

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN HUMANO-ESTRUCTURA EN PUNTES PEATONALES DE SANTIAGO DE CALI

ANALYSIS OF HUMAN-STRUCTURE INTERACTION IN FOOTBRIDGES IN SANTIAGO DE CALI

JHON ANDERSON SÁNCHEZ

Ing. Civil, Universidad del Valle, Cali, Colombia. jhon.sanchez.v@gmail.com

DANIEL GÓMEZ

M.Sc en Ing. Civil, Profesor Asociado, Universidad del Valle, Cali Colombia. daniel.gomez@correounivalle.edu.co

PETER THOMSON

Ph.D en Ing. Aeroespacial, Profesor Titular, Universidad del Valle, Cali, Colombia. pethomso@univalle.edu.co

Recibido para revisar Octubre 16 de 2012, aceptado Diciembre 6 de 2012, versión final Diciembre 12 de 2012

RESUMEN: En la actualidad, el incremento de la resistencia en nuevos materiales y las mayores luces entre apoyos hacen que los puentes peatonales sean más susceptibles a problemas de vibraciones excesivas. Infortunadamente las provisiones de las normas colombianas son limitadas para el diseño o rehabilitación de estas estructuras. En este artículo se presenta una clasificación de los puentes peatonales en Santiago de Cali que permite comparar efectos de la Interacción Humano-Estructura, aceleraciones máximas y frecuencias naturales, con los criterios de vibraciones para diseño especificados en las principales normas. Aunque en los 19 puentes estudiados no se superaron los límites de aceleraciones establecidas por las normas por una persona al caminar, 16 de los puentes presentaron vibraciones que generaron incomodidad en los peatones. En consecuencia, se recomienda que futuras normas colombianas establezcan valores límites de aceleraciones y frecuencias naturales en función del desempeño según niveles de comodidad y seguridad percibida por los peatones.

PALABRAS CLAVE: Interacción humano-estructura, vibración en puentes peatonales, cargas de servicio en puentes, respuesta dinámica, cargas antrópicas.

ABSTRACT: Modern footbridges are susceptible to vibration related problems due to the development of new materials with greater strength and the subsequent longer spans of these bridges. Unfortunately Colombian building codes are very limited when it comes to the design and retrofit of these structures. In this paper a classification is provided of the footbridges that exist in Santiago de Cali, and human-structure interaction effects, maximum accelerations and natural frequencies are compared with vibration design criteria specified by different building codes. Although measured accelerations in the 19 bridges considered in this study did not exceed the maximum values specified in the building codes for a person walking across the bridge, 16 of these bridges had vibration levels that caused discomfort in the pedestrians. Hence, it is recommended that future Colombian codes establish ranges of accelerations and natural frequencies in function of performance criteria that account for perceived comfort and safety.

KEYWORDS: Human-structure interaction, footbridge vibrations, bridge service loads, dynamic response, anthropic loads.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los puentes peatonales son estructuras cada vez más esbeltas debido a requerimientos estéticos y al incremento de la resistencia de los materiales modernos. Debido al aumento en la flexibilidad, disminución de la masa y uso de grandes luces entre apoyos, estas estructuras se hacen más sensibles a cargas dinámicas [1] y por lo tanto el uso cotidiano de las personas causa vibraciones, que en algunos casos pueden ser excesivas. Como consecuencia, las

condiciones de servicio ante vibraciones producidas por personas son las que están gobernando los criterios de diseño en este tipo de estructuras [2].

El incremento de problemas de vibraciones en puentes peatonales ha mostrado que éstos no deben ser diseñados para cargas estáticas únicamente. Algunos códigos y normas, entre ellas el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 [3], imponen límites en frecuencia o aceleración que no son suficientes para garantizar el confort de los usuarios. No sólo la frecuencia natural, sino

también las propiedades de amortiguamiento, la masa del puente y la carga del peatón son factores determinantes en la respuesta dinámica de la estructura [4].

El uso de grandes luces en puentes peatonales implica que los modos de vibración estén asociados generalmente a frecuencias bajas, entre 1 Hz y 8 Hz [1]. El andar de las personas está clasificado según el tipo de actividad y la frecuencia de paso. Para el caminar, la frecuencia de paso está entre 1.7 Hz y 2.3 Hz y para trote, entre 2.5 Hz y 3.2 Hz para el 90% de la población [5]. Lo anterior pone en evidencia el riesgo potencial de estas estructuras a la inducción del fenómeno conocido como resonancia. La resonancia ocurre cuando la frecuencia natural del puente coincide con la frecuencia de excitación, en este caso la frecuencia de paso de las personas, o uno de sus armónicos [4, 6].

Para considerar el servicio de la estructura ante vibraciones, se requiere de la caracterización de la fuente de vibración, la respuesta y el receptor de la misma. El ser humano generalmente es la mayor fuente de vibraciones para puentes peatonales. La respuesta estructural está relacionada con la masa, el amortiguamiento y la rigidez del puente, ya que el comportamiento de la estructura en resonancia es el que gobierna los criterios de servicio. El receptor de las vibraciones es finalmente el usuario, es decir el peatón [1].

Las vibraciones en puentes peatonales pueden ocurrir en dirección vertical, horizontal y en algunos casos torsional [4]. En este artículo se consideran vibraciones horizontales y verticales en los puentes estudiados pero, debido a la configuración geométrica de los sistemas estructurales usados habitualmente en el ámbito local, se hace énfasis en las vibraciones verticales. Además, con el estudio de las cargas antrópicas se pretende caracterizar la interacción humano-estructura en los diferentes tipos de puentes peatonales en la ciudad de Cali de acuerdo a sus sistemas constructivos.

2. CARGAS DINÁMICAS PRODUCIDAS POR LOS PEATONES

Cada vez son más frecuentes los problemas de vibraciones causados por personas en puentes peatonales reportados en la literatura. La implementación de materiales con mejores características mecánicas ha permitido el diseño de estructuras cada vez más ligeras y por lo tanto más sensibles a cargas dinámicas [1, 2, 7]. Uno de los primeros casos de

problemas de vibraciones inducidas por personas sucedió en 1831 en Inglaterra cuando 60 soldados marchaban sobre un puente. Este fue el evento que provocó que un considerable número de puentes tuvieran la advertencia de que las tropas deben romper la marcha cuando crucen sobre estos [1]. Aunque ha habido muchos reportes de puentes con problemas de vibraciones en el pasado, se empezó a prestar gran atención a este tema después del 10 de Junio del año 2000, tras la apertura del Puente Millenium en Londres, el cual presentó vibraciones horizontales excesivas producidas por los peatones el día de su inauguración [1, 8, 9].

Las cargas dinámicas producidas por las personas pueden ser clasificadas en dos categorías generales, in-situ y móviles. El salto periódico debido a la música, el ponerse de pie rápidamente y movimientos aleatorios en el mismo lugar son ejemplos de actividades in-situ. Caminar y correr son ejemplos de actividades móviles [10]. Las cargas dinámicas producidas por personas modifican las propiedades dinámicas del sistema, cambiando la frecuencia natural y el amortiguamiento asociados a cada modo [2]. Este último efecto ha sido ampliamente estudiado para personas en estado estático, pero aún falta mucha investigación para el caso de personas en movimiento [11].

La carga producida por una persona al caminar tiene componentes en tres direcciones: una componente vertical, que es la de mayor magnitud, una componente horizontal y una componente longitudinal. Estas tres componentes dependen de parámetros como la frecuencia, velocidad y longitud del paso [12]. Una gráfica típica de la componente vertical de la carga en el tiempo es mostrada en la Figura 1.

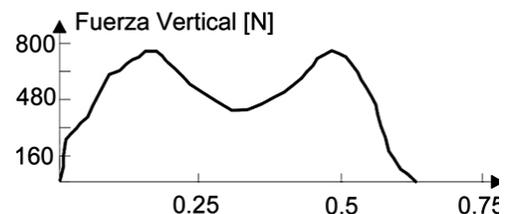


Figura 1. Carga vertical generada por una persona al dar un paso [12].

2.1. Grupos de personas

Diferentes modelos han sido desarrollados para estimar la respuesta dinámica de puentes peatonales ante cargas producidas por multitudes de personas. Algunos de estos

modelos son basados en factores de multiplicación, otros en simulaciones Monte Carlo y otros más en modelos en el dominio de frecuencias [13]. En 1978, Matsumoto aproximó la respuesta dinámica producida por un grupo de personas multiplicando los efectos producidos por un peatón por un coeficiente [1]. Él asumió que el flujo de peatones sobre un puente seguía una distribución de Poisson, lo que significa que la fase entre los pasos de los peatones seguía una distribución totalmente aleatoria. De acuerdo a esto Matsumoto definió el factor mostrado en la ecuación (1).

$$m = \sqrt{\lambda T_0} \quad (1)$$

En esta ecuación, λ es el número de personas que pasan el puente en un segundo, T_0 es el tiempo en segundos que tarda una persona en cruzar el puente y λT_0 es el número de personas en cualquier instante sobre el puente. La simulación Monte Carlo es un método más realista, que considera distribuciones de probabilidad de las diferentes variables que intervienen en la respuesta dinámica del puente. El procedimiento consiste en simular el paso de un flujo de peatones de acuerdo, generalmente, a una distribución de Poisson, mientras que parámetros como la frecuencia de paso, peso y velocidad de las personas y amplitud de la fuerza son generados de acuerdo a la distribución probabilista apropiada para cada variable [13, 14].

Aunque los modelos determinísticos de carga son los más usados en las diferentes guías de diseño y códigos internacionales, en los últimos años un nuevo enfoque para modelar las fuerzas producidas por el caminar de las personas ha sido planteado. Este enfoque considera modelos en el dominio de frecuencias, que tienen en cuenta el ancho de banda en el que se encuentran dispersas las fuerzas producidas por las personas, siendo representadas por densidades espectrales de potencia [12, 13, 15].

2.2. Trote y cargas vandálicas

El trotar o saltar, a diferencia del caminar, está compuesto por un tiempo de contacto y un tiempo de no contacto. En consecuencia, a menudo estas cargas son modeladas por media función seno para el tiempo de contacto y cero para el tiempo de no contacto [16]. Diversos autores afirman que no es posible que las cargas antrópicas generen daños estructurales a un puente peatonal. Sin embargo, considerando la poca masa de estas estructuras en comparación con otras estructuras civiles y el poco amortiguamiento que

caracteriza a los puentes peatonales modernos [1], es posible que un grupo de personas pueda afectar la integridad estructural de un puente peatonal. Un ejemplo de esto sucedió en China en 1994, cuando un grupo de estudiantes provocó serias fallas estructurales en un puente peatonal al excitarlo por diversión, causando la muerte de 38 personas [16].

Las cargas inducidas al correr o saltar (cargas vandálicas o “*vandal loads*”) tienen amplitudes mucho mayores que las inducidas al caminar. Frecuencias típicas para estas actividades están entre 2.5 Hz a 3.2 Hz para trote y entre 1.3 Hz a 2.4 Hz para saltos [5].

2.3. Criterios de servicio en puentes peatonales

Los códigos y guías de diseño actuales que tienen en cuenta los efectos dinámicos de las cargas vivas poseen diferentes criterios para establecer los valores límites de aceleraciones en edificaciones ocupadas por el público. Estos valores generalmente son subjetivos [2] y dependen tanto del uso como de la frecuencia natural de la estructura [17]. Así, para estructuras en lugares cerrados donde son más perceptibles las vibraciones, se establecen aceleraciones máximas o aceleraciones RMS menores que para estructuras en exteriores. Para puentes peatonales, la Tabla 1 muestra los criterios que establecen algunos de estos códigos y guías de diseño incluyendo la NSR-10 [3], tanto para vibraciones verticales como horizontales [4, 8, 17, 18].

Tabla 1. Criterios para vibraciones verticales y horizontales en diferentes normas [3, 8]

Norma	Dirección vertical	Dirección horizontal
NSR-10	$f \geq 5 [Hz]$	No específica
ISO 10137	Ver Figuras 12, 14	Ver Figura 13
BS 5400	$\leq 0.5\sqrt{f} \left[\frac{m}{s^2} \right]$	No específica
Eurocode	$a_{m\acute{a}x} \leq 0.7 \left[\frac{m}{s^2} \right]$	$a_{m\acute{a}x} \leq 0.2 \left[\frac{m}{s^2} \right]$
BRO 2004	$a_{RMS} \leq 0.5 \left[\frac{m}{s^2} \right]$	No específica

3. CLASIFICACIÓN DE LOS PUENTES PEATONALES DE LA CIUDAD DE CALI

En la primera etapa de este estudio, se realizó un levantamiento de los puentes peatonales en Santiago de Cali, Colombia. Los 60 puentes identificados fueron clasificados de acuerdo al tipo de sistema estructural y luces típicas entre apoyos. Se encontró que predomina el uso de 7 sistemas estructurales. A continuación se describen brevemente cada uno de los sistemas estructurales identificados y sus luces típicas entre apoyos.

3.1. Puente tipo 1

La estructura consta de una viga cajón de acero con forma trapezoidal trabajando en sección compuesta junto con una loseta en concreto reforzado. Todo esto a su vez está soportado por columnas de sección circular en concreto. La luz mínima encontrada para este sistema estructural fue de 19 m, la máxima de 27 m y la luz media de 24 m. Existen 11 puentes de este tipo en la ciudad.



Figura 2. Puente tipo 1.

3.2. Puente tipo 2

Puente en estructura metálica, posee dos vigas principales con sección en cajón cuadrada arriostradas lateralmente por viguetas metálicas de sección en *I*. La loseta es de concreto y se coloca sobre lámina colaborante. Las columnas son metálicas en sección cajón cuadrada y arriostradas por miembros metálicos de sección cajón rectangular. La luz mínima encontrada para este sistema estructural fue de 20 m, la máxima de 26 m y la luz media de 24 m. Existen 8 puentes de este tipo en la ciudad.



Figura 3. Puente tipo 2.

3.3. Puente tipo 3

Puente atirantado con 4 pares de cables por cada apoyo. Usa dos vigas principales metálicas de sección en *I*, arriostradas lateralmente por viguetas metálicas también de sección en *I*. Posee una loseta en concreto sobre lámina colaborante. Cada apoyo está formado por un par de columnas ahusadas en concreto con sección cuadrada. La luz mínima encontrada para este sistema fue de 24 m, la máxima de 40 m y la luz media de 34 m. Existen 6 puentes de este tipo en la ciudad.



Figura 4. Puente tipo 3.

3.4. Puente tipo 4

Puente con estructura metálica compuesta por cuatro vigas principales de sección en *I* arriostradas lateralmente en cada apoyo. La loseta es en concreto sobre lámina colaborante. En cada apoyo hay dos columnas metálicas de sección circular en cajón, arriostradas lateralmente. La luz mínima encontrada para este sistema fue de 18 m, la máxima de 24 m y la luz media de 20 m. Existen 3 puentes de este tipo en la ciudad.



Figura 5. Puente tipo 4.

3.5. Puente tipo 5

Estructura de concreto preesforzado con viga T como viga principal, que a la vez cumple la función de losa. La viga T está simplemente apoyada sobre columnas de sección circular y posee un voladizo en uno de sus extremos. La luz mínima para este sistema estructural fue de 17 m, la luz máxima de 21 m y la luz media de 19.7 m. Existen 3 puentes de este tipo en la ciudad.



Figura 6. Puente tipo 5.

3.6. Puente tipo 6

Puente en estructura metálica con una viga cajón semicircular como viga principal. La loseta es en concreto y está fundida sobre una lámina colaborante que a su vez está soportada por dos vigas de sección en I que transmiten las cargas a la viga principal. La luz mínima encontrada para este sistema fue de 23 m, la máxima de 39 m y la luz media de 33 m. Existen 3 puentes peatonales de este tipo en la ciudad.



Figura 7. Puente tipo 6.

3.7. Puente tipo 7

Puente con estructura en concreto, posee como viga principal una viga T , que a la vez cumple la función de losa. La viga está simplemente apoyada sobre columnas cuadradas en concreto. La luz mínima para este sistema estructural fue de 14 m, la máxima de 20 m y la luz media de 19 m. Existen 2 puentes de este tipo en la ciudad.

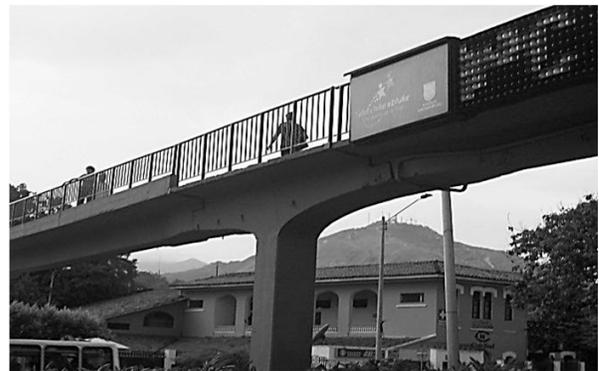


Figura 8. Puente tipo 7.

4. ENSAYOS DINÁMICOS SOBRE LOS PUENTES PEATONALES

Con el fin de determinar las características dinámicas y la respuesta ante las cargas producidas por la excitación antrópica de los puentes peatonales en Cali, se escogió un puente representativo para cada uno de los sistemas estructurales identificados. Para cada una de estas estructuras se adquirieron registros de vibración ambiental, vibración libre y vibración forzada inducida por personas. Los registros de vibración ambiental se tomaron para cada una de las

luces de la estructura, mientras que los registros de vibración libre y de vibraciones inducidas por personas se tomaron sólo en una de las luces, generalmente la mayor o la que facilitara la conexión de los equipos de medición. Posteriormente se tomaron uno o dos puentes adicionales por cada sistema estructural identificado. En éstos se adquirieron registros de vibraciones horizontales y verticales en el centro de cada una de sus luces, tanto para cargas producidas por personas como para vibración ambiental. Para la medición de vibraciones se usaron acelerómetros sísmicos de baja frecuencia tipo Wilcoxon Research modelo 731A, que tienen un ancho de banda de 0.05 Hz a 500 Hz (± 3 dB) y una sensibilidad de 10 v/g. Los registros de aceleraciones se tomaron a una frecuencia de muestreo de 250 Hz. Para el procesamiento de los datos se determinaron gráficos de densidad espectral de potencia para conocer el contenido frecuencial de la señal, y por último se generaron espectrogramas de la señal para determinar la variación en el tiempo de las frecuencias identificadas.

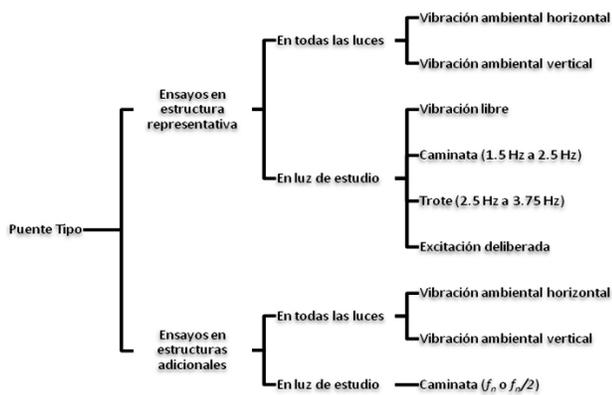


Figura 9. Esquema de los ensayos realizados.

En los puentes peatonales representativos de cada sistema estructural se realizaron ensayos experimentales de excitación inducida por cargas antrópicas. Estas pruebas se dividieron en tres tipos de excitación: personas caminando, trotando y excitación tipo vandálica (*vandal test*). Las pruebas con personas caminando se realizaron con frecuencias de paso desde 1.5 Hz hasta 2.5 Hz, las pruebas con personas trotando con frecuencias de paso desde 2.25 Hz hasta 3.75 Hz y para los ensayos de excitación vandálica se permitió que los sujetos de prueba coordinaran la excitación de manera libre. En cada caso las frecuencias de paso fueron coordinadas mediante la guía auditiva de un

metrónomo, elemento que genera pulsos a intervalos de tiempo regulares. En la Figura 9 se muestra un esquema de los ensayos realizados en cada una de las estructuras.

La relación entre luz y frecuencia natural vertical para las distintas estructuras estudiadas se muestran en las Figuras 10 y 11 por tipo de puente y por tipo de material, respectivamente. Además, se resalta con una franja horizontal el posible rango de frecuencias de paso de las personas (1.7 a 2.3 Hz) o el primer armónico de éstas (3.4 a 4.6 Hz). De los 19 puentes estudiados, 16 de éstos poseen por lo menos una luz con frecuencia natural por debajo de 4.6 Hz (máxima frecuencia del segundo armónico de carga para una persona caminando) y 5 puentes poseen por lo menos una luz con frecuencia menor a 2.3 Hz.

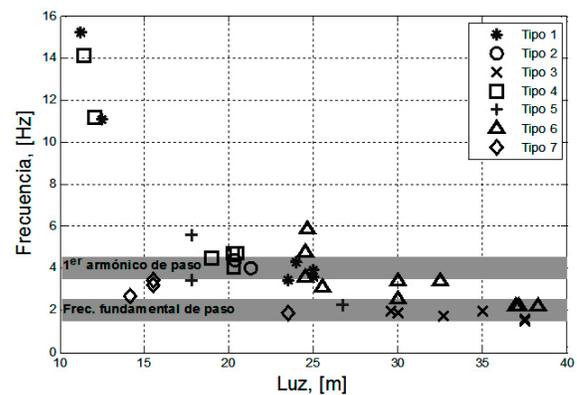


Figura 10. Luz vs. Frecuencia natural vertical por tipo de puente.

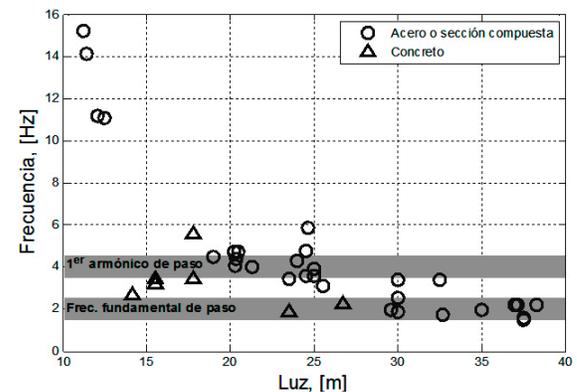


Figura 11. Luz vs. Frecuencia natural vertical por tipo de material.

4.1. Vibración ambiental

En las Figuras 12 y 13 se muestran las aceleraciones máximas de acuerdo a los criterios especificados por las diferentes normas. Para el caso de la norma que define

las aceleraciones en RMS, se convirtieron a valores pico equivalentes multiplicando por la raíz cuadrada de dos [1]. En cada caso los registros de vibración ambiental en sentido vertical y horizontal fueron adquiridos mientras la estructura estaba en servicio. En consecuencia, las aceleraciones máximas mostradas en las figuras corresponden a los valores pico que se presentaron en la estructura debidas al paso de las personas de manera aleatoria durante los registros. Dado que los registros de vibración ambiental se tomaron con el flujo normal de peatones sobre la estructura durante un periodo de 10 minutos, las aceleraciones que se presentan en el puente dependen de esta condición.

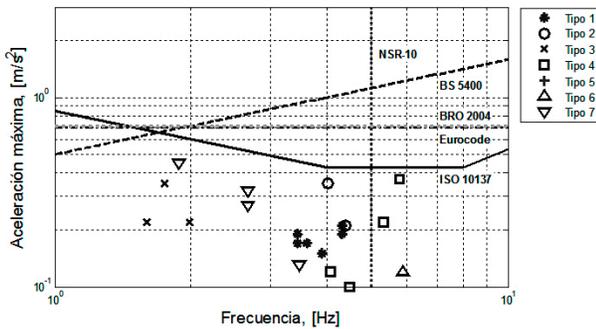


Figura 12. Evaluación de servicio para vibraciones ambientales verticales.

En la Figura 12 se puede observar que las aceleraciones verticales están por debajo de los valores límites especificados en las normas internacionales para todos los puentes. Sin embargo, la mayoría de los puentes estudiados no cumplen con el criterio de la NSR-10 de frecuencia natural vertical por encima de 5 Hz.

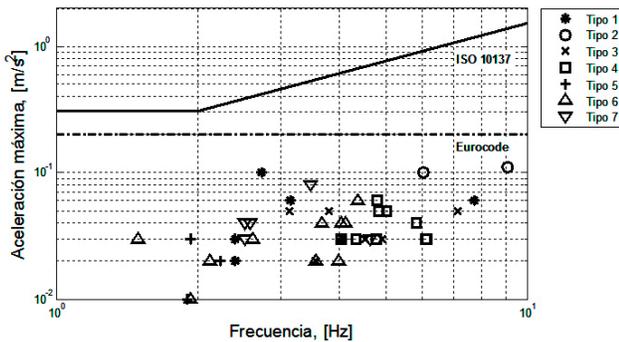


Figura 13. Evaluación de servicio para vibraciones ambientales horizontales.

4.2. Personas caminando y trotando

Los ensayos con personas caminando y trotando fueron realizados con el flujo controlado de una y tres personas

circulando de forma sincrónica por el puente. La frecuencia de paso fue coordinada con un metrónomo y fue variada desde 1.5 Hz hasta 2.5 Hz para el caso de personas caminando y para personas trotando desde 2.25 Hz hasta 3.75 Hz. De esta manera fue posible identificar el efecto de la relación entre la frecuencia de paso del peatón y la frecuencia natural del puente en la respuesta del sistema humano-estructura. Además, permitió identificar la influencia del segundo armónico de carga al caminar o trotar con una frecuencia de paso igual a la mitad de la frecuencia natural.

Diversos códigos y guías internacionales proponen que la aceleración máxima generada por un peatón caminando en perfecta sincronía con la frecuencia natural del sistema (condición de resonancia) sea el criterio para evaluar el servicio de puentes peatonales ante vibraciones. La aceleración máxima obtenida en 12 puentes peatonales, clasificados según su tipología, se muestra en la Figura 14 para el caso de un peatón caminando.

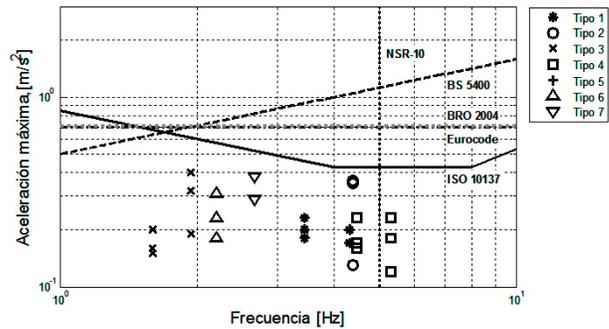


Figura 14. Evaluación de servicio para vibraciones verticales para una persona caminando.

Las aceleraciones máximas producidas por tres personas caminando y trotando de manera sincronizada son mostradas en la Figura 15 junto con los límites planteados por algunas normas. Se puede observar que los puentes tipo 1, 2, 5 y 6 son los que presentan mayor sensibilidad a cargas dinámicas producidas por personas, ya que presentaron mayores aceleraciones durante las pruebas. Aunque los ensayos de personas caminando y trotando fueron coordinados mediante un metrónomo, se debe resaltar que hay diferencias en la percepción y coordinación de cada persona y, por lo tanto, los picos alcanzados están ligados al grado de sincronización que lograron en cada ensayo.

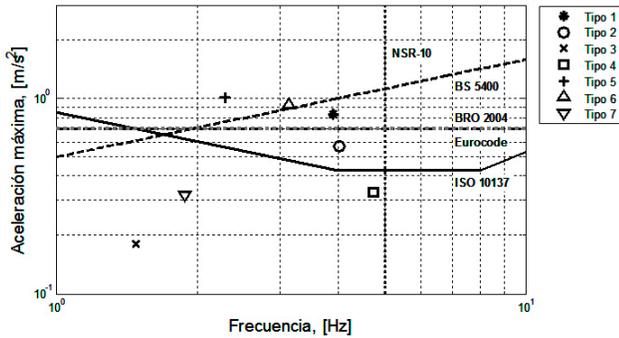


Figura 15. Evaluación de servicio para vibraciones verticales para tres personas caminando.

4.3. Excitación tipo vandálica

En este caso los ensayos se realizaron mediante saltos coordinados de tres personas para generar altos factores de impacto. Las recomendaciones de diseño son escasas para este tipo de cargas y, por tanto, se requiere de mayor investigación para evaluar con precisión el cambio en las propiedades dinámicas. La Figura 16 muestra los valores de aceleraciones máximas alcanzadas para cargas vandálicas. Se puede observar que 6 de las 7 tipologías presentan valores de aceleración mayores a los niveles especificados en las normas internacionales. No obstante, este es un tipo de carga bastante específico e improbable y no indica que estas estructuras necesariamente incumplan criterios de servicio [19].

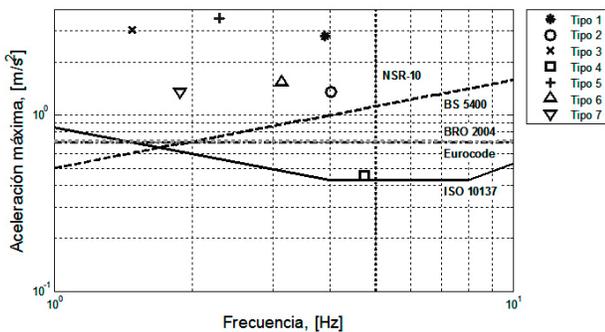


Figura 16. Evaluación de servicio para vibraciones verticales para cargas vandálicas.

Las aceleraciones máximas para este tipo de excitación son las más altas debido a que eran cargas dinámicas de mayor factor de impacto actuando en el punto de mayor deflexión modal, a diferencia de los otros tipos de excitación donde la carga era móvil. Cabe precisar que en algunas pruebas la sintonía entre la frecuencia de salto y la frecuencia natural de la estructura no era

perfecta, mientras que en otros puentes la amplitud de las vibraciones fue tan alta que la excitación debió ser detenida para conservar la integridad estructural.

5. CONCLUSIONES

Al comparar puentes peatonales de luces similares se observa una tendencia en los construidos con acero a tener frecuencias naturales verticales mayores que los de concreto. Se encontró además, que los puentes de concreto con luces entre 28 m y 48 m tienen mayor probabilidad de problemas de vibraciones para el primer armónico de carga. Así mismo, para los puentes en acero estos problemas serían más probables para luces entre 33 m y 40 m para el primer armónico.

Aunque la respuesta de un puente peatonal ante la carga producida por el paso de un peatón en resonancia da una buena idea de la sensibilidad de estas estructuras ante las cargas producidas por personas, estas cargas están determinadas por el flujo de los peatones. Es, por lo tanto, más apropiado tener en cuenta el efecto producido por grupos de personas para el diseño de estas estructuras. Por ejemplo, en [19] se propone la modelación de estas cargas usando distribuciones de probabilidad adecuadas para variables como la longitud y frecuencia de paso, factores dinámicos de carga, peso de la persona y densidad de personas por unidad de área y, además, se exponen los parámetros necesarios para estimar la respuesta dinámica ante grupos de personas.

Si bien la excitación deliberada de puentes peatonales es poco común, es recomendable tener en cuenta sus efectos en el diseño de puentes peatonales cercanos a sitios de gran concentración de personas como estadios y coliseos. Una opción que debe ser considerado para estos casos es la generación de amortiguamiento adicional por medio de dispositivos de control.

Al realizar las mediciones de vibraciones debido a cargas antrópicas en puentes peatonales en Cali, fue una constante la queja de los usuarios por la percepción de incomodidad e inseguridad. Sin embargo, todos los puentes ensayados cumplen con los criterios internacionales de aceleraciones verticales para el caminar de una persona. Esto sugiere que los límites especificados en las normas internacionales son insuficientes si se desea tener en cuenta la percepción de comodidad y seguridad de los peatones.

Los diferentes códigos y guías de diseño de estructuras susceptibles a vibraciones establecen criterios de servicio ligados a aceleraciones máximas o a límites en la frecuencia natural. Sin embargo, los resultados de aceleraciones máximas en los puentes peatonales sugieren que valores de aceleración no son suficientes como criterio de servicio ante cargas antrópicas.

De los 19 puentes peatonales evaluados, 16 de ellos poseen por lo menos una luz con frecuencia natural vertical por debajo de 5 Hz. Esto contradice lo que explícitamente dice la NSR-10 en B.4.7, al especificar que las frecuencias naturales verticales sean mayores o iguales a 5 Hz. Sin embargo, ninguno de estos puentes superó los límites de aceleraciones máximas establecidos por las normas ISO 10137, Bro 2004, BS 5400 o Eurocode para el caso de una persona caminando. En consecuencia, se recomienda que futuras normas colombianas tengan en cuenta el efecto dinámico de las cargas vivas estableciendo valores límites de aceleraciones y frecuencias naturales en función del desempeño según niveles de comodidad y seguridad percibida por los peatones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de la Universidad del Valle y COLCIENCIAS mediante el proyecto: *Desarrollo de una guía de diseño estructural para disminuir el efecto de la interacción humano-estructura en estructuras civiles*, (Contrato No. 382-2009).

REFERENCIAS

- [1] Zivanovic, S., Pavic, A., Reynolds, P. Vibration serviceability of footbridges a under Human-Induced excitation: a literature review, *Journal of Sound and Vibrations*, pp. 1-74, 2005.
- [2] Zivanovic, S. and Pavic, A., Reynolds, P. Human Structure Dynamic Interaction in Footbridges. *Institution of civil engineering*, pp. 165-177, 2005.
- [3] AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10. Bogotá, Colombia, 2010.
- [4] HIVOSS, Human Induced Vibration of Steel Structures. Design of Footbridges. Porto, Portugal, 2009.
- [5] Newland, D.E., Pedestrian excitation of bridges, *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 218, pp. 477-492, 2004.
- [6] Ortiz, A.R., Gómez, D. y Thomson, P., Caracterización del efecto de la interacción Humano-Estructura en el estadio olímpico en Cali, Colombia, *Revista Ingeniería e Investigación*, Vol. 29 (1), pp. 13-23, 2009.
- [7] Gómez, D., Comparison of frequency response and neural network techniques for system identification of an actively controlled structure, *Revista Dyna*, No. 170, pp. 79-89, Diciembre, 2011.
- [8] Hauksson, F., Dynamic Behaviour of Footbridge to Pedestrian-Induced Vibrations. Master's Dissertation, Lund University, Suecia, 2005.
- [9] Ortiz, A.R., Gómez, D. y Thomson, P., Efecto de la Interacción Humano-Estructura en las propiedades dinámicas de una tribuna, *Revista Ingeniería y Competitividad*, Vol. 14 (1), pp. 63-73, 2012.
- [10] Figueiredo, F.P., Da Silva, J.G., De Lima, L.R., Vellasco, P.C. and Andrade, S.A., A Parametric Study of Footbridge Under Pedestrian Walking Loads, *Engineering Structures*, pp. 605-615, 2007.
- [11] Zivanovic, S., Díaz, I.M. and Pavic, A., Influence of Walking and Standing Crowds on Structural Dynamic Properties, IMAC-XXVII, Orlando, USA, 2009.
- [12] Venuti, F. and Bruno, L., Pedestrian Loads and Dynamic Performances of Lively Footbridges: an Overview on Measurement Techniques and Codes of Practice, *Civil Structure Health Monitoring 2nd Workshop*, Taormina, Italia, 2011.
- [13] Brownjohn, J., Zivanovic, S. and Pavic, A., Crow Dynamic Loading on Footbridges, *Footbridge2008. Third International Conference*. Porto, Portugal, 2008.
- [14] Zivanovic, S. and Pavic, A., Ingolfsson, E. Modelling Spatially Unrestricted Pedestrian Traffic on Footbridges, *Journal of Structural Engineering*, vol. 136 (10), pp. 1296-1308, 2010.
- [15] Zivanovic, S. and Pavic, A., Quantification of dynamic excitation potential of pedestrian population crossing footbridges, *Shock and Vibrations*, vol. 18,(4), pp. 563-577, 2011.
- [16] Elsa, C., Cunha, A. and Moutinho, C., Vandal loads and induced vibrations on a footbridge, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 16, (3), pp. 375-382, 2011.
- [17] AISC, Floor Vibrations due to Human Activity - Steel Design Guide Series 11. Chicago, USA, 2003.
- [18] ISO 10137, Bases for Design of Structures-Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations. Ginebra, Suiza, 2007.
- [19] Sánchez, J. A., Análisis de la Interacción Humano-Estructura en Puentes Peadonales de Santiago de Cali, [Proyecto de grado en Ingeniería Civil], Univesidad del Valle, Cali, Colombia, 2012.