


Predicción del comportamiento de puentes peatonales usando modelos de computador


Prediction of the behavior of pedestrian bridges using computer models

DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.05>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción: 16 de diciembre de 2016. Fecha de aceptación: 19 de mayo de 2017.

Jonathan José Cala Monroy 

Consultoría y Supervisión de Estructuras SAS. Tunja (Colombia)
ingjonathancala@gmail.com

Katherine Alejandra Villar Galindo 

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Bogotá (Colombia)
alejavillar14@gmail.com

Para citar este artículo:

J.J. Cala Monroy y K.A. Villar Galindo, "Predicción del comportamiento de puentes peatonales usando modelos de computador" *INGE CUC*, vol. 13, no. 2, pp. 42-52, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.05>

Resumen

Introducción– En el artículo se da una breve introducción al problema de las vibraciones de baja frecuencia, describiendo cómo éstas son generadas por la acción del caminar humano y, a su vez, afectan la estructura del puente peatonal, las cuales, al final, se ven traducidas en una molestia para los usuarios.

Objetivo– El documento explica el método comúnmente usado por los ingenieros para la evaluación del efecto de las vibraciones y sus limitaciones, optando por desarrollar una técnica de modelado por computador que represente de manera más aproximada a la realidad el fenómeno de vibraciones de piso en puentes peatonales.

Metodología– El estudio está compuesto por dos fases principales: 1) una revisión bibliográfica conceptual sobre el tema de vibraciones de piso haciendo énfasis en la Guía de Diseño No. 11 del Instituto Americano de Construcciones de Acero y 2) el desarrollo del modelo por computador que comprende: definición de variables, elaboración del modelo dinámico de la estructura, calibración del modelo, evaluación de los parámetros objeto de estudio, análisis de resultados y conclusiones.

Resultados– Consecuentemente, y conforme con las etapas preliminares, se obtienen los resultados de la aceleración para diferentes frecuencias y para diferentes grados de amortiguamiento, observando que el puente de estudio es potencialmente susceptible entre los rangos de 4 a 8 Hz, y que, al entrar resonancia, la estructura presenta una aceleración pico muy superior al umbral para la comodidad humana recomendada en puentes peatonales.

Conclusiones– Al respecto se aprecia cómo con el uso de buenas técnicas de modelación y de elementos finitos pueden llegar a obtenerse resultados confiables y que acompañen de manera directa el proceso de diseño de estructuras, en este caso, puentes peatonales.

Palabras clave– Vibraciones, respuesta dinámica, modos de vibración, excitación dinámica, frecuencia fundamental, pisos compuestos, puentes peatonales, elementos finitos, SAP2000®.

Abstract

Introduction– The present article is aimed to present a brief introduction of the issues related to the low frequency vibrations, by indicating human walking as its relevant source which affecting structures of the footbridges and are turned into inconveniences to the pedestrian traffic.

Objective– The main objective of this research paper is to explain the most common methods used by engineers for the evaluation of the vibrations and their effects as well as their limitations, furthermore a computer modeling technique was developed in order to approach it to the reality of the phenomenon of vibrations in pedestrian bridges.

Methodology– The present work was divided into main phases: The first phase was a conceptual bibliographical review of the subject of floor vibrations by focusing on the use of the Design Guide No. 11 of the American Institute of Steel Construction, with regard to the second phase it had to do with the development of a computer model which included a definition of variables, the elaboration of a dynamic model of the structure, the calibration of the model, the evaluation of the parameters under study and the analysis of results and conclusions.

Results– Consequently, and according to the preliminary stages, the results of the acceleration were obtained to different frequencies and to different degrees of damping by observing that the chosen sample was potentially susceptible between four and eight Hz ranges, hence when resonances took place the mentioned structure presented a peak acceleration above the threshold recommended by human beings comfort related to pedestrian bridges.

Conclusions– To conclude it can be said that through the appropriate modeling techniques and finite elements convenient and reliable results should be accomplished that leading the design process of structures as pedestrian bridges.

Keywords– Vibrations, dynamic response, vibration modes, dynamic excitation, fundamental frequency, Composite floors, Footbridges, finite elements, SAP2000®.

I. INTRODUCCIÓN

Las vibraciones de servicio del piso se han convertido en un área de interés y en un aspecto de verificación en el diseño de puentes peatonales, especialmente para aquellos de largas luces realizados en sistemas metálicos y/o de suspensión que son más propensos a presentar vibraciones de piso debido a la acción del caminar humano.

Cuando las personas caminan sobre los pisos, escaleras, puentes u otras estructuras aplican fuerzas dinámicas que causan que la estructura vibre. La amplitud del desplazamiento por vibración es por lo general bastante pequeña y no es perceptible visual o significativamente en términos de integridad estructural, sin embargo, a menudo puede ser sentida por las personas y, si es excesiva, puede ser un factor de distracción y detrimento para la calidad percibida de la estructura. La vibración también puede afectar el funcionamiento de equipos sensibles en edificios como laboratorios y similares [1, p. 6].

El punto central de esta investigación es desarrollar una técnica de modelado por computador para predecir la frecuencia fundamental de vibración y la aceleración pico efectiva debido a la excitación por la actividad humana para un puente peatonal. Existen un número de guías que exponen análisis con fórmulas simplificadas para la obtención de estos valores que son parámetros directamente relacionables con las fuerzas aplicadas y las sensaciones percibidas por el peatón; sin embargo, los métodos reduccionistas muestran regularmente ser imprecisos e inapropiados. La alternativa metodológica aquí planteada es el análisis de elementos finitos (FEA), el cual, por lo general, es considerado el más preciso.

II. ¿POR QUÉ ESTUDIAR LAS VIBRACIONES?

Una estructura, aparte de dar refugio, debe garantizar confianza y comodidad en sus usuarios. El estado de la cultura ha estado relacionado con la percepción de las personas ante las deflexiones de un entrepiso y la estética de las particiones frágiles, sin embargo, últimamente se ha observado que la percepción humana a ciertos movimientos y/o fuerzas puede generar la misma incomodidad o aun peor. Recientemente, se ha visto cómo las estructuras nuevas, realizadas con nuevos materiales y de calidades mayores, han generado sistemas propensos a la vibración ante bajas frecuencias de excitación, muy similares a las producidas por la acción del caminar humano, lo que provoca que, para ciertos modos de vibración, el piso de la estructura entre en resonancia. Este fenómeno también ocurre en estructuras antiguas a medida que van perdiendo rigidez con el paso del tiempo y el uso de las mismas.

Entre los casos más famosos se encuentra el Millennium Bridge o Puente del milenio (fig. 1) en Londres, inaugurado el 10 de junio del año 2000 [2]; este puente está constituido por dos plataformas de soporte y



Fig. 1. Puente del milenio. Fuente: [15].

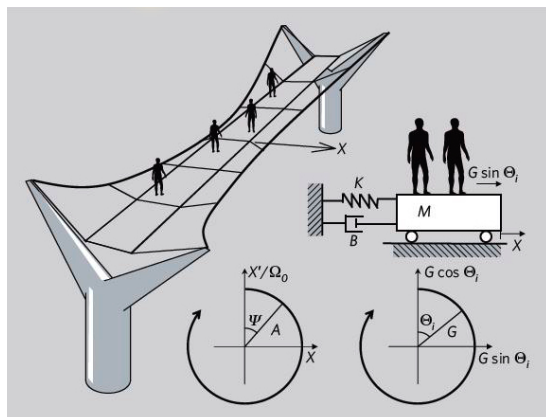


Fig. 2 Modelo matemático del sistema del puente del milenio. Fuente: [16]

está hecho en tres secciones de 81 m, 144 m, y 108 m (de norte a sur), con una estructura resultante de 325 m; tiene 8 cables tensados que mantienen el puente en suspensión para poder sostener 2000 toneladas de peso (lo suficiente para soportar a 5000 personas en el puente al mismo tiempo) y posee una cubierta de aluminio de 4 m de ancho. Unas inesperadas vibraciones que conllevaron a fallas estructurales, hicieron que éste tuviera que ser cerrado el 12 de junio del año 2000, dos días después de su apertura para realizar modificaciones. Estos movimientos eran producidos por el gran número de personas, 90.000 el primer día y más de 2.000 en el puente al mismo tiempo. Las primeras pequeñas vibraciones obligaron a los peatones a caminar de manera sincronizada con el balanceo, incrementando el efecto, incluso cuando el puente se encontraba relativamente poco transitado.

Así como el Puente del milenio se encuentran un buen número de estructuras en la actualidad que carecen de un adecuado diseño para la previsión de este fenómeno de resonancia por pequeñas vibraciones; es por eso que se ve la necesidad de usar un método para poder revisar de manera precisa el comportamiento dinámico de una estructura, en este caso de un puente peatonal ante las vibraciones causadas por la actividad humana.

III. DESCRIPCIÓN DEL FENOMENO

En puentes peatonales, la más usual e importante fuente interna de la excitación dinámica es el tráfico peatonal. Una persona que camina a un ritmo regular aplica una fuerza periódica al piso que puede causar una respuesta estructural en el piso.

Para determinar cómo una estructura responde a las fuerzas inducidas por el caminar humano es necesario entender los siguientes conceptos: la fuerza aplicada a la estructura, las propiedades dinámicas de la estructura y la respuesta de la estructura ante las cargas aplicadas [1].

IV. FUERZAS DEBIDAS A LAS PISADAS

Las fuerzas dinámicas aplicadas al piso por una persona caminando pueden ser medidas directamente con experimentos, usando platinas de fuerza o plataformas instrumentadas. En la fig. 3, se muestran 4 medidas de diferentes tipos de pisadas; estos registros muestran la componente de la fuerza aplicada a una estructura por los dos pies durante un periodo de varias caídas de tacón (heel drop). Una caminata normal tiene un ritmo de entre 1.5 y 2.5 pasos por segundo (promedio alrededor de 1.8), y, por tanto, el periodo es aproximadamente 0.5 segundos. En estas medidas se sustrajo el peso del individuo debido a que éste no varía con el tiempo y, por lo tanto, no induce respuesta dinámica.

Las cuatro gráficas de tiempo-historia son bastante diferentes, tanto en su forma como en su magnitud. Investigaciones extensivas [3] han mostrado que los factores que contribuyen a esta variación incluyen el peso, el género, el tipo de calzado, la altura, la superficie sobre la que se camina y la velocidad a la que se camina.

Dada esta variabilidad, no hay una sola fuerza que se ajuste y pueda ser usada para calcular la respuesta estructural, en lugar, es apropiado adoptar valores que sean estadísticamente representativos y arbitrarios pero con una probabilidad de excedencia conocida.

V. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA

Como se conoce, todas las estructuras tienen modos naturales de vibración y cada uno de estos modos tiene una única distribución espacial de los desplazamientos (conocido como la forma modal), la frecuencia natural de vibración, la masa modal y el amortiguamiento modal asociado con este. Los modos naturales son la forma u patrón preferido de una estructura o el modo en el que ésta vibrará si es excitada por un impacto repentino. La fig. 4 es un ejemplo de la anterior descripción.

En el caso de un puente, éste tiene muchos modos de vibración vertical. En la fig. 5 se muestran algunos de estos modos.

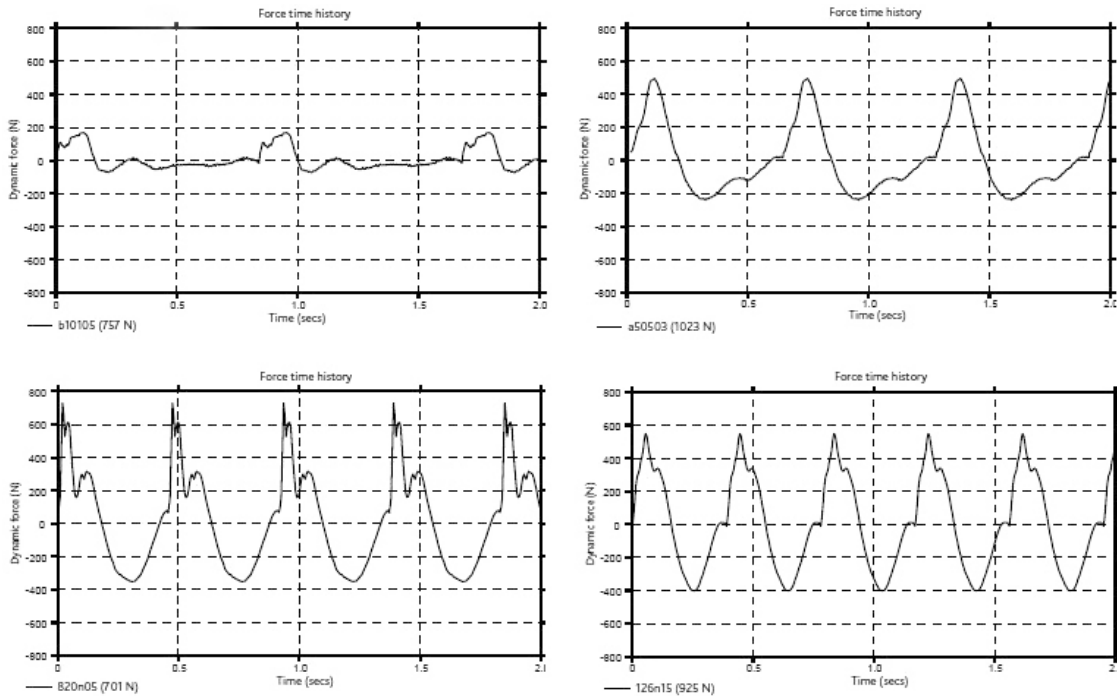


Fig. 3. Ejemplo de diferentes funciones de pisadas. Fuente: [1].

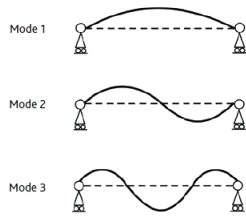


Fig. 4. Excitación, vibración y respuesta. Fuente: [1].

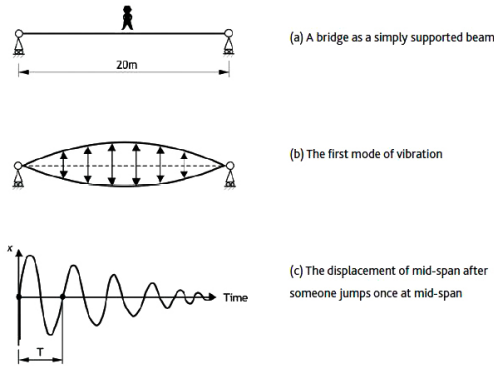


Fig. 5. Tres primeros modos de vibración de un puente de una luz. Fuente: [1].

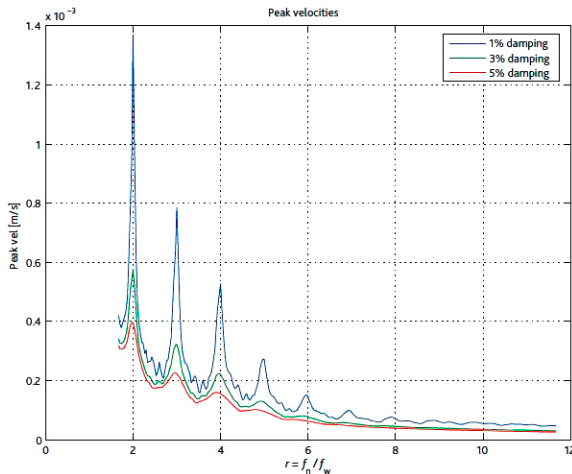


Fig. 6. Picos de aceleración para r . Fuente: [1].

Un modo puede ser excitado por fuerzas aplicadas en una posición de desplazamiento nulo en el modo, en este caso, mientras los modos del primero y tercer modo de vibración pueden ser excitados por un salto en la mitad de la luz, el segundo solo sería excitado si una persona salta en otro lugar del puente.

Si en lugar de saltar en el puente la persona descrita anteriormente prefiere caminar a través del puente, se aplica una carga periódica dinámicamente variable como las de la fig. 3 y el puente responderá dinámicamente a ésta, en función del tiempo y de la fuerza.

La respuesta del puente a la aplicación repetitiva de esta fuerza depende de varios factores, siendo los más importantes los siguientes: la rigidez y la masa del puente, el amortiguamiento del puente y el radio (r) de la frecuencia natural de vibración del puente (f_n) a la frecuencia de andar (f_w).

En general, la respuesta de vibración se reduce a medida que r aumenta, sin embargo, hay picos en los espectros de respuesta, en particular cuando los valores de r son cercanos a 1.0, donde la tasa de pisadas iguala la frecuencia natural del modo, y el modo responde entrando en resonancia con el primer armónico de la fuerza de la pisada; si r es cercano a 2.0, el modo responde resonante al segundo armónico de la fuerza de la pisada, y así sucesivamente.

El anterior análisis genérico muestra que una persona puede caminar a una tasa tal que sea factor de 1, 2, 3 o 4 menos que la frecuencia natural de un modo, entonces la resonancia es posible y esto llevaría a unos niveles de vibración mayores que caminar ligeramente a diferentes tasas de pisadas. Para valores de r mayores que aproximadamente 4.2, hay una tendencia general al decrecimiento de la respuesta con altas frecuencias estructurales, pero hay poca evidencia de respuesta resonante y de menor sensibilidad para un valor exacto de r .

Como las tasas típicas de pisadas varían entre 1.5 Hz y 2.5 Hz, entonces cualquier estructura con frecuencias modales entre 1.5 Hz y 10.5 Hz es potencialmente susceptible a altas respuestas debido a la resonancia. Para modos estructurales con frecuencias suficientemente altas, éstas no pueden ser excitadas por el cuarto armónico, por ejemplo, frecuencias naturales superiores a los 10.5 Hz, entonces, las vibraciones no aumentarán de manera significativa debido a una simple pisada. Si el amortiguamiento es bastante pequeño entonces en teoría la resonancia en el quinto y sexto armónico podría producir una alta respuesta, pero esto no es usualmente de interés práctico debido a que las pisadas sucesivas no son completamente idénticas y esto reduce la magnitud de los armónicos altos.

VI. METODOLOGÍAS DE CÁLCULO USADAS ACTUALMENTE

A. Guía No 11 AISC/CISC “Vibraciones del piso debido a la actividad humana”

La DG 11 [4] contiene métodos de cálculo simples para uso manual con el fin de evaluar las vibraciones de servicio de pisos en términos de aceleración pico y frecuencia. De manera simplificada, cada porción (definida como un área rectangular entre 4 o más columnas) dentro del sistema de piso que tenga un único marco es evaluado usando los procedimientos de la DG 11 para la excitación por la acción de caminar. Cada evaluación consta de dos partes de cálculo: una determina la frecuencia fundamental de la porción en estudio y la otra determina la máxima amplitud de la aceleración.

La evaluación resulta de comparar la aceleración pico esperada con los niveles de tolerancia humana. La siguiente desigualdad representa esta comparación.

$$\frac{a_p}{g} \geq \frac{a_p}{g} = \frac{P_0 e^{-0.35 f_n}}{\beta W} \quad (1)$$

Donde

- $a_0 =$ Tolerancia humana de la aceleración pico en fracción de la gravedad
- $a_p =$ aceleración pico estimada debido a la excitación por caminar (como fracción de la gravedad)
- $P_0 =$ una fuerza constante
- $f_0 =$ frecuencia fundamental del sistema
- $\beta =$ coeficiente de amortiguamiento modal
- $W =$ peso efectivo del sistema.

Los parámetros individuales envueltos en la evaluación son discutidos más adelante, pero no serán explicados más allá de los límites de esta investigación.

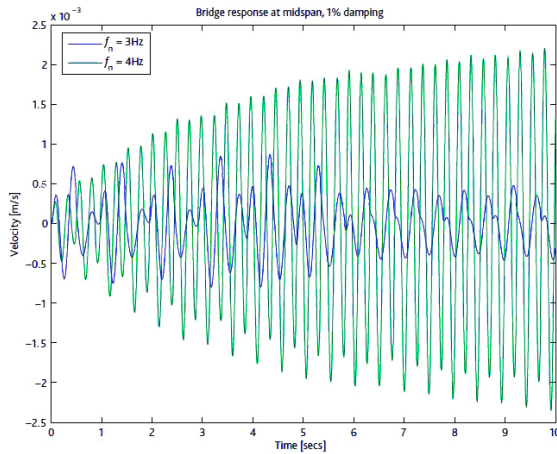


Fig. 7. Respuesta transitoria y resonante. Fuente: [1].

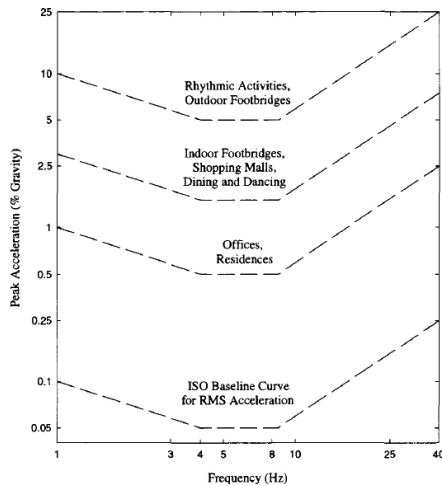


Fig. 8. Aceleración pico recomendada para la comodidad humana debido a las actividades de los mismos [6, 7]. Fuente: [4].

B. La percepción humana

La respuesta humana al movimiento del piso es una forma de percepción compleja que involucra una variedad de factores ambientales, particularmente de la magnitud y la duración de movimiento, las señales visuales o audibles y la actividad o inactividad de la persona afectada [5]. En general, los estudios de la percepción humana y la tolerancia a las vibraciones indican que la aceleración es el mejor indicador global del potencial de incomodidad de los humanos debido a los movimientos del piso [6].

Los criterios de diseño de la DG 11 están basados en el cuadro mostrado en la fig. 8, el cual fue desarrollado usando la línea base de límites de aceleración recomendados por la Organización de estándares internacionales (ISO 2631-2 1989) [7], los cuales fueron ajustados por la ocupación pretendida y la experiencia [8].

La DG 11 sugiere que la aceleración pico usada como umbral para la comodidad humana en puentes peatonales sometidos a frecuencias de vibración entre 4 Hz y 8 Hz es 0.005g o el 5% de la gravedad. El umbral inferior dentro del rango de frecuencias de 4 a 8 Hz puede ser explicado por estudios en los que se muestra cómo los humanos son particularmente sensibles a vibraciones con frecuencias entre los 5 y 8 Hz, que es el rango que corresponde a las frecuencias naturales de muchos de los órganos principales del cuerpo [9], [10].

El límite de la aceleración de 0.5 g dentro del rango de 4 a 8 Hz es resaltado debido a que representa el rango de frecuencias que puede ser excitado con el segundo o tercer armónico del caminar, donde un armónico está definido como el múltiplo integral de la frecuencia de paso. Bajo el caminar normal, las pisadas humanas tienen una frecuencia de dos pisadas por segundo, pero pueden llegar a ser alrededor de 2.4 pasos por segundo. Si cada paso se ve como una fuerza de entrada, entonces en consecuencia el segundo y tercer armónicos de la fuerza de entrada de 2.4 Hz será 4.8 Hz y 7.2 Hz, respectivamente. Los pisos que tienen una frecuencia natural cerca a estos armónicos pueden presentar una excesiva respuesta debido a que la componente de la fuerza impuesta del armónico puede coincidir con la frecuencia de resonancia del piso [11].

C. Respuesta de la aceleración

La expresión para estimar la aceleración pico mostrada en la ecuación (1) fue determinada modelando una porción de un piso con algo del correspondiente piso efectivo, como un sistema simplificado de masa-resorte-amortiguador llevado a su frecuencia natural por una fuerza armónica efectiva debido al caminar, resultando en una respuesta resonante.

El término de la fuerza armónica efectiva $P_0 e^{-0.35 f_n}$ de la ecuación (1) está basado en una fuerza repetida representativa que depende del tiempo, de una persona

que camina a través de un piso $F(t)$, como una serie de Fourier o una combinación de fuerzas sinusoidales compuestas de los armónicos del caminante.

$$F(t) = P \left[1 + \sum_i a_i \cos(2\pi i f_{step} t + \phi_i) \right] \quad (2)$$

Donde

P = peso de la persona aproximadamente 157 lbs según la DG 11.

a_i = coeficiente dinámico para el componente armónico i de la fuerza.

f_{step} = frecuencia de paso de la persona caminando

t = tiempo

ϕ_i = ángulo de fase del armónico

La DG 11 asume que solo uno de los componentes armónicos de la ecuación (2) será asociado con la frecuencia natural del piso, incitando la respuesta resonante de ese modo, y que la respuesta debida a los otros armónicos ante la frecuencia de pasos es pequeña en comparación. Entonces, el componente armónico de la fuerza dependiente del tiempo correspondiente a la frecuencia natural del piso es:

$$F_i(t) = P a_i \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (3)$$

La DG 11 sugiere los coeficientes dinámicos para la excitación por la acción de caminar que se muestran en la Tabla I. Estas relaciones de paso fueron simplificadas aproximando pasos a varios rangos de frecuencia por el término $\alpha = 0.83e^{-0.35f_n}$.

TABLA I. FRECUENCIA FORZANTES COMUNES Y COEFICIENTES DINÁMICOS.

Armónico	Persona caminando	
i	F (Hz)	α_i
1	1.6-2.2	0.5
2	3.2-4.4	0.2
3	4.8-6.6	0.1
4	6.4-8.8	0.05

α_i Es la fuerza pico sinusoidal dividida entre el peso de la persona(s).

Fuente: [4].

Pernica (1990) [12] también calculó los coeficientes dinámicos midiendo las fuerzas de individuos realizando actividades rítmicas incluyendo caminar, que cae dentro del rango sugerido en la tabla 1. En 1998, Kerr [3] condujo un exhaustivo estudio experimental sobre las fuerzas verticales de las pisadas y, en el 2001, Young [13] analizó los componentes armónicos de cada una de las 882 funciones de tiempo-historia de las fuerzas de paso simple de Kerr y desarrolló una tabla similar de coeficientes dinámicos para los primeros 4

armónicos de caminar. En vez de obtener valores constantes para los coeficientes dinámicos de las frecuencias que caen dentro de un rango particular de armónicos, él desarrolló funciones lineales dentro de los rangos, y en general, están en concordancia con los sugeridos por la tabla 1. Estos son pasos similares dentro de los rangos de frecuencia, sin embargo, los pasos de Young tienen una pendiente un poco más alta.

La función de respuesta resonante presentada en la DG 11, resultante de la componente simple de la fuerza armónica causante de la respuesta resonante, tiene la forma:

$$\frac{a}{g} = \frac{R \alpha_i P}{\beta W} \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (4)$$

Donde a/g es la aceleración del piso expresada como fracción de la gravedad. R es un factor de reducción tomado como 0.5 para estructuras de piso con formas modales en dos direcciones, para tomar en cuenta el hecho de que el movimiento totalmente estacionario no se logra por caminar y que una persona caminando y la persona a la que incomoda la señal no están simultáneamente en la localización del máximo desplazamiento modal. Esta expresión para la aceleración de estado estacionario, debido a la resonancia armónica, está dada por Rainer y Swallow (1988) [14] y Allen y Murray (1993) [8].

Para los propósitos de evaluación, la ecuación (4) se reduce a la aceleración pico de la parte de la derecha de la ecuación (1) donde el numerador $P_0 e^{-0.35f_n}$ es solo una expresión simplificada que contiene el peso de 157 lb de una persona, el factor de reducción de 0.5 mencionado anteriormente y los coeficientes dinámicos en la forma de $\alpha = 0.83e^{-0.35f_n}$, y puede ser visto como la fuerza armónica efectiva aplicada en el punto medio de la porción que representa las fuerzas generadas por una persona caminando.

IV. FRECUENCIA Y ESTIMACIÓN DEL PESO EFECTIVO

Los procedimientos de la DG 11 para predecir la frecuencia natural de un sistema de piso para usar la ecuación (1) consisten en una serie de cálculos para la frecuencia de paneles sobre viguetas y vigas simplemente apoyadas y, finalmente, una combinación de estos para representar la frecuencia del sistema f_n , usando la relación de Dunkerly.

$$\frac{1}{f_n^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2} \quad (5)$$

Donde f_j y f_g son las frecuencias fundamentales de los paneles de viguetas y las vigas, respectivamente.

Aunque aquí no se muestren las ecuaciones para las frecuencias individuales de los paneles, el procedimiento consiste en determinar la máxima deformación estática de la vigueta o de la viga, asumiendo como si estuviera uniformemente cargada, simple-

mente apoyada y mostrara una acción compuesta entre el sistema de tablero o losa y los miembros de acero, suponiendo que están en contacto continuo sin importar que el piso haya sido diseñado con conectores compuestos. Las suposiciones posteriores se basan en los desplazamientos extremadamente pequeños que se presentan en la vibración de piso, en los que las fuerzas de cortante resultantes en la interfaz entre la losa y los miembros son resistidos por los puntos de soldadura de la construcción o por la fricción. La DG 11 recomienda para el cálculo del momento transformado de inercia del panel de viguetas y vigas que el módulo de elasticidad sea tomado como 1.35 respecto al estándar estructural actual, como se muestra en la ecuación (6), para tomar en cuenta la mayor rigidez del concreto sobre la lámina colaborante bajo cargas dinámicas.

$$E_c = W^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

Donde

E_c = módulo de elasticidad del concreto (ksi)

W = peso unitario del concreto (lb/fts)

f'_c = resistencia a la compresión del concreto (ksi)

Adicionalmente, hay límites recomendados para los anchos efectivos de la losa de concreto que difieren de los que se usan en el diseño por resistencia. Para vigas y viguetas, el ancho efectivo se toma como el espaciamiento de los miembros, pero no mayor a 0.4 la luz del miembro. Esta limitación se corta a la mitad para miembros de borde, donde el ancho efectivo es la mitad del espaciamiento adyacente más el borde de la viga de borde, pero no más que 0.2 la luz del miembro.

Los últimos dos parámetros requeridos para el lado derecho de la ecuación (1) para estimar la aceleración pico efectiva son el peso efectivo del sistema W y el amortiguamiento modal. La DG 11 señala una serie de cálculos usados para determinar el peso efectivo del panel del sistema como una función de la rigidez relativa de los componentes, de factores de continuidad y geometría del piso.

Mientras no sea medido, el amortiguamiento modal debe ser estimado basado en la experiencia y en los valores recomendados para las condiciones finales del piso evaluado. Para puentes peatonales externos, la DG 11 recomienda un valor de 0.01.

V. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para mostrar cómo determinar de manera aproximada el efecto de la vibración generada por un peatón sobre un puente peatonal se utilizó el software SAP2000®, del cual se expondrá a continuación los pasos más importantes.

Este estudio se efectuó sobre un puente ubicado sobre la ruta del sol a la altura de la ciudad de Ibagué. El puente está construido en una sección de 40 m de longitud, constituido en su gran mayoría por elementos tipo frame, con características de sección

IPE 240 para las vigas transversales y de carga, con calidad de acero ASTM A572 Gr50, los pendolones con tubería cuadrada de 200 x 7 y los arcos con tubería de 300 x 400 x 5 en calidades A500 GrC. El tablero está constituido por una lámina colaborante calibre 3 con un espesor total de 12cm.

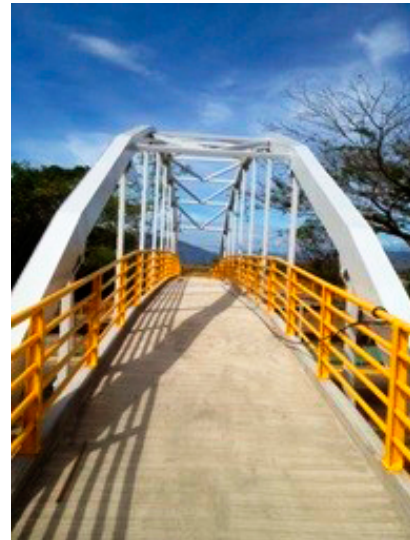


Fig. 9. Puente sobre la vía de Ibagué al cual se aplicó el estudio.
Fuente: Autores del proyecto.

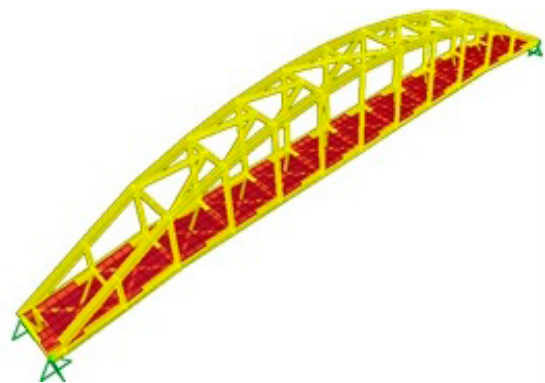


Fig. 10. Modelo en elementos finitos.
Fuente: Autores del proyecto.

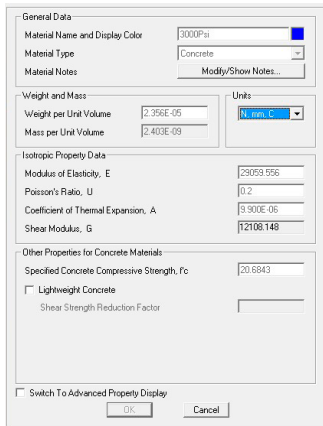


Fig. 11. Modulo dinámico según DG 11. Fuente: Autores del Proyecto.

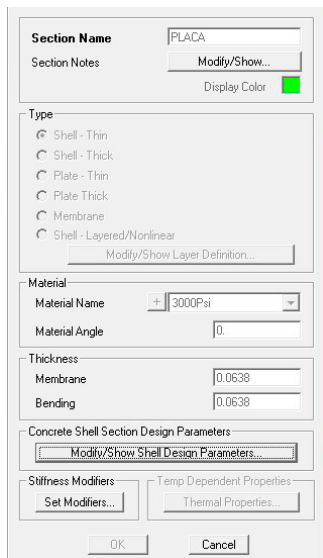


Fig. 12. Espesor compuesto de la lámina colaborante. Fuente: Autores del proyecto.

Una vez definida la geometría se realiza la asignación de materiales y propiedades según las especificaciones mencionadas. Para tomar en cuenta las características dinámicas del concreto se utiliza la indicación de la DG 11: aumentar el módulo de elasticidad del concreto 1.35 veces con respecto al estándar estructural actual.

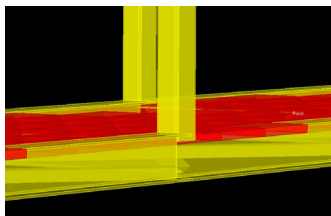


Fig. 13. Nudo típico con el centroide desfasado. Fuente: Autores del proyecto.

Con una relación $L/h > 300$, la sección de la losa se genera como un elemento tipo Shell-thin (figura 12), despreciando las deformaciones de flexión por efectos de corte. La losa se dibuja sobre los elementos tipo frame tomando en cuenta la acción compuesta entre la losa de concreto y la lámina colaborante, y desfasando los centroides de las vigas de transferencia, como se aprecia en la figura 13.

Cada paso que da el peatón en su recorrido debe ser modelado como una carga puntual aproximadamente en el lugar donde ésta se va dar, en este caso se dividió la malla para empatar con la mitad de la distancia de un paso promedio que es de alrededor de 70 cm a 100 cm. De esta forma, se crean los patrones de carga y se define cada paso como una carga lineal estática (figuras 14 -17).

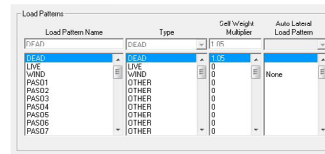


Fig. 14. Creación de los pasos de carga. Fuente: Autores del proyecto.

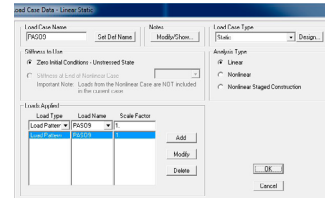


Fig. 15. Caso de carga típico de un paso. Fuente: Autores del proyecto.

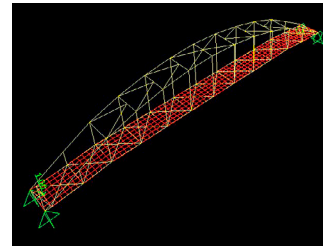


Fig. 16. Carga paso 1. Fuente: Autores del proyecto.

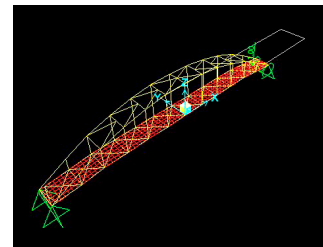


Fig. 17. Carga paso 35. Fuente: Autores del proyecto.

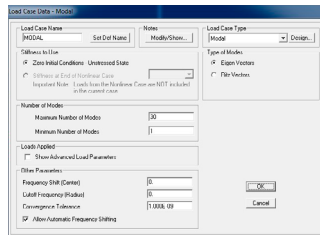


Fig. 18. Caso de carga modal.
Fuente: Autores del proyecto.

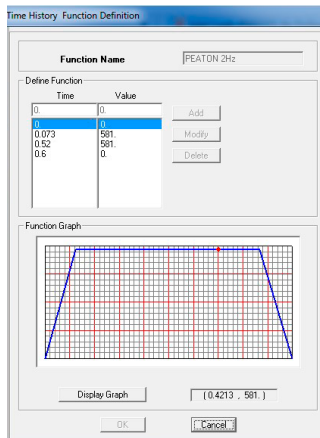


Fig. 19. Impacto de talón de un peatón.
Fuente: Autores del proyecto.

El análisis de vibraciones se hace obteniendo las frecuencias del sistema, o lo que es igual, resolviendo el problema de los valores propios. Para este fin, se hace un análisis modal y se toman en cuenta aquellos modos en que la frecuencia esté entre 2 y 15 Hz, que son las frecuencias en las que puede entrar a resonar el sistema debido a la frecuencia de paso.

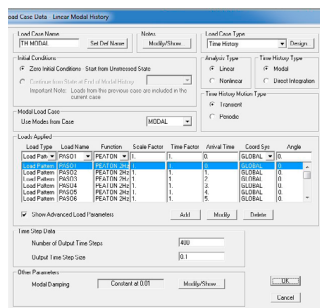


Fig. 20. Análisis de tiempo historia.
Fuente: Autores del proyecto.

El peso de la persona y la acción dinámica de éste se toma en cuenta creando un registro de tiempo-historia en el que se simula una carga de caída de talón en la cual se somete un punto al impacto pro-

ducido por una persona que se deja caer sobre sus talones, esto ha demostrado promediar de manera efectiva el caminar cíclico de una persona mediante un impacto pseudo-estacionario.

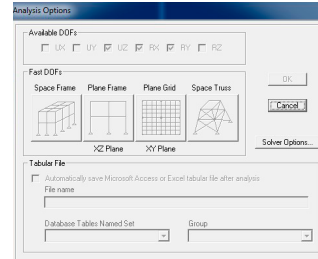


Fig. 21. Grados de libertad de análisis.
Fuente: Autores del proyecto.

La creación del caso de análisis de tiempo-historia cuenta con la inclusión de todos los pasos de carga creados, a los cuales se les asigna como función de carga el pulso de la caída de talón, y cada paso se indica con un tiempo de llegada posterior del anterior. Estos tiempos deben coincidir aproximadamente con el recorrido que hace el peatón por el puente.

Para hacer un análisis rápido y tomar en cuenta solo los efectos necesarios se puede realizar un análisis que tenga en cuenta solamente los desplazamientos verticales y las rotaciones en X y Y.

Posteriormente, se pueden obtener los resultados de la aceleración para diferentes frecuencias y para diferentes grados de amortiguamiento, así como la respuesta para la excitación en cada punto. Y, finalmente, se puede transformar la aceleración en función de la gravedad y compararla con los límites permitidos para determinar el nivel de cumplimiento de estos.

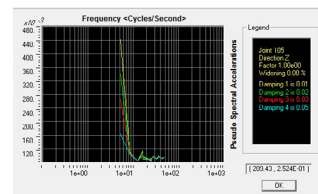


Fig. 22. Aceleración vs frecuencia para un punto aproximadamente al centro del puente.
Fuente: Autores del proyecto.

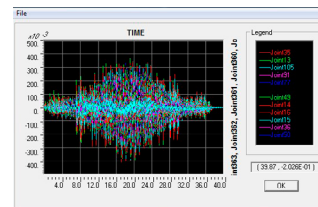


Fig. 23. Respuesta para todos los puntos para la carga del peatón.
Fuente: Autores del proyecto.

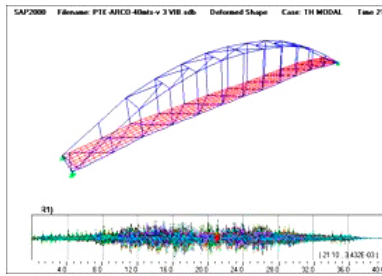


Fig. 24. Esquema de vibración del puente.
Fuente: Autores del proyecto.

VI. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la figura 22 puede observarse el comportamiento del puente peatonal ante el caminar humano. Cuando la frecuencia es superior a 10 Hz, la respuesta es similar para cualquier valor de amortiguamiento, y, a medida que aumenta el amortiguamiento, la respuesta en aceleración decrece.

Al sobreponer todas las respuestas se genera una especie de pseudo envolvente, en la cual se puede apreciar cómo para cada punto del puente se obtiene una respuesta diferente en el tiempo a medida que el peatón camina a través del puente. Las máximas respuestas en la envolvente se pueden apreciar a la mitad de la luz y en los tercios extremos de la longitud del puente.

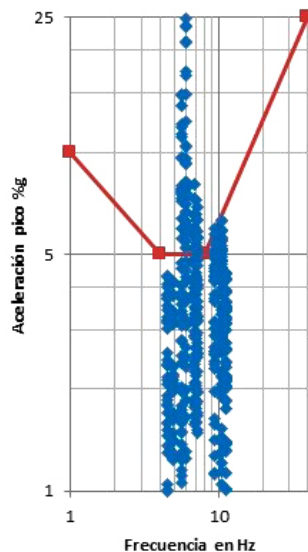


Fig. 25. Niveles de tolerancia.
Fuente: Autores del proyecto.

De acuerdo con la figura 25, el puente es susceptible entre los rangos de 4 a 8 Hz, que resulta el más inconveniente porque es donde el límite es más estricto por estar cerca a la frecuencia de la acción del caminar humano. En algunos puntos, la respuesta es casi cuatro veces la frecuencia aceptable.

Se deben tomar en cuenta las características de la sección compuesta en la estructura, y se debe tener en cuenta, con la mayor precisión posible, la posición de cada elemento estructural, así como la interacción con los elementos no estructurales.

El problema de las vibraciones se incrementa debido a la baja relación entre el peso y la rigidez vertical de la estructura.

Resulta evidente cómo el diseño de las estructuras para puentes peatonales no solo obedece a temas estéticos y económicos, también debe incluirse el aspecto funcional y/o de servicio para la verificación de vibraciones. Al respecto, se presume que debe existir un peso mínimo para cualquier estructura de puentes peatonales.

Es importante reglamentar los límites de tolerancia humana a las vibraciones; aun cuando ya son aceptados, ningún reglamento de construcción exige su uso y verificación completa.

El uso de modelos de computador para la predicción del comportamiento de los efectos de las vibraciones sobre estructuras, en este caso puentes peatonales, tiene bastante confiabilidad y permite evaluar formas irregulares y efectos inesperados por el tránsito humano.

VII. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

1. Se recomienda modelar las losas como elementos 2D y las vigas con sus centroides desplazados para tomar en cuenta la acción compuesta. De no ser posible, se debe garantizar que la rigidez axial sea correcta, es decir, que la sección transversal compuesta sea la equivalente. La losa debe ser modelada en su eje neutro y las vigas desplazadas la mitad de su altura más la altura del eje neutro de la losa. Si no se puede aplicar este método, se pueden usar vínculos rígidos para unir la losa a la viga.
2. Las costillas, conectores y pliegues de las losas compuestas de acero o de las vigas de acero deben ser modeladas explícitamente como entidades en las que se distinga su centroide. En el caso de los elementos tipo losa, deben tener rigideces tanto a flexión como a tensión y asegurarse de que no haya restricciones laterales que puedan generar restricciones a los desplazamientos.
3. Si es complicado modelar los elementos como independientes, se pueden usar las teorías de sección compuesta validando la rigidez del sistema.
4. Se debe usar una división de los elementos finitos adecuada. Para tener resultados satisfactorios, por lo general, es suficiente tener 8 elementos por cada panel, sin embargo, debe hacerse un reajuste haciendo elementos la mitad de pequeños para comprobar que las frecuencias dadas por los dos modelos, el de 8 y el de 16, sean aproximadamente iguales.

5. Se debe tomar en cuenta la participación de las masas de elementos no estructurales y de aquellas que se encuentren permanentemente sobre la estructura, esto se puede lograr asignando masas en los puntos requeridos o poniendo las cargas según como se haga el análisis.
6. Para los muros de fachada y núcleos de concreto se ha visto que una restricción vertical puede ser suficiente para homologar la participación de los mismos.
7. Todas las conexiones son empotradas, aunque se hayan diseñado como articuladas. Los ensayos han demostrado que para niveles de vibración bajos éstas se comportan como rígidas.
8. La rigidez rotacional de las columnas puede incrementar las frecuencias de vibración del piso, por lo que se debe incluir el efecto de éstas hacia las mitades de los pisos superior e inferior al evaluado.
9. Si se modela una porción de la estructura, se debe tener cuidado con la selección de las condiciones de borde, así como la masa desplazada. Es mejor hacer el entrepiso completo.

X. FINANCIACIÓN

Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación titulado: "Predicción del comportamiento de puentes peatonales usando modelos de computador". Proyecto financiado por la empresa Consultoría y Supervisión de Estructuras SAS y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Fecha de inicio: septiembre de 2014. Fecha de finalización: agosto de 2015.

REFERENCIAS

- [1] M. R. Willford y P. A. Young, "A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures," *The Concrete Centre*, Camberley, Surrey, England, diciembre 2006.
- [2] P. Dallard, A. J. Fitzpatrick, A. Flint, S. Le Bourva, A. Low, R. M. R. Smith y M. Willford, "The London Millennium Footbridge," *The Structural Engineer*, vol. 79, no. 22, pp. 17-33, noviembre 2001.
- [3] S. C. Kerr, "Human Induced Loading on Staircases," Tesis doctoral, University of London, Londres, Inglaterra, 1998.
- [4] T. M. Murray, D. E. Allen y E. E. Ungar, "Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations Due to Human Activity," American Institute of Steel Construction AISC, Chicago, Illinois, octubre 2003.
- [5] R. M. Hanes, "Human Sensitivity to Whole-Body Vibration in Urban Transportation Systems: A Literature Review," *Applied Physics Laboratory*, The John Hopkins University, Silver Springs, Maryland, 1970.
- [6] B. R. Ellingwood, "Serviceability Guidelines for Steel Structures," *Engineering Journal American Institute of Steel Construction*, vol. 26, pp. 1-8, enero 1989.
- [7] *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration - Part 2: Vibrations in Buildings (1 to 80 Hz)*, International Standard ISO 2631-2, 2003.
- [8] D. E. Allen y T. M. Murray, "Design Criterion for Vibrations Due to Walking," *Engineering Journal American Institute of Steel Construction*, vol. 30, pp. 117-129, 1993.
- [9] M. J. Griffin, *Handbook of Human Vibrations*. London, England: Elsevier Press, 1990. <http://dx.doi.org/10.1121/1.401606>
- [10] T. M. Murray, "Building Floor Vibrations," *Engineering Journal American Institute of Steel Construction*, vol. 28, pp. 102-109, 1991.
- [11] H. Bachmann, W. J. Ammann, F. Deischl, J. Eissenmann, I. Floegl, G. H. Hirsch, G. K. Klein, G. J. Lande, O. Mahrenholtz, H. G. Natke, H. Nussbaumer, A. J. Pretlove, J. H. Rainer, E. U. Saemann y L. Steinbeisser, *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Basel, Suiza: Birkhäuser Verlag, 1995. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-0348-9231-5>
- [12] G. Pernica, "Dynamic load factors for pedestrian movements and rhythmic exercises," *Acoustique Canadienne*, vol. 18, pp. 3-18, enero 1990.
- [13] P. Young, "Improved Floor Vibration Prediction Methodologies," *Proceedings of Arup Vibration Seminar on Engineering for Structural Vibration - Current Developments in Research and Practice*, Londres, Reino Unido, octubre 2001.
- [14] J. H. Rainer y J. C. Swallow, "Dynamic Behavior of a Gymnasium Floor," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 13, pp. 270-277, 1986. <https://dx.doi.org/10.1139/186-039>
- [15] S. H. Strogatz, D. M. Abrams, A. McRobie, B. Eckhard y E. Ott, "Crowd synchrony on the Millennium Bridge," *Nature*, vol. 438, pp. 43-44, noviembre 2005.
- [16] I. J. Ramaji, "Cable Stay & Suspension Bridges Failures," 2013, [Presentación en Building, Architectural and Civil Engineering Failures and Forensic Practices]. <https://failures.wikispaces.com/Cable+Bridge+Failures+Overview> [Accessed: 27-jun-2016].