

DYNAMIC ASSESSMENT OF COMPOSITE STEEL-DECK FLOORS UNDER HUMAN- INDUCED ACTIVITIES

Gelacio Juárez-Luna ⁽¹⁾, Félix Josué Gallegos Correa ⁽²⁾, Omar Caballero
Garatachea ⁽³⁾, Luis Ángel Peralta González ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Profesor-Investigador, Departamento de Materiales, Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, CP 02200, México D.F. gjl@azc.uam.mx

⁽²⁾ Estudiante Maestría, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo No. 180, Col. Azcapotzalco, 02200, México, D.F. Teléfono: (55) 5318-9085; Fax: (55)5318-9085; felix_300393@hotmail.com

⁽³⁾ Estudiante de posdoctorado. Instituto de Ingeniería UNAM, Circuito Escolar S/N, Cd. Universitaria, Ciudad de México, 04510, caballerog12@gmail.com

⁽⁴⁾ Estudiante Licenciatura, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo No. 180, Col. Azcapotzalco, 02200, México, D.F. Teléfono: (55) 5318-9085; Fax: (55)5318-9085; perag1407@gmail.com

Received: January 2023. Accepted: February 2023

Published: March, 2023

ABSTRACT

Ambient and force vibration tests carried out on a steel-deck interior bay are presented. This bay is supported on joist and girders. The modelling of the steel-deck interior bay was detailed, the concrete was meshed with 3D solid finite elements, the deck with shell finite elements, beams and columns with frame finite elements and the welded steel mesh with bar finite elements. The numerical models are validated with the natural frequency and accelerations registered for human induced activities in experimental tests.

A parametric study of the variables which affects the natural frequency and acceleration in steel-deck systems under human induced activities is carried out. The studied variables are: steel-deck gauge, concrete thickness above the top of the steel deck, joist spacing, bay size, increment on the moment of inertia of joist, girders and columns, increment of the elastic modulus of the concrete and the use of lightweight concrete in the slab. As a result of the parametric study, the variables with greater influence in the natural frequency are the thickness of the concrete slab, joist and girder spacing, but the steel-deck gauge has no influence on it. To reduce the acceleration induced by human activities, it is recommended the increment on the moment of inertia of joist, the increment of the thickness of the concrete slab but with lightweight concrete and the increment of the elastic modulus of the concrete. It is demonstrated that other modes, different to the fundamental one, have greater influence in the response under human-induced activities.

Keywords: Steel-deck floor; human-activities; vibration; natural frequency.

EVALUACIÓN DINÁMICA DE LOSAS DE CONCRETO COLADO SOBRE LÁMINA ACANALADA Y CORRUGADA DE ACERO ANTE ACTIVIDADES HUMANAS

RESUMEN

Se presentan los resultados de pruebas de vibración ambiental y forzada realizadas en un tablero interior de losa de concreto colado sobre lámina acanalada de acero acanalada y corrugada (LCSLA). El tablero se apoya sobre vigas secundarias, que a su vez se apoyan sobre vigas principales. El modelado de las LCSLA es detallado, el concreto se malló con elementos finitos tipo sólidos 3D, la lámina con elementos finitos tipo cascarón, las vigas y columnas con elementos finitos tipo viga-columna y la malla electrosoldada con elementos tipo barra. Los modelos numéricos se validan con la frecuencia natural y aceleraciones por actividades humanas obtenidas de las pruebas experimentales.

Se realiza un estudio paramétrico de las variables que influyen en la frecuencia natural y aceleración de sistemas de LCSLA sujetos a actividades humanas. Las variables que se estudian son: calibre de lámina, espesor de la capa de concreto sobre la parte superior de la lámina de acero, separación de vigas secundarias, tamaño de tableros, incremento de inercia de vigas principales, secundarias y columnas, incremento del módulo elástico del concreto, así como uso de concretos ligeros en la losa de concreto. Del estudio paramétrico se tiene que las variables que más influyen en la frecuencia natural de la LCSLA es el espesor de la losa de concreto, la separación de las vigas secundarias y principales, pero el espesor de la lámina de acero no tiene influencia. Para reducir la aceleración producida por actividades humanas se sugiere el incremento de vigas secundarias, incremento de espesores de losa de concreto, pero con concreto ligero, e incremento del módulo elástico del concreto. Se demuestra que existen otros modos, distintos al modo fundamental, que tiene mayor participación en la respuesta bajo actividades humanas.

Palabras clave: Losas de concreto colado sobre lámina acanalada; actividades humanas; vibración; frecuencia natural.

1 INTRODUCCIÓN

Las vibraciones producidas por el caminar de personas en sistemas de piso es un fenómeno laborioso de evaluar, pues, aunque existen recomendaciones prácticas, requiere de modelos laboriosos de elementos finitos y/o de pruebas experimentales o de ambos. Aunque existen recomendaciones para controlar la frecuencia natural, éstas solo son válidas en sistemas de piso donde la rigidez se distribuye uniformemente como en losas macizas y reticulares. Sin embargo, en sistemas de piso estructurado con LCSLA, podrían existir aceleraciones mayores en zonas fuera del centro geométrico del tablero. Por lo anterior es necesario evaluar experimental y numéricamente aceleraciones no sólo en el centro geométrico de los tableros, correspondiente a la amplitud máxima del modo fundamental, sino también en los tableros secundarios, en los que pudiera influir otro modo de vibrar.

Otro aspecto que se tiene al analizar sistemas de LCSLA en condiciones de servicio, es que se utilizan parámetros como el espesor de la lámina, separación de vigas secundarias y principales y el espesor del concreto para limitar la deflexión estática. Sin embargo, no se relaciona el efecto de vibración con alguno de estos parámetros. Por lo tanto, es necesario realizar estudios para evaluar el nivel de perceptibilidad de vibración, con el cambio de alguno de estos parámetros.

Las aceleraciones, velocidades o desplazamientos son parámetros que se utilizan para evaluar las vibraciones producida por alguna actividad física. Aunque en la literatura existen funciones matemáticas representativas para este tipo de actividades, no todas están representadas adecuadamente, pues algunas sobreestiman y otras subestiman las aceleraciones que se obtienen. Por lo tanto, es necesario evaluar las funciones de carga que se utilizan en los manuales de diseño de la losa de concreto sobre lámina de acero.

Mello *et al.* (2008) realizaron estudios numéricos en sistema de piso de losa de concreto sobre lámina de acero, en el cual consideraron cuatro patrones de carga para comparar las vibraciones producidas por el caminar de personas. Los patrones de carga se consideraron conforme a lo establecido al AISC-97 (1997) bajo tres consideraciones diferentes y lo propuesto por Varela (2004). Para lo cual, la fuerza P se tomó igual a 700 N, una frecuencia de paso igual a 1.856 Hz y la fracción de amortiguamiento igual al 3%. Las cargas se colocaron en zonas de amplitud máxima, conforme a los modos de vibrar. Existen aceleraciones que exceden los umbrales permisibles recomendados en el AISC (1997) y el ISO 2631-2 (1989). Mashaly *et al.* (2013) analizaron las vibraciones dinámicas producidas por el caminar de personas en puentes peatonales estructurados de perfiles de acero y una losa de concreto. El análisis consistió en modelar una carga representativa por el caminar de una persona, para este estudio se utilizó lo recomendado por Murray (1997), posteriormente se colocó una carga en el centro del tablero del puente. Los resultados mostraron que las aceleraciones obtenidas exceden los umbrales en todos los casos de estudio. Hicks (2004) presenta una revisión histórica de los criterios de aceptabilidad para vibraciones de sistemas de piso, así como de las metodologías de diseño de LCSLA y de pruebas de vibración realizadas en sitio. Varela y Battista (2011) demuestran experimentalmente el uso eficiente de amortiguadores de masa sintonizada para controlar las vibraciones en LCSLA.

Chen *et al.* (2018) estudiaron la influencia de la frecuencia natural, del peso y el amortiguamiento en la vibración inducida por actividades humanas en un tablero de LCSLA. Este estudio se realizó en un modelo de elementos finitos detallado en el programa ANSYS, al que se le asignó el modelo de carga recomendado en el AISC (1997).

Actualmente existen códigos y especificaciones que regulan el nivel de vibraciones ante actividades humanas, como por ejemplo la guía de diseño número 11 del American Institute of Steel Construction (AISC-97, 1997), en el cual se regula el nivel de vibración para diferentes sistemas de piso. Por otra parte, en México se han incluido recomendaciones de diseño en las NTCEA-20 (2020), donde sólo se proporcionan los umbrales de aceptación de la aceleración y de la frecuencia. Además, se proporciona una expresión para el cálculo de la frecuencia que sólo incluye la contribución de las vigas secundarias, pero no incluye los apoyos principales que pueden ser vigas principales o apoyos rígidos, los cuales contribuyen en la magnitud de la frecuencia global del sistema. Pues como se

observa en manuales y reglamentos las losas (principalmente la losa de concreto sobre lámina de acero), se diseñan para resistir las cargas verticales de diseño y de servicio, dejando a un lado la parte dinámica de ésta. Por lo anterior es importante estudiar las vibraciones para el sistema de piso losa de concreto sobre lámina de acero sujeta a actividades humanas.

2 PRUEBA EXPERIMENTAL

2.1 Descripción

Las pruebas experimentales se realizaron en un edificio que es propiedad de la empresa *Coppel S.A. de C.V.*, el cual está construido en el predio localizado en Av. Presidente Benito Juárez #21, entre Av. Felipe Berriozabal y Av. Francisco I. Madero, Col. Centro, Tlalnepantla, Estado de México, México. Este edificio consta de tres niveles de estacionamiento subterráneo y cinco niveles superiores para uso de oficina. Los niveles de estacionamiento están estructurados a base de marcos rígidos, formados por trabes y columnas de concreto reforzado; su sistema de piso es de losa reticular. Los niveles superiores están estructuradas a base de marcos rígidos, formado por columnas y vigas de acero, sobre las que se apoya el sistema de piso de losa de concreto sobre lámina de acero, como se muestra en la Figura 1.

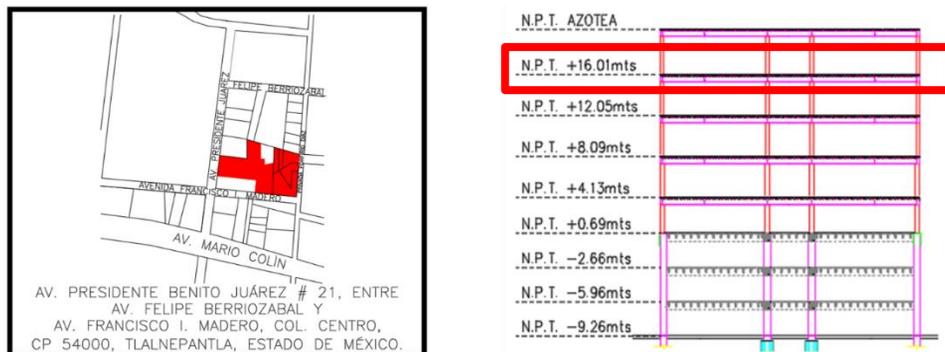


Figura 1. Ubicación y configuración del edificio.

El tablero de losa de concreto sobre lámina de acero que se escogió para el estudio se rotuló rotuladas como T_1 , el cual se muestran en la Figura 2a. El tablero T_1 se localiza entre los ejes 15-23 y LL-S, cuyas dimensiones son 10.06 m de largo y 4.27 m de ancho, (Figura 2b). El tablero está apoyado sobre vigas secundarias separadas aproximadamente a cada 1.60 m, las cuales se apoyan sobre vigas principales en los bordes de los tableros. Las vigas principales del tablero T_1 se apoyan en sus cuatro esquinas sobre columnas cuadradas huecas. El espesor de la losa de concreto es de 7.60 cm, la cual está soportada por una lámina DECK 25, Calibre 24 y una malla electrosoldada de 15.24 X 15.24 cm embebida en el concreto. Las vigas secundarias son IPR 254 X 17.9, las vigas principales son IPR 533 X 101 y las columnas son rectangulares de acero OR-406 X 19. Para asegurar la adherencia y evitar que el concreto deslice sobre la lámina, se colocaron sobre las vigas secundarias y principales conectores de cortante de 19 mm de diámetro por 102 mm de altura espaciadas a cada 30 cm. Debido a que en los niveles +4.13 m, +8.09 m y +12.05 m el personal realizaba trabajos de acabados e instalaciones, se optó por realizar las pruebas en tableros de losa de concreto sobre lámina de acero

del nivel +16.01 m, el cual se observa en las Figuras 1 y 3. Es de interés mencionar que debido a las condiciones mostradas en la Figura 3, en la revisión analítica y numérica no se consideró alguna carga viva de diseño, tan solo se tomó en cuenta el peso propio de la losa.

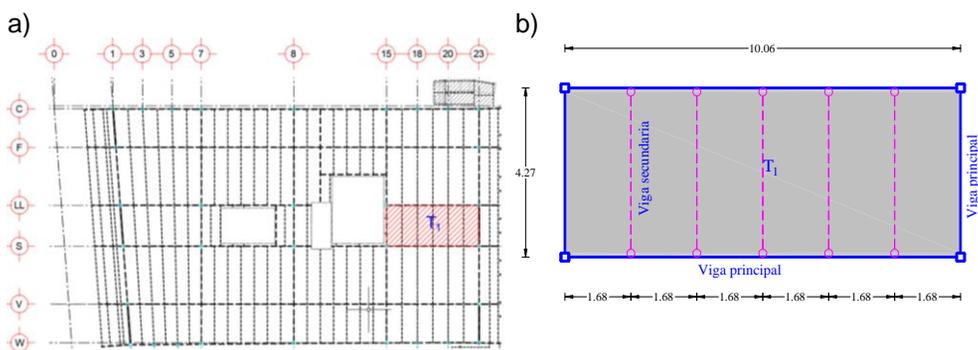


Figura 2. Tablero T_1 : a) ubicación y b) geometría.



Figura 3. Colocación de equipo sobre tablero T_1 .

2.2 Modelado

El modelado de los tableros se realizó para determinar las frecuencias en las zonas donde ocurren las amplitudes modales máximas y para calibrar con los resultados experimentales. Los sensores se colocaron en las zonas de amplitudes modales máximas, pues es en estas zonas donde se esperan que ocurran las aceleraciones mayores. Para modelar el tablero T_1 , primeramente, se realizó el trazo de la geometría de los tableros en el programa AutoCAD 2017. Posteriormente se realizó el mallado de los elementos estructurales en el programa GID, como se muestra en la Figura 4; con este programa se generó un archivo de salida con las coordenadas de los nodos y con las conectividades de los elementos. Finalmente se utilizó el programa SAP-2000 (CSI) para realizar los análisis modales que proporcionaron las frecuencias naturales de las losas. Es de interés mencionar que el mallado de las láminas se realizó con elementos tipo cascarón (Shell), el de vigas y columnas con elementos tipo viga-columna (frame), el del concreto con elementos sólidos 3D y el de la malla-electrosoldada con elementos armadura, los cuales se embebieron en el concreto, considerando adherencia perfecta.

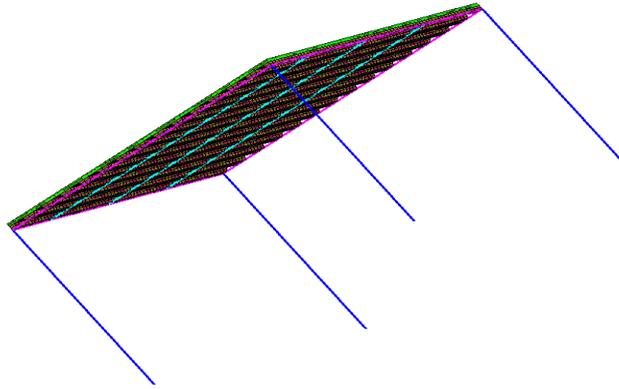


Figura 4. Mallado del tablero T_1 en GID.

Las frecuencias naturales calculadas en el programa SAP2000, se muestran en la Tabla 2, donde se muestran las tres primeras configuraciones modales del tablero T_1 . La ubicación de los sensores se realizó con base en estos tres modos fundamentales, correspondiente a la zona de amplitud modal máxima, como se muestra en la Tabla 1. Por lo que el sensor S1 se colocó en el centro del claro, correspondiente a la amplitud modal máxima del modo 1, el sensor S2 se colocó al centro del borde largo (sobre la viga principal), correspondiente a la amplitud modal máxima del modo 2, el sensor S3 se colocó a un cuarto del lado largo, correspondiente a la amplitud modal máxima del modo 3.

Tabla 1. Formas modales

Modo 1 11.973 Hz	Modo 2 18.592 Hz	Modo 3 27.761 Hz

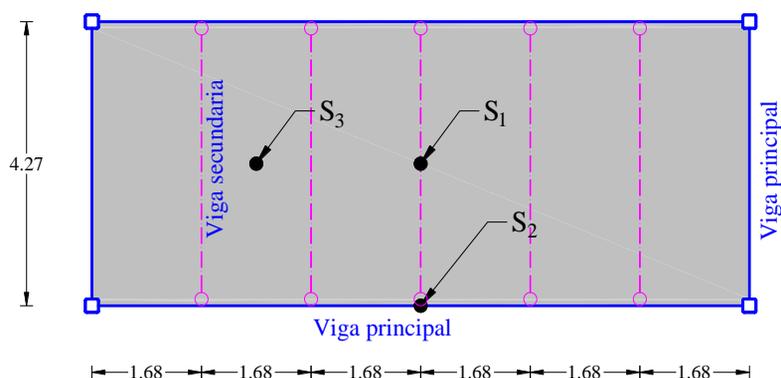


Figura 5. Arreglo de sensores con base en los tres modos de vibrar.

2.3 Sistema de adquisición de datos

Para el registro de datos de cada prueba en la losa se utilizó: un equipo de registro para procesamiento de señales y sensores de aceleración. El primero consta de un dispositivo digital modelo SIG-LAB 20-42, el cual registra las señales para el posterior procesamiento de datos en un programa de cómputo de MATLAB V11. Los sensores se caracterizan por ser medidores piezoeléctricos de aceleración uniaxial, como se muestra en la Figura 6a, el cual transforma la lectura de aceleración en señales eléctricas. Dado que en algunas ocasiones las señales de salida de los sensores son pequeñas, es necesario utilizar un sistema de amplificación de señal para que el sistema de adquisición de datos procese de manera adecuada la señal registrada. Para ello se utiliza el acondicionador de señal como el que se muestra en la Figura 6b (PCB, 2018), donde la señal de salida de los sensores se cambia a un nivel de voltaje requerido. Las características de los sensores utilizados se resumen en la Tabla 2, donde se proporcionan sus valores de sensibilidad y exactitud.

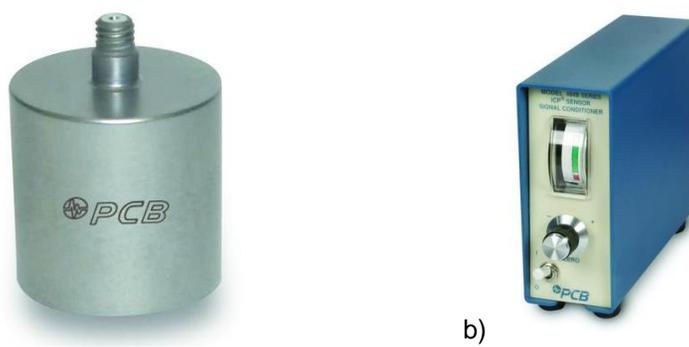


Figura 6. Dispositivos de medición: a) sensor de aceleración modelo 393B04 y b) acondicionador de señal modelo 484B06 (adaptado de PCB, 2018).

Tabla 2. Características de sensores de aceleración, modelo 393B04 (PCB, 2018)

DESEMPEÑO	Magnitud (SI)
Sensibilidad ($\pm 10\%$)	102 mV/(m/s ²)
Rango de Mediciones	± 49 m/s ² pk
Rango de frecuencias ($\pm 5\%$)	0.06 para 450 Hz
Rango de frecuencias ($\pm 10\%$)	0.05 para 750 Hz
Rango de frecuencias (± 3 dB)	0.02 para 1700 Hz
Frecuencia resonante	≥ 2500 Hz
Resolución (1 to 10000 Hz)	0.00003 m/s ² rms
No linealidad	$\leq 1\%$
Sensibilidad transversal	$\leq 5\%$
AMBIENTAL	
Límite de sobrecarga	± 2950 m/s ² pk
Rango de temperatura	-26 a +80 °C
Sensibilidad a la deformación de base	≤ 0.005 (m/s ²)/ $\mu\epsilon$
ELÉCTRICO	
Voltaje de excitación	18 a 30 VDC
Consumo de energía	2 a 10 mA
Impedancia de salida	<500 Ohm
Tiempo de descarga	5 to 15 sec
Tiempo de estabilidad	<100 sec
Ruido espectral (1 Hz)	2.9 ($\mu\text{m/s}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ruido espectral (10 Hz)	1.0 ($\mu\text{m/s}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ruido espectral (100 Hz)	0.4 ($\mu\text{m/s}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ruido espectral (1 kHz)	0.4 ($\mu\text{m/s}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$
FÍSICO	
Elemento sensitivo	Cerámica
Material de cubierta	Titanio
Sellado	Hermético
Diámetro	25 mm
Altura	31 mm
Peso	50 gm
Conexión eléctrica	10-32 Coaxial

Las mediciones se realizaron para las pruebas de vibración libre y vibración forzada. Con los registros de la prueba de vibración libre se determinan las frecuencias asociadas a los tres primeros modos de vibrar. Por otra parte, con los registros de la prueba de vibración forzada se determinan las aceleraciones debidas al caminar, brincar y el correr de una persona, así mismo se realizó pruebas para un conjunto de personas. En la Tabla 3 se enlistan las cargas que se consideraron para cada prueba, donde para el caminar de una persona los tableros se sometieron a una carga de 97 kg y a una frecuencia de paso de 1.87 Hz, y para el correr de una persona a una frecuencia de paso igual a 2.63 Hz.

Tabla 3. Pesos considerados para cada prueba.

Personas	peso (kg)
1	97
2	187
3	301
10	985

El registro de la aceleración ante vibración ambiental en cada prueba se realizó con una frecuencia de muestreo de 512 Hz, en un lapso de tiempo de 300 s. Mientras que, para las pruebas ante vibración forzada se utilizó la frecuencia de muestreo antes mencionada con una duración promedio de tiempo de 30 a 35s. Una vez colocado los sensores se realizaron pruebas para el caminar de 1, 2, 3 y 10 personas (CA1P, CA2P, CA3P y CA10P). Además, se realizaron pruebas para el brinco de 1, 3 y 10 personas (BR1P, BR3P y BR10P) y, finalmente, para el correr de 1 persona: CO1P.

2.4 Calibración del del modelo numérico con pruebas experimentales

Después de obtener las señales de aceleración con los sensores piezoeléctricos, los registros para vibración ambiental y forzada se analizaron en el programa MATLAB R2018a. En el cual la señal que se obtuvo de los instrumentos de medición ya está filtrada analógica y electrónicamente de tal manera que es adecuada para su uso; posteriormente se realizaron los espectros de potencia. En la Figura 7 se muestran las aceleraciones registradas durante la prueba experimental de vibración forzada para el caminar de una persona (CA1P), en el cual se observa que la aceleración en el sensor 3 es mayor a la del sensor 1 (Figura 5).

Posteriormente de cada una de las señales se obtuvo el espectro de potencia como se muestra en la Figura 8, de la misma manera, se obtuvieron los resultados para las pruebas de vibración ambiental y forzada.

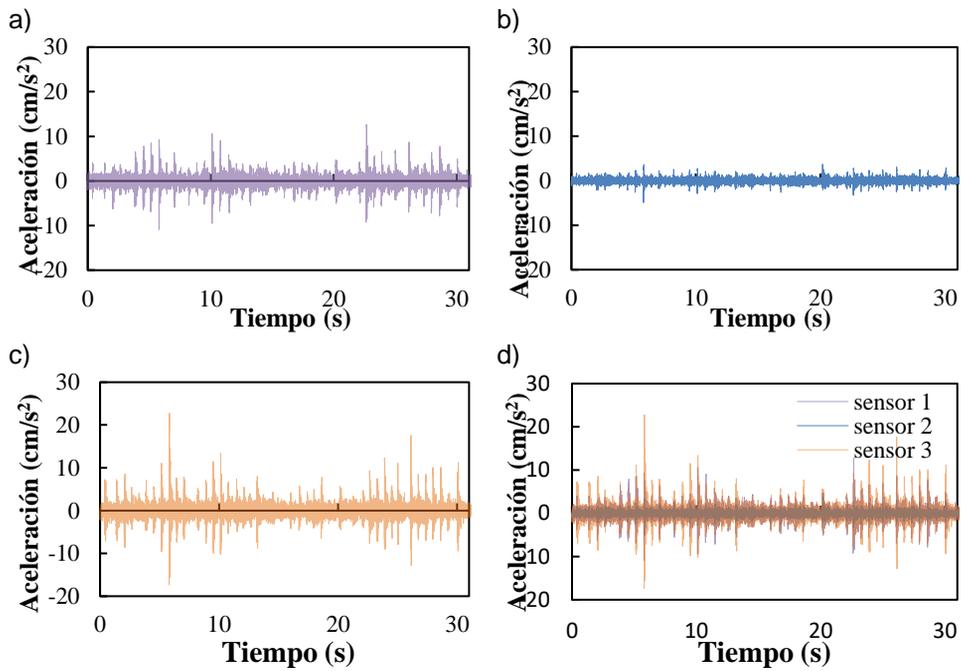


Figura 7. Registro de aceleraciones en prueba experimental de vibración forzada por el caminar de una persona: a) sensor 1, b) sensor 2, c) sensor 3 y d) comparación de la respuesta.

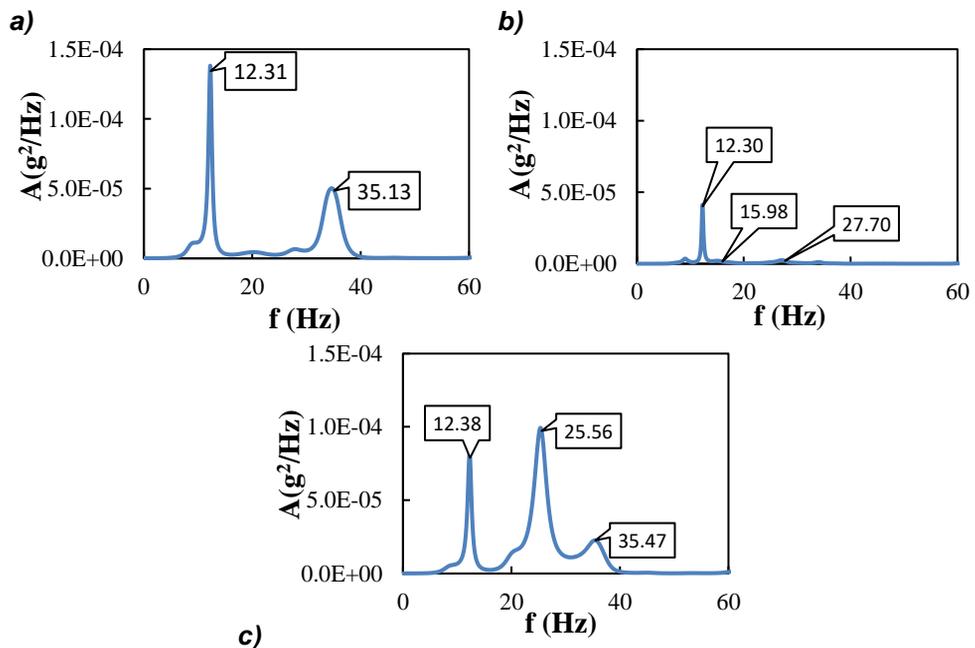


Figura 8. Espectros de potencia para el caminar de una persona: a) S_1 , b) S_2 y c) S_3 .

Otra manera de analizar las aceleraciones es en términos de los espectros de potencia determinado a través de pruebas experimentales, pues proporciona otra

perspectiva sobre las frecuencias y modos de vibrar que tienen mayor participación en el análisis de una estructura. En la Figura 9a se muestra un espectro de potencia para una prueba de vibración ambiental en el cual la participación del primer modo es mayor (sensor 1) a diferencia de los otros dos. En la Figura 9b, c y d, se muestra los espectros de potencia para el caminar de una, dos y tres personas respectivamente, en ellos se observa que la participación del sensor 3 es mayor a la del sensor 1. Con estos resultados, se ratifica que no solo es importante conocer la respuesta global de la losa, sino también evaluar lo que ocurre en los tableros secundarios.

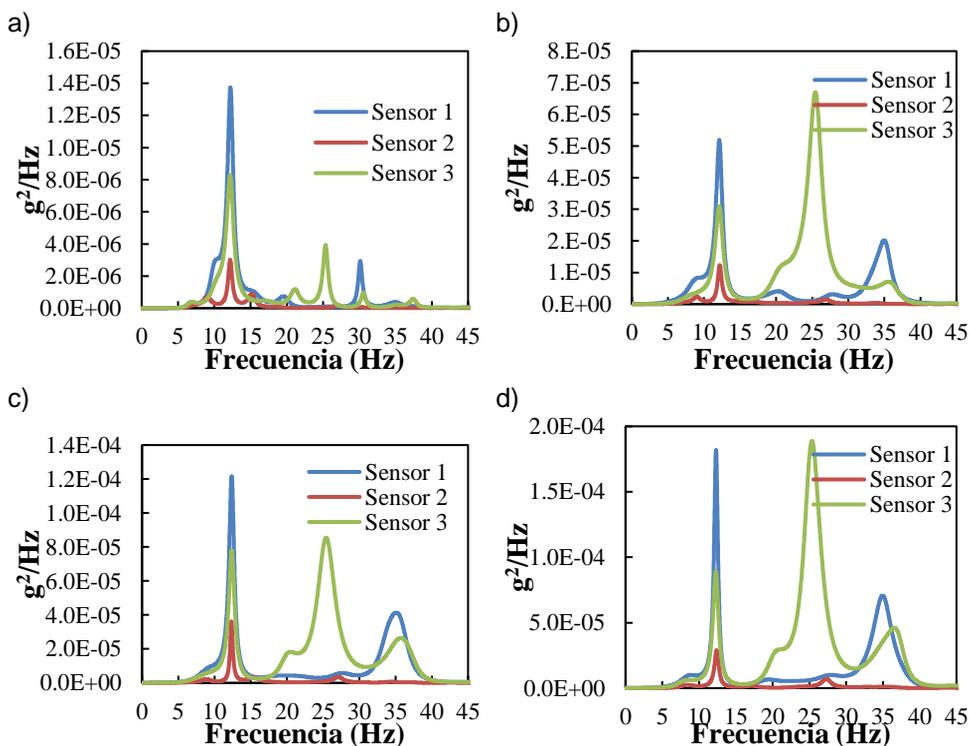


Figura 9. Espectros de potencia de: a) vibración ambiental y el caminar de b) 1 persona, c) 2 personas y d) 3 personas.

En la Tabla 4 se resumen las frecuencias experimentales obtenidas mediante la prueba de vibración ambiental, y las frecuencias obtenidas con modelos de elementos finitos, asimismo se muestra las aceleraciones obtenidas por el caminar y correr de una persona. Como se observa, las frecuencias obtenidas de manera experimental son parecidas a lo numérico, se tiene una diferencia menor del 10%, pues la colocación de los sensores y el modelado fueron congruentes con lo obtenido experimentalmente. En la evaluación de la aceleración, se muestra que son mayores a los valores permisibles en las NTCEA-20 (2020), pues para el caminar de personas el intervalo de aceptación es de 0.005g a 0.01g (4.9-9.8 cm/s^2), y para actividades físicas como el correr y brincar es de 0.02g a 0.05g (19.6-49 cm/s^2).

Tabla 4. Frecuencias y aceleraciones para diferentes sistemas

Especímen	Modos de vibrar	frecuencia experimental	frecuencia numérica M1	aceleración (cm/s ²)		% diferencia en frecuencias
				caminar	correr	
T ₁	1	12.22	11.973	6.90	36.25	2.02
	2	19.37	18.592			4.02
	3	30.28	27.761			8.32

2.4.1 Evaluación del nivel de perceptibilidad del Tablero T₁ ante vibración

En la Tabla 5 se muestra los resultados obtenidos por el caminar de personas en el tablero T₁. Para el caminar de 1, 2, 3 y 10 personas, las aceleraciones registradas en los sensores son no aceptables, puesto que superan a 0.01g. Note que las aceleraciones máximas se registraron en el sensor S₃ para el caminar de 1, 2 y 10 personas, y en el sensor S₁ para el caminar de 3 personas. En la Tabla 6 se muestran los resultados experimentales obtenidos para el brincar de 1 y 3 personas, las aceleraciones registradas en los tres sensores son aceptables, pues son menores a 0.05g; sin embargo, para el brincar de 10 personas se registraron vibraciones no aceptables en los sensores S₁ y S₃. Por otra parte, para el correr de 1 persona también se registraron vibraciones no aceptables en los sensores S₁ y S₃. Note que las aceleraciones máximas se registraron en los sensores S₁ y S₃ para el brincar de 1 persona, en el sensor S₁ para el brincar de 3 personas y en el sensor S₃ para el brincar de 10 personas y el correr de 1 persona.

Tabla 5. Evaluación del tablero T₁ ante el caminar de personas.

Actividad	Sensor	Pseudo-aceleración experimental (g)	Frecuencia (Hz)	Normatividad
Caminar de 1 persona	S1	0.026	12.19	No Aceptable
	S2	0.005	17.45	Aceptable
	S3	0.031	25.34	No Aceptable
Caminar de 2 personas	S1	0.025	12.33	No aceptable
	S2	0.004	15.16	Aceptable
	S3	0.029	25.33	No aceptable
Caminar de 3 personas	S1	0.049	7.531	No aceptable
	S2	0.022	14.02	No aceptable
	S3	0.022	22.36	No aceptable
Caminar de 10 personas.	S1	0.055	12.17	No aceptable
	S2	0.022	16.19	No aceptable
	S3	0.062	25.11	No aceptable

Tabla 6. Evaluación del tablero T₁ ante cargas rítmicas.

Actividad	Sensor	Pseudo-Aceleración experimental (g)	Frecuencia (Hz)	Normatividad
Brincar de 1 persona	S1	0.002	12.45	Aceptable
	S2	0.001	15.31	Aceptable
	S3	0.002	25.39	Aceptable
Brincar de 3 personas	S1	0.024	12.38	Aceptable
	S2	0.006	17.73	Aceptable
	S3	0.022	24.77	Aceptable
Brincar de 10 personas	S1	0.167	12.25	No aceptable
	S2	0.0819	16.63	Aceptable
	S3	0.1943	25.27	No aceptable
Correr de 1 persona	S1	0.064	12.47	No aceptable
	S2	0.019	16.69	Aceptable
	S3	0.076	24.66	No aceptable

2.4.2 Evaluación de la perceptibilidad de la vibración conforme a las NTCEA-20 y AISC-97

En la Figura 10 se muestran las aceleraciones registradas durante las actividades realizadas. Estas aceleraciones experimentales se evalúan conforme a los criterios de las NTCEA-20 (2017), a los límites propuestos en el AISC-97 (1997) enlistados en la Tabla 7 y a los nomogramas propuesto por Allen y Murray (1993), cabe mencionar que el límite de la línea punteada corresponde para el uso de oficinas y zonas residenciales. Como se observa, los valores experimentales por el caminar de personas en ambos tableros exceden las aceleraciones permisibles de ambos reglamentos, aunque para otras zonas de las losas no se exceden las aceleraciones permisibles en el AISC-97 (1997). Por otra parte, para el correr y brincar de personas son menos los puntos que exceden estos umbrales, pero también se exceden las aceleraciones permisibles. Note que el criterio del AISC-97 (1997) permite aceleraciones mayores para las frecuencias menores a 4 Hz y mayores a 9 Hz, mientras que los umbrales de aceleración que se recomiendan en las NTCEA-20 (2020) tienen un valor constante para cualquier valor de f_n , ante diferentes excitaciones como el caminar o correr.

Tabla 7. Aceleración límite para actividades rítmicas (tomado de AISC, 1997)

Tipo de actividad u ocupación	a(%g)
Oficina o residencia	0.4-0.7
Comedor o gimnasio	1.5-2.5
Solo actividad rítmica	4.0-7.0

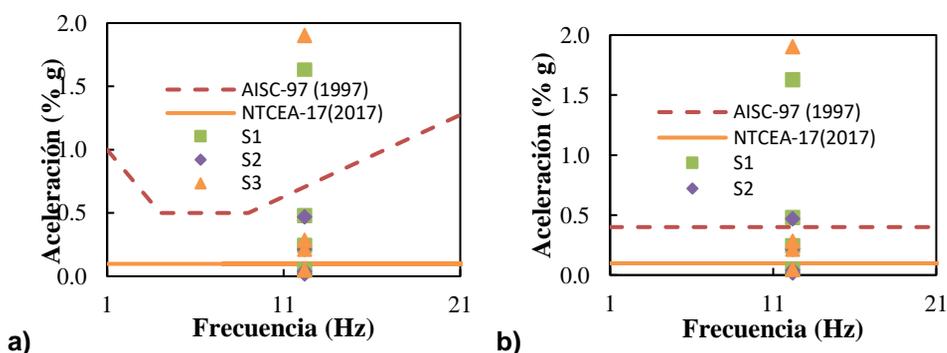


Figura 10. Comparación de resultados experimentales, NTCEA-20 y AISC-97 en el tablero T₁: a) por el caminar de personas y b) por el correr y brincar de personas.

3 Estudio paramétrico

En este estudio se analizaron tres tableros, en el primero se tomó como base el tablero T₁, de la Figura 2b. En este tablero se estudió el incremento del módulo elástico del concreto, el incremento de inercia de vías principales, de vigas secundarias y de las columnas, además, se estudió el uso de concreto ligero, incrementando el espesor de la losa. En el segundo tablero, T₂, se estudió el

espesor y la separación de vigas secundarias, tomando constante el ancho y largo del tablero. Se colocaron dos funciones de carga, una en el centro y la otra en un sub-tablero adyacente. En el cual se observó que, para espesores de concreto menor a 8 cm, existen aceleraciones locales mayores al global. Para el tercer tablero, T₃, la única variable fue la separación de las vigas secundarias, en el que el largo del tablero es variable, se tomó como constante el número de sub-tableros y el espesor del concreto. En el tercero se evalúan variables para reducir la aceleración. Este último tablero surge de los resultados obtenidos en el segundo, pues en este caso se colocó cuatro funciones de carga en el centro de cada sub-tablero. En el cual se observó que existen aceleraciones mayores que en el tablero principal; sin embargo, esto no sucede para los desplazamientos y las velocidades.

3.1 Evaluación del espesor de losa de concreto y separación de vigas secundarias

Una vez realizado la calibración numérico-experimental para la evaluación de la frecuencia natural y la aceleración, se realizaron modelos con el programa SAP 2000 (CSI-09) mediante el método de elementos finitos, con el fin de evaluar la aceleración ante diferentes configuraciones geométricas para observar el comportamiento ante el cambio de algún parámetro. Para el modelado de la losa de concreto sobre lámina de acero se consideró la configuración tipo II, el cual la losa es apoyada sobre columnas a media altura, manteniendo constante el ancho y largo. La losa de concreto sobre lámina de acero se modeló con una resistencia a la compresión del concreto de $f'_c=210$ kg/cm², y una resistencia a la fluencia del acero de $f_y=3515$ kg/cm². Las dimensiones son: 10.06 m en su dirección larga y 4.27 m en la dirección corta, las cuales están apoyados sobre vigas secundarias y a su vez sobre vigas principales en los bordes de los tableros; estas vigas principales se apoyan en sus cuatro esquinas sobre columnas cuadradas huecas. Se consideraron espesores de concreto de: 5, 6, 8, 10, y 12 cm; la cual está soportada por una lámina cuyos espesores de estudio fueron: 0.0759, 0.0912 y 0.1214 cm (calibre 22, 20 y 18 respectivamente) y una malla electrosoldada de 15.24 X 15.24 cm embebida en el concreto. Las vigas principales son IPR 533X101 y las vigas secundarias son IPR 254X17.9, en las cuales se consideró una separación inicial de 140 cm el cual se varió a cada 20 cm hasta los 400 cm. Por ultimo las columnas son secciones rectangulares de acero OR-406X19.

En el caso de la aceleración se analizaron las variables de los modelos con la carga aplicada en dos posiciones, como se muestra en la Figura 11. En el primer caso, la carga se aplicó en el centro geométrico de la losa, U₁, sobre una viga secundaria y, en el segundo caso, la misma carga se colocó en el centro del tercer sub-tablero, U₂, entre dos vigas secundarias. Las cargas aplicadas modelan las actividades del caminar y el correr de personas, las cuales se recomiendan en la ecuación (1) del AISC-97 (1997). Los parámetros de cada carga se muestran en la Tabla 8, donde el factor α solo corresponde a un armónico por lo tanto i es igual a uno. Es importante mencionar que la carga se distribuyó a lo largo del espesor de la losa, el cual está conformado por 5 nodos; el motivo se debe que al colocar la carga concentrada sólo en el nodo superior, se obtienen aceleraciones con valores mayores a los calculados experimentalmente, pues se tiene una concentración de desplazamientos, velocidades y, consecuentemente, de aceleraciones, lo cual se resuelve distribuyendo la carga en todos los nodos con los que se mallan el espesor de la losa.

$$F(t) = P\alpha_i \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (1)$$

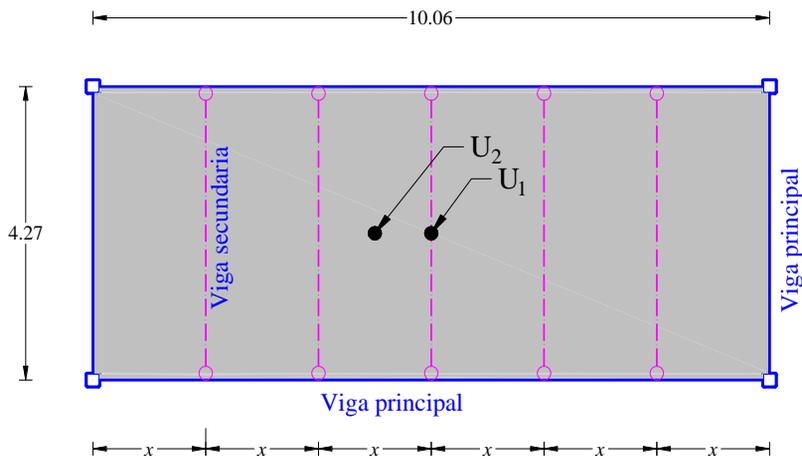


Figura 11. Configuración del modelado numérico

Tabla 8. Factores de carga dinámica por el caminar y correr de una persona

Actividad	P(kg)	α	F_{step} (Hz)	i
Caminar	97	0.5	1.87	1
Correr	97	1.5	2.63	1

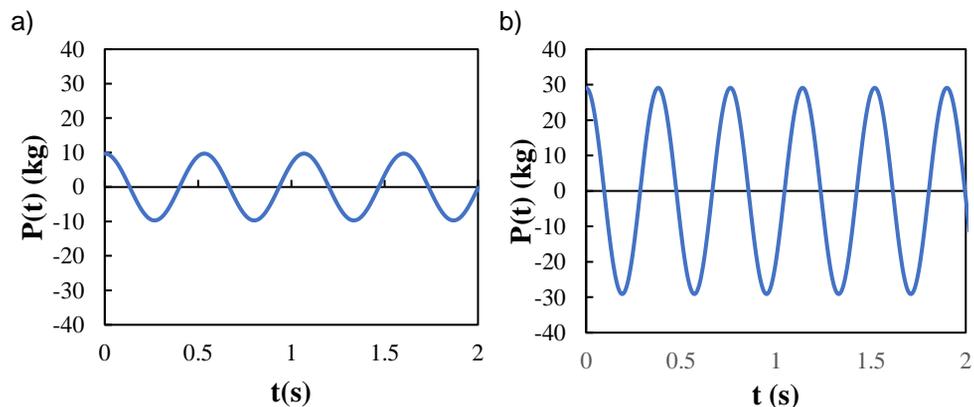


Figura 12. Funciones de carga aplicadas en cada nodo conforme al AISC (2003), para el: a) caminar y b) correr de una persona.

3.1.1 Cargas dinámicas aplicada en la ubicación U1

En la Figura 13 se muestra las aceleraciones calculadas por el caminar de personas, considerando 5 cm de espesor constante del concreto sobre la lámina con distintos calibres de lámina. Como se observa, el calibre de mayor grosor de la lámina tiene

poca influencia en la aceleración, pues la diferencia del espesor entre ellas es de 0.455 mm. Por lo tanto, el usar uno de los tres calibres es indistinto para la evaluación de la aceleración o la frecuencia natural; sin embargo, como se recomienda en manuales de diseño como el AISC-97 (1997), si aumenta resistencia de diseño. Para el modelado de los demás especímenes, se consideró un espesor de lámina de 0.1214 cm (calibre 18).

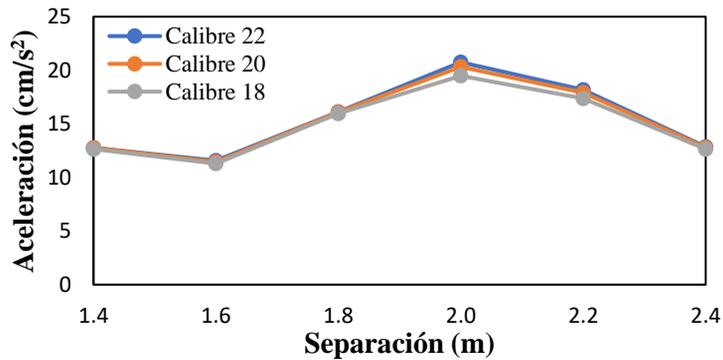


Figura 13. Variación de la aceleración para diferentes calibres de lámina y separación de vigas secundarias producido por el caminar de una persona en la ubicación U_1 .

Para la evaluación de la frecuencia natural, en la Figura 14 se muestran los valores calculados de los modelos numéricos con los diferentes espesores de concreto sobre la lámina y con distintas separaciones de las vigas secundarias. Como se observa las frecuencias disminuyen a medida que aumenta el espesor del concreto, también se observa que las frecuencias aumentan hasta una separación de 2.6 m, posteriormente disminuyen. Para espesores mayores a 10 cm, la separación entre vigas secundarias tiene poca influencia en la frecuencia natural, pues están entre los rangos de 13.0 Hz y 13.5 Hz, pues se mantienen casi constante, y para separaciones mayores a 3.4 m las frecuencias son iguales en espesores de concreto mayores de 10.0 cm.

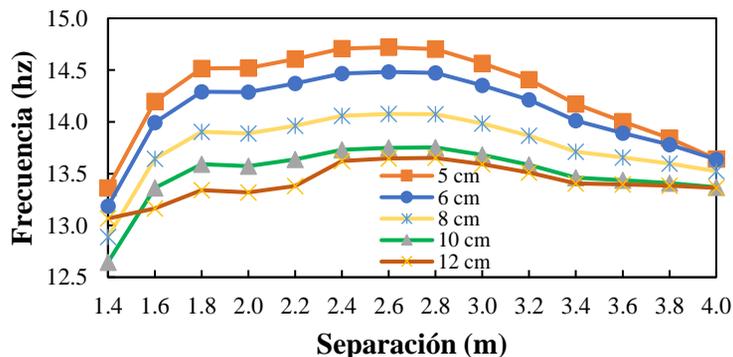


Figura 14. Variación de frecuencias para diferentes espesores de concreto y separación de vigas secundarias.

En las Figuras 15 y 16 se muestran los desplazamientos, velocidades y aceleraciones para diferentes espesores de concreto para el caminar y correr de una persona, respectivamente. En las curvas de desplazamientos se observa que, para separaciones de vigas secundarias entre 1.4 m y 2.0 m los desplazamientos tienen poca variación, a diferencia de la velocidad y la aceleración. En las curvas de desplazamiento y velocidad, se muestra una tendencia a incrementar a medida que la separación entre vigas secundarias aumenta; sin embargo, la aceleración tiende a disminuir con separaciones de vigas secundarias mayores a 2.40 m. También se observa que para espesores de 10 y 12 cm las aceleraciones son prácticamente iguales. Las aceleraciones para el caminar y correr de una persona son mayores a los límites que se recomiendan en las NTCEA-20 (2020), cuyos valores son de entre 5 y 10 cm/s^2 para el caminar de personas y entre 20 y 49 cm/s^2 para el correr. Otra de las recomendaciones que se proponen en las NTCEA-20 (2020) es la evaluación de la frecuencia natural, pues se recomienda que, para tener un nivel bajo de percepción de las vibraciones, los sistemas de losa deben tener una frecuencia mayor a 8 Hz. Como se observa en las curvas de la Figura 14, las frecuencias son mayores a lo recomendado; sin embargo, todas las aceleraciones son mayores a los permisibles. Note que al incrementar el espesor de la losa se reducen hasta el 50% la aceleración; sin embargo, se incrementa el peso de la losa que repercute en el diseño sísmico de una estructura.

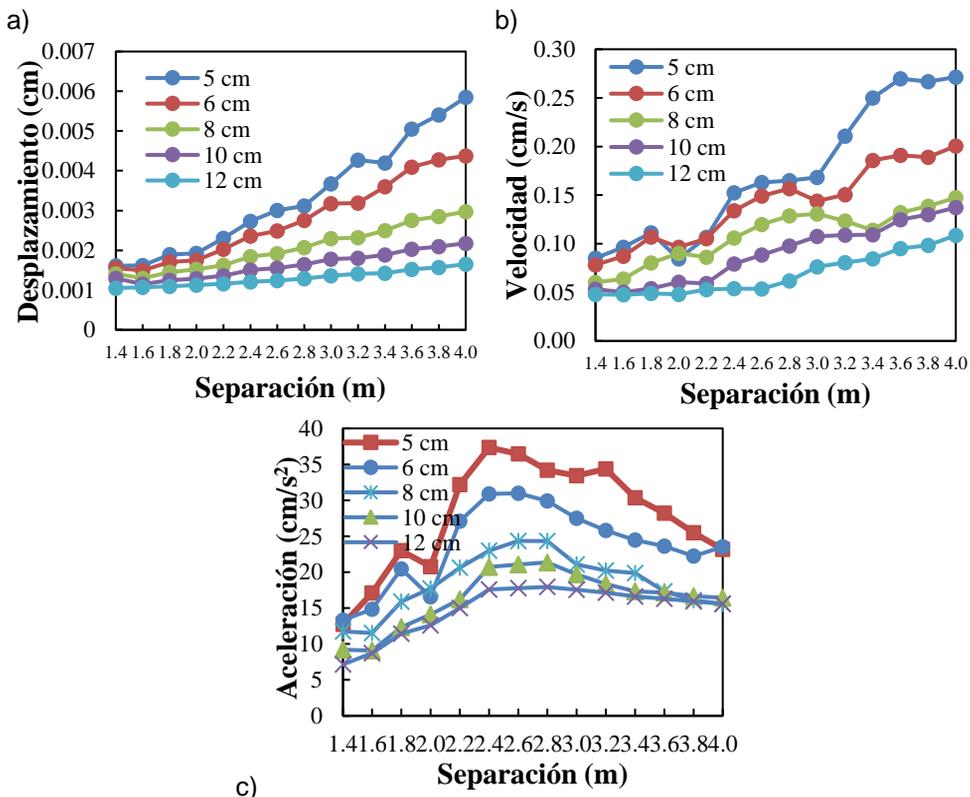


Figura 15. Variación de: a) desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración por el caminar de una persona en la ubicación U_1 , para diferentes espesores de concreto.

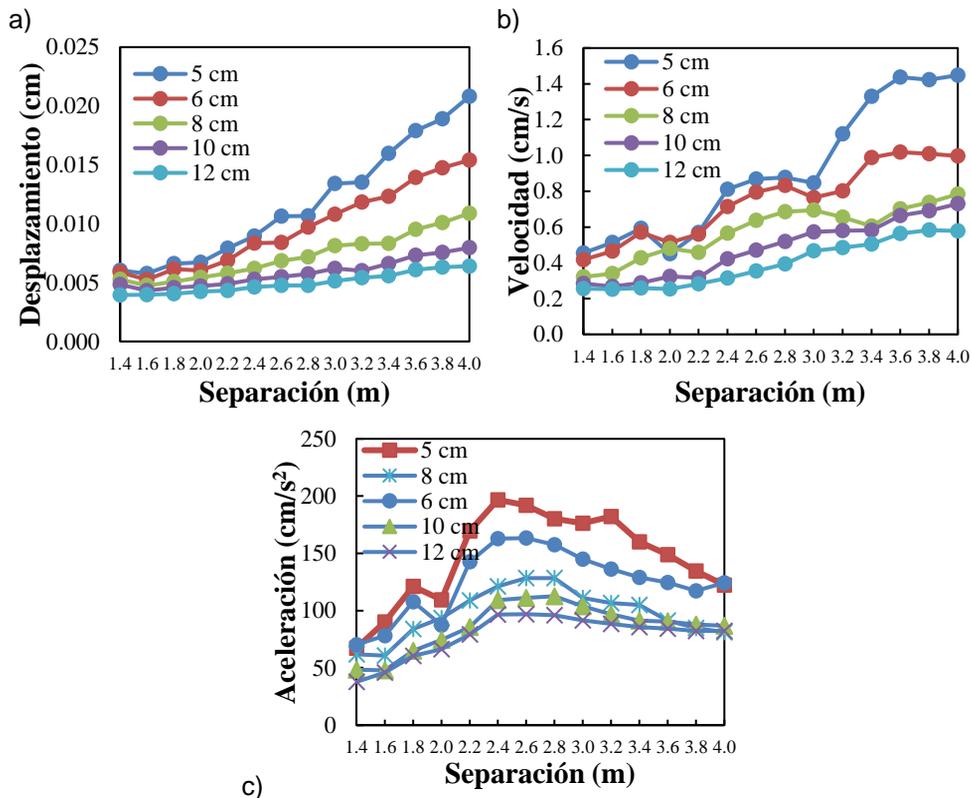


Figura 16. Variación de: a) desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración por el correr de una persona en la ubicación U_1 , para diferentes espesores de concreto.

3.1.2 Cargas dinámicas aplicada en la ubicación U_2

Como se mencionó al inicio de la sección 3.1, se colocó una carga en la ubicación U_2 , al centro del tercer sub-tablero, como se muestra en la Figura 11. En las Figuras 17 y 18 se observa que los desplazamientos, las velocidades y aceleraciones se reducen al incrementar el espesor de la losa de concreto. Estas tres magnitudes incrementan al incrementar la separación de las vigas secundarias; como era de esperarse, estas magnitudes son mayores para el correr que para el caminar. Los desplazamientos y velocidades tienen una variación uniforme; sin embargo, la aceleración no es uniforme, pues presenta variaciones, en especial para espesores de losa de concreto menores a 6 cm.

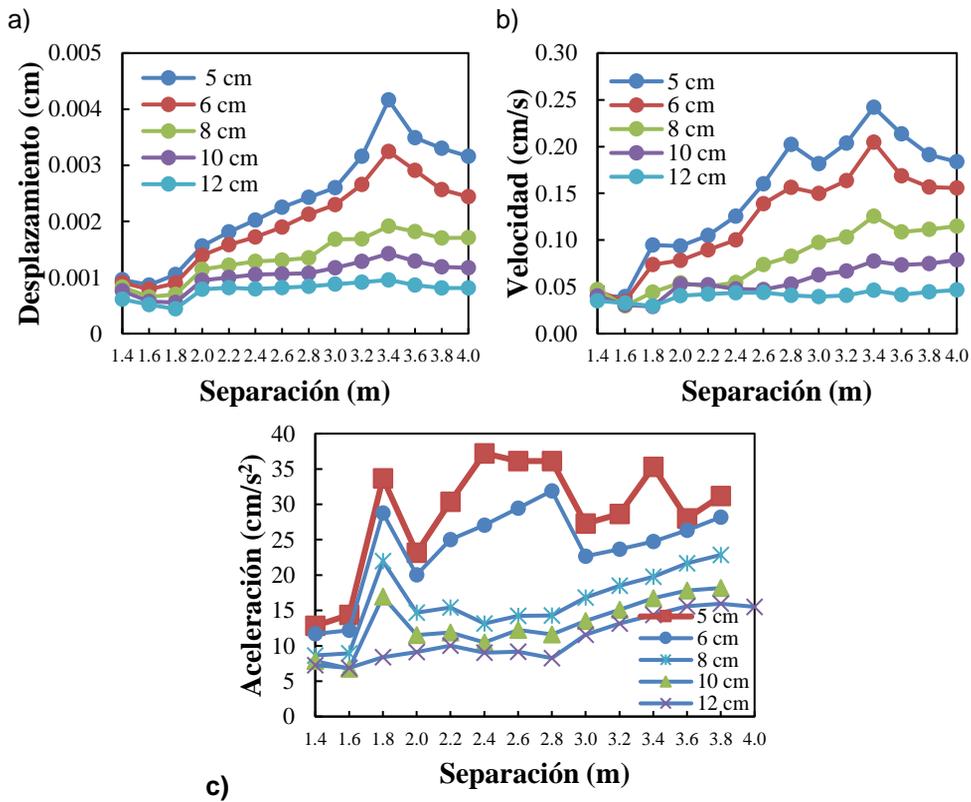
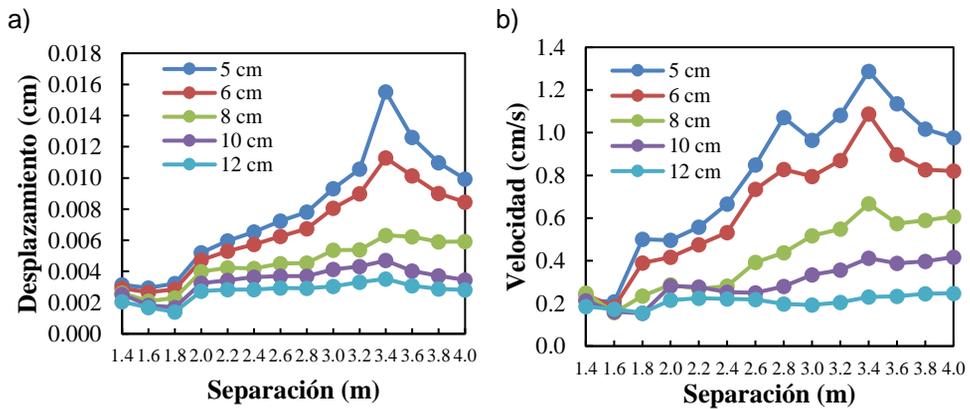


Figura 17. Variación de: a) desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración por el caminar de una persona en la ubicación U_2 para diferentes espesores de concreto.



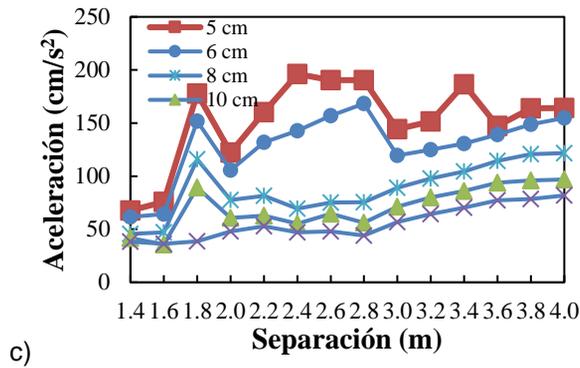
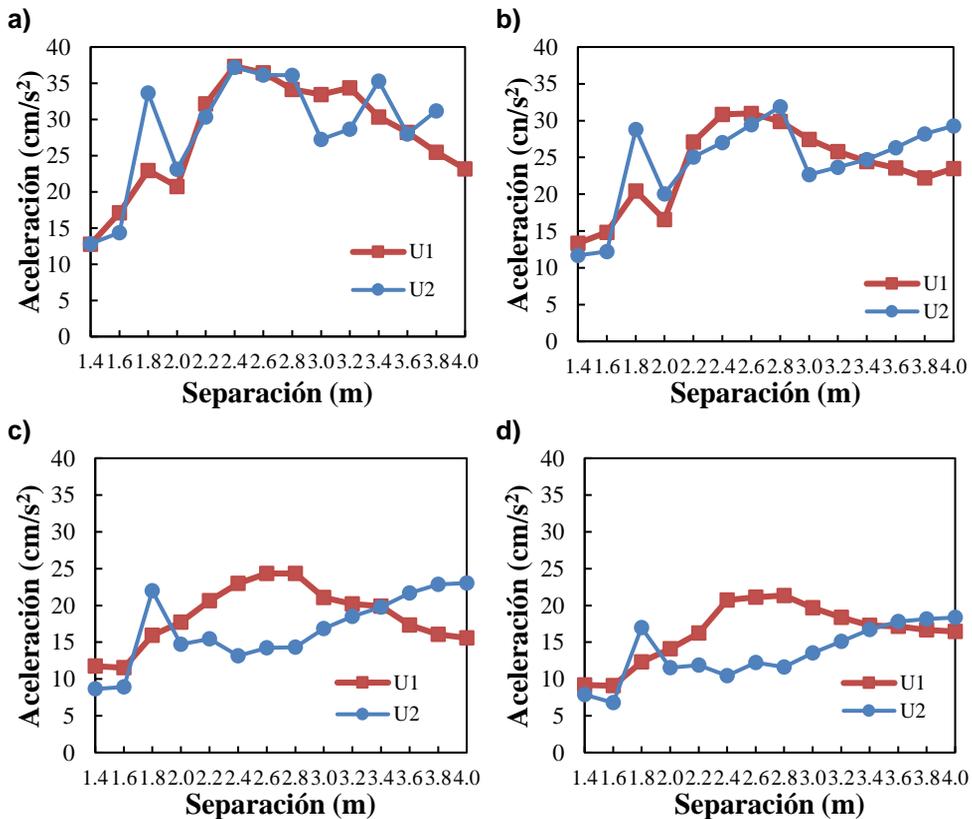
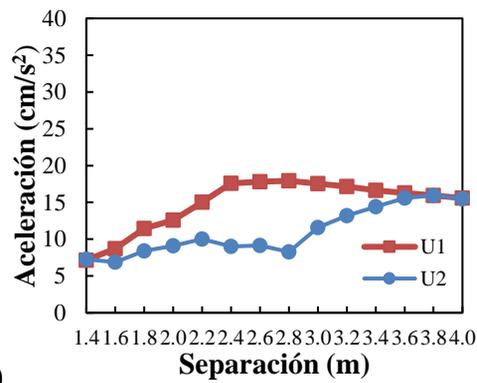


Figura 18. Variación de: a) desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración por el correr de una persona en la ubicación U_2 para diferentes espesores de concreto.

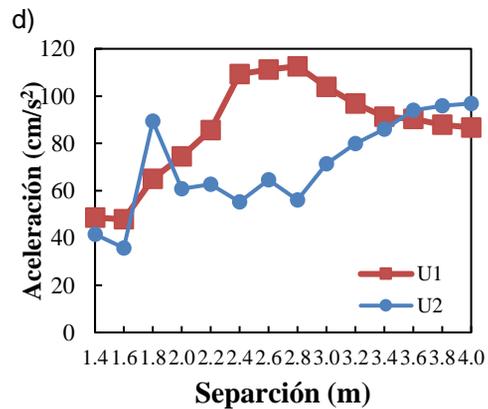
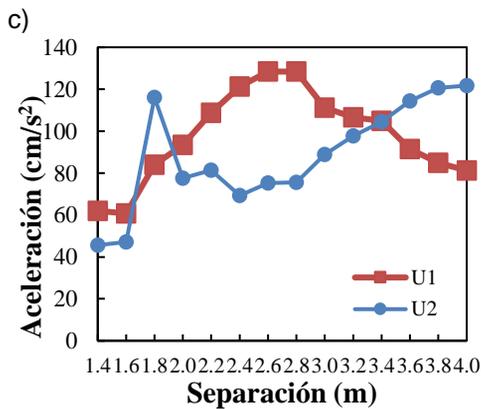
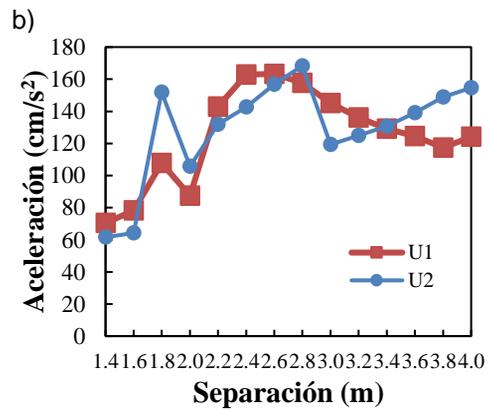
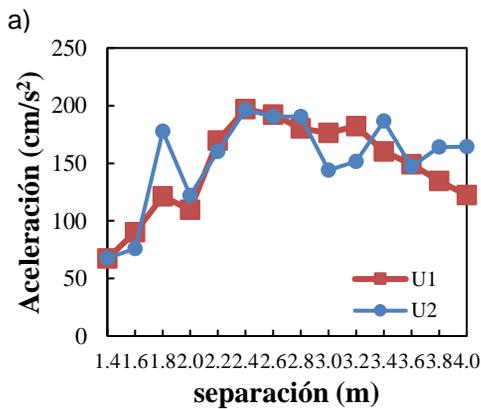
En las Figuras 19 y 20 se compara la respuesta en los puntos donde se aplicó la carga, U_1 y U_2 , para los diferentes espesores de concreto, producidos por el caminar y correr de una persona. Como se observa, al incrementar el espesor del concreto, aumenta la aceleración en el tercer sub-tablero. Además, se puede observar que la aceleración en la ubicación U_2 en algunos casos es mayor que en el centro geométrico, ubicación U_1 , particularmente para separaciones mayores a 3.4 m.

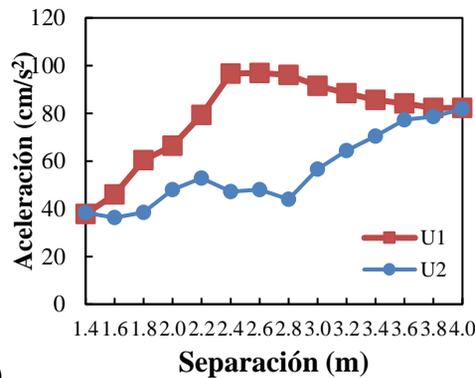




e)

Figura 19. Comparación de la aceleración en la ubicación U_1 y U_2 para el caminar de una persona en losa con espesores de concreto: a) 5 cm, b) 6 cm, c) 8 cm, d) 10 cm y e) 12 cm.





e)

Figura 20. Comparación de la en la ubicación U_1 y U_2 para el correr de una persona en losa con espesores de concreto: a) 5 cm, b) 6cm, c) 8 cm, d) 10 cm y e) 12 cm.

Después de obtener las aceleraciones de los modelos numéricos, se comparó el porcentaje que disminuye la aceleración a medida que aumenta el espesor del concreto (con respecto al espesor de 5 cm), como se muestra en la Figura 21. Como se observa el aumentar 1 cm al espesor del concreto se puede reducir la aceleración hasta un 20 %, el aumentar el espesor 3 cm se reduce un 40 %; sin embargo, el aumentar los espesores 5 o 7 cm la reducción es del 50% pues las aceleraciones son prácticamente iguales. Para separaciones de vigas secundarias mayores a 3.6 m, no importa si el espesor se aumenta más de 3 cm, pues se tiene el mismo porcentaje en la reducción de la aceleración.

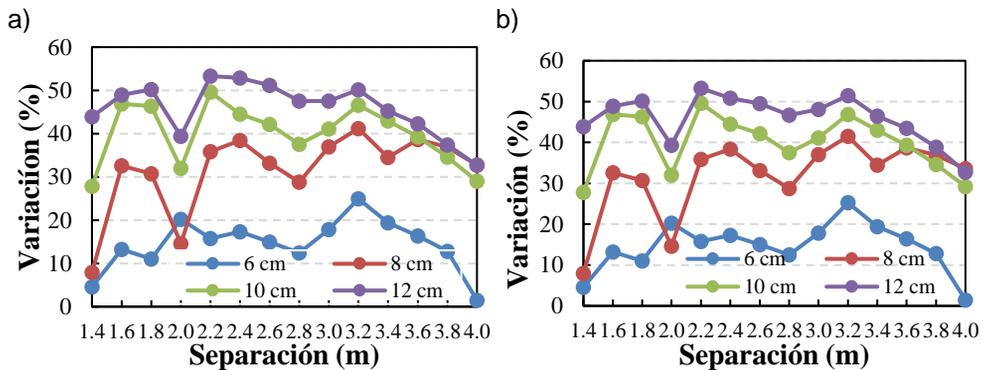


Figura 21 Porcentaje de la aceleración global con respecto al espesor de 5 cm para el: a) caminar y b) correr de una persona.

3.2 Evaluación de cargas actuantes en sub-tableros

Como se muestra en la sección anterior, existen aceleraciones en el tercer sub-tablero de la Figura 22 que son mayores a las que se presenta en el centro geométrico, donde ocurren los desplazamientos modales máximos correspondientes al periodo fundamental. Es importante evaluar la respuesta en tableros secundarios por lo que se realizó el modelado numérico de un tablero con siete sub-tableros, para que su centro geométrico coincidiera con el centro del tablero principal. En esta losa se consideró constante el ancho de la losa igual a 4.27 m y el espesor de concreto igual a 12 cm. La variable para el modelado de la losa fue la separación entre vigas secundarias, con lo cual el largo de la losa cambia.

Cabe mencionar que se utilizaron las mismas propiedades mecánicas del acero y el concreto descritas para el modelado anterior.

Para la respuesta de la aceleración se evaluó cada tablero secundario con una carga armónica conforme a lo establecido en el AISC-97 (1997), pues primero se colocó la carga en el sub-tablero 1. El mismo procedimiento se realizó para los sub-tableros 2, 3 y 4. Cabe mencionar que en los sub-tableros 5, 6 y 7 no se colocó alguna carga, pues como se observa en la Figura 22, el tablero es simétrico.

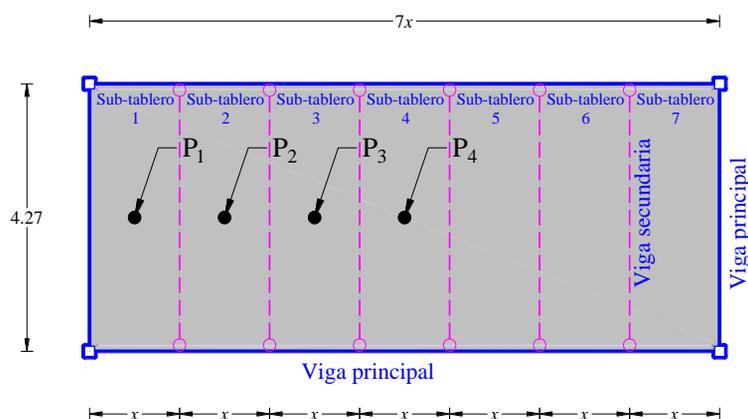


Figura 22. Configuración de modelado de sub-tableros

En la Figura 23 se muestra las frecuencias obtenidas del modelado, cabe mencionar que en el eje de las abscisas se define la separación de vigas secundarias con la finalidad de conocer la influencia de esta variable en el cálculo de la frecuencia natural. Como se observa, al aumentar la separación de vigas secundarias, disminuye la frecuencia natural, caso contrario a los resultados de Figura 14, donde las dimensiones de los tableros son constantes. Para separaciones de vigas secundarias mayores a 180 cm, los valores de la frecuencia natural son menores a 8 Hz, considerando el criterio descrito en las NTCEA-20, estas losas son muy susceptibles a la incomodidad por aceleraciones debidas a alguna actividad rítmica.

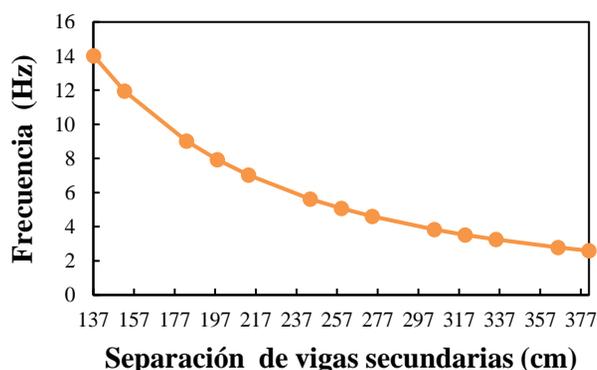


Figura 23. Variación de la frecuencia para diferentes separaciones de vigas secundarias.

En las Figuras 24 y 25 se muestran los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones para cada separación entre vigas secundarias. Como se observa, el desplazamiento y la velocidad, incrementan en los sub-tableros más cercanos al centro de la losa; además, estas incrementan al aumentar la separación entre vigas secundarias. En el caso de la aceleración, las magnitudes son mayores en el sub-tablero 1, lo cual es sorprendente, pues se esperaba que las mayores aceleraciones ocurrieran en el sub-tablero 4; posteriormente se tiene que los valores de aceleración del sub-tablero 4 son mayores que las de los sub-tableros 2 y 3. Para el caminar de personas, las aceleraciones en los sub-tableros 2 y 3 son menores a los permisibles de acuerdo a las NTCEA-20; por otra parte, para el correr de personas todos los tableros secundarios están fuera de los umbrales permisibles.

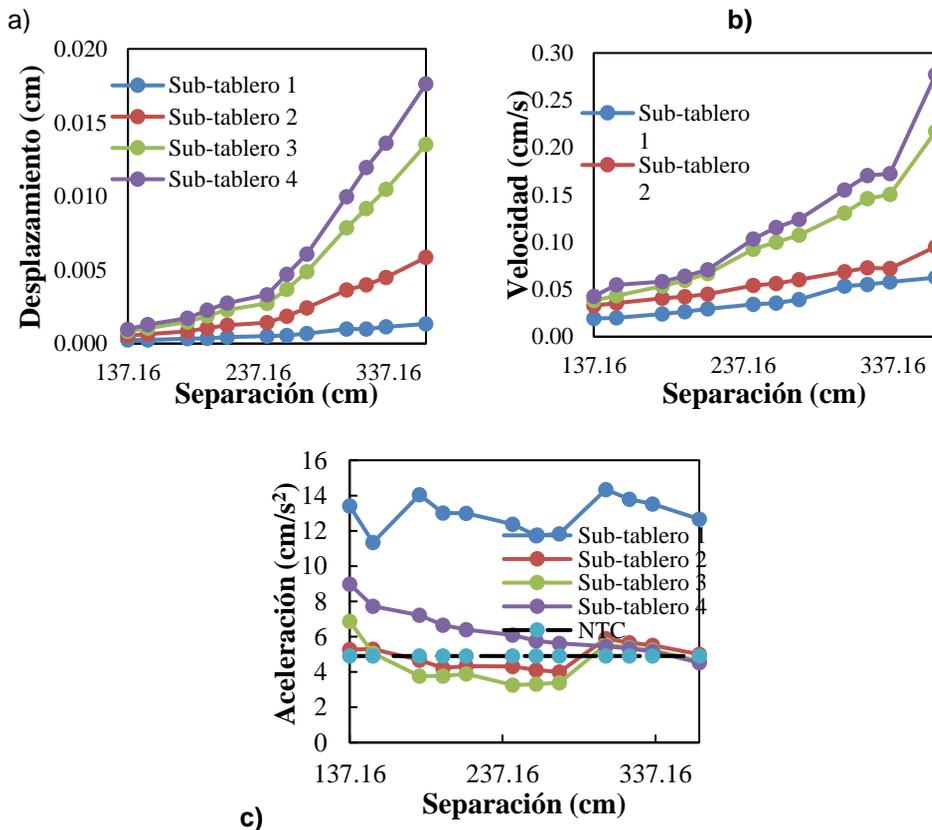


Figura 24. Variación de: a) desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración por el caminar de una persona en diferentes sub-tableros.

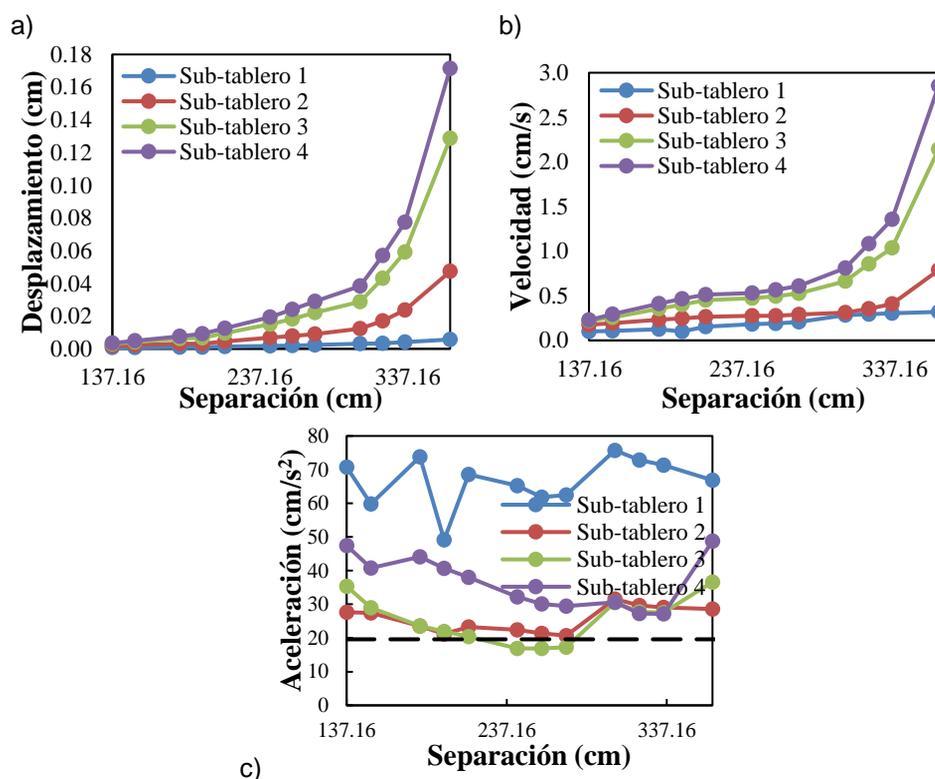


Figura 25. Variación de: a) desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración por el correr de una persona en diferentes sub-tableros.

Como se observa, no es suficiente con conocer la respuesta para el modo fundamental de vibrar, como lo maneja diferentes manuales de diseño AISC (1997) y NTCEA-20 (2017), pues como se ha demostrado con análisis numéricos, existen aceleraciones mayores que ocurren en otros lugares distintos a los que corresponden a la amplitud máxima del modo fundamental. Una manera de justificar estos resultados es mediante las pruebas experimentales. En la Figura 7 se observa que la aceleración en el sensor 3 es mayor a la del sensor 1 (Figura 5); por lo tanto, este resultado justificar a lo obtenido con los modelos numéricos.

3.3 Variables para mitigar aceleraciones

3.3.1 Influencia del módulo elástico

Uno de los factores que podría influir en la aceleración es módulo elástico. Pues este factor, que depende de la resistencia a la compresión del concreto, aumenta la rigidez del sistema estructural; sin embargo, en losas macizas de concreto, este factor tiene poca viabilidad en la evaluación de la frecuencia natural y, en consecuencia, en la evaluación de la aceleración como lo demuestra Caballero (2020).

Para conocer la influencia del módulo elástico en la aceleración a en sistemas de piso losa de concreto sobre lámina de acero, se estudió un tablero T_1 , (Figura 2b). El espesor del concreto es de 7.6 cm, las secciones para las vigas primarias, secundarias y las columnas son las mismas que se describen en la sección 2.1. El

módulo elástico se asignó conforme a lo establecido en las NTCC-17 (2017) considerando un concreto de clase 1. Las aceleraciones fueron evaluadas en el centro geométrico de la losa. En la Tabla 9 se muestra que al variar la resistencia a la compresión del concreto en incrementos de $\Delta f'c=50$ kg/cm², la magnitud de la aceleración disminuye entre el 17% al 23%.

Tabla 9. Variación de la aceleración ante distintas resistencias de concreto.

$f'c$ (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	a (cm/s ²)	Δa (%)
250	221359.436	9.373	0
300	242487.113	7.775	-17.049
350	261916.017	7.614	-18.767
400	280000	7.188	-23.312

3.3.2 Vigas principales y secundarias

A las vigas principales del tablero T₁ (ver Figura 2b), modelado como se muestra en Figura 4, se les incrementó el peralte, utilizando distintos perfiles. Originalmente se tienen vigas principales W530x101 con peralte de 53.6 cm e inercia de 61600 cm⁴, las cuales se cambiaron sucesivamente por los perfiles siguientes: W610x101, W690x125 y W840x176. Estas vigas tienen los peraltes 60.02 cm, 67.80 cm y 83.6 respectivamente, por lo que sus momentos de inercia incrementan: 76200 cm⁴, 119000 cm⁴ y 246000 cm⁴. En los tres casos se trató de mantener el peso por metro lineal de la viga, con el fin de no modificar el comportamiento de respuesta sísmica de la estructura. Por cada tipo de vigas principal, se obtuvo una variación de la aceleración, la cual se enlista en la Tabla 3. Donde la aceleración incrementó hasta un 23%, por lo que el incrementar la rigidez de las vigas principales no es una opción para mitigar las aceleraciones.

Tabla 10. Variación de la aceleración con distintas vigas principales

	PERFIL	Peralte (cm)	Modo de Vibrar	Frecuencia (Hz)	Aceleración (cm/s ²)	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)	Δa (%)
Vigas Principales	W530X101	53.6	1	13.6424	13.98	0.0668	0.001648	
			2	21.0156				
			3	28.0646				
	W610x101	60.3	1	14.5338	14.63	0.06659	0.001509	4.65
			2	22.4407				
			3	29.0929				
	W690X125	67.8	1	16.1631	15.71	0.06575	0.001268	12.37
			2	24.6519				
			3	30.8948				
	W840x176	83.5	1	18.9565	17.22	0.06422	0.001033	23.18
			2	27.9843				
			3	33.4841				

Además, se modificaron las vigas secundarias, incrementando el peralte y, consecuentemente, su rigidez. La viga secundaria original es una W250X167, con

peralte de 28.9 cm e inercia 29600 cm². Las vigas secundarias que se modelaron son: W310X179, W360X162 y W460X158, las cuales tienen peraltes de 33.3 cm, 36.4 cm y 47.6 cm y momentos de inercia de 44500cm⁴, 51600cm⁴ y 79500cm⁴, respectivamente. En los tres casos se trató de mantener el peso por metro lineal de la viga, con el fin de no modificar el comportamiento de respuesta sísmica de la estructura. Por cada tipo de vigas secundarias, se obtuvo una variación de la aceleración, la cual se enlista en la Tabla 4. Donde la aceleración se redujo hasta un 20.74%, por lo que el incrementar la rigidez de las vigas secundarias es una opción para mitigar las aceleraciones.

Tabla 11. Variación de la aceleración con distintas vigas secundarias

	PERFIL	Peralte (cm)	Modo de Vibrar	Frecuencia (Htz)	Aceleración (cm/s ²)	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)	Δa (%)
Vigas Secundarias	W250X167	28.9	1	13.6424	13.98	0.0668	0.001648	
			2	21.0156				
			3	28.0646				
	W310X179	33.3	1	13.6534	12.68	0.06094	0.001551	-9.30
			2	20.9069				
			3	29.1431				
	W360X162	36.4	1	13.8487	12.296	0.06111	0.00154	-12.05
			2	21.1317				
			3	29.8231				
	W460X158	47.6	1	14.0297	11.08	0.053991	0.001437	-20.74
			2	21.1898				
			3	31.5839				

3.3.3 Concreto ligero

Otra opción por evaluar para mitigar las aceleraciones es el incremento el peralte de la losa de concreto con uno más ligero en el tablero T₁, modelado en la Figura 4, pero sin exceder el peso original de la losa. Se cambió el concreto de 2400 kg/m³ que se tenía originalmente por uno ligero de 1500 kg/m³. Los peraltes evaluados son: 7.6 cm, 10.74 cm y 13.74 cm, este último es el máximo posible con concreto ligero. La variación de la aceleración para los distintos espesores de losa con concreto ligero se enlista en la Tabla 12. Donde la aceleración se redujo hasta un 23.46%, por lo que el incrementar el espesor de la losa de concreto con uno ligero es una opción para mitigar las aceleraciones.

Tabla 12. Variación de la aceleración con distintos peraltes de losa de concreto ligero

	Peralte de losa (cm)	Modo de Vibrar	Frecuencia (Hz)	Aceleración (cm/s ²)	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)	Δa (%)
Losa ligera 2400kg/m ³	7.6 original	1	13.64	13.98	0.0668	0.001648	
		2	21.02				
		3	28.06				
Losa ligera 1500kg/m ³	7.6	1	15.57	17.16	0.07771	0.001688	22.75
		2	23.28				
		3	32.40				
	10.74	1	15.21	13.39	0.06159	0.001454	-4.22
		2	23.12				
		3	32.58				
	13.74	1	14.96	10.7	0.05081	0.001274	-23.46
		2	23.13				
		3	33.00				

3.3.4 Columnas

Otro elemento que proporciona rigidez al tablero y que podrían modificar la respuesta son las columnas. Las dimensiones de las columnas originales son 40.6x40.6x1.48 cm en el tablero T₁, modelado en la Figura 4. En éste se evaluaron otras columnas de 45x45x1.48 cm y 50x50x1.48 cm. La variación de la aceleración para estas columnas se enlista en la Tabla 13. Donde la aceleración se redujo solo un 2.146%, por lo que el incrementar las secciones de las columnas no es una opción para mitigar las aceleraciones.

Tabla 13. Variación de la aceleración con distintas columnas de apoyo

Dimensión de columna	Modo de Vibrar	Frecuencia (Htz)	Aceleración (cm/s ²)	Velocidad (cm/s)	Desplazamiento (cm)	Δa (%)
40x40x1.48	1	13.6424	13.98	0.0668	0.00165	
45x45x1.48	1	13.9345	14.15	0.0669	0.00162	-1.216
50x50x1.48	1	14.1620	14.28	0.06698	0.00159	-2.146

4 Conclusiones

De los resultados experimentales se obtuvieron las frecuencias y la aceleración máxima por actividades rítmicas de las personas. Estos valores experimentales fueron de utilidad para calibrar los resultados obtenidos con los modelos numéricos, pues las frecuencias numéricas son congruentes con sus respectivos espectros de potencia experimentales.

La ubicación de los sensores es importante, pues de ella depende las formas modales fuera del plano que se registran durante la prueba. Estos sensores se colocaron en la zona de amplitud modal máxima de los tres primeros modos de vibrar, pues se espera que en estos puntos ocurren los desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas. En los dos tableros, la colocación de los sensores fue en las tres mismas ubicaciones debido a que el comportamiento modal

es semejante; el sensor S_1 se colocó en el centro del claro, el sensor S_2 sobre el borde largo y el sensor S_3 a la mitad del claro corto y a un cuarto del claro largo.

Para el cálculo de la frecuencia natural mediante análisis numéricos es importante el criterio del mallado de la losa de concreto sobre lámina de acero; pues de ello depende la aproximación. En este trabajo el mallado de la losa se realizó con base a la separación de la malla electrosoldada, dividiendo el espesor y valle de la losa a la mitad, pues un mallado más fino sólo tendría un gasto computacional innecesario.

En el tablero T_1 , las aceleraciones por el caminar de una persona no son aceptables con base en los umbrales proporcionados por las NTCEA-20. Además, las aceleraciones para el correr de una persona tampoco son aceptables, ni tampoco las aceleraciones para el brincar de una persona son aceptables, dependiendo de la ubicación de la persona. Aunque las aceleraciones en este tablero son no aceptables para la mayoría de las actividades, esto no significa que la losa esté mal diseñada para soportar las cargas actuantes, simplemente, que para condiciones de servicio no son adecuados.

En base a los resultados de las pruebas experimentales, se demuestra que la función de carga propuesta por Murray (1975) y lo recomendado en la norma AISC (1997), descrita en la ecuación (1), proporciona una buena aproximación de la aceleración en los análisis de modelado numérico. Pues ésta muestra un porcentaje de error menor del 10% en comparación a las demás funciones de carga propuestas en la literatura.

El espesor de la lámina no tiene mayor influencia en el cálculo de la frecuencia natural, aunque aumenta resistencia de diseño. El aumentar el espesor de la losa de concreto con uno de peso normal, las aceleraciones disminuyen al igual que las frecuencias, pero se incrementa la masa y, en consecuencia, repercute en el diseño sísmico. Finalmente, la separación de las vigas secundarias comprendidas entre 1.4 m y 2.0 m los desplazamientos tiene poca variación, a diferencia de la velocidad y la aceleración. En separaciones mayores a 3.0 m y con espesores de concreto mayor a 8.0 cm las aceleraciones tienen poca variación.

Al evaluar las vibraciones del tablero principal, centro geométrico del tablero, y del centro de los tableros secundarios, se mostró que ocurren aceleraciones locales en los sub-tableros, las cuales son mayores a las del modo fundamental en el centro del tablero principal. Aunque este argumento pareciera obvio en separaciones mayores a 2.0 m, esto ocurre inclusive en separaciones mínimas propuestas en manuales de diseño de fabricantes. De igual manera estas aceleraciones se validan mediante pruebas experimentales obtenidas por el caminar de una, dos y tres personas. De estas pruebas se obtuvieron sus respectivos espectros de potencia, el cual se observa que, a medida que aumenta el número de personas en el tablero, existen otros modos que contribuyen más en las vibraciones.

El incrementar el módulo elástico del concreto reduce hasta un 23% las aceleraciones, el incremento de la inercia de las vigas secundarias reduce las aceleraciones hasta un 20%, el incrementar el peralte del concreto con uno ligero reduce hasta un 23% las aceleraciones. Por otro lado, el incrementar la rigidez de las vigas principales y el incrementar la sección de las columnas no son una opción para reducir las aceleraciones.

Expresiones prácticas para calcular la frecuencia natural y la aceleración que no requieren de realizar modelos numéricos detallados se desarrollan para trabajos futuros.

AGRADECIMIENTOS

El segundo autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca para sus estudios de Maestría. Se agradece al Dr. Manuel Eurípides Ruíz Sandoval Hernández por el apoyo para realizar las pruebas experimentales. Todos los autores agradecen las facilidades brindadas por la Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, para el desarrollo de este trabajo.

Referencias

1. AISC-97 (1997), "Steel Design Guide 11, Floor vibrations due to human activity", American Institute of Steel Construction, Chicago, Estados Unidos.
2. Caballero O. (2020), "Determinación de recomendaciones de diseño de losas de vigueta y bovedilla y losas macizas de concreto reforzado sujetas a vibración", Tesis de doctorado, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana.
3. Chen S., Zhang R., Zhang J. (2018), "Human-induced vibration of steel-concrete composite floors", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, **171(1)**, 50-63. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00179>
4. CSI (2009), "Analysis reference manual for SAP2000", Computers & Structures, Berkley.
5. Hicks S.J. (2004), "Vibration characteristics of steel-concrete composite floor systems", *Progress in Structural Engineering and Materials*, **6(1)**, 21-38. <https://doi.org/10.1002/pse.163>
6. Mashaly E., Ebrahim T.M., Abou-Elfath H., Ebrahim O.A. (2013), "Evaluating the vertical vibration response of footbridges using a response spectrum approach", *Alexandria Engineering Journal*, **5(2)**, 419-424. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.06.003>
7. Mello A., da Silva J.G.S., Vellasco P.C.G. da S., de Andrade S.A.L., de Lima L.R.O. (2008), "Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams", *Journal of Constructional Steel Research*, **64(1)**, 1142-1151. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.09.011>
8. Murray, T.M. (1975), "Design to prevent floor vibrations", *AISC Engineering Journal*, **12(3)**, 82-87.
9. NTCEA-20 (2020), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Gaceta Oficial del Distrito Federal. México D.F.

10. NTCC-17 (2017), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Gaceta Oficial del Distrito Federal. México D.F.
11. Varela, W.D. (2004), "Modelo teórico-experimental para análisis de vibrações induzidas por pessoas caminando sobre lajes de edificios", Tesis Doctoral, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
12. Varela W.D., Battista R.C. (2011) "Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks", *Engineering Structures*, **33 (9)**, 2485-2494. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.021>.