masa sintonizados. Cd. Mx: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martel, E. (2014). Diseño de puente peatonal urbano bajo consideraciones HIVOSS. Argentina: Departamento de Construcciones y Obras Civiles, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán – Avenida Independencia 1800.
- Mayol, J. J. (2015). Diseño conceptual y dimensionamiento de una pasarela metálica curva atirantada con un pilono lateral inclinado situada en la rambla del Puerto de La cadena a su paso por el hospital universitario virgen de la Arrixaca. Cartagena: Universidad Politecnica de Cartagena.
- Ortiz, P. A. (2013). Evaluación del comportamiento vibratorio de puentes peatonales bajo carga peatonal. LIMA- PERU: Universidad nacional de Ingeniería.
- Rabanal, J. F. (2009). Respuesta aeroelástica de diversos tipos de puentes de tirantes.
- Rubio, D. (2010) Métodos de Definición de cargas en tirantes en puentes atirantados. Tesis (Master), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).
- Sánchez, J. A. (2013). Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales. Medellín: Dyna.
- Tapia, J., Pinzón, A. F. (2014) Pre diseño para un modelo de puente peatonal en intercepciones viales aplicadas a calzadas de alto flujo vehicular. Bogotá: Escuela de Ingenieros Militares.