

<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria>
ISSN 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

AGOSTO/DICIEMBRE 2013 - VOLUMEN 23 Número (2)



FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE ENTREPISOS: MÉTODOS ANALÍTICOS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

*Luis Carlos Esquivel Salas
Pío Alberto Miranda Jenkins*

Resumen

Se presenta la estimación por métodos analíticos de la frecuencia fundamental de tres entrepisos de sección compuesta y su validación experimental mediante instrumentación en campo. Las frecuencias naturales teóricas se comparan con las experimentales determinadas a partir de pruebas dinámicas, logrando la comprobación experimental de los métodos analíticos, por lo que se pudo determinar cuál de ellos realiza una estimación más realista de la frecuencia fundamental. Adicionalmente, se determinaron las frecuencias naturales del Modo 2 experimentalmente y se generaron las deformadas correspondientes a los Modos 1 y 2, con lo que se pudo verificar si se logró excitar el Modo que se pretendía. Entre las principales conclusiones se determinó que el método de Murray estima de manera más precisa y exacta la frecuencia fundamental de los entrepisos, con errores por debajo del 3 %. Así mismo, se concluye que la rigidez de los acabados de piso debe ser tomado en cuenta a la hora de calcular la inercia de la sección compuesta, disminuyendo los errores del cálculo de la frecuencia fundamental hasta en un 16 %.

Palabras clave: frecuencia fundamental, entrepisos, pruebas dinámicas, vibraciones.

Abstract

The estimation of the fundamental frequency by analytic methods and its experimental validation it's presented. The theoretical natural frequencies are compared with the experimental ones determined by means of dynamic tests. With this, the experimental validation of the analytic methods is achieved and the method which estimates the fundamental frequency in a more realistic way can be determined. In addition, the natural frequencies of Mode 2 are determined experimentally and the deformed shapes of the floors for Modes 1 and 2 where generated, to verify which modes were excited. One of main conclusions is that the Murray method estimates in a more precise and exact way the fundamental frequency of floors, with an error below 3 %. Another important conclusion is that the rigidity of the floor finishes has to be taken into account, reducing the error up to 16 %.

Keywords: fundamental frequency, floors, dynamic tests, vibrations.

Recibido: 17 de julio de 2013 **Aprobado:** 21 de octubre de 2013

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aporte

Esta investigación tiene su mayor aporte en las pruebas dinámicas, ofreciendo datos y una

metodología para un tipo de prueba de realización sumamente escasa en nuestro país. Aunado a esto, se comparan resultados de estimaciones analíticas de la frecuencia fundamental con los resultados de estas pruebas, obteniendo conclusiones valiosas sobre los métodos de análisis de vibraciones en entrepisos aplicados.

1.2 Antecedentes

Los entrepisos al igual que otras partes de una estructura, la totalidad de la estructura o cualquier otro cuerpo, posee características dinámicas intrínsecas; una de ellas es la frecuencia natural fundamental.

Murray, Allen & Ungar (2003) definen la frecuencia natural como la frecuencia a la que oscila un cuerpo cuando este es desplazado de su posición de equilibrio y se deja vibrar libremente. Además aclara que todas las estructuras tienen muchas frecuencias naturales, y es a la menor de estas la que se designa como frecuencia natural fundamental o frecuencia fundamental. El término “natural” se utiliza para enfatizar que estas frecuencias solamente dependen de la masa y rigidez de la estructura.

La frecuencia natural fundamental es el parámetro dinámico principal en el análisis de vibraciones en entrepisos provocadas por la acción de caminar. Esto debido a que está muy relacionada con el fenómeno de resonancia, el cual consiste en un aumento importante de las amplitudes de las vibraciones que ocurre cuando la frecuencia excitadora iguala o es muy cercana a la frecuencia natural fundamental de un cuerpo.

Así mismo, la aceleración en la que incurrir el entrepiso es calculada a partir de la frecuencia fundamental, y esta aceleración es la que se compara con los límites máximos permitidos basados en la percepción humana de vibraciones. Esto significa que un pequeño error en su cálculo puede representar la diferencia entre aceptar o rechazar el diseño de un entrepiso por vibraciones.

En los últimos años este tipo de análisis ha ganado notable importancia, ya que los entrepisos diseñados para evitar vibraciones con criterios antiguos fueron criticados por sus ocupantes al respecto. El problema ocurre principalmente en entrepisos de sección compuesta, ampliamente utilizados en edificaciones con sistemas estructurales en acero. La razón principal se asocia a lo relativamente livianos y el poco peralte de este tipo de entrepisos, por lo que hay una disminución en la masa responsable de la atenuación de vibraciones.

2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN ENTREPISOS

Se seleccionaron los objetos de estudio conformados por tres entrepisos de sección compuesta. Las características que se evaluaron para la escogencia fueron tres: accesibilidad a los planos estructurales, diferencia en el uso de los entrepisos y finalmente que el propietario estuviera anuente a que se realizaran las pruebas, ofreciendo un espacio de tiempo suficiente para la realización de las mediciones sin mayores interrupciones.

El primer entrepiso forma parte de una torre de apartamentos en construcción, por lo que al momento de la prueba el entrepiso estaba desnudo, sin ningún elemento no estructural. El sistema de entrepiso consta de vigas y viguetas de acero sobre las que descansan las láminas del sistema APSADeck. Los pliegues de la láminas tienen un peralte de 63 mm, mientras que la sobrelosa de concreto de resistencia $f'c = 20,6$ MPa (210 kg/cm²) tiene un espesor de 60 mm, para un espesor total de 123 mm.

El segundo entrepiso analizado fue el de un estacionamiento, terminado y en servicio. Al momento de la prueba el parqueo estaba cerrado al público, por lo que se realizó sin la presencia de vehículos. El mismo está compuesto por viguetas y vigas de acero, junto con el sistema METALDeck 2” calibre 22 con concreto de resistencia $f'c = 20,6$ MPa (210 kg/cm²), 50.8 mm de peralte de los pliegues y 70 mm de sobrelosa, para un espesor total de 120,8 mm.

El último entrepiso estudiado fue el de una oficina terminada y en servicio, con todos los elementos no estructurales típicos de estas instalaciones. Utiliza viguetas y vigas de acero sobre las que se coloca la losa de concreto prefabricado, con resistencia $f'c = 30$, MPa (310 kg/cm²), tipo Filigran de 70 mm de espesor. Sobre esta se cuela una losa de concreto de resistencia $f'c = 20,6$ MPa (210 kg/cm²) con un espesor de 80 mm, obteniendo un espesor total de 150 mm.

A cada uno de estos entrepisos se aplicaron cuatro métodos de análisis de vibraciones, a saber: general y simplificado, expuestos en el documento *P-354: Diseño de Entrepisos por Vibraciones: Un nuevo acercamiento* del Instituto de Construcción en Acero (SCI), revisada en

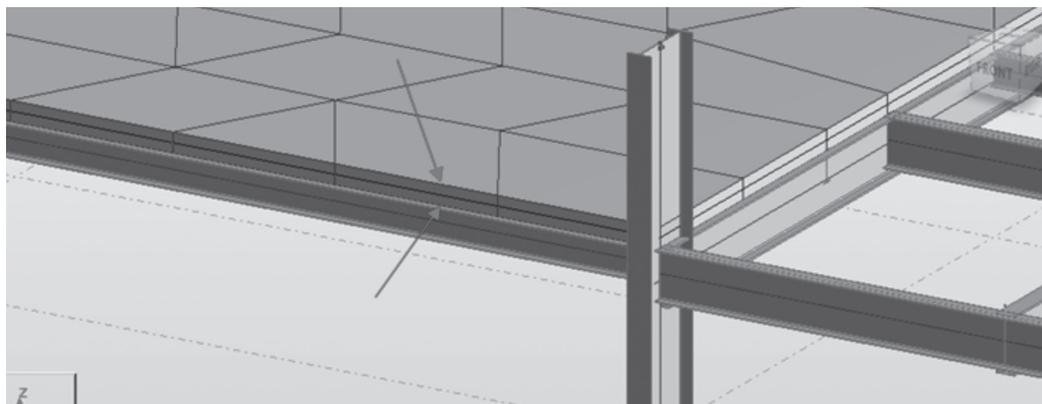


Figura 1. Excentricidad de vigas y viguetas con respecto a la losa de concreto.

Fuente: Elaboración propia, 2013

el 2009. El método de Murray, publicado en la *Guía de Diseño en Acero No. 11: Vibraciones de entrepisos debido a Actividades Humanas* del Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC), revisada en el 2003. Por último el método manual, desarrollado en la guía *Diseño por Vibraciones para Entrepisos del Fondo para la Investigación del Carbón y el Acero* en su proyecto *Vibraciones inducidas por actividades Humanas en Estructuras de Acero (HIVOSS)*. Estos métodos varían en el tiempo que toma su ejecución, dificultad de aplicación y etapa de diseño sugerida para su evaluación, como se muestra en el Cuadro 1.

2.1 Método General

Este método requiere la elaboración de un modelo de elemento finito, al cual se le aplica el análisis modal para obtener así las frecuencias naturales de cada uno de los modos de vibración. Para esta investigación se utilizó el programa de análisis estructural Robot Structural Analysis Professional 2011.

La guía de diseño ofrece algunas sugerencias a la hora de crear el modelo, como utilizar elementos tipo shell ortotrópicas para definir la sección de entrepiso compuesta por el deck y una losa de concreto, además la misma debe tener una excentricidad (igual al

Cuadro 1. Características de los métodos de análisis de vibraciones utilizados

Métodos de análisis de vibraciones	Tiempo de ejecución	Dificultad de aplicación	Etapas de diseño sugerida
Método General del SCI	Considerable	Alta	Final
Método Simplificado del SCI	Medio	Media	Final o Intermedia
Método de Murray	Medio	Media	Final o Intermedia
Método Manual de HIVOSS	Poco	Baja	Inicial

Fuente: Elaboración propia, 2013

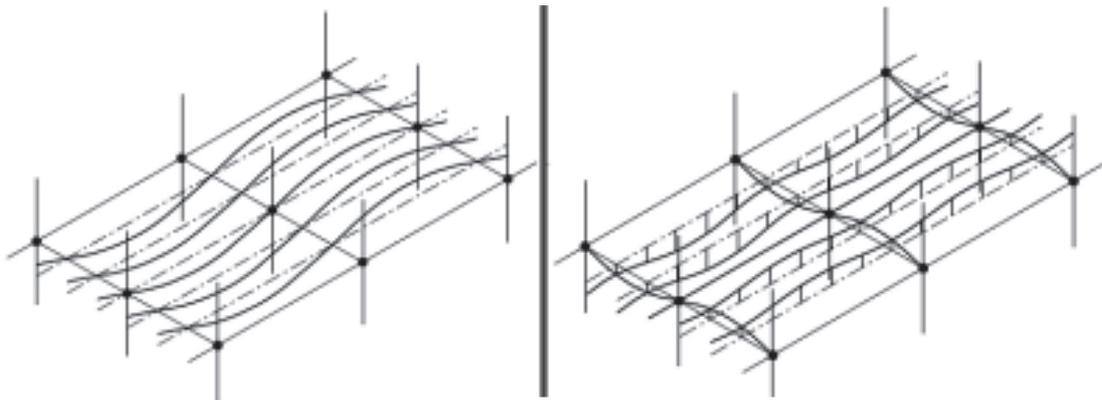


Figura 2. Modo de viga secundaria y primaria, respectivamente.

Fuente: Smith, Hicks & Devine, 2009.

espesor total de la losa) con respecto a las viguetas y vigas para asegurar una adecuada representación de la rigidez del sistema. Esto se muestra en la Figura 1.

Además, todas las conexiones deben asumirse como rígidas, aunque fueron diseñadas como conexiones de cortante; ya que los esfuerzos y deformaciones, debido a la acción de caminar, no superan la resistencia de fricción de las conexiones. Las columnas deben modelarse con su sección correspondiente y tener una articulación en sus puntos de inflexión teóricos (típicamente a la mitad de su altura). Por último, el tamaño de los elementos finitos debe ser tal que, al ser reducidos a la mitad, las frecuencias naturales no se modifiquen en gran medida.

2.2 Método Simplificado

Se deriva de la aplicación del método general a muchos entrepisos de mallas regulares para análisis de elemento finito. Para el cálculo de la frecuencia natural, supone dos posibles modos de vibración, modo de viga secundaria y modo de viga primaria (ver Figura 2).

Como se aprecia en la Figura 2, el modo de la viga secundaria asume las viguetas como apoyadas y las vigas como líneas nodales. En el caso del modo de viga primaria, las vigas vibran como elementos simplemente apoyados, mientras las

viguetas lo hacen como doblemente empotradas. En ambos casos la losa se asume empotrada entre las viguetas y utiliza secciones transformadas para vigas y viguetas compuestas. Consecuentemente con las condiciones de apoyo, se calculan las deflexiones para cada uno de los modos.

Con las deflexiones calculadas, se procede a determinar la frecuencia fundamental para cada modo y se escoge la menor de estas como la frecuencia fundamental del entrepiso. Para cada modo, la frecuencia natural fundamental se calcula con la Ecuación (1):

$$f_n = 18 / \sqrt{\delta} \quad (1)$$

Donde:

$f_n=1$: Frecuencia natural del modo 1 (Hz).

δ : Deflexión total del modo analizado (mm).

2.3 Método de Murray

El método de Murray calcula las deflexiones para una viga simplemente apoyada, tanto para la vigueta compuesta como la viga compuesta, en sus secciones transformadas a acero. En el caso de que las viguetas o vigas sean continuas, aplica una corrección a la deflexión calculada. De igual

forma, la deflexión se corrige si hay conexiones de momento a las columnas, por la rigidez que estas proporcionan a la conexión con la viga.

Con estas deflexiones, utilizando la relación de Dunkerly, se calcula la frecuencia fundamental del entrepiso, como lo muestra la Ecuación 2.

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \tag{2}$$

Donde:

$f_n=l$: Frecuencia natural fundamental del entrepiso (Hz).

Δ_j : Deflexión del modo de vigueta compuesta (m).

Δ_g : Deflexión del modo de viga compuesta (m).

2.4 Método Manual

Este método es el más simple de todos. Estipula que el modo predominante es de una vigueta compuesta simplemente apoyada, donde el cálculo de la frecuencia natural sería el siguiente:

$$f_v = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3E_s I_v}{0,49 \mu l^4}} \tag{3}$$

Donde:

f_v : Frecuencia fundamental de la vigueta compuesta (Hz).

E_s : Módulo de elasticidad del acero (N/m²).

I_v : Inercia de la vigueta compuesta (m⁴).

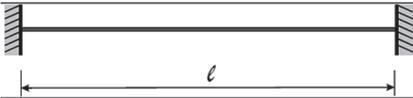
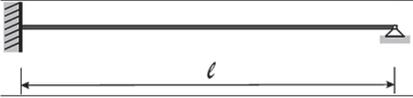
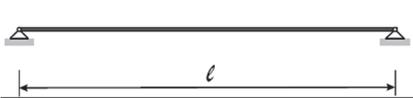
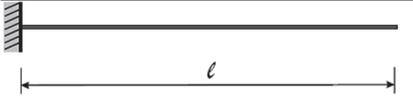
Condiciones de apoyo	Frecuencia natural	Masa Modal
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,37 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,2 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,49 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{0,24 \mu l^4}}$	$M_{mod} = 0,64 \mu l$

Figura 3. Frecuencia natural y masa modal para diferentes condiciones de apoyo.
Fuente: Smith, Hicks & Devine, 2009.

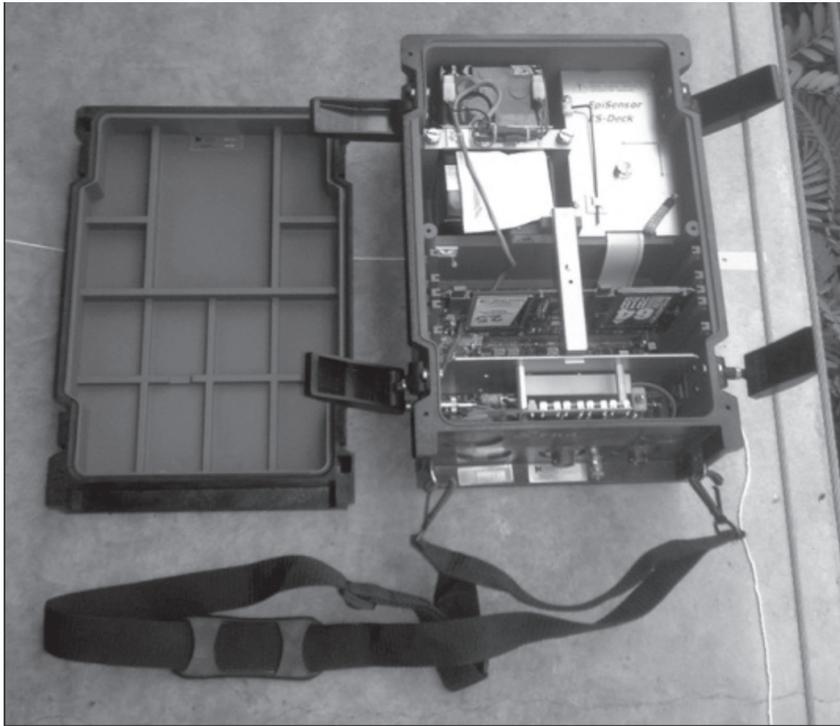


Figura 4. Acelerógrafo utilizado.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

μ : Masa distribuida sobre la vigueta compuesta (kg/m).

l : Longitud de la vigueta (m).

Si el diseñador considera que la viga no se puede aproximar como simplemente apoyada, el método ofrece otras ecuaciones para el cálculo de la frecuencia fundamental y la masa modal asociada a la vigueta compuesta. Estas ecuaciones se resumen en la Figura 3

3. PRUEBAS DINÁMICAS REALIZADAS

Consistió en la medición de las vibraciones y la aplicación del análisis de Fourier a los entrepisos analizados anteriormente en la fase teórica. Para realizar las mediciones se contó con la ayuda del

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, cuyo personal tiene experiencia en el manejo de acelerógrafos digitales.

3.1 Metodología para la realización de las pruebas dinámicas

A continuación se expone la metodología creada y aplicada en esta investigación para realizar pruebas dinámicas a entrepisos de sección compuesta utilizando al menos tres acelerógrafos.

Los acelerógrafos utilizados son de marca Kinematics, modelo Etna y pertenecientes a la familia de instrumentos Altus (ver Figura 4). Poseen tres canales de medición, transversal (canal 1), longitudinal (canal 2) y vertical (canal 3), para efectos de este trabajo se registraron las aceleraciones en la dirección vertical únicamente.

En el sitio se recomienda colocar los acelerógrafos de manera tal que sus ejes

transversales, o longitudinales, se encuentren alineados. Además, se debe revisar que los tres pines de nivelación del acelerógrafo, ubicados en la parte inferior del mismo no se apoyen sobre algún obstáculo entre estos y la superficie de medición, ya que perjudica la toma de datos.

El objetivo que se buscó, cuando se realizaron las pruebas, fue poder excitar el entrepiso por medio de una carga impulsiva y dejarlo vibrar libremente. Con los acelerógrafos se midieron las aceleraciones y se generaron los acelerogramas, de los cuales se obtienen los espectros de Fourier por medio de la transformada de Fourier, donde se pueden leer las frecuencias naturales.

A modo de preparación preliminar, se estudiaron los planos del entrepiso, donde se muestran las secciones de columnas y vigas, sección del entrepiso y especificaciones de los materiales utilizados (tales como los tipos de acero, resistencia a compresión del concreto).

Se procedió a realizar una visita al sitio para verificar la información mostrada por los planos, así como para identificar posibles cambios recientes no contemplados en los mismos y la distribución espacial de muebles, otros objetos o personas que se deberían tomar en cuenta a la hora de la medición.

Con la ayuda de los planos (comprobados y actualizados) se elaboró un modelo en tres dimensiones preliminar del entrepiso con el

cual se pudo estudiar, de manera teórica y por medio del análisis modal, la deformada asociada a cada modo natural. Utilizando este modelo se definieron los puntos de colocación de los acelerógrafos y de aplicación de la fuerza excitadora, ya que en la deformada del entrepiso para cada modo de interés se pudo apreciar los puntos de desplazamientos nulos y máximos.

Tomando en cuenta el área de estudio y los puntos de colocación de los acelerógrafos, se elaboró un croquis con la cuadrícula que deberá dibujarse en el campo para la realización de las mediciones. Este croquis varió según el modo excitado, ya que el Modo 1 no tiene puntos de inflexión entre los apoyos, mientras el Modo 2 tiene un punto de inflexión en el centro del claro entre los apoyos, por lo que la cantidad de puntos de medición para este fue mayor. Ejemplos de estos croquis se observan en la Figura 5.

Una vez en el sitio, lo primero que se hizo fue evaluar la necesidad de acordonarlo, esto en caso de que el tránsito de personas o vehículos fuera importante y pudiera haber afectado las mediciones; una vez resuelto esto se procedió a definir la cuadrícula con ayuda de cuerdas, tizas y marcadores en el espacio determinado para realizar la medición. Este es uno de los aspectos más importantes, ya que la colocación de los acelerógrafos y la aplicación de la fuerza excitadora a lo largo de

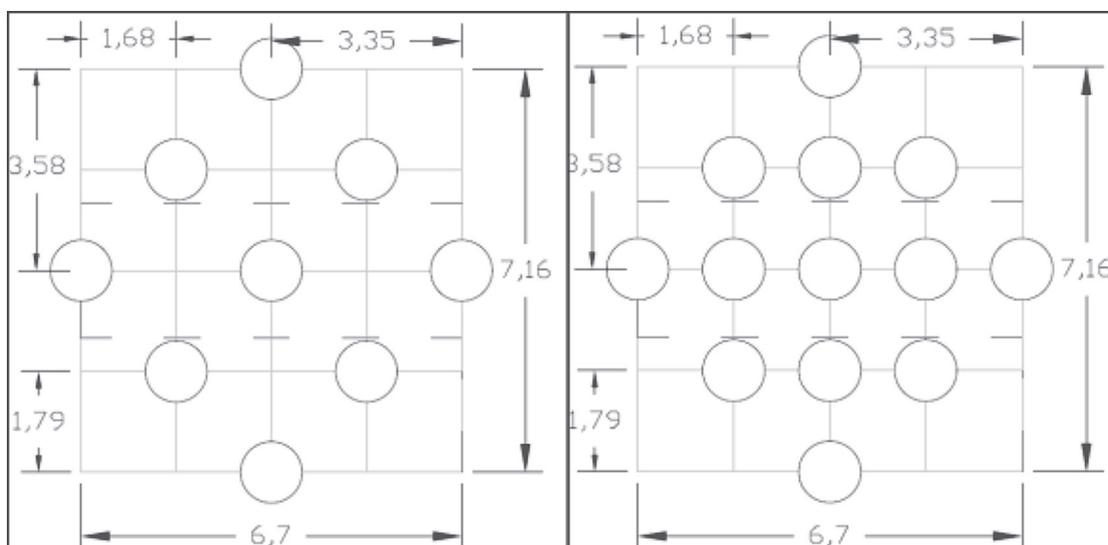


Figura 5. Croquis para el Modo 1 y 2, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

toda la medición se definen por medio de ésta.

Con la cuadrícula definida, se asignó a cada operario el manejo de un acelerógrafo, y a otro operario (se requieren de cuatro operarios en total) el provocar la excitación del entrepiso por medio de una llanta aro #13 con una presión de aire de 300 KPa, dejada caer a partir del reposo lanzada desde 1 m de altura (Cuevas, 2002). Se colocaron los acelerógrafos según los croquis realizados con anterioridad para cada prueba.

Dado que se contaba con tres acelerógrafos y el total de puntos de colocación de los acelerógrafos es de 9 para el Modo 1 y 13 para el Modo 2, se hicieron arreglos de tres puntos. En cada uno de estos la fuerza excitadora se aplicó tres veces, con el objetivo de trabajar con el promedio de estos tres registros y así atenuar posibles excitaciones externas no controladas.

Los acelerógrafos se calibraron de tal manera que el nivel de disparo fuera lo suficientemente alto para que estos no se dispararan por fuerzas externas. Esto es importante, ya que todos los acelerógrafos debían de dispararse aproximadamente al mismo tiempo para obtener registros comparables y evitar que alguno dejara de medir cuando se excitara el entrepiso.

Debido a que el nivel de disparo era un

poco alto, los acelerógrafos se dispararon de forma manual por medio de un pequeño golpe efectuado al mismo tiempo por cada uno de los operarios al acelerógrafo bajo su cargo. Luego se esperaban 10 segundos y se dejaba caer la llanta sosteniéndola en su rebote para lograr un único golpe seco, finalmente se dejaba pasar el tiempo del post-evento hasta que los acelerógrafos dejaran de registrar.

Al finalizar la medición para cada arreglo, había que mover los acelerógrafos de lugar por lo que se procedía a apagarlos. Esto ayudó a identificar cuando se cambiaba de arreglo, ya que al momento del análisis todos los registros de ese día se encontraban almacenados en la carpeta creada por el acelerógrafo, en la memoria flash.

3.2 Corrección de los acelerogramas en SMA

Los registros obtenidos de las mediciones (de extensión .evt), llamados acelerogramas, tienen una duración aproximada de 60 segundos y pueden ser leídos con el software Strong Motion Analyst (SMA) de Kinemetrics, del cual el LIS posee una licencia. Este minuto de tiempo está compuesto

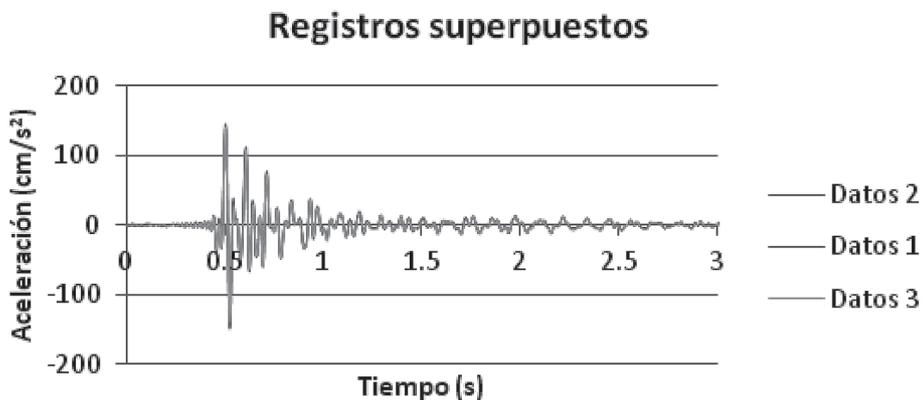


Figura 6. Registros superpuestos del acelerógrafo LIS 3, posición 1 para el Modo 1.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

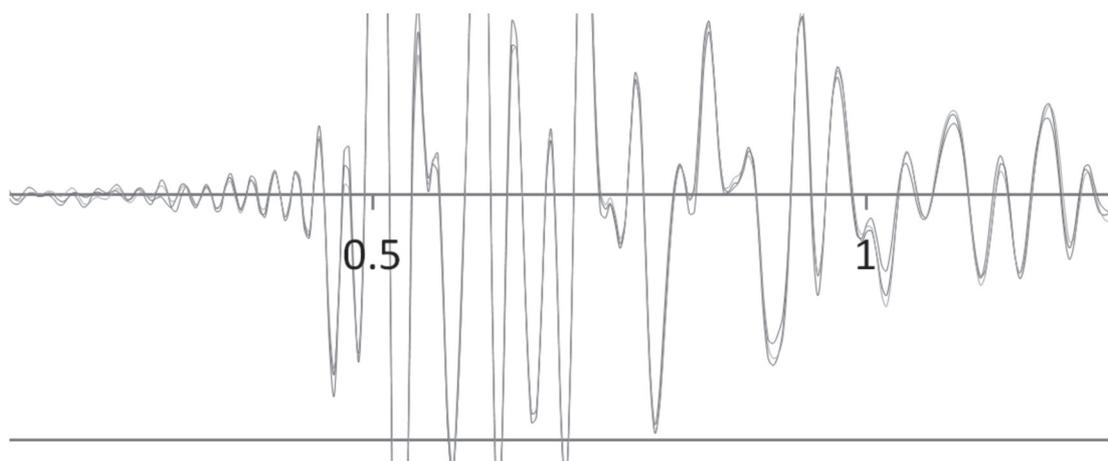


Figura 7. Ampliación de los registros superpuestos.

Fuente: Elaboración propia, 2013.

por la memoria pre y post-evento, el tiempo que se esperaba para dejar caer la llanta y el tiempo que duraba el entrepiso en atenuar la excitación.

Los acelerogramas se deben corregir primeramente eliminando el desfase (offset en inglés) de los datos, seguido por las correcciones por instrumento y línea base. Como resultado, se obtienen registros de aceleraciones corregidos que pueden ser trabajados en cualquier programa, ya que el programa SMA ofrece la opción de almacenar el registro corregido en un archivo de texto (.txt).

3.3 Obtención de las aceleraciones promedio

Se debe recordar que las correcciones anteriores son realizadas a la totalidad del acelerograma (60 segundos), mientras que la ventana de tiempo que interesa es de tres a seis segundos. Esta ventana varía según el amortiguamiento del entrepiso analizado, ya que en los tres o seis segundos se debían de disipar por completo las vibraciones.

Es por esto que los acelerogramas se exportaron a Excel, en el cual se creó una hoja de cálculo donde se podían extraer los datos correspondientes a la ventana de tiempo requerida para facilitar y aclarar la parte de la señal que se quiere analizar. Una vez que se tienen los acelerogramas con la ventana de tiempo requerida,

se procedió a obtener las aceleraciones promedio para cada posición de los distintos acelerógrafos.

Para esto se compararon los tres registros de cada posición, uno sobre el otro en un mismo gráfico, con el fin de comprobar que estuvieran en la misma fase y tuvieran igual forma, mostrando solamente diferencias en amplitudes. Esto se puede observar en la Figura 6.

Para poder apreciar si los registros se encuentran en fase y tienen la misma forma debe analizarse la Figura 6, y con una ampliación a los 0.5 segundos en la Figura 7.

Se observa que para el acelerógrafo LIS 3, posición 1 para el Modo 1, los tres registros presentan la misma forma y fase con diferentes magnitudes de aceleración, por lo que en este caso se promedian los tres registros para obtener los valores de aceleración promedio. En el caso de que alguno de los tres hubiera tenido una forma o fase diferente, la aceleración promedio se obtiene de los dos registros restantes.

Este proceso es de suma importancia debido que asegura que los valores de aceleraciones promedio calculados son correctos, es decir, que no se están promediando amplitudes de diferente signo. Esto puede ocurrir al promediar registros con formas o fases diferentes, obteniendo como resultado una disminución drástica de la magnitud de las aceleraciones realmente medidas.

Después de aplicar este proceso a los tres arreglos del Modo 1 y cinco arreglos del Modo 2 para cada acelerógrafo, se obtiene un registro

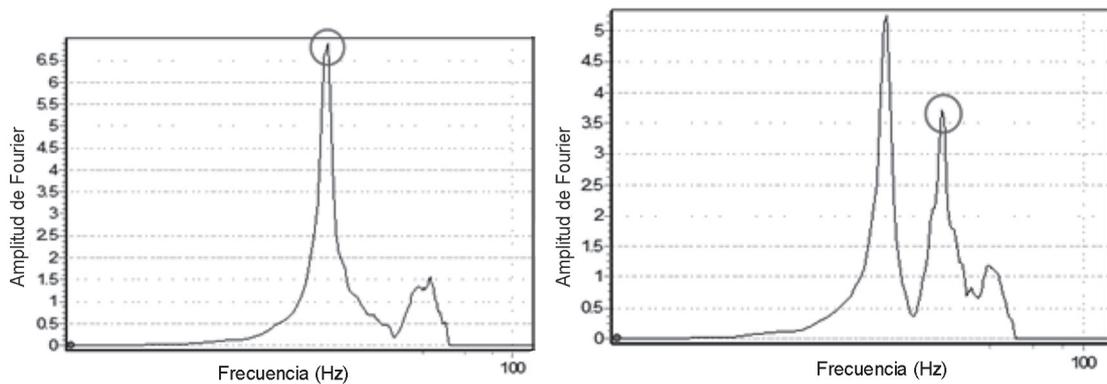


Figura 8. Ampliación de los registros superpuestos.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

por cada posición, el acelerograma de las aceleraciones promedio. Estos acelerogramas son los que se analizan en el programa de análisis de registros sísmicos, con el fin de aplicar otras correcciones y el método de Fourier.

Para este trabajo se utilizó el programa de análisis de registros sísmicos SeismoSignal versión 4.1.2 de SeismoSoft Ltd, para el cual se solicitó una licencia académica.

3.4 Corrección de los acelerogramas en SeismoSignal versión 4.1.2

Una vez que se obtuvieron los datos correspondientes a las vibraciones del entrepiso, se exportaron al programa SeismoSignal. En el mismo fue necesario aplicar un filtro a los datos para suavizar la señal, luego de esto se revisó que las velocidades y desplazamientos mostraran un comportamiento adecuado, esto es, que no existiera una deformación inicial o permanente (empezaran y terminaran en cero) y los valores oscilaran alrededor del eje x.

3.5 Obtención de las frecuencias naturales

Una vez obtenidos los acelerogramas corregidos con la ventana de tiempo requerida,

el programa procede a aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés). La salida del programa es una tabla con las frecuencias, períodos, amplitudes y ángulos de fase para cada dato ingresado en el acelerograma, además de la representación gráfica de la frecuencia contra las amplitudes, que es precisamente el espectro de amplitudes de Fourier (Hoffman, 2010).

En la Figura 8, se pueden apreciar los espectros de Fourier del Modo 1 y 2 respectivamente, obtenidos para el entrepiso de la oficina. El círculo denota la frecuencia natural del modo que se pretendió excitar.

3.6 Obtención de las deformadas

Para asegurarse que las frecuencias naturales obtenidas correspondieran a los Modos 1 y 2, se estudiaron las deformadas de cada entrepiso producto de la excitación de los mismos. Para realizar estas deformadas se utilizó el programa Surfer versión 8.02 de Golden Software para modelar superficies, el cual necesita como datos de entrada el desplazamiento en varios puntos de la superficie.

Se procedió a tabular los desplazamientos y coordenadas de cada punto en Excel para ingresarlos a Surfer y a partir de estos calcular la deformada del entrepiso. Con estos datos, Surfer completa la deformada por medio de aproximaciones

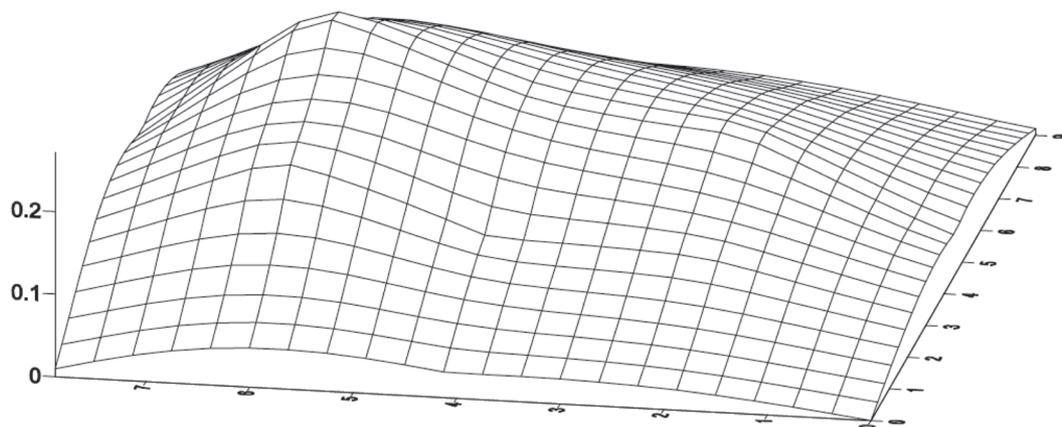


Figura 9. Deformada típica del Modo 1.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

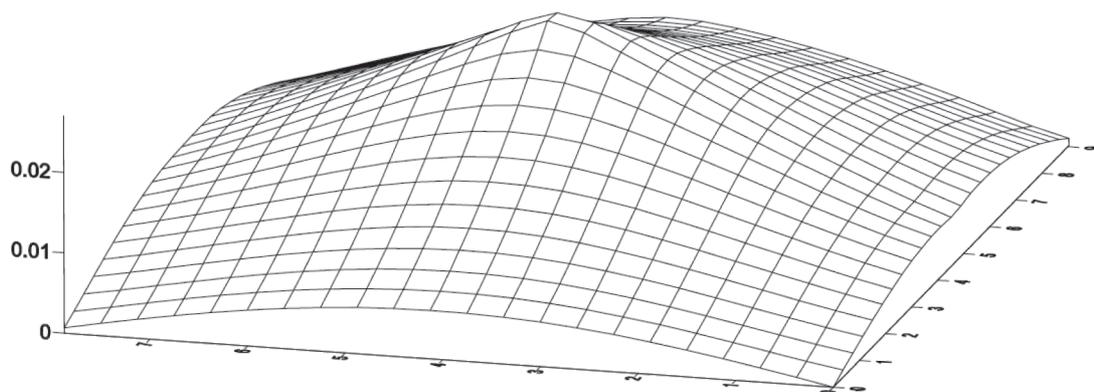


Figura 10. Deformada típica del Modo 1 y 2 superpuestos.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

Cuadro 2. Frecuencias naturales fundamentales calculadas analíticamente

Frecuencia natural fundamental (Hz)	Sitios de medición			
	Torre en construcción	Parqueo	Oficina	
Método para obtener la f_1			Incluyendo rigidez de la cerámica	Sin incluir rigidez de la cerámica
Murray	8,97	5,03	9,44	7,94
Simplificado SCI	9,99	5,91	8	7,36
General SCI	9,8	5,47	9,46	8,6
Manual	9,77	5,76	7,84	6,39

Fuente: Elaboración propia, 2013

Cuadro 3. Frecuencias naturales fundamentales determinadas experimentalmente

Lugar de la Prueba	Frecuencia natural fundamental f_1 (Hz)	Frecuencia natural del modo 2 f_2 (Hz)
Torre en construcción	8,79	13,28
Parqueo	5,08	6,84
Oficina	9,77	18,75

Fuente: Elaboración propia, 2013

Cuadro 4. Porcentajes de error para las frecuencias naturales fundamentales calculadas

Porcentaje de error	Sitios de medición			
	Torre en construcción	Parqueo	Oficina	
Método para obtener la f_1	Tomada como exacta	Tomada como exacta	Incluyendo rigidez de la cerámica Tomada como exacta	Sin incluir rigidez de la cerámica Tomada como exacta
Medición en sitio				
Murray	2%	1%	3%	19%
Simplificado SCI	14%	16%	18%	25%
General SCI	11%	8%	3%	12%
Manual	11%	13%	20%	35%

Fuente: Elaboración propia, 2013

polinómicas entre los puntos con que se cuenta el desplazamiento medido en la prueba.

En la Figura 9 se muestra la deformada a los 0,515 segundos de aplicar la excitación al entrepiso. Corresponde al Modo 1, por lo que se puede apreciar la forma de domo, con los desplazamientos disminuyendo a medida que se acercan a las fronteras, lo cual es lógico ya que en ellas la rigidez de las vigas restringen más los desplazamientos.

La Figura 10 muestra la deformada del Modo 1 y 2 superpuestos. No se podía obtener la deformada del Modo 2 solamente, ya que para esto sería necesario contar con un motor con carga excéntrica, el cual pudiera aplicar al entrepiso una fuerza con una frecuencia determinada (igual a la frecuencia natural del Modo 2) y así excitar solamente este modo.

Lo anterior explica la forma de la deformada, la cual tiene un desplazamiento máximo en el punto de aplicación de la fuerza y se aprecia como empieza a formarse una doble curvatura que es interrumpida por los desplazamientos correspondientes al Modo 1. Nuevamente, los desplazamientos van disminuyendo conforme se acercan a las fronteras de la bahía.

En las deformadas anteriores se invirtieron los desplazamiento, los cuales inicialmente se verían hacia abajo del plano del entrepiso. Esto se hizo con el objetivo de apreciar con mayor claridad la forma de la deformada.

RESULTADOS

En esta sección se presentan las estimaciones obtenidas de las frecuencias naturales por medio de los métodos analíticos y las pruebas dinámicas, así como la comparación entre estas.

El Cuadro 2 muestra las frecuencias calculadas por los métodos analíticos. Para el caso de la oficina, se realizó el cálculo de la frecuencia natural fundamental incluyendo la rigidez de la cerámica y sin incluir la rigidez de la misma, esto para demostrar lo sensible que es la frecuencia natural fundamental con respecto a la inercia de los acabados de piso.

El Cuadro 3 muestra las frecuencias naturales para el Modo 1 y 2 obtenidas de las pruebas dinámicas:

Con el fin de aclarar y simplificar la comparación entre los Cuadros 2 y 3, se calcularon los porcentajes de error asociados a cada frecuencia fundamental obtenida por métodos analíticos. Los resultados son expuestos en el Cuadro 4.

Analizando los resultados expuestos, se llega a la conclusión de que se debe incluir la rigidez de los acabados de piso para reducir en aproximadamente 7 % a 16 % el porcentaje de error de la estimación de la frecuencia natural fundamental. Este porcentaje de error aumentará a medida que aumente el módulo elástico y el espesor del acabado que será utilizado.

Por ejemplo, en las guías de diseño estudiadas no se incluía el acabado de piso ya que generalmente se utilizaba alfombra o piso falso, el cual tendrá un aporte nulo a la rigidez del sistema. Esto debido a que la alfombra se deforma muy fácilmente; no opone una resistencia a la deformación significativa que altere la rigidez del entrepiso. Por otro lado, en es muy común el uso de cerámica o porcelanato como acabado de piso, los cuales tienen un efecto importante en la rigidez del sistema, como ya se demostró.

Un punto de análisis interesante obtenido del estudio de todos los espectros de Fourier (Esquivel, 2012) calculados para cada prueba (de los cuales se leyeron las frecuencias naturales), es que dependiendo del punto de excitación, y por consiguiente de la forma del modo, cada sitio de colocación de los acelerógrafos se afecta según el desplazamiento que experimente debido al modo.

Esto se aprecia en los espectros del Modo 2 correspondientes al punto de cero desplazamiento para este modo (aproximadamente en el centro, ver Figura 11), donde no aparece el pico respectivo a la frecuencia natural de este Modo 2, sino solamente al del Modo 1 (ver Figura 12, donde la posición L5M2P2 corresponde al punto de cero desplazamiento); estos resultados son consistentes con los obtenidos por Alvis (2001).

Por último, se muestran los resultados de las deformadas obtenidas para el Modo 1 y los Modos 1 y 2 superpuestos. Consisten en los desplazamientos máximos (D) medidos en el instante de tiempo t.

Del Cuadro 5 se puede notar como los desplazamiento para la oficina son los menores de las tres pruebas realizadas. Esto debido a que este entrepiso contaba con una mayor rigidez

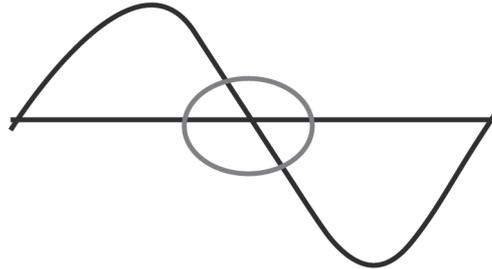


Figura 11. Punto de cero desplazamiento para el Modo 2.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

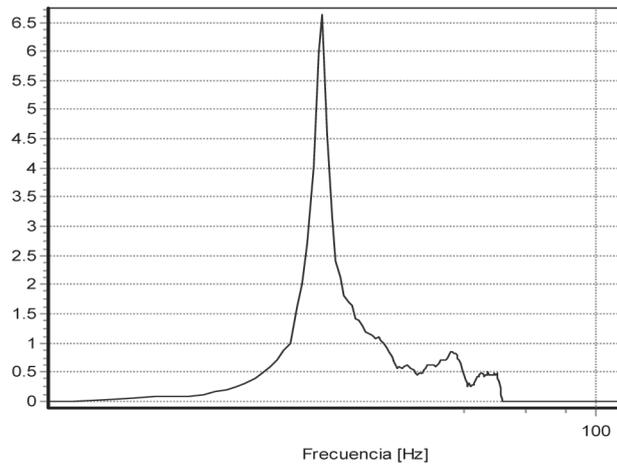


Figura 12. Espectro de Fourier correspondiente a la excitación del Modo 2, posición L5M2P2.
Fuente: Elaboración propia, 2013.

Cuadro 5. Desplazamientos máximos calculados a partir de laspruebas dinámicas

Lugar	Modo 1		Modo 1 y 2 superpuestos	
	D (mm)	t (s)	D (mm)	t (s)
Torre en construcción	0,28	0,505	0,28	0,515
Parqueo	0,18	0,52	0,17	0,52
Oficina	0,104	0,515	0,113	0,515

Fuente: Elaboración propia, 2013

proporcionada por una losa maciza de 150 mm y el aporte de los acabados de piso.

Del estudio de las formas de la totalidad de las deformadas obtenidas (Esquivel, 2012) se puede concluir que efectivamente se excitaron los modos que se pretendían, por lo que las frecuencias naturales obtenidas presentadas en el siguiente apartado corresponden a la frecuencia natural fundamental y la frecuencia natural del Modo 2.

CONCLUSIONES

El método de Murray es el que predice de forma más exacta y precisa las frecuencias naturales fundamentales de los entrepisos de sección compuesta estudiados, con errores en la estimación de la frecuencia natural fundamental menores al 3 %.

Un detalle responsable de que el método de Murray tenga errores tan bajos es la longitud efectiva de la sección compuesta, la cual este método toma como 0,4 de la luz del elemento, mientras los otros métodos la toman como 0,25 de la luz del elemento. Esto se refleja en una disminución del error de 5 %, si el método simplificado del SCI utilizara 0,4 en lugar de 0,25.

El método simplificado del SCI reporta errores alrededor del 16 %, requiriendo una inversión de tiempo muy parecida a la del método de Murray para aplicarlo. Este porcentaje de error puede deberse a varios factores, como el módulo elástico dinámico que utiliza, el cual solamente es función del peso del concreto y no de resistencia a la compresión.

Otro factor es que no se corrige por la rigidez que aportan las columnas y la subsecuente disminución en la deflexión, sino que el modo de viga secundaria supone la rigidez de las columnas como infinita (la viga no sufre deflexiones) y el modo de viga primaria supone la rigidez de las columnas igual a cero (viga simplemente apoyada), luego se escoge la mayor de estas deflexiones para definir la frecuencia natural fundamental. Se trabaja con extremos de condiciones de rigidez, no con condiciones de rigidez más realistas, como lo hace el método de Murray en su corrección por el efecto de la rigidez de las columnas.

El método general del SCI reporta mejores resultados que el simplificado, como es de esperar, pero aún son altos para el nivel de tiempo que se requiere invertir en su aplicación, el cual depende de la habilidad del diseñador para elaborar modelos de elemento finito.

En el método manual se observó un aumento en el error del cálculo de la frecuencia natural de alrededor del 8 % para el entrepiso de la oficina. Esto hace pensar que la rigidez de las columnas de este entrepiso en particular afecta de mayor forma el desplazamiento calculado, y por ende la frecuencia natural fundamental del sistema. Así mismo, este método deja más puntos importantes a criterio del diseñador, ya que no selecciona las condiciones de apoyo como lo hacen el método de Murray y del SCI.

La rigidez de los acabados de piso debe tomarse en cuenta, independientemente del método que se siga, para estimar la frecuencia natural fundamental de un entrepiso, ya que reduce los errores de estimación hasta en un 16 %. Esto conduce a pensar que el uso del entrepiso, bajo el cual se realiza el análisis, es sumamente importante, ya que no se puede asegurar que el problema por las vibraciones producidas debido a la acción de caminar no se presentará en caso de cambio de uso.

Son de suma importancia las correcciones a las deflexiones, tanto por continuidad de las vigas o viguetas como por la rigidez de las columnas, ya que de estas depende directamente el cálculo de la frecuencia natural (son inversamente proporcionales dentro de la raíz cuadrada).

Es posible, mediante la aplicación de una fuerza de excitación en el punto correspondiente a máximo desplazamiento, excitar los Modos 1 y 2 por medio de una carga impulsiva. La corroboración de esto se puede realizar por medio de un estudio de la deformada, la cual puede construirse utilizando un programa para modelar superficies, con los desplazamientos en cada punto como los datos de entrada y una interpolación polinómica entre estos datos.

En una prueba dinámica que utiliza una carga impulsiva como medio para excitar el entrepiso, no se tiene control de la cantidad de modos que se excitan ni del aporte de energía de cada uno de estos. Pero esto, si los puntos de excitación y medición

son bien escogidos, no debería afectar la medición de las frecuencias naturales para los Modos 1 y 2.

El método de Fourier es apto para la determinación de las frecuencias naturales a partir de un acelerograma en donde participan varios modos, pero hay que aclarar que se deben aplicar los filtros y correcciones pertinentes para obtener resultados confiables, especialmente de los desplazamientos. Esto debido a que una filtración o corrección errónea provoca la eliminación de alguna parte de los datos o disminución importante en las amplitudes de los parámetros, lo cual aumenta de gran manera a la hora de calcular los desplazamientos (aplicar integración doble a las aceleraciones).

Se debe tener en cuenta que en los puntos de cero desplazamiento para el modo que se pretende excitar, esta frecuencia no se verá reflejada en el espectro de Fourier. Podría cometerse el error de omitir la lectura de la frecuencia pretendida de no estar consciente de esto, en caso de utilizar muy pocos puntos de medición y que la ubicación de estos sea en los puntos de cero desplazamiento.

Es necesario realizar tres mediciones en cada punto de colocación de los acelerógrafos, esto para asegurar que no hay contaminación externa del registro por alguna frecuencia ajena a las del entropiso.

El uso de al menos tres acelerógrafos agiliza y posibilita un mayor mapeo del entropiso, obteniéndose más puntos de medición en períodos de prueba de tres horas aproximadamente. Adicionalmente, es importante una prueba preliminar, como la que se realizó para este trabajo en un mezzanine, para estimar parámetros de calibración para los acelerógrafos, siendo los más importantes la sensibilidad del disparador y el tiempo para el pre-evento y el post-evento.

Para entropisos con poco amortiguamiento, muchos modos participan cuando este se excita, por lo que los espectros de Fourier presentan más picos con diferente magnitud de amplitud. En cambio, para entropisos con razones de amortiguamiento de al menos 3 %, los modos que se pretenden excitar son prácticamente los únicos que se verán reflejados en el espectro de Fourier.

Para entropisos con frecuencias bajas (alrededor de 5 Hz), las frecuencias naturales se encuentran más cercanas unas de otras que en entropisos de mayor frecuencia natural fundamental (alrededor de 9 Hz).

AGRADECIMIENTOS

Colaboraron en la investigación el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica y los propietarios e ingenieros que facilitaron la coordinación y permisos para realizar las mediciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvis, R (2001). *An Experimental and Analytical Investigation of Floor Vibrations*. Proyecto de Graduación para optar por el grado parcial de Maestría en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico y Universidad Estatal de Virginia, Virginia, Estados Unidos de América.
- Cuevas, A. (2002). *Identificación de Sistemas Estructurales de Entrepisos sujetos a Vibraciones Inducidas*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Esquivel, L. (2012). *Análisis de vibraciones provocadas por la acción de caminar en entropisos de sección compuesta*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Hoffman, F. *An Introduction to Fourier Theory*. Recuperado de <http://utcs1.phys.utk.edu/~forrest/papers/fourier.html> [Consultado el 2 de setiembre, 2010]
- Murray, T., Allen, G. & Ungar, E. (2003). *AISC Steel Design Guide Series II: Floor Vibrations due to Human Activity*. American Institute of Steel Construction, Chicago: USA.
- Research Found for Coal and Steel (2007). *Human induced Vibrations of Steel Structures: Vibration Design of Floors Guideline*. Reino Unido: Research Found for Coal and Steel.
- Research Found for Coal and Steel (2007). *Human induced Vibrations of Steel Structures: Background Document for Floor Vibrations*. Reino Unido: Research Found for Coal and Steel.
- Smith, A., Hicks, S. & Devine, P. (2009). *SCI Publication P354 Design of Floors for*

Vibration: A New Approach. Steel Construction Institute, Ascot: Reino Unido.

Rica. Labora en IECA Internacional S.A., Departamento de Diseño Estructural Correo electrónico: luis.esquivelsalas@gmail.com

SOBRE LOS AUTORES

Luis Carlos Esquivel Salas: Ingeniero Civil estructural egresado de la Universidad de Costa

Pío Alberto Miranda Jenkins: Ingeniero Civil, Consultor de SismoConsultores S.A. Magíster en Ingeniería Sísmica. Correo electrónico: pmiranda@sismocon.com

