

Efectos de la interacción humano-estructura en las propiedades dinámicas de una tribuna

CIVIL ENGINEERING

Effects of human-structure interaction on the dynamic properties of a grandstand

Albert R. Ortiz^{*§}, Daniel Gómez^{*}, Peter Thomson^{*}

**Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7.*

§alrortiz@gmail.com, daniel.gomez@correounivalle.edu.co, pethomso@univalle.edu.co

(Recibido: Febrero 9 de 2011 –Aceptado: Abril 10 de 2012 –Versión Final: Junio 22 de 2012)

Resumen

Tradicionalmente en la ingeniería civil el efecto de las personas sobre las estructuras se ha considerado sólo como una carga adicional sin tener en cuenta que esta ocupación puede cambiar los parámetros dinámicos de la estructura. Estos hechos han despertado el interés en emular las características de la carga humana a través de la formulación de modelos dinámicos que interactúan con el sistema estructural y modifican sus propiedades dinámicas. Este artículo presenta la caracterización de los efectos producidos por cargas humanas en la frecuencia natural fundamental y la razón de amortiguamiento viscoso correspondiente de una estructura que fue construida para ser representativa en el modo y la frecuencia natural de la tribuna sur del Estadio Olímpico Pascual Guerrero de Cali (Colombia). Se realizaron ensayos de vibración forzada en la tribuna, tanto con ocupantes humanos en diferentes configuraciones y densidades de ocupación como con cargas muertas equivalentes. Los resultados muestran que para el caso de las cargas humanas, la frecuencia natural fundamental y la correspondiente razón de amortiguamiento de la estructura pueden variar hasta en 35% y 27% respectivamente, en relación con los valores de la estructura con cargas muertas equivalentes.

Palabras Claves: *Propiedades modales, interacción humano-estructura, respuesta dinámica, carga viva.*

Abstract

In structural engineering, human occupants have traditionally been considered as external loads with no consideration being made for changes they can produce in the dynamic properties of the structure. Hence, the current interest in proposing dynamic models for human occupants that interact with structural models and account for changes in the dynamic properties of the structure. This article presents the characterization of the effects that human occupants have on the fundamental natural frequency and corresponding equivalent viscous damping ratio of a structure that was built such that its fundamental natural frequency is similar to that of the grandstand of the Pascual Guerrero Stadium, in Cali, Colombia. Forced vibration tests were conducted on the grandstand with both dead loads and human occupants in different positions and occupation densities. Results show that for the case of the structure with human occupants, the fundamental natural frequency and corresponding damping ratio can vary up to 35% and 27% respectively, with respect to those of the structure with equivalent dead loads.

Keywords: *Modal properties, human-structure interaction, dynamic response, live load.*

1. Introducción

Saltar, bailar, caminar, correr y realizar ejercicios aeróbicos son actividades que comúnmente causan problemas de vibraciones en estructuras civiles. Este inconveniente se ha intensificado debido a la aparición de configuraciones estructurales más flexibles, con materiales más livianos y resistentes. Saidi et al. (2006) y Reynolds et al. (2004) coinciden en afirmar que los problemas de vibraciones son debidos a las bajas frecuencias naturales de la estructura, las cuales se encuentran en el rango de las frecuencias producidas por las personas en movimiento, representando un caso típico de resonancia. Este efecto se ha detectado, incluso, en puentes peatonales sometidos a vibraciones horizontales producidas por el caminar de una persona.

Si bien el tema se está investigando desde hace varias décadas por Lenzen (1966), Allen & Pernica (1984), Allen (1990), y Murray (1991), los problemas de vibraciones que ocurrieron en el año 2000 en el puente Millennium, en Inglaterra, Zivanovic et al. (2005) representaron un punto de partida que despertó un mayor interés por parte de los ingenieros estructurales. Las investigaciones recientes expresan que las vibraciones producidas por las actividades rítmicas de personas sobre una estructura no sólo corresponden a los efectos propios de un caso de resonancia, sino que, debido a la propia naturaleza de la fuerza, ésta altera sus condiciones produciendo mayores o menores niveles de excitación. De igual forma la acción de esta carga sobre la estructura no sólo es considerada como una fuerza externa, sino como un sistema dinámico (Figura 1) que altera las propiedades de la estructura Sachse et al. (2003). Los efectos producidos por esta interacción son conocidos en la literatura como efectos de Interacción Humano-Estructura y están relacionados con el accionar de las personas ante diferentes tipos de excitación, de estructuras, ambientales y emocionales.

El fenómeno de la Interacción Humano-Estructura ha sido ampliamente estudiado para actividades que incluyen a personas en movimiento, sin embargo, la actividad pasiva de las personas no ha sido estudiada en profundidad Sachse et al. (2003), ignorando los cambios que

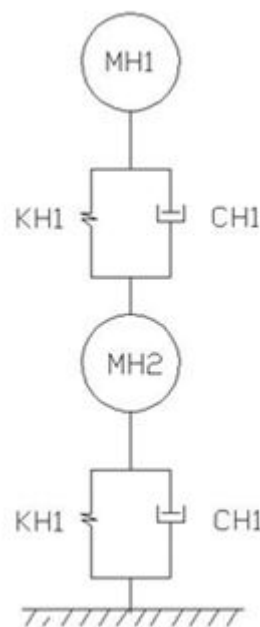


Figura 1. Modelo dinámico de una persona propuesto por ISO (1981).

pueden presentar las estructuras ante la ocupación del público. Este trabajo muestra la variación en el amortiguamiento y la frecuencia natural de una estructura producida por las personas en estado pasivo. Adicionalmente, una comparación entre resultados obtenidos con personas y los obtenidos al utilizar sacos de arena con masa similar es presentada.

2. Metodología

2.1 Plataforma de ensayos: tribuna

La geometría de los estadios, coliseos y grandes sitios dedicados a la aglomeración de personas debe garantizar la visión de todos los espectadores hacia un punto en común. Debido a esto, estas estructuras pueden presentar irregularidades en altura, un claro ejemplo es el Estadio Olímpico Pascual Guerrero donde la Universidad del Valle ha venido realizando estudios de Monitoreo de Salud Estructural y Vibraciones. Entre los resultados, Ortiz et al. (2009) encontraron que existen problemas de acoplamiento entre la excitación de las cargas producidas por el público y modos locales de algunos sectores en las

tribunas populares (Figura 2). Con base en estos resultados se construyó en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle una plataforma de ensayos para realizar pruebas experimentales de vibraciones y efectos de interacción humano-estructura, en estructuras que tuvieran geometría similar y que permitieran reproducir los efectos producidos por las personas

La plataforma presenta una geometría análoga a la tribuna sur del estadio Pascual Guerrero. Está construida con miembros estructurales de acero formados en frío y diseñada según la NSR-10, AIS (2011) en su título F – Estructuras Metálicas. Durante el diseño no se realizaron análisis de sismo o viento, sólo se tuvo en cuenta la carga que actúa durante los ensayos la cual es la producida por el salto de las personas sobre la estructura, esta carga viva fue de 500 kg/m^2 de acuerdo a las especificaciones de las Normas Colombianas NSR-10, AIS (2011) en su título B.4.2.1 para graderías de coliseos y estadios. Otro parámetro de diseño es su comportamiento dinámico, en el cual se pretende alcanzar una frecuencia de 2.5 Hz en un primer modo que fuera transversal con flexión del voladizo inferior, con el fin de asemejarse al comportamiento dinámico identificado por Ortiz et al. (2009) en la tribuna sur del estadio Olímpico Pascual Guerrero y de esta manera poder representar los problemas de vibraciones producidas por las personas. Para asemejar las condiciones reales de la tribuna del estadio, se seleccionó la misma configuración estructural, formada por columnas en forma de V y con una

inclinación de la gradería de 27° (Figura 3). En el diseño primó el uso de acero para garantizar la flexibilidad, ya que utilizando concreto reforzado se dificultaba obtener propiedades dinámicas similares. Para incluir los efectos del suelo se calibró el modelo numérico (desarrollado en SAP2000) incluyendo sistemas masa resorte en la base de la estructura (ver Figura 4), lo que permitió obtener un modelo analítico ajustado para los primeros dos modos de vibración obtenidos experimentalmente. El resultado de esta calibración, más conocida en la literatura como *model updating*, se presenta en la Tabla 1.



Figura 3. Tribuna a escala construida como plataforma de pruebas.



Figura 2. Estructura interna de la Tribuna Sur del Estadio Olímpico Pascual Guerrero.

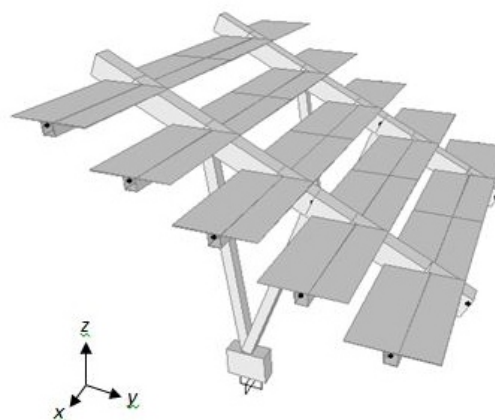


Figura 4. Tribuna modelada en SAP2000

Tabla 1. Modos de la estructura calibrada en SAP2000.

Modo	Frecuencia (Hz)	% Participación de Masa		
		X	Y	Z
1	2.94	0.02	67.30	2.30
2	4.45	91.70	0.01	0.05
3	5.32	0.00	2.70	0.14
4	19.98	0.29	6.50	20.00
5	25.50	0.15	5.80	3.80

2.2 Ensayos dinámicos

Se realizaron registros de vibración forzada sobre la tribuna empleando un actuador electrodinámico serie APS Dynamics de ELECTRO-SEIS Modelo 113, el cual genera rangos de fuerza de 20 a 40 libras y rangos de frecuencia de 0 a 200 Hz, ver Figura 5. Este excitador utiliza un amplificador serie APS 114 el cual está diseñado específicamente para proporcionarle potencia al actuador. Estos dos elementos se conectan mediante un cable multi-axial. Los registros consistieron en una excitación sinusoidal de frecuencia variable de 1 a 10 Hz y 1 a 6 Hz.

Para la medición de vibraciones se usaron acelerómetros sísmicos de baja frecuencia Wilcoxon Research Modelo 731A y acelerómetros ENDEVCO Modelo 752A13, cada uno con un amplificador Wilcoxon Research Modelo P31. Los acelerómetros sísmicos tienen un ancho de banda de 0.05 a 500 Hz (± 3 dB), una sensibilidad de 10 V/g y junto con los amplificadores se puede obtener una sensibilidad total de 10 V/g, 100 V/g ó 1000 V/g. Los acelerómetros ENDEVCO tienen un ancho de banda de 0.3 a 10000 Hz (± 1 dB), una sensibilidad de 1 V/g y junto con los amplificadores se puede obtener una sensibilidad total de 1 V/g, 10 V/g ó 100 V/g.

Los ensayos se realizaron adicionando carga a la estructura con las siguientes configuraciones: personas paradas, sentadas (1, 2, 3, 5 o 10 personas) y costales con arena. La carga máxima utilizada fue de 790 kg para la proporcionada con arena y 640 kg para la proporcionada por las personas, lo que corresponde a 10 personas sobre la estructura. Los ensayos se centraron en el

primer y último peldaño, utilizando la siguiente nomenclatura para la identificación en los resultados:

SAB: Personas sentadas peldaño inferior.

SAR: Personas sentadas peldaño superior.

PAB: Personas paradas peldaño inferior.

PAR: Personas paradas peldaño superior.

MAB: Masa (Arena) ubicada sobre el peldaño inferior.

MAR: Masa (Arena) ubicada sobre el peldaño superior.

Modelo AB: Carga aplicada en el modelo analítico en el peldaño inferior.

Modelo AR: Carga aplicada en el modelo analítico en el peldaño superior.

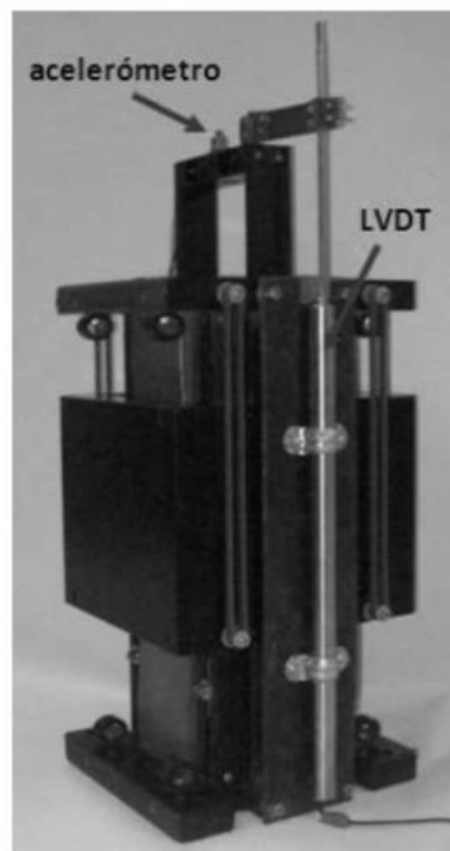


Figura 5. Actuador dinámico para producir vibración forzada sobre la tribuna.

La Figura 6 muestra un esquema de la posición de las personas y el excitador sobre la tribuna.

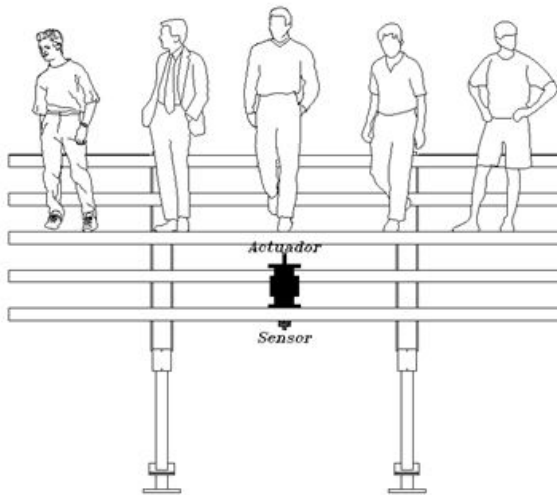


Figura 6. Esquema de ubicación del actuador y las personas en la plataforma de ensayos.

2.3 Procesamiento de registros, identificación de modelos y obtención de parámetros dinámicos.

El procesamiento de los registros se realizó a través de algoritmos de identificación de sistemas dinámicos. La identificación es la obtención de un modelo matemático de un sistema dinámico a partir de datos de medición de las entradas (excitaciones) y salidas (respuestas) del sistema, para calcularlos se utiliza la identificación en el dominio de la frecuencia que consiste en hallar un modelo dinámico que replique el comportamiento real del sistema estructural para una relación entrada/salida. Para implementar este método, primero se determina experimentalmente la función de respuesta en frecuencia la cual relaciona la entrada al sistema con su salida, teniendo esto se emplean algoritmos de ajuste del Toolbox de Control Robusto de MATLAB, los cuales ajustan la función utilizando una aproximación por mínimos cuadrados generando una función de transferencia, Gómez (2010), esta aproximación ha sido utilizada exitosamente y es recomendada en aplicaciones de identificación y control estructural en Dyke et al. (1994), Dyke (1996) y Dyke et al. (1996).

Como ejemplo del procesamiento de los datos, en la Figura 7 se muestra la señal aplicada en el excitador o señal de entrada (arriba) y la señal de salida (abajo) que mide la respuesta de la estructura ante la excitación producida por la fuerza dinámica, sobre estos dos registros se obtiene una función de respuesta en frecuencia que representa el sistema identificado ajustado a través de mínimos cuadrados (Figura 8). La Figura 9 muestra el ajuste del sistema identificado en el dominio del tiempo y el porcentaje de correlación obtenido. El uso de las funciones de transferencia obtenidas de la identificación fueron utilizados por Hernández et al. (2011) para implementar metodologías de control de la respuesta estructural para la disminución de las vibraciones.

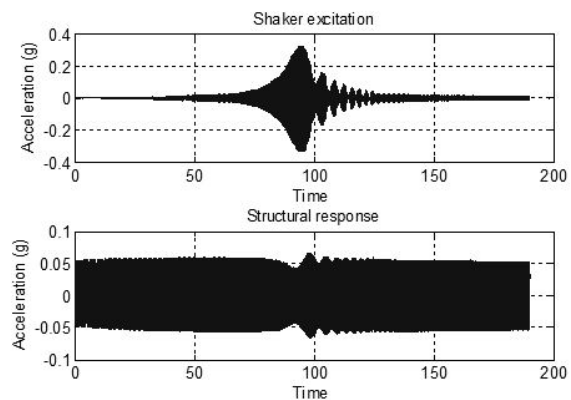


Figura 7. Señal de entrada producida por el excitador y señal de respuesta de la tribuna ante la excitación. (Señal de salida).

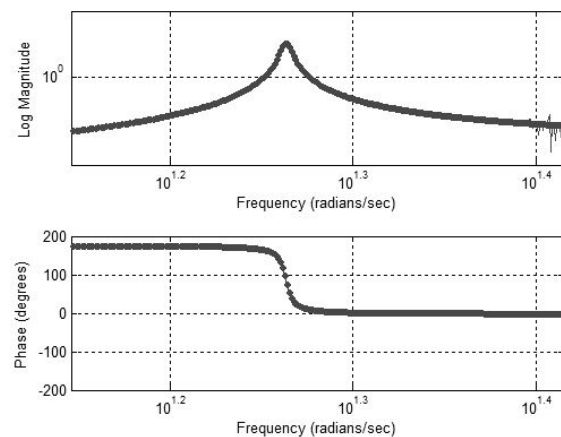


Figura 8. Ajuste en frecuencia entre la señal de salida y el sistema identificado.

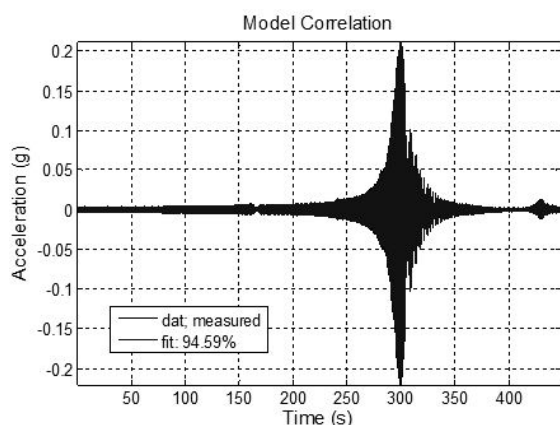


Figura 9. Correlación entre el sistema identificado y señal de salida en el dominio del tiempo.

3. Resultados

Se adquirieron 84 registros de vibración forzada que se utilizaron para la obtención de las variaciones de amortiguamiento y frecuencia. El ajuste de los modelos obtenidos fue superior al 80%, sin embargo, en los registros que involucran a 5 y 10 personas (entre 300 y 640 kg), se toleraron ajustes hasta el 60% debido al alto amortiguamiento evidenciado. La frecuencia natural asociada al primer modo de la estructura

(sin masa adicional) fue del orden de 2.94 Hz, con una razón de amortiguamiento de 0.3%. En las pruebas utilizando arena se observaron cambios en la frecuencia natural de la estructura entre 2.94 Hz cuando no hay masa adicional sobre la estructura, y 1.94 Hz con 786 kg de arena en el peldaño superior. La variación del amortiguamiento utilizando arena está en el rango de 0.3% a 0.6%. (Figura 10).

En los ensayos con personas sentadas la razón de amortiguamiento aumentó hasta un 27.8% cuando se ubicaron en el peldaño superior, mientras que en el peldaño inferior, la razón de amortiguamiento aumentó sólo un 5.4%. La Figura 11 muestra los resultados de la variación de los parámetros dinámicos en función de la carga viva impuesta sobre la estructura (personas sentadas).

Para las personas paradas en el primer y último peldaño el cambio en la frecuencia natural de la estructura estuvo en el rango de 2.94 Hz hasta 2.44 Hz, esta última frecuencia se obtuvo cuando 10 personas aportaron 658 kg de carga viva. La variación de la razón de amortiguamiento aumentó hasta un 5.39% cuando las personas están paradas en el peldaño superior y 3.61% cuando se encuentran de pie

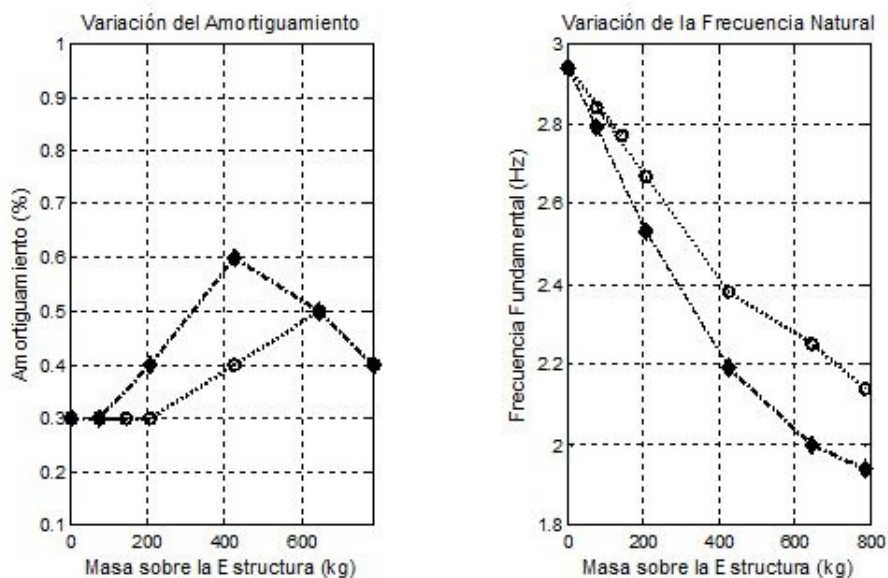


Figura 10. Cambios en las propiedades dinámicas de la tribuna debido a la sobrecarga con arena, ---○--- MAB, —◆— MAR.

en el peldaño inferior (Figura 12). Para la validación se aplicaron estas cargas en el modelo en elementos finitos de la estructura con el fin de obtener un punto de comparación con los resultados experimentales. Los resultados de la aplicación de masa en la parte inferior y superior

de la tribuna se presentan en la Figura 13. Las Figuras 14 y 15 presentan la variación de amortiguamiento y frecuencia en los casos de carga evaluados, representando en el eje horizontal la razón entre la carga viva y el peso de la estructura para una mejor comprensión.

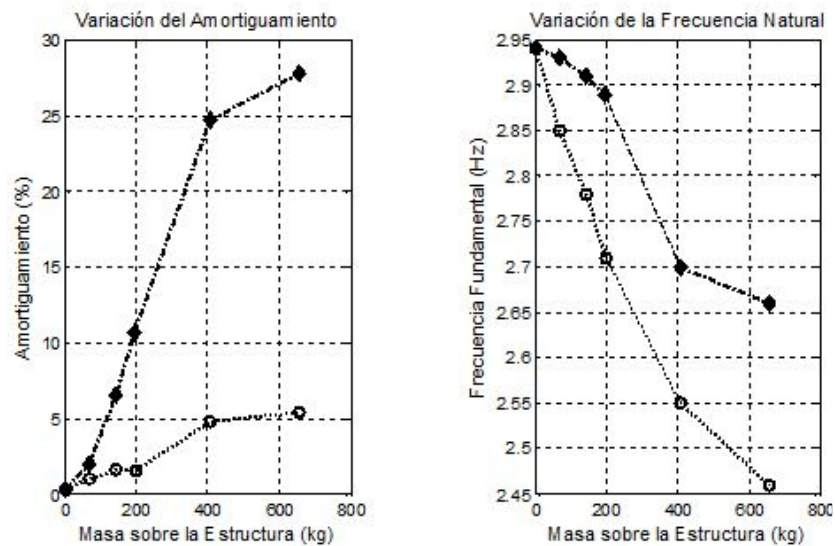


Figura 11. Cambios en las propiedades dinámicas de la tribuna debido a la sobrecarga con personas sentadas, $\cdots\circ\cdots$ SAB, $\cdots\blacklozenge\cdots$ SAR.

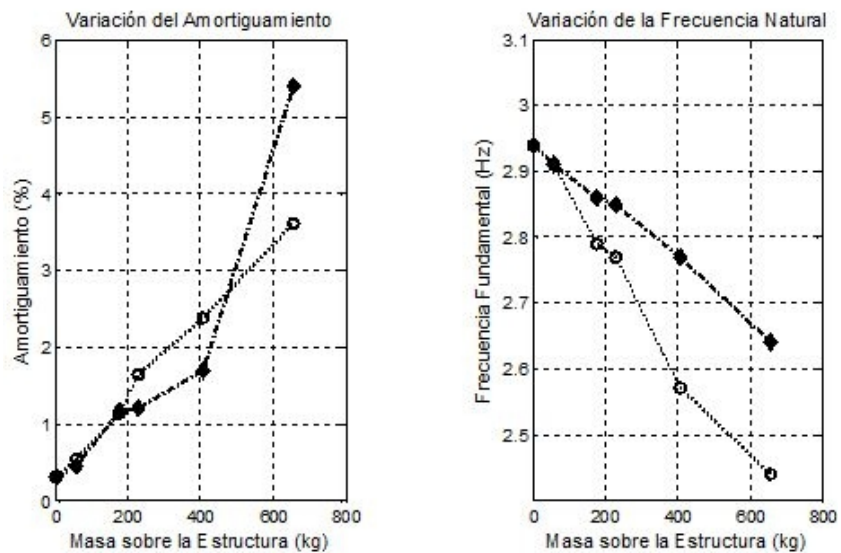


Figura 12. Cambios en las propiedades dinámicas de la tribuna debido a la sobrecarga con personas paradas, $\cdots\circ\cdots$ PAB, $\cdots\blacklozenge\cdots$ PAR.

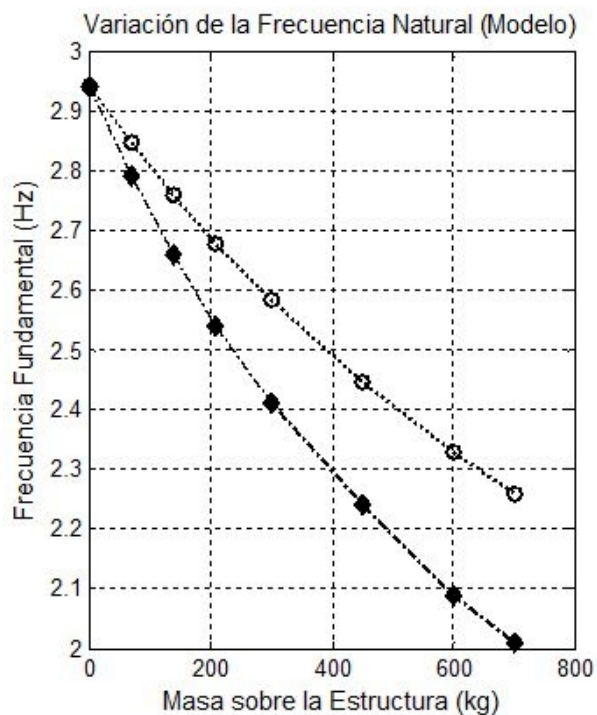


Figura 13. Cambios en las propiedades dinámicas del modelo analítico de la tribuna, $\cdots\circ\cdots$ Modelo(AB), $-\bullet-$ Modelo(AR).

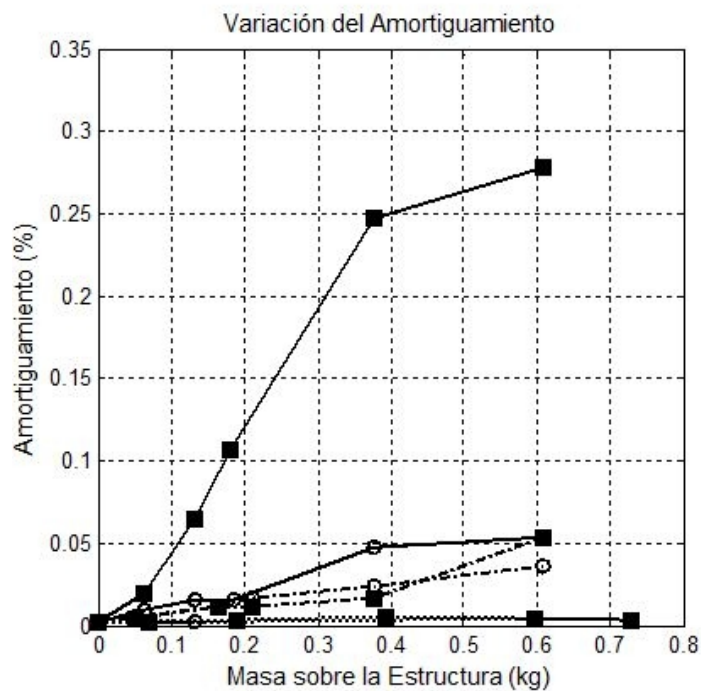


Figura 14. Cambios en el amortiguamiento de una tribuna debido a la carga viva, $\cdots\circ\cdots$ SAB, $-\blacksquare-$ SAR, $-\circ-$ PAB, $-\blacksquare-$ PAR, $\cdots\circ\cdots$ MAB, $-\blacksquare-$ MAR.

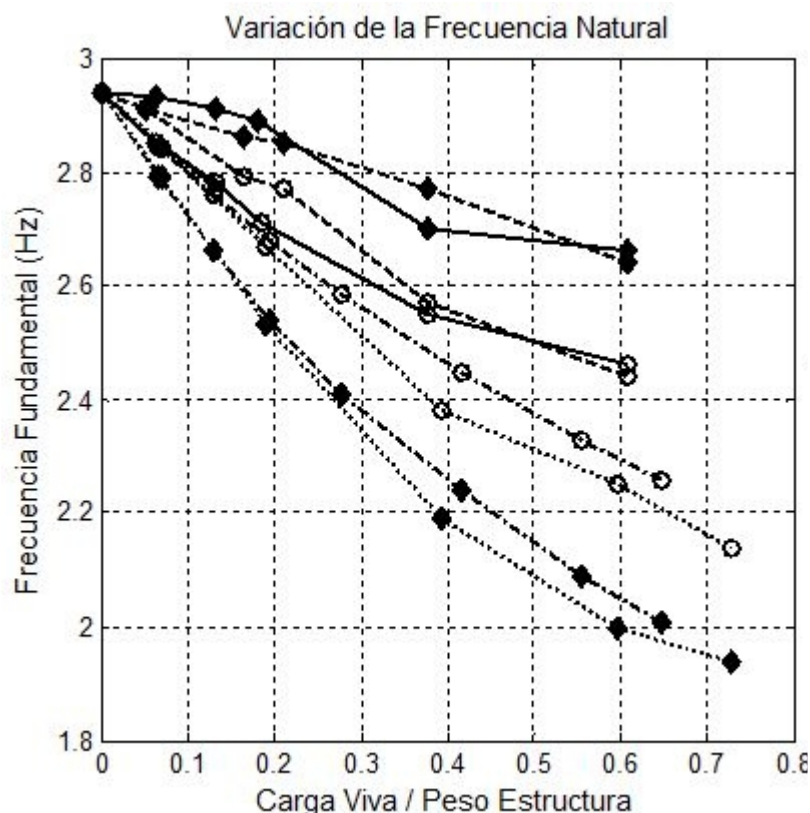


Figura 15. Cambios en la frecuencia fundamental de una tribuna debido a la carga viva, —○— SAB, —△— SAR, ---△--- PAB, ---○--- PAR, ---△--- MAB, ---○--- MAR, ---△--- ModeloAR, ---○--- ModeloAB.

4. Conclusiones

Los cambios en las propiedades dinámicas de la tribuna a escala muestran variaciones significativas según las condiciones de carga viva aplicadas. En la utilización de arena para la simulación de carga viva estática, el cambio en la razón de amortiguamiento de la tribuna tuvo una fluctuación entre el 0.3% y el 0.6%, pero con una tendencia constante, es decir, para este caso de carga al considerar sólo masa muerta sobre la estructura, no se observa una relación directa entre la masa aplicada y la razón de amortiguamiento. Contrario a esto, la frecuencia natural decayó hasta 1.94 Hz cuando se utilizaron 786 kg de arena, una variación de 1 Hz respecto a la frecuencia natural de la estructura vacía, esta diferencia se presentó en el peldaño inferior, es decir, en la parte de la estructura que presenta las mayores deformaciones en su modo fundamental de vibración.

Contrario a los ensayos donde se utilizó arena como carga viva, en los ensayos que involucraron personas sí existe una relación directa entre la carga (o número de personas) y la razón de amortiguamiento, esto quiere decir que el cuerpo humano actúa como un sistema que altera las condiciones de amortiguamiento de la estructura según la posición en la que se encuentre, en este caso, el amortiguamiento de las personas sentadas en el peldaño más alto fue la condición que más afectó esta característica dinámica, llegando a razones de amortiguamiento de 27.5%, condiciones que modifican ampliamente la respuesta de la estructura ante cargas humanas.

Para los ensayos en los cuales la carga viva estuvo conformada por personas paradas, el aumento en el amortiguamiento estructural, aunque está relacionado con la carga viva, fue indiferente del lugar en la tribuna. La variación en la razón de amortiguamiento obtenida para el peldaño más

alto y más bajo de la estructura es similar y considerablemente más baja que la obtenida con las personas sentadas. Esto indica que el cuerpo humano al estar sentado causa un mayor aumento en el amortiguamiento estructural que al estar de pie.

Los resultados más significativos de ésta investigación radican en la similitud entre los resultados experimentales utilizando sacos de arena y el modelo analítico en SAP2000. En este caso, para una estructura de 1082 kg de peso, considerada liviana, los efectos de interacción producen cambios notorios en parámetros estructurales como el amortiguamiento y la frecuencia natural, los cuales deberían tenerse en cuenta en el modelo analítico por parte del diseñador estructural. Infortunadamente los resultados obtenidos del modelo analítico simulando la aplicación de las cargas vivas muestran la tendencia a reducir la frecuencia natural de la estructura al mismo nivel que la ocasionada por los ensayos realizados con arena, lo cual indica que los efectos de interacción humano-estructura no son considerados por estos modelos y no son tenidos en cuenta en el diseño definitivo de la estructura.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología COLCIENCIAS, por la financiación del proyecto 'Desarrollo de una Guía de diseño estructural para disminuir el efecto de la interacción Humano-Estructura en estructuras civiles' (Contrato No. 382-2009).

6. Referencias Bibliográficas

AIS. (2011). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Allen, D. E. (1990). Building vibrations from human activities. *Concrete International: Design*

and Construction. American Concrete Institute, 12 (6), 66-73.

Allen, D. E., & Pernica, G. (1984). A simple absorber for walking vibrations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 11, 112-117.

Gómez, D. (2010). Comparison of the identification of a structural system with active control using frequency response and neural networks. *Revista Dyna*, No. 170, Diciembre, 2011, 79-89.

Dyke, S. (1996). *Acceleration feedback control strategies for active and semi-active systems: modeling, algorithm development and experimental verification*. Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana.

Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Quast, P., Kaspari Jr, D. C., & Sain, M. K. (1996). Implementation of an active mass driver using acceleration feedback control. *Microcomputers in Civil Engineering*, 11 (5), 305-323.

Dyke, S. J., Spencer, B. F., Quast, P., Sain, M. K., Kaspari, D., & Soong, T. (1994). Experimental Verification of Acceleration Feedback Control Strategies for an Active Tendon System. *National Center for Earthquake Engineering Research*, New York: Technical Report NCEER-94-0024.

ISO (1981) *Vibration and shock - Mechanical driving point impedance of the human body*. ISO 5982:1981. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO).

Hernández, D., Gómez, D., & Thomson, P. (2011). Implementación de un sistema de control activo para disminuir las vibraciones producidas por personas en una tribuna. *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia, No. 61, Diciembre, 2011, 73-82.

Lenzen, H. K. (1966). Vibration of Steel joist-concrete slab floors. American Institute of Steel Construction (AISC). *Engineering Journal*. (3), 133-136.

Murray, T. M. (1991). Building Floor Vibrations. *Engineering Journal*, 28 (3), 102-109.

Ortiz, A., Gómez, D., & Thomson, P. (2009). Caracterización del efecto de la interacción humano-estructura en el estadio olímpico en Cali, Colombia. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29 (1), 13-23.

Reynolds, P., Pavic, A. & Ibrahim, Z. (2004). *Changes of modal properties of a stadium structure occupied by a crowd*. In 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII), Dearborn, Detroit, USA, January.

Sachse, R., Pavic, A. & Reynolds, P. (2003). Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review. *The Shock and Vibration Digest*, 35 (1), 3-18.

Saidi, I., Haritos, N., Gad, E., & Wilson, J. (2006). Floor vibrations due to human excitation – damping perspective. *Earthquake Engineering in Australia*, Camberra, 24-26.

Zivanovic S., Pavic A., Reynolds P. (2005). Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*, 279, 1–74