

# Effects of human-structure interaction in slabs Efectos de interacción humano-estructura en losas

Sandra Villamizar <sup>a</sup>, Daniel Gómez <sup>b</sup> & Peter Thomson <sup>c</sup>

<sup>a</sup> M.Sc., Universidad del Valle, Colombia. Grupo de Investigación G-7. [sandra.villamizar@correounivalle.edu.co](mailto:sandra.villamizar@correounivalle.edu.co)

<sup>b</sup> M.Sc., Profesor Asociado, Universidad del Valle, Colombia. Grupo G-7. [daniel.gomez@correounivalle.edu.co](mailto:daniel.gomez@correounivalle.edu.co)

<sup>c</sup> Ph.D., Aeroespacial, Profesor Titular, Universidad del Valle, Colombia. Grupo G-7. [peter.thomson@correounivalle.edu.co](mailto:peter.thomson@correounivalle.edu.co)

Received: August 23th, 2013. Received in revised form: December 20th, 2013. Accepted: January 21th, 2014

## Abstract

During the last several decades, stronger and lighter materials have been developed with the aim of optimizing performance and building costs. These technological advances have given rise to thin flexible flooring systems with natural frequencies that lie within the frequency range of vibrations produced by human activity. Human occupants can cause changes in the dynamic properties of the structure and structural vibrations can cause discomfort to the occupants, who not only perceive the vibrations but also interact dynamically with the structure. This paper presents the results of the characterization of the effect of human-structure interaction (HSI) in three flooring systems commonly used in the Colombian building industry. The methodology consisted in the characterization of the dynamic response of the flooring systems due to different coordinated human activities. Based on the results, the authors recommend that future building codes account for human-structure interaction effects in flooring systems.

*Keywords:* Human-Structure Interaction, vibrations, dynamic response, slabs.

## Resumen

Los avances tecnológicos de las últimas décadas han tendido al desarrollo de materiales más livianos y resistentes con el fin de optimizar costos y rendimientos en la construcción de losas. Estos avances han permitido el diseño y construcción de sistemas de piso más esbeltos y ligeros cuyas frecuencias naturales son cercanas al rango de frecuencias de excitación producidas por las personas en movimiento. Está demostrado que los humanos pueden provocar cambios en las propiedades dinámicas de las losas, y las vibraciones pueden producir sensación de inseguridad en las personas. Esta investigación presenta los resultados de la caracterización experimental del efecto de Interacción Humano-Estructura (IHE) en tres sistemas de entresijos de común uso en el sector de la construcción colombiana. La metodología empleada consistió en la determinación de la respuesta mediante registros experimentales en las plataformas sometidas a diferentes actividades antrópicas. Al final del artículo se hace una recomendación para tener en cuenta los efectos de IHE en las losas en futuras normas de diseño.

*Palabras Clave:* Interacción Humano-Estructura, vibraciones, respuesta dinámica, losas.

## 1. Introducción

La tendencia hacia el uso de materiales más resistentes y livianos ha permitido el diseño y construcción de losas con largas luces, más esbeltas y ligeras. Esto hace que muchos sistemas de entresijos tengan baja capacidad de disipación de energía y frecuencias naturales muy cercanas al rango de las frecuencias de excitación producidas por las personas en movimiento. En consecuencia, estos sistemas de entresijos son susceptibles a vibraciones que frecuentemente causan incomodidad a los ocupantes y, en algunos casos, han generado daños estructurales y colapso. Muchos ejemplos han sido documentados sobre casos de vibraciones extremas producidas por personas al bailar, saltar o caminar en diferentes tipos de sistemas de piso [1-4]. En Colombia, el Reglamento de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10 [5] es muy limitado en cuanto a las recomendaciones para efectos dinámicos locales en estructuras (numeral B.4.7) e insuficiente para

garantizar el diseño adecuado de losas, puentes peatonales y graderías para cargas de servicio [1].

Los efectos de interacción en losas han sido ampliamente estudiados por diferentes autores. Allen et al. [6] y Ellis et al. [7,8], caracterizaron la carga dinámica producida por actividades rítmicas de una o más personas, formularon criterios de servicio y determinaron valores de coeficientes de Fourier en función del tiempo de contacto con la estructura y el periodo de salto [9]. Ebrahimpour et al. [10,11] y Yao et al. [12] cuantificaron la carga dinámica debida al salto de grupos de personas en función de las propiedades dinámicas de la estructura y la sincronización de las personas [13]. Recientemente, las investigaciones se han enfocado en determinar las frecuencias producidas por las personas y la forma como éstas afectan a la estructura, determinando factores de seguridad que varían según las normas de cada país [2]. Los resultados obtenidos demuestran que las actividades antrópicas generan cambios en las propiedades dinámicas de las estructuras

y además pueden llegar a provocar vibraciones que causan incomodidad y sensación de inseguridad en los usuarios. Esto se debe porque las personas no sólo perciben las oscilaciones, sino que simultáneamente interactúan con el entrepiso, actuando como un sistema dinámico adicional [3]. Pese a que el tema ha causado preocupación desde la década de los 80's, su impacto en los diferentes códigos internacionales de diseño y construcción no ha sido el esperado. Particularmente, la norma colombiana se limita a restringir la frecuencia natural vertical a un rango mayor a 5 Hz y emplea el enfoque tradicional en el que se involucra a los ocupantes humanos como una carga estática adicional.

Un ejemplo claro de las consecuencias que puede generar la excitación antrópica en una estructura ocurrió el 25 de abril de 2008 en el Estadio Guillermo Plazas Alcíd en Neiva, Colombia, donde parte de la tribuna occidental se desplomó en pleno concierto musical dejando a una persona muerta y tres heridas [4]. Lo anterior demuestra que aun para entrepisos y otros elementos estructurales que no forman parte del sistema de resistencia sísmica, el comportamiento dinámico ante efectos de Interacción Humano-Estructura (IHE) debe ser verificado y tenido en cuenta en el análisis y diseño estructural. La IHE representa un campo relevante que debe ser considerado explícitamente en el reglamento de diseño colombiano mediante la disposición de valores límites de aceleraciones y frecuencias naturales en función del desempeño según niveles de seguridad y comodidad percibida. En este artículo se presentan los resultados de la caracterización de los efectos de IHE obtenidos a partir de ensayos experimentales realizados en tres sistemas de entrepiso sometidos a diferentes actividades antrópicas.

## 2. Plataformas experimentales

Para la determinación experimental de los efectos de IHE en los parámetros dinámicos de las losas, se construyeron tres sistemas de entrepiso diferentes cuadrados de 4 m de lado. Estas losas fueron apoyadas sobre cuatro celdas de carga ubicadas en la parte superior de cuatro columnas de sección transversal cuadrada de 0.36 m de lado y 1 m de altura, tal como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Descripción general de las plataformas experimentales

El diseño de las losas se realizó de manera que su configuración geométrica permitiera la realización segura de

ensayos con grupos de hasta 45 personas. La resistencia del concreto utilizada en cada entrepiso fue de 21 MPa. El entrepiso Tipo 1 (T1) mostrado en la Figura 2, corresponde a una losa en concreto reforzado armada en una dirección y aligerada con casetón en esterilla de guadua. Esta losa tiene una altura total de 0.40 m, un peso aproximado de 65 kN, y está compuesta por una loseta de 0.08 m de espesor, reforzada con malla electrosoldada de 4 mm, fundida sobre una cuadrícula de dos vigas y cinco viguetas cada una con altura de 0.32 m. La estructura se diseñó para que la frecuencia natural fuera superior a los cuartos y quintos armónicos producidos por las cargas humanas cuando están en movimiento [14].



Figura 2. Plataforma experimental T1: losa aligerada con casetón en esterilla de guadua [14]



Figura 3. Plataforma experimental T2: losa en Placa Fácil

El entrepiso Tipo 2 (T2) corresponde a una losa aligerada con ladrillo de arcilla cocida, comúnmente denominado como sistema *Placa fácil*, tal como se muestra en la Figura 3. El peso de esta losa es de aproximadamente 60 kN y consiste en una loseta de 0.06 m de espesor en concreto reforzado con malla electrosoldada de 6 mm (0.15 m x 0.15 m). Se utilizaron tres perfiles de acero estructural abiertos formados en frío, cuyas dimensiones finales fueron 130 mm de base, 90 mm de altura y 1.5 mm de espesor. Las vigas perimetrales en concreto reforzado tienen sección rectangular con un ancho de 0.25 m y una altura de 0.30 m.

El entrepiso Tipo 3 (T3), mostrado en la Figura 4, corresponde a un sistema de losa en Steel Deck. Este entrepiso está compuesto por una lámina estructural galvanizada calibre 22, con altura de nervadura de 0.05 m y

doble armado de malla electrosoldada de 4 mm. La losa está apoyada sobre perfiles metálicos en lámina delgada PHR C 220x80 con espesor de 2.5 mm formando una sección tipo cajón, los cuales transmiten las cargas a las cuatro columnas. El espesor total de esta losa es de 0.10 m incluyendo la altura del concreto y tiene un peso aproximado de 60 kN. Para garantizar que el conjunto de losa-viguetas se pueda considerar como sección compuesta, se utilizaron pernos industriales de 3/4" separados cada 0.61 m como conectores de cortante.

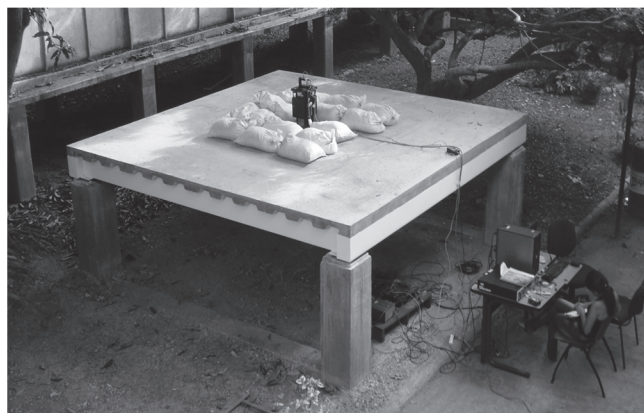


Figura 4. Plataforma experimental T3: losa en Steel Deck

### 3. Ensayos experimentales

Los ensayos de las losas se clasificaron siguiendo la propuesta de Alves et al. [15] quienes consideran dos tipos de carga: cargas sin pérdida de contacto y cargas con pérdida de contacto. Para el primer tipo de carga, se analizó la respuesta de los entresijos con personas de pie y sin movimiento. Las actividades de las personas que forman parte de la segunda clasificación fueron: saltos, bailes en pareja y aeróbicos. La respuesta de las losas fue registrada mediante acelerómetros Endevo modelo 752A con ancho de banda  $\pm 5\%$  de 1 a 8000 Hz ubicados en su parte inferior, en el centro, en las vigas perimetrales y en algunas viguetas. Además, las cuatro celdas de carga ubicadas en la parte superior de las columnas fueron usadas para registrar las fuerzas.

#### 3.1. Cargas sin pérdida de contacto

Las cargas sin pérdida de contacto corresponden a las posturas estacionarias de las personas, bien sea sentadas o de pie, sobre una estructura. Para observar la variación de las propiedades dinámicas (razones de amortiguamiento y frecuencias naturales) de las losas ante este tipo de cargas, se realizaron ensayos de vibración forzada de las losas vacías, con sacos de arena y con grupos de personas hasta un máximo de 46 individuos. Las pruebas tuvieron una duración entre 300 y 600 s. Un actuador dinámico con una masa activa de 30.6 kg, ubicado en el centro de la losa (Ver Figuras 4, 5 y 6), fue empleado para generar fuerzas verticales sobre las losas. Se realizaron barridos frecuenciales lineales de excitación, entre 10 y 30 Hz, para garantizar que cada plataforma entrara en resonancia en su modo fundamental.

#### 3.1.1. Ensayos sin carga adicional

Las propiedades dinámicas de los tres tipos de losas fueron determinados mediante ensayos de vibración forzada en cada una de ellas, sin carga adicional (Ver Figura 5).



Figura 5. Ensayo de vibración forzada en losa vacía

#### 3.1.2. Ensayos con sacos de arena y personas

En los tres tipos de losas se realizaron ensayos de vibración forzada en los que se adicionó peso muerto, tanto por medio de sacos como con personas. Se realizó un aumento paulatino de esta carga con el fin de comparar la variación de la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento de cada una de las losas. Para el caso de los sacos de arena, se colocaron sobre las losas tal como se muestra en la Figura 4. El peso total de los sacos de arena se aumentó hasta llegar a valores de 6331 N, 4792 N y 6272 N para las plataformas experimentales Tipo 1, 2 y 3, respectivamente.

De manera similar, se aumentó el número de personas en postura erguida estacionaria sobre los tres tipos de losas hasta alcanzar una sobrecarga de 6600 N en la losa T1, 7070 N en la tipo T2 y 6760 N en la T3 (Ver Figura 6).



Figura 6. Ubicación del actuador dinámico y personas durante ensayos experimentales

### 3.2. Cargas con pérdida de contacto

Las cargas con pérdida de contacto son producidas por las personas cuando realizan actividades en las cuales temporalmente pierden contacto con la estructura. Algunos ejemplos de este tipo de carga son aquellas producidas por saltar, caminar, trotar, correr, bailar y hacer aeróbicos.

#### 3.2.1. Ensayos con personas saltando

Se tomaron registros de vibraciones para obtener funciones de carga cuando las personas de manera individual y grupal realizaron saltos coordinados. Cada ensayo tuvo una duración de 40 segundos y consistió en la participación de 1 a 45 voluntarios, a los cuales se les pidió saltar siguiendo un metrónomo sonoro. Las pruebas se realizaron para cinco frecuencias de salto: 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 y 2.50 Hz, para abarcar el rango típico de frecuencias correspondientes a los saltos producidos por multitudes.

#### 3.2.2. Ensayos con personas realizando aeróbicos y bailes

Las actividades rítmicas realizadas por personas en gimnasios, discotecas y salones de baile fueron reproducidas sobre las losas mediante ensayos de aeróbicos y bailes en pareja. La duración de las pruebas experimentales fue de 900 s, en los cuales los participantes bailaron según el género musical. Los géneros considerados fueron: salsa, merengue, bachata y reggaetón. Las rutinas de baile sincronizado (aeróbicos) fueron ejecutadas para diferentes números de individuos, alcanzando un máximo de 9 personas.

La Figura 7 muestra una de las rutinas de aeróbicos realizada para un total de 6 personas. Los ensayos de baile libre en parejas, contaron con la participación de un máximo de 5 parejas.



Figura 7. Ensayo con personas realizando aeróbicos

## 4. Resultados

Las propiedades dinámicas de las losas fueron obtenidas a partir de los registros de vibraciones utilizando algoritmos de identificación de sistemas dinámicos en el dominio de

frecuencias. El método empleado consiste en determinar la función de respuesta en frecuencia (FRF) y en realizar un ajuste de curva por medio de mínimos cuadrados para obtener una ecuación en el dominio de frecuencia. Esta ecuación se denomina modelo analítico y relaciona, a través de un cociente en el dominio complejo, la respuesta  $Y(s)$  del sistema con la señal de entrada o excitación  $U(s)$  [16]. En la Tabla 1 se especifican los valores experimentales de las frecuencias naturales y las razones de amortiguamiento del primer modo para cada uno de los tres sistemas de entrepiso.

Tabla 1. Propiedades dinámicas de las losas vacías

Sistema Estructural	$f_n$ [Hz]	$\xi$ [%]
Losa con casetón de esterilla, (T1)	19.64	2.07
Losa Placa Fácil, (T2)	15.69	1.91
Losa Steel Deck, (T3)	14.51	1.70

En la Figura 8 se presenta la variación de la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento de cada uno de los sistemas de entrepiso en función de la masa adicional proporcionada por las personas y los sacos de arena. En esta figura se puede observar como la variación en la masa total de las personas y sacos de arena produce tendencias opuestas en el cambio de la frecuencia natural. Villamizar *et al.* en [17] demostraron de manera analítica y experimental que esta variación ocurre en sistemas donde la rigidez de la estructura es mayor a la de las personas y el segundo modo es predominante. Esta diferencia en las propiedades dinámicas de ambos sistemas (losa-personas) ocasiona la separación de frecuencias a medida en que se incrementa la razón de masas entre ellos. Como resultado, la frecuencia predominante asociada al segundo modo del sistema losa-personas aumenta y la frecuencia fundamental disminuye [18].

Los resultados de los ensayos con pérdida de contacto en los cuales la excitación es producida por los saltos de personas fueron clasificados en función del número de personas que realizaron los saltos y en términos de la representación de la carga. Esta representación puede ser estática, a través de la determinación del Factor de Impacto ( $K_p$ ) el cual es la relación de la carga producida por la persona al momento de saltar y la producida sin estar en movimiento, o dinámica, por medio de la obtención de los coeficientes de Fourier [14].

Tabla 2. Factor de impacto máximo para salto individual

$K_p$ máx	Peso [N]	Frecuencia de Excitación [Hz]				
		1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
Losa 1	568.4	3.96	2.83	3.63	3.96	4.10
Losa 2	588.0	3.16	3.45	3.10	3.21	3.63
Losa 3	509.6	3.55	4.79	4.70	5.10	5.11

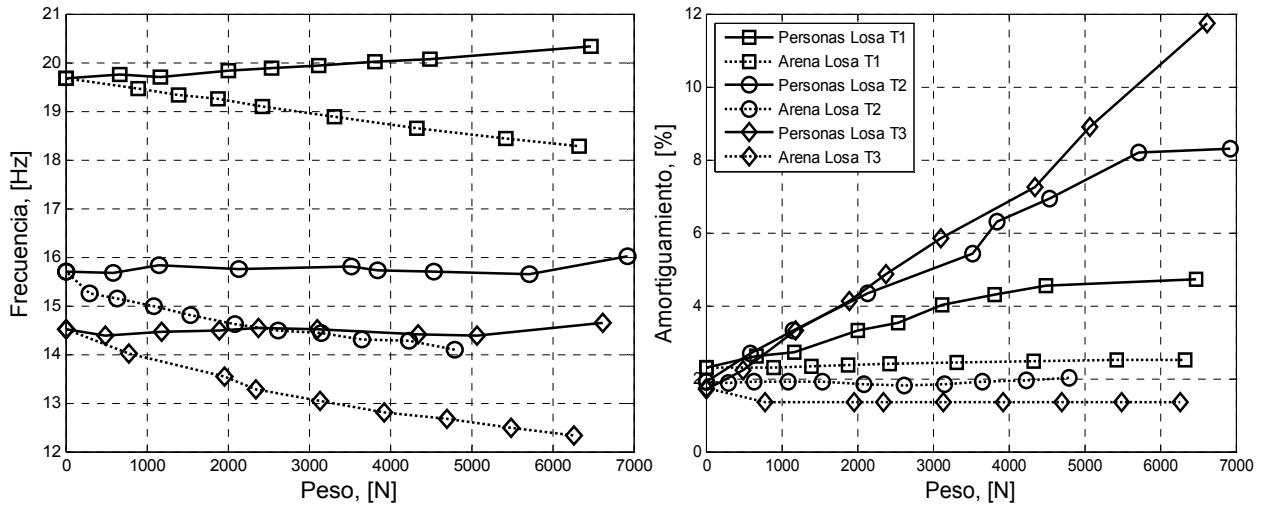


Figura 8. Variación de las propiedades dinámicas de las losas

Las Tablas 2 y 3 contienen los valores máximos y promedios de los factores de impacto ( $K_p$ ), obtenidos para saltos individuales en los tres sistemas de entrespiso. En la caracterización dinámica de la fuerza generada por saltos de personas, la determinación de los coeficientes de Fourier constituye un elemento importante. Los valores obtenidos para los coeficientes de Fourier están influenciados por factores tales como la edad, sexo, la habilidad y forma como cada persona realiza el salto [19]. También, el tipo de calzado empleado durante la prueba, aspectos de personalidad, la sincronización y hasta la motivación del individuo en el momento de los ensayos.

Tabla 3. Factor de impacto promedio para salto individual

$K_p$ prom	Peso [N]	Frecuencia de Excitación [Hz]				
		1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
Losa 1	568.4	2.73	2.21	2.92	3.35	3.43
Losa 2	588.0	1.65	1.49	1.31	1.29	1.32
Losa 3	509.6	2.81	3.21	3.67	4.68	4.56

La Tabla 4 muestra los valores de los coeficientes de Fourier para la carga producida por personas al saltar recomendados por el Comité Euro-International du Béton (CEB) en 1991 [19] y los valores obtenidos en esta investigación para los tres sistemas de entrespiso.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos en otras investigaciones tales como las desarrolladas por la Universidad Federal de Río de Janeiro [19], las recomendaciones propuestas por Bachmann *et al.* [20],

las deducciones de Rainer *et al.* [21], la revisión de la literatura realizada por investigadores de la Universidad de Sheffield [22] y los trabajos de caracterización de efectos IHE en la Universidad del Valle [14,23].

Tabla 4. Coeficientes de Fourier para sistemas de entrespiso

Saltos sobre losas	Coeficiente de Fourier		
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>
Valores del CEB [10]	1.80	1.30	0.70
Losa aligerada con casetón [6]	1.60	0.90	0.40
Losa Placa Fácil	1.30	0.62	0.45
Losa Steel Deck	1.50	0.85	0.54

La caracterización de cargas producidas por el salto de grupos de personas incluye los valores máximo y promedio de los Factores de Impacto  $K_p$  en función del peso de los participantes para cada una de las frecuencias de salto. La Figura 9 muestra los valores máximos de Factores de Impacto obtenidos para saltos con grupos de personas en los tres sistemas de entrespiso y las diferentes frecuencias de vibración que se pudieron identificar. Cabe resaltar que estas frecuencias están relacionadas al segundo modo.

La Figura 10 representa los Coeficientes de Fourier obtenidos para los tres primeros armónicos de cada sistema de entrespiso en función del peso de las personas para una frecuencia de excitación de 2 Hz.

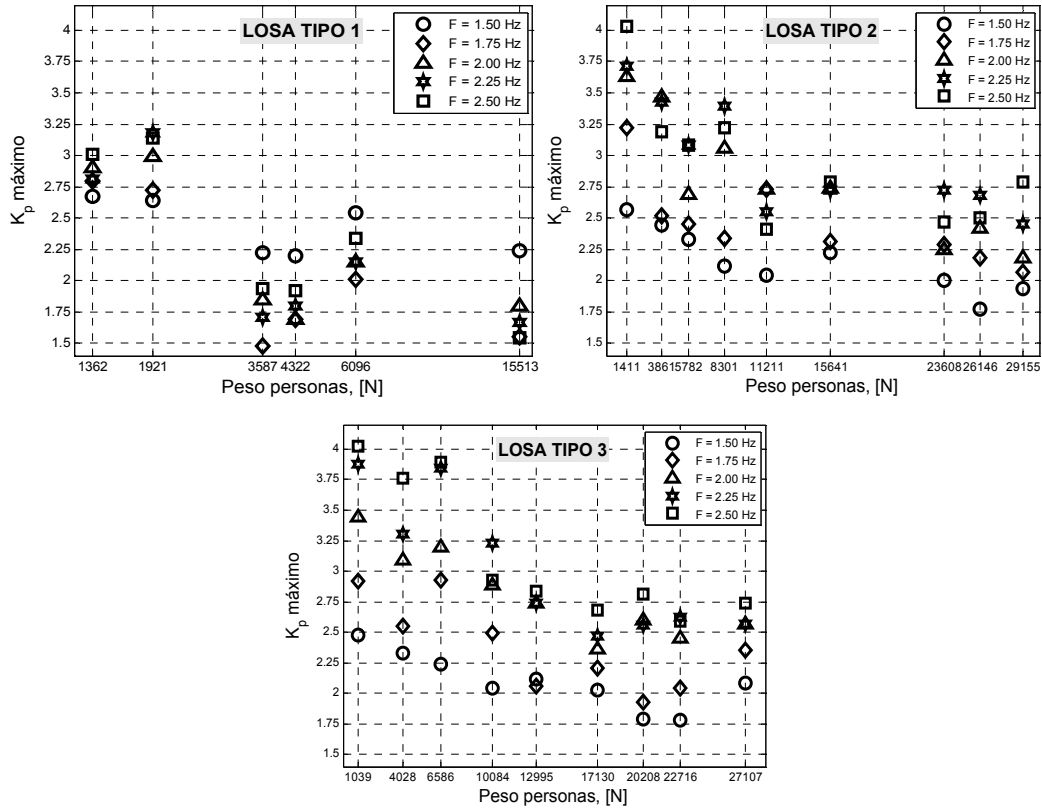


Figura 9. Factores de impacto máximos para saltos de grupos de personas

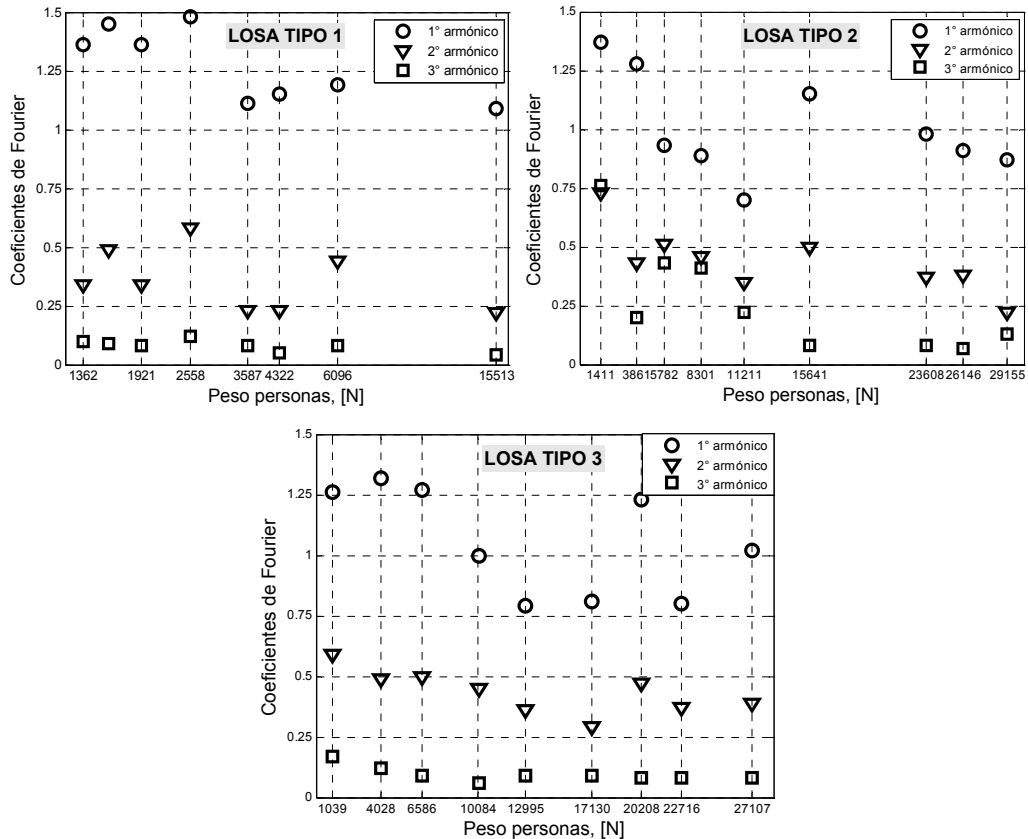


Figura 10. Coeficientes de Fourier en función del peso de las personas

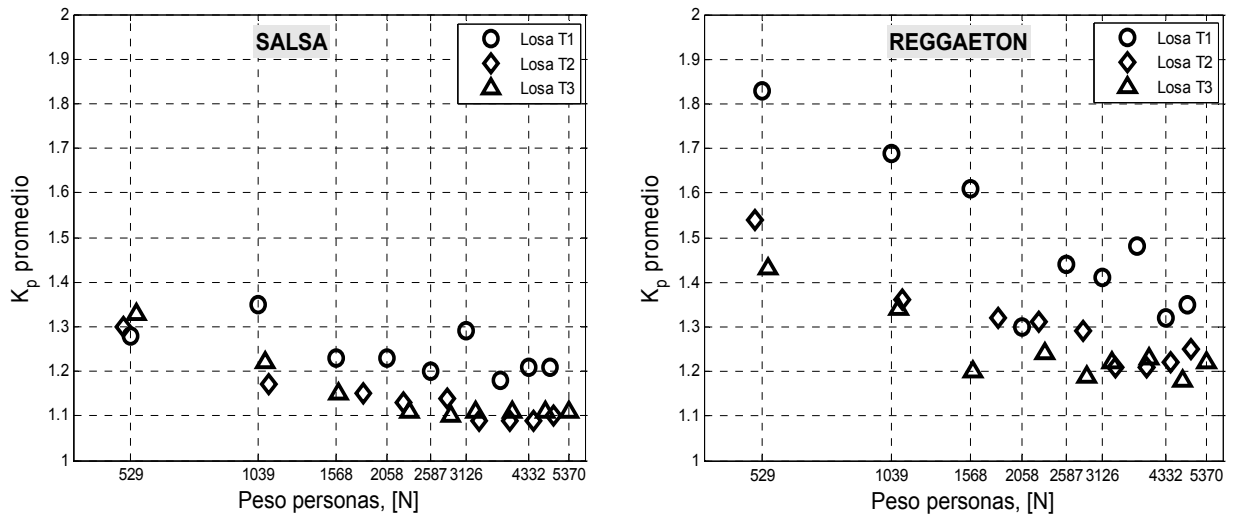


Figura 11. Factor de impacto máximo para baile sincronizado

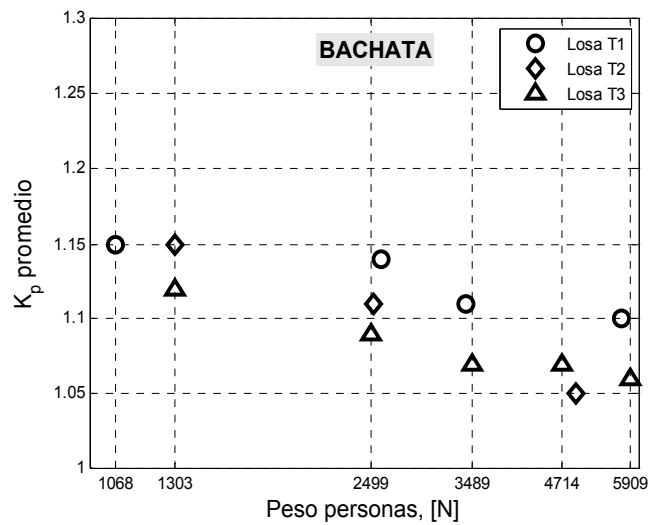
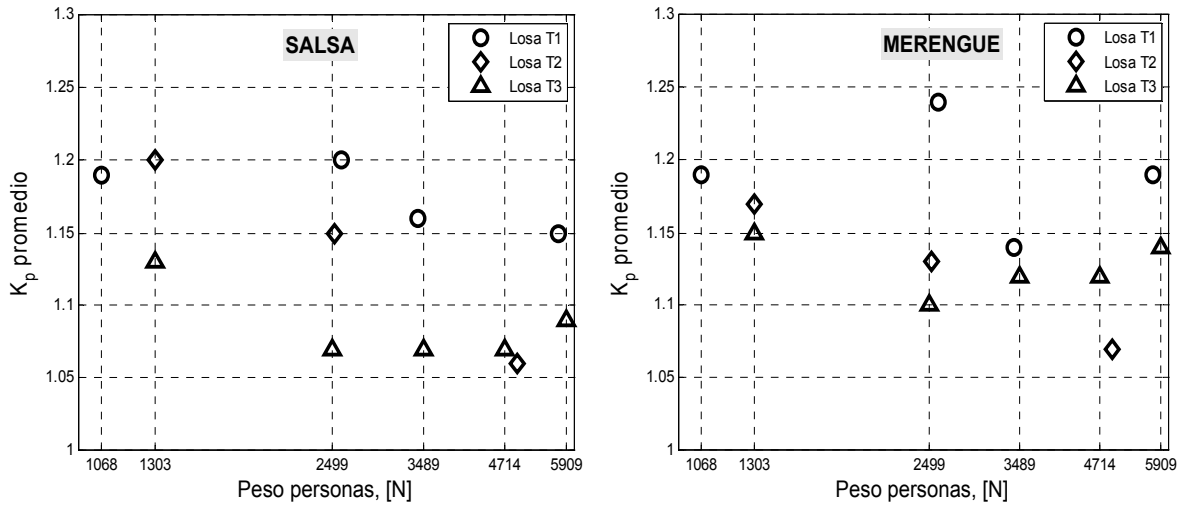


Figura 12. Factor de impacto para baile en pareja

La Figura 11 presenta los Factores de Impacto obtenidos experimentalmente para baile sincronizado (aeróbicos) correspondiente a los géneros salsa y reggaeton, sobre los tipos de losas construidos. Se puede observar que a medida que se incrementa el número de participantes en cada ensayo el factor de impacto disminuye hasta alcanzar un valor constante. La Figura 12 muestra los Factores de Impacto para los géneros musicales de salsa, merengue y bachata, obtenidos experimentalmente en cada sistema de entepiso para bailes en pareja.

#### 4. Conclusiones

La caracterización experimental de efectos producidos por las personas sobre las estructuras es compleja porque depende de factores físicos y psicológicos propios de cada persona (estatura, peso, edad, sexo, personalidad, sincronización, entre otros). Pese a la influencia de estos factores en las propiedades dinámicas de las losas, se logró establecer valores de frecuencias naturales y razones de amortiguamiento viscoso en el sistema losa-personas para cargas sin pérdida de contacto. Para las cargas con pérdida de contacto se obtuvo experimentalmente los valores de  $K_p$  y de los Coeficientes de Fourier.

Al analizar la respuesta en los tres tipos de plataformas de pruebas ante cargas sin pérdida de contacto, los efectos de IHE se hacen evidentes al comparar la respuesta dinámica del sistema losa-masa muerta con la respuesta del sistema losa-personas. Un aumento progresivo de la carga muerta mediante sacos de arena generó una disminución en la frecuencia natural, como es de esperarse. Por otro lado, un aumento paulatino en el número de personas en postura erguida estacionaria sobre la losa, generó la interacción con el sistema de entepiso. Esto se evidenció en que el segundo modo del sistema acoplado se vuelve el predominante y el primer modo no fue identificable en los registros. Por lo tanto, contrario a la intuición, la frecuencia del modo predominante junto con su razón de amortiguamiento aumenta.

Para el caso cargas con pérdida de contacto, se evaluó la respuesta dinámica en los tres sistemas de entepiso para actividades tales como, saltar y bailar. Las frecuencias asociadas a los segundos armónicos de estas actividades pueden llegar a ser igual o superior al criterio establecido por la norma NSR-10 en el numeral B.4.7. Por lo tanto, se recomienda que este límite en frecuencia sea reevaluado y que, además, en la normas de diseño se incluya un criterio de aceleración en función del tipo de uso que va a tener el sistema de entepiso. Es importante recalcar que las pruebas experimentales se realizaron en losas sin muros, ya que los muros y otros elementos no estructurales tienden a aumentar el amortiguamiento y disminuir la respuesta dinámica en una estructura convencional.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle y 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.

#### Referencias

- [1] Sánchez, J. A., Gómez, D. y Thomson, P., Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de Santiago de Cali, Revista Dyna, No. 177, pp. 86-94, 2013.
- [2] Ortiz, A. R., Gómez, D. y Thomson, P., Caracterización del efecto de interacción humano-estructura en el estadio olímpico de Cali, Colombia, Revista Ingeniería e Investigación, No. 29, pp. 13-23, 2009.
- [3] Ortiz, A. R., Gómez, D., 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.
- [4] Hernández, D., Gómez, D. y Thomson, P., 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, pp. 83-92, 2011.
- [5] AIS., Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, 2011.
- [6] Allen, D. E., Rainer, J.H. and Pernica, G., Vibration criteria for assembly occupancies, Canadian Journal of Civil Engineering, No. 12(3), pp. 617-623, 1985.
- [7] Ellis, B. R. and Ji, T., Floor vibration induced by danced-type loads: theory, The Structural Engineer, No. 72(3), pp. 37-44, 1994.
- [8] Ellis, B. R. and Ji, T., Floor vibration induced by danced-type loads: verification, The Structural Engineer, No. 72(3), pp. 45-50, 1994.
- [9] Li, W. W., Wong, C.T., Leung, M. K. and Fung, S. C., Floor vibration due to human rhythmic activities: Tin Shui Wai Public Library Cum Indoor Recreation Centre, Procedia Engineering, No. 14, pp. 3285-3292, 2011.
- [10] Ebrahimpour, A., Hamam, A., Sack, R.L. and Patten, W.N., Measuring and modeling dynamic loads imposed by moving crowds, Journal of Structural Engineering, No. 122(12), pp. 1468-1474, 1996.
- [11] Ebrahimpour, A. and Sack, R.L., A review of vibration serviceability criteria for floor structures, Computers and Structures, No. 83(28), pp. 2488-2494, 2005.
- [12] Yao, S., Wright, J., Pavic, A. and Reynolds, P., Experimental study of human-induced dynamic forces due to jumping on a perceptibly moving structure, Journal of Sound and Vibration, No. 296(1), pp. 150-165, 2006.
- [13] Sachse, R., Pavic, A. and Reynolds, P., Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: A literature review, The Shock and Vibration Digest, No. 35(1), pp. 3-18, 2003.
- [14] Ortiz, A., Caracterización de efectos de interacción humano-estructura, [Proyecto de Grado Maestría en Ingeniería], Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- [15] Alves, N. K. C., Roitman, N. and Magluta, C., Dynamic response under human movements, Materials and Structures, No. 32, pp. 31-37, 1999.
- [16] Gómez, D., Comparison of the identification of a structural system with active control using frequency response and neural networks, Revista Dyna, No. 170, pp. 79-89, 2011.
- [17] Villamizar, S., Riascos, C. y Thomson, P., Validación teórica de un modelo experimental de Interacción Humano-Estructura, VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Bucaramanga, 2013.
- [18] Brownjohn, J.M.W., Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction, Shock and Vibration, No. 8, pp. 315-323, 2001.



[19]González, R., Caracterización de cargas dinámicas generadas por actividades rítmicas, [Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Civil], Universidad Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, Brasil, 2003.

[20]Bachmann, H., Pretlove, A. and Rainer, H., Vibrations problems in structures: Practical guidelines, dynamic forces from rhythmical human body motions (Appendix G), Basel: Birkhäuser, 1995.

[21]Rainer, J., Pernica, G. and Allen, D., Dynamic loading and response of footbridges, Canadian Journal of Civil Engineering, No. 15, pp. 66-71, 1988.

[22]Zivanoc, S., Pavic, A. and Reynolds, P., Human-structure dynamic interaction in footbridges, Proceedings of the ICE-Bridge engineering, No. 158, pp. 165-177, 2005.

[23]Villamizar, S., Efecto de interacción humano-estructura en losas, [Proyecto de grado Maestría en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Civil], Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2013.