

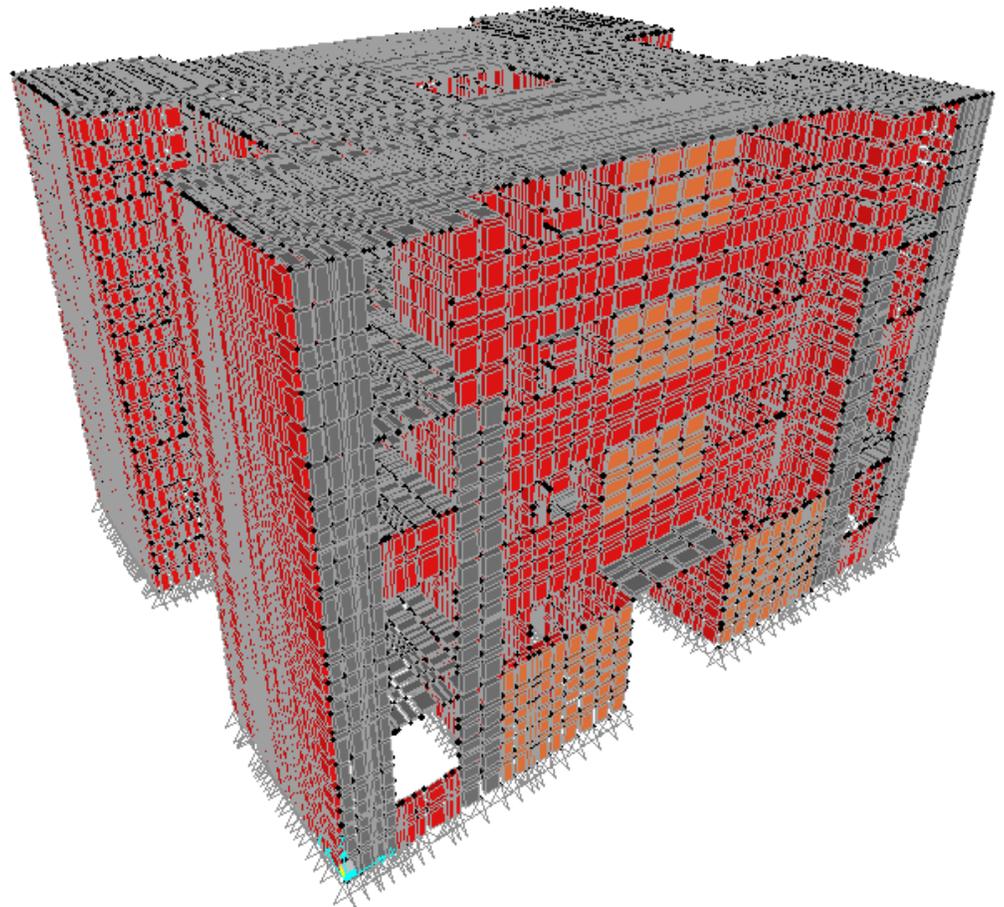


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ESTUDIO NUMÉRICO Y CON VIBRACIÓN AMBIENTAL DE
CUATRO EDIFICIOS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE
CUATRO NIVELES

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
PRESENTA
MARIO GRANADOS MEDINA

DIRECTOR DE TESIS
DOCTOR EN ESTRUCTURAS JORGE IGNACIO CRUZ DÍAZ



CONTENIDO:

AGRADECIMIENTOS	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Instrumentación de estructuras en México y el mundo	4
1.2. Técnicas para la determinación de las características dinámicas de estructuras	7
1.3. Características sísmicas del país y del estado de Michoacán	11
1.4. Justificación	13
1.5. Objetivos y alcances del estudio.....	13
2. ESTRUCTURAS ESTUDIADAS CON VIBRACIÓN AMBIENTAL.....	14
2.1. Estructuras instrumentadas	14
2.2. Procedimientos de análisis.....	22
2.3. Simulaciones numéricas	26
3. EDIFICIOS ESTUDIADOS	29
3.1. Descripción de los edificios estudiados.....	31
3.2. Modelación y calibración numérica de los edificios	34
4. MEDICIONES DE LOS EDIFICIOS CON VIBRACIÓN AMBIENTAL	41
4.1. Equipo utilizado.....	42
4.2. Localización de los sensores.....	43
4.3. Mediciones de vibración ambiental	45
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
5.1. Análisis de las señales	48
6. COMENTARIOS FINALES	55
7. REFERENCIAS.....	56

AGRADECIMIENTOS

De y gracias:

A Dios por permitirme seguir trazando mi camino y por poner a tantas personas maravillosas en él.

A mis padres Mario y Guadalupe, porque cada uno de mis logros es reflejo de su sacrificio, dedicación y amor a nuestra familia.

A mi hermana Janeth por siempre apoyarme, por preocuparse por mí y ser un ejemplo a seguir.

A mi hermana Guadalupe por escucharme y apoyarme.

A Karla, por ser mi incondicional y estar a mi lado sin importar nada.

A todos y cada uno de mis amigos por ser mi segunda familia y estar siempre cuando los necesito.

A mi asesor de tesis el Dr. Jorge Ignacio Cruz por todo su apoyo, paciencia y por los conocimientos transmitidos en la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros y amigos Roberto Ezequiel Chávez, Eliseo Trujillo y Conrado Bucio por su apoyo en la realización de este trabajo.

Finalmente agradezco a la "Desarrolladora Inmobiliaria Can-ik S.A. de C.V." por las facilidades prestadas para poder realizar en las mejores condiciones las pruebas de vibración ambiental

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Instrumentación de estructuras en México y el mundo

En el pasado han ocurrido en todo el mundo un sin número de eventos sísmicos, teniendo inevitablemente repercusiones en todo tipo de estructuras, ocasionando alteraciones en sus propiedades de rigidez y resistencia, y disminuyendo su capacidad para disipar energía, lo que a su vez genera una mayor vulnerabilidad por lo que es de vital importancia conocer las propiedades dinámicas de las estructuras.

En la actualidad existen algunas técnicas aceptadas por la comunidad internacional para determinar dichas características, por ejemplo las pruebas de vibración ambiental, las pruebas de vibración forzada y las pruebas de registro sísmico. La instrumentación consiste en colocar sensores distribuidos en la estructura dependiendo del interés que se persiga, la selección de estos sensores depende de la magnitud física en la que se pretenda hacer mayor énfasis ya que pueden registrar aceleración, velocidad o desplazamiento.

La aceleración suele ser más utilizada para determinar el comportamiento sísmico o dinámico. Siguiendo esta idea se colocan acelerómetros que registran las aceleraciones que se presentan en diferentes puntos de las estructuras.

Por lo general, al realizar algún tipo de prueba en la que se desee conocer las aceleraciones se conforma un sistema formado por varios acelerómetros colocados en diferentes niveles de la estructura. Estos acelerómetros envían la información registrada a una central de registro, la cual puede ser análoga o digital dependiendo de la forma de almacenamiento de datos con la cual cuenta dicha central de registro.

Sin embargo no hay que perder de vista que cada región y cada país tienen una serie de características que convierten a cada estudio en un caso particular, como lo son; tipo de suelo, materiales disponibles, zonas sísmicas, etc., por lo que; aunque existen algunas recomendaciones generales para el procedimiento a seguir en la realización de las mediciones, los resultados solo se pueden tomar para el caso puntual del comportamiento de la estructura que los arrojan o como referencia para alguna otra estructura que comparta sus características. Por lo anterior, queda claro que es necesario instrumentar estructuras típicas de cada región en estudio.

En México se empezó a mostrar un gran interés en este tipo de mediciones a partir de los años 60 gracias al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, el cual comenzó a impulsar esta práctica en diferentes instituciones, tanto públicas como privadas. Pero fue hasta 1987, debido a que con anterioridad no se contaban con los suficientes recursos económicos, que se comenzó en el país una práctica formal de este tipo de estudios experimentales.

La Torre Latinoamericana fue la primera estructura instrumentada en México, su instrumentación permitió registrar dos eventos sísmicos; el de julio de 1957 y el de mayo de 1962 (Murià, 2007). Los registros obtenidos sirvieron de base para definir los coeficientes sísmicos del reglamento de construcción del Distrito Federal de aquel entonces. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados, no se dió continuidad a los estudios, ni tampoco fue punta de lanza para la instrumentación de más estructuras, por lo que se perdieron registros tan importantes como los de los sismos de septiembre de 1985.

En México no se cuenta con un registro exacto de los edificios instrumentados pero seguro no exceden los 25 (Murià, 2007), ubicándose la mayoría en la ciudad de México; aunque esta es una de las zonas con características muy particulares en cuanto a riesgo y tipo de terreno se refiere, no es suficiente para representar la totalidad de las zonas de mayor riesgo en el país.

En las décadas de 1987 a 2007 el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México realizó el análisis detallado de siete edificios instrumentados, destacando los resultados de tres edificios localizados en la zona de suelos blandos de la ciudad de México y uno en la zona de suelos

blandos de la ciudad de Acapulco debido a que sus periodos fundamentales de vibración son muy cercanos a los periodos dominantes del sitio.

La instrumentación en estos edificios fue tan detallada y eficiente que gracias al número de registros se pudieron elaborar y calibrar modelos analíticos capaces de reproducir las respuestas experimentales. Una de las principales ventajas con las que se contó fue la alta resolución de los equipos que permitió registrar pequeñas intensidades e incluso vibración ambiental en dos de los edificios. Gracias a los resultados se pudo determinar las propiedades dinámicas del sistema, los efectos de torsión así como los efectos de interacción suelo-estructura.

A pesar de la poca experiencia en comparación con países como Estados Unidos y Japón, los resultados obtenidos hasta la fecha han permitido aceptar que muchas de las hipótesis y consideraciones de análisis de las estructuras en cuanto a la práctica se refieren, deben de ser mejoradas para una mayor aproximación a las respuestas dinámicas reales. Una de estas consideraciones, y quizás una de las de mayor importancia, es el deterioro estructural.

Los resultados de la instrumentación de edificios se hacen más notables al permitir la reevaluación y mejora de los criterios e incluso de los reglamentos de construcción, como por ejemplo los coeficientes de seguridad sísmica.

Los estudios realizados por Japón y Estados Unidos no se pueden tomar como solución a las problemáticas que se presenten en otros países, ya que cada país cuenta con sus propias características sísmicas y sus propios métodos de construcción; no obstante sí han servido de parteaguas para el desarrollo de estos mismos estudios en otros países.

Sin embargo, y sin importar el lugar donde se realice un estudio de instrumentación el principal objetivo es el mismo, realizar evaluaciones cuantitativas de la relación que existe entre las acciones provocadas por un sismo en una estructura y la respuesta de estas ante dichas acciones.

Las evaluaciones a su vez nos permiten realizar una mejora en los criterios de diseño estructural, además de ser un buen punto de partida para la elaboración de programas de operación y mantenimiento.

1.2. Técnicas para la determinación de las características dinámicas de estructuras

Para la obtención de las características dinámicas, en específico los periodos de vibración de estructuras tales como edificios, se distinguen principalmente dos tipos de técnicas de estudios para determinar las características dinámicas de estructuras; las técnicas paramétricas y las técnicas no paramétricas.

Los métodos paramétricos se basan en las teorías de la elasticidad, por lo que es necesario conocer algunos parámetros como lo son las propiedades elásticas, la geometría de los elementos a estudiar, la distribución y tipo de carga que se presenten, así como los tipos de apoyos que tengan y en base a esto la realización de un modelo numérico simplificado. Dentro de las técnicas paramétricas podemos mencionar dos; el método de la columna ancha (MCA) y el método del elemento finito (MEF).

El método de la columna ancha, básicamente, consiste en la sustitución de los muros, o incluso segmentos de muro, por columnas en el centro de los mismos ejes asignándoles la sección transversal del muro que corresponda considerando la sección transformada esto es, sustituyendo las áreas de concreto de los castillos por la relación modular “n” ($n = E_c / E_m$). Por lo que respecta a las trabes el segmento que intercepta al muro se le asigna una rigidez infinita y en las partes donde no hay muro se deberá tomar en cuenta la contribución del patín de la losa a la rigidez de la viga aplicando el ancho equivalente, esto quiere decir que la columna representará todas las características geométricas del muro (fig. 1).

Una de las grandes ventajas que presenta la utilización de este método es que las propiedades de corte y flexión de los muros pueden representarse adecuadamente a través de las propiedades del material, y de las propiedades geométricas de las secciones del muro (Zúñiga, 2005), aunado a esto, un análisis con este método nos permite la obtención de momentos flexionantes y de fuerzas cortantes, tal y como ocurre en una estructura esquelética. Hablando específicamente de resultados se han realizado comparativas entre este método y el MEF, arrojando que el MCA nos dá resultados muy similares a los arrojados por el MEF.

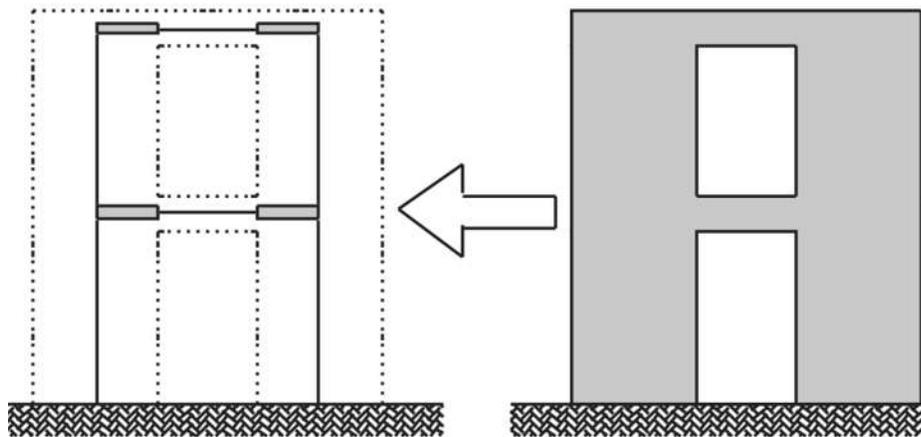


Fig. 1 Demostración grafica del MCA.

Por otra parte, el método del elemento finito tiene como idea principal la división de un continuo en un conjunto de elementos interconectados por un conjunto de puntos llamados nodos (fig. 2).

De esta forma tendremos que la ecuación que rige al continuo regirá de la misma forma cada elemento que conforma al continuo. Dado lo anterior tendremos que el sistema del continuo, el cual tiene de inicio un número infinito de grados de libertad, se transforma en un sistema con un número finito de grados de libertad. El comportamiento de este sistema se podrá modelar en base a un sistema de ecuaciones, que podrán o no ser lineales.

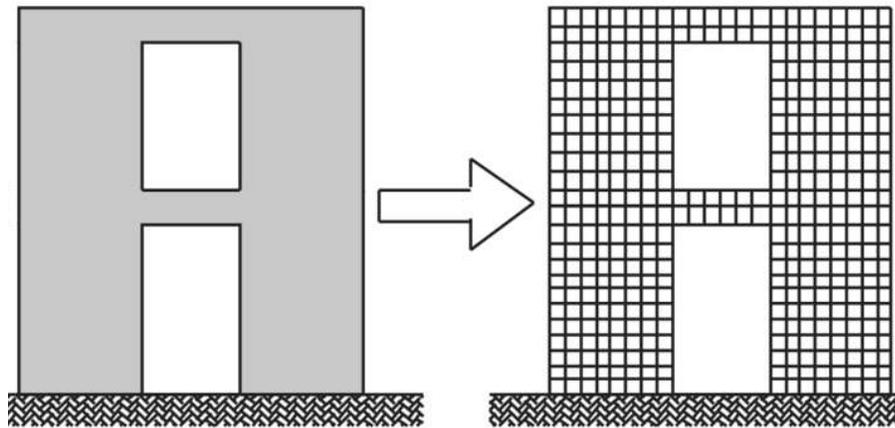


Fig. 2 Demostración grafica del MEF.

En la actualidad, este último método tiene más aceptación ya que modela elementos de composición y geometría compleja, adicionalmente se utiliza en un gran número de programas de computo, los cuales toman la geometría planteada y las transforman en un modelo con un número de elementos definidos (Carrillo, 2009).

Dentro de las técnicas no paramétricas encontramos tres tipos de pruebas experimentales, las cuales son; Pruebas de Vibración Ambiental (PVA), Pruebas de Vibración Forzada (PVF) y por último las Pruebas de Registro Sísmico (PRS).

Una prueba de vibración ambiental consiste en registrar por medio de acelerómetros las vibraciones producidas por situaciones cotidianas tales como el tránsito vehicular, el viento, e incluso las vibraciones producidas por el uso mismo que se le dá a las estructuras.

Por su parte las pruebas de vibración forzada se llevan a cabo al producir excitaciones en las estructuras por medio de motores de vibración, los cuales cuentan con un control de velocidad muy preciso. Finalmente, las pruebas de registro sísmico consisten en registrar por medio de acelerómetros ó acelerógrafos los movimientos que se producen al presentarse un sismo de baja, mediana o gran intensidad.

Existen diferencias muy marcadas entre los tres tipos de pruebas, siendo una de las de mayor relevancia la magnitud de la amplitud que se pueden registrar, por ejemplo, en las PRS se pueden realizar registros con amplitudes mucho mayores que en los otros dos casos (Murià et al, 1995).

Lo anterior deberá tenerse en cuenta al determinar el alcance que se le desee dar al estudio para la elección de la prueba, ya que otro factor de menor importancia que el anterior pero que a final de cuentas es el que marcará la elección de la prueba es el factor económico.

Para las PRS es necesario acondicionar un espacio en la estructura para que el equipo que se utilice este seguro e interfiera en lo menor posible con las actividades que se realicen dentro de esta, ya que dado que no se puede saber con exactitud el momento en que se presente un sismo es necesario tener en funcionamiento el equipo por un tiempo indeterminado, a diferencia de una PVA en la cual las mediciones se realizan en lapsos de tiempo cortos y determinados por lo que existe una diferencia muy marcada en el factor económico.

Conociendo las diferentes técnicas cabe mencionar que no necesariamente se tiene que elegir entre una técnica paramétrica y una técnica no paramétrica, pudiendo realizar ambas para fines comparativos y de complemento en algún estudio determinado.

Es muy común la realización de estudios de vibración ambiental o de pruebas de registro sísmico acompañados por algún modelo numérico basado, por ejemplo, en el método del elementó finito. Lo anterior se realiza generalmente para poder comparar los resultados de ambos estudios y así poder sustentar más dichos resultados.

1.3. Características sísmicas del país y del estado de Michoacán

México es un país que se encuentra en constante actividad sísmica ya que se localiza en una de las zonas consideradas de mayor riesgo sísmico debido a que además de estar ubicada dentro de la zona de contacto de dos grandes placas tectónicas como lo son la del Pacífico y la Norteamericana, limita con la de Cocos, la del Caribe y la placa de la Rivera.

Al observar la figura 3 podemos apreciar la forma y la zona en que limitan estas placas lo que hace de la zona de la costa del pacifico la más peligrosa del país, teniendo a ciudades como Ciudad Guzmán en Jalisco, Lázaro Cárdenas en Michoacán, Acapulco en Guerrero, Puerto Escondido y Puerto Ángel en Oaxaca, así como la ciudad de México como principales focos de atención en cuanto a actividad sísmica se refiere.

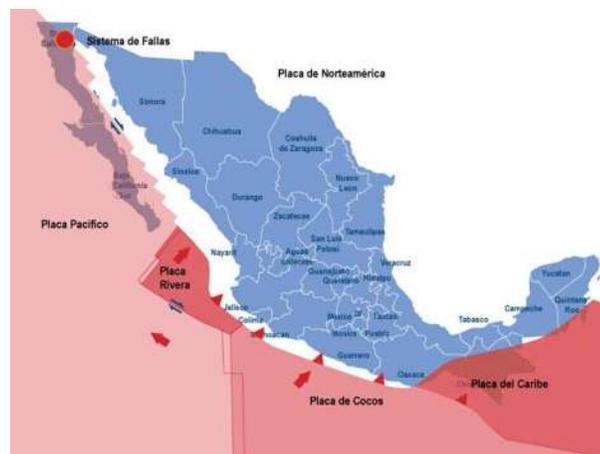


Fig. 3 Ubicación de las placas tectónicas en México.

Gracias a organizaciones como el Servicio Sismológico Nacional (SSN) se ha podido monitorear y localizar gran cantidad de sismos como se muestra en la figura 4 y en la cual se observa con mayor claridad la zona de mayor actividad del país.

En la figura se muestran dos tipos de sismos; los superficiales percibidos a profundidades menores de 50 km, indicados con los puntos cafés, y los sismos con profundidades mayores a los 50 km que son indicados con los puntos azules.

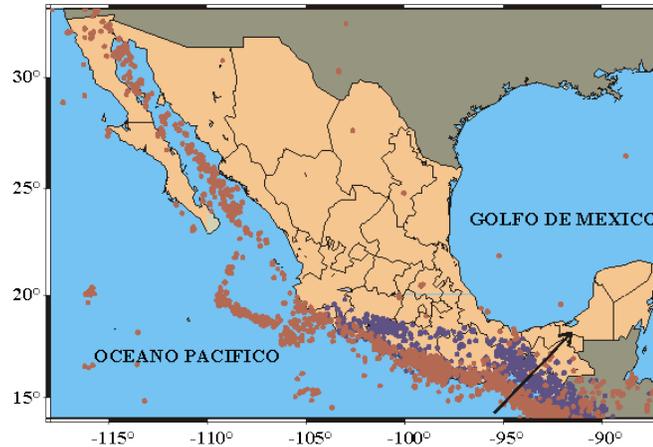


Fig. 4 Ubicación de los sismos registrados entre 1964 y 1995.

Entonces, tomando en cuenta lo anterior, es innegable que el estado de Michoacán es uno de los estados con mayor riesgo sísmico en el país. Por lo tanto, es uno de los estados en los cuales su infraestructura está en mayor “prueba sísmica”, esto quiere decir; su infraestructura está constantemente sometida a la acción de movimientos sísmicos de baja, mediana y alta intensidad.

Por lo general, los daños en las estructuras producidos por los movimientos sísmicos se manifiestan en grietas o hundimientos e incluso en los colapsos de las estructuras lo que en ocasiones, y por desgracia, lleva a la pérdida de vidas humanas. Por lo que es de vital importancia contar con registros de movimientos sísmicos que nos permitan tener un historial de los eventos que han producido estos daños, así como un registro de la magnitud de dichos daños.

Por lo que el monitoreo y análisis de eventos sísmicos nos da la posibilidad de mejorar las técnicas y por ende los resultados en la construcción, permitiendo mejorar el comportamiento de las estructuras al verse sometidas a este tipo de eventos.

1.4. Justificación

En la actualidad la mampostería sigue representando una de las técnicas de construcción más utilizadas en México y en el mundo. Debido al constante crecimiento de la población y su concentración en las ciudades la demanda de vivienda unifamiliar se ha incrementado, una alternativa viable es la construcción de edificios de mampostería de mediana altura.

Por otro lado, existen pocos estudios de vibración ambiental en estructuras de mampostería confinada, por lo que aún existen grandes incertidumbres en su comportamiento ante acciones sísmicas, una alternativa para mejorar el entendimiento del comportamiento dinámico de este tipo de estructuras consiste en realizar estudios de vibración ambiental y numéricos.

Ante las dificultades técnicas y económicas que representa la realización de estudios de vibración ambiental en todas las estructuras en una región en particular, se puede optar por seleccionar un número representativo de estructuras con características similares. Tal es el caso del estudio realizado en este trabajo.

1.5. Objetivos y alcances del estudio

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar las características dinámicas de cuatro edificios de mampostería confinada de cuatro niveles por medio de pruebas de vibración ambiental, así como la generación y calibración de un modelo numérico por medio de elementos finitos para cada edificio mediante el uso del programa de computo SAP2000 versión 14.

Debido a el tiempo en que se realizó el estudio, este nos permitirá contar con las características dinámicas de los cuatro edificios ya mencionados en la etapa inicial de su vida útil, los cuales servirán como control para estudios futuros, así mismo permitirá contribuir en el conocimiento del comportamiento de este tipo de estructuras.

2. ESTRUCTURAS ESTUDIADAS CON VIBRACIÓN AMBIENTAL

La obtención de datos sísmicos tiene un grado de complejidad debido, principalmente, a la imprevisibilidad de la ocurrencia de un evento sísmico, lo que los convierte en procesos prolongados en cuanto a tiempo de monitoreo se refiere.

A diferencia de los estudios sísmicos, los estudios realizados en base a vibraciones ambientales nos permiten su ejecución en cualquier espacio de tiempo, ya que estas se encuentran presentes en todo momento. Estas vibraciones comprenden las inducidas en las estructuras por factores como el viento, paso de vehículos, paso de peatones, en si las producidas por la actividad humana.

Un estudio de vibración ambiental consiste en la instrumentación de la estructura en cuestión con el propósito de poder obtener registros de las vibraciones ocasionadas por los factores ya mencionados, el monitoreo se puede realizar en cortos periodos de tiempo.

2.1. Estructuras instrumentadas

Alrededor del mundo se han instrumentado todo tipo de estructuras, con el fin de realizar estudios de vibración ambiental y se ha logrado encontrar un sin fin de conclusiones e información útil para los fines propuestos, a continuación se mencionaran algunos casos notorios tanto en el país como en el extranjero.

En el 2003 y como parte del trabajo de microzonificación de la ciudad de Mérida, Venezuela; el grupo de Investigaciones Sísmicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes realizó

estudios de vibración ambiental a once edificios de concreto armado de cuatro niveles, edificios que se consideran como representativos de los edificios de media altura de esta ciudad.

Se consideró importante la realización de los estudios en esta zona debido a que se considera de alto riesgo sísmico ya que en toda su extensión está presente la falla Boconó y otras fallas de menor importancia pero que en conjunto son la causa de la mayor parte de la actividad sísmica de relevancia en la zona andina venezolana.

Como meta principal se planteó el encontrar las frecuencias predominantes en los edificios de mediana altura de la región, para lo cual se optó por realizar estudios de vibración ambiental en la planta baja y en la azotea de cada edificio seleccionado.

Dentro de los edificios seleccionados se pueden distinguir tres tipos: a) Construcciones tipo Banco Obrero, complejos habitacionales los cuales están ocupados por numerosas familias, b) Construcciones realizadas por empresas privadas, con características muy similares a las anteriores, y c) Construcciones realizadas por particulares. Distinguiendo estos tres tipos de edificios, se consideró que se tomaban en cuenta otro tipo de factores como la posible calidad de materiales de construcción, así como de mano de obra.

Para llevar a cabo las mediciones de vibración ambiental se emplearon tres sensores de banda ancha WR-1 conectados a una grabadora digital SSR-1, todo esto de la marca Kinematics. Se realizaron nueve registros en intervalos de 30 segundos y para el procesamiento de los datos se usó el software de Kinematics y el programa DEGTRA (Ordaz et al, 1997). Los gráficos se obtuvieron mediante el programa DLOTW, versión 1.2. Sin embargo, y debido a que en los gráficos se presentaron varios picos predominantes, para el análisis de resultados se usaron diversos métodos; primero se obtuvieron los espectros de Fourier, a continuación se obtuvieron los cocientes espectrales de Fourier entre azotea y planta baja y adicionalmente se aplicó la técnica de Nakamura obteniendo un segundo cociente. Obteniendo un promedio por edificio, se obtuvo que para cuatro de ellos el periodo fue de 0.20 segundos, para seis es de 0.17 segundos y el periodo del edificio restante de 0.30 segundos.

Todos los periodos obtenidos resultan muy por debajo de los señalados en las normativas de aquel país, lo que indica que los edificios son mucho más rígidos que lo que consideran las fórmulas usadas en dicha normativa y se concluye que esto es debido a que en las fórmulas no se toman en cuenta factores como la rigidez que aportan los elementos no estructurales, y mayormente a que las fórmulas de la normativa están basadas en análisis estructurales teóricos que dejan fuera los ajustes que se pudieran realizar utilizando estudios de vibración ambiental (Barcia et al, 2003).

Por su parte en el trabajo de Huerta et al, (2009), se describe el estudio e instrumentación de un edificio de nueve niveles en la Cd. de Tijuana, BC, México. Para tal estudio se realizaron pruebas de vibración ambiental así como una estimación teórica utilizando como herramienta el programa SAP2000 V.10. La estructura del edificio se puede observar en la figura 5, en planta y perfil.

El edificio en cuestión es utilizado en su totalidad como complejo habitacional, sus dos primeros niveles comprenden la zona de estacionamiento y los restantes son conformados por varios apartamentos. La estructura está construida en base a perfiles de acero de ala ancha en traveses y columnas, también cuenta con contraventeos ubicados de forma estratégica, según el diseño, para optimizar su funcionalidad y vista en planta tiene una sección en forma de U.

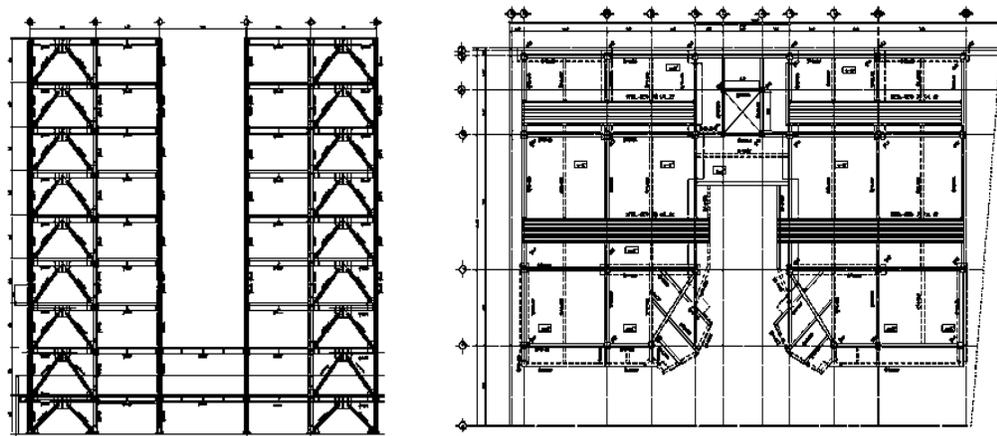


Fig. 5 Estructura de edificio ubicado en la zona río de Tijuana, B. C., México.

Para las pruebas de vibración ambiental se utilizó una grabadora Kinematics SSR-1 de seis canales, así como tres acelerómetros EpiSensor FBAES-T. Los acelerómetros se colocaron en pisos intermedios de la estructura (3 y 7 generalmente) y en nivel de azotea, se registraron varias series de movimientos con intervalos de tiempo de entre 10 y 20 min.

Se consideraron registros para analizar las tres direcciones (longitudinal, transversal y vertical) y después de analizar y comparar los resultados tanto de las pruebas de vibración ambiental como las pruebas teóricas realizadas a través del programa SAP, se concluyó que el rango de diferencia entre las frecuencias fundamentales encontradas con ambas pruebas es reducido, por lo que las frecuencias obtenidas se consideran aceptables, excepto para la componente vertical (Huerta, et al, 2009).

Lo interesante en este trabajo fue que se realizó una investigación de registros sísmicos para ubicar una estación que estuviera en un suelo similar al sitio donde se desplantó el edificio para poder tener una respuesta lo mas apegada posible a lo que podría suceder en este sitio. Con los datos de la investigación se le provocó una excitación sísmica virtual al modelo.

Murià instrumentó un edificio en la ciudad de Acapulco Guerrero (fig. 6), localizado en la zona que se considera de alto riesgo por sus características geológicas y sísmicas, además de ubicarse en la brecha de guerrero, zona donde se prevé ocurra un macro-sismo.

El edificio está formado por varios departamentos distribuidos en 17 niveles, cuenta además con un nivel de sótano utilizado como estacionamiento. La estructura del edificio está construida a base de trabes y muros de concreto reforzado, losa maciza ligada monolíticamente a las trabes. Para la cimentación se usaron 30 pilas, ubicadas a 12.5 m de profundidad y ligadas entre ellas con contratraves.



Fig. 6 Vista de perfil del edificio instrumentado por David Murià.

Dadas las dimensiones del edificio, se instalaron 24 servoacelerómetros uniaxiales de alta resolución distribuidos a lo largo del edificio y en campo libre. Se tuvo especial cuidado en la ubicación y en el arreglo de los servoacelerómetros ubicados en los niveles de azotea y sótano ya que parte fundamental del estudio fue establecer la interacción suelo-estructura, de aquí el cuidado en la instrumentación en azotea y sótano.

Los resultados señalan que la interacción suelo-estructura es parte fundamental en el comportamiento de dicho sistema, ya que se encontró que la frecuencia fundamental de vibración en la dirección transversal del sistema es muy parecida a la primera frecuencia del suelo.

En Chile también se le ha dado una gran importancia a la realización de este tipo de estudios, ya que este país también cuenta con una actividad sísmica notoria; y a través de RENADIC (Red Nacional de Acelerógrafos) la Universidad de Chile mantiene en constante monitoreo, pretendiendo alcanzar diversos propósitos, algunas estructuras importantes como las que se mencionan a continuación.

El edificio de la Cámara Chilena de la Construcción, el cual se muestra en la figura 7, cuenta con una red local de 12 acelerógrafos conectados a un registrador tipo ALTUS K2, los acelerógrafos se encuentran distribuidos desde los niveles subterráneos hasta el piso 20. La instrumentación de este edificio pretende estudiar el comportamiento del edificio, que aunque con una altura considerable cuenta con una estructuración típica del país.



Fig. 7 Cámara Chilena de la Construcción.

La Comunidad Andalucía cuenta con una red local constituida por cuatro acelerógrafos del tipo SSA-2, el estudio de esta zona pretende entender el comportamiento de un edificio aislado, es decir; un edificio que cuenta con aisladores sísmicos en la base, y como complemento se construyó un edificio con características similares pero sin aislamiento en la base. Los cuatro acelerógrafos ya mencionados registran el comportamiento ante eventos sísmicos de ambos edificios, lo que ha demostrado que la aislación sísmica de base es una buena alternativa de solución al problema de proteger edificios o estructuras de sismos.



Fig. 8 Edificio aislado.

Mencionados los ejemplos anteriores, podemos entender con mayor claridad la importancia de los trabajos de instrumentación. Se hace notar, que aunque es de mucha ayuda la revisión y consulta de trabajos similares, se deben realizar proyectos de este tipo en cada región en específico para poder enfocar más la problemática en estructuras con características sísmicas, características de materiales de construcción y de procesos y métodos constructivos propios de dicha región.

Debemos entender además que las normativas de construcción de la mayoría de los países, estados, regiones, etc., tienen aún muchas deficiencias y espacios en blanco por llenar, para lo cual resulta muy útil este tipo de estudios.

Otra aplicación de dichos estudios consiste en darle seguimiento al comportamiento de las estructuras con el paso del tiempo. Un ejemplo de lo anterior es el trabajo realizado por Ramírez et al., en ese proyecto el objetivo principal consistió en determinar los cambios en los periodos naturales de vibración de un edificio de 5 niveles después de ser reforzado en algunos muros. Para lo cual realizaron mediciones de vibración ambiental en dicha estructura y en otro similar pero sin reforzar.

Las dos estructuras forman parte de la Unidad Habitacional El Rosario, ubicada en la delegación Azcapotzalco y en el municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, y tan solo están separadas entre sí por algunos metros. Estas estructuras fueron construidas en el año de 1976 por lo que tomaron como base para su construcción los reglamentos vigentes de dicho año.

Los problemas que se presentaban eran muy similares en ambas estructuras: deterioro importante en los castillos de las esquinas, consistentes en agrietamientos, exposición del acero de refuerzo y desprendimiento del recubrimiento, por lo que el proyecto de reparación y refuerzo consistió básicamente en reforzar los muros de mampostería exteriores en ambas direcciones con mortero cemento arena y malla electrosoldada así como los elementos de concreto dañados fueron reparados con mortero epoxico.

Para la toma de registros en ambas estructuras se utilizó una grabadora digital Kinometrics SSR-1, con seis canales de registro simultáneo, velocidad de muestreo variable, tres filtros y 16 bits de resolución.

Los tres sensores utilizados son unidireccionales, Kinematics FBA-11. El equipo se controló mediante una computadora portátil utilizando el programa de comunicaciones Quick Talk.

El arreglo en ambos edificios fue el mismo, el primer sensor y el segundo se ubicaron en el centroide, en dirección longitudinal y transversal respectivamente. El último sensor se ubicó en dirección transversal, en el extremo de la planta, paralelo al segundo. En cada edificio se realizaron 10 mediciones con duración de 60 segundos cada una. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 1 Resultados en edificio reforzado.

EDIFICIO REFORZADO		
Modo	Periodo (seg)	Tipo
1	0.32	Flexión en dirección transversal
2	0.27	Flexo-torsión
3	0.1	Flexión en dirección transversal
4	0.07	Flexión en dirección longitudinal

Tabla 2 Resultados en edificio no reforzado.

EDIFICIO NO REFORZADO		
Modo	Periodo (seg)	Tipo
1	0.32	Flexión en dirección transversal
2	0.26	Flexión en dirección longitudinal
3	0.23	Torsión
4	0.1	Flexión en dirección transversal

Observando los resultados nos podemos dar cuenta que el refuerzo de los muros de mampostería exteriores de uno de los edificios de 5 niveles no cambio los periodos naturales de vibración del mismo, por lo tanto, no hubo modificación de su rigidez. Únicamente se presentan diferencias considerables en el tercer modo y en algunas de las formas modales. Sin embargo, sí se logró el incremento en la resistencia al ser reforzado. El que no se presenten cambios considerables en los periodos naturales de vibración se debe a que en sí, el sistema estructural no se modificó.

2.2. Procedimientos de análisis

En cuestión de señales sísmicas se debe realizar un análisis de tipo espectral, para lo cual existen diversas técnicas. Algunas de estas técnicas se describen a continuación, mencionando las que se consideran de mayor relevancia.

Método espectral

Este método consiste en la ubicación de una estación base, la cual deberá estar ubicada en roca, y de una estación en el sitio de interés (suelo blando). Su fundamento consiste en compensar los efectos de fuente y trayecto entre estas dos estaciones para lo cual se usan registros de microtemores.

Realizando la razón espectral de la componente horizontal en ambas estaciones, obtendremos lo que se puede considerar como el efecto de sitio. Lo anterior se hace realizando la suposición de que ambos sitios tienen efectos de fuente y de trayecto similares, además de que el sitio donde se ubica la estación de referencia tiene respuestas de sitio despreciables.

El método fue propuesto por Borchardt (1970), también conocido por el nombre de SSR por sus siglas en inglés (Standar Spectral Ratios) (Flores et al, 2009), y aplicado con éxito en el estudio realizado para la microzonificación sísmica en EEUU (Yauri, 2006).

Método espectral de Nakamura

Este método fue propuesto por Nakamura en 1989, propone estimar el periodo fundamental de las estructuras en base a estudios de vibraciones ambientales, verticales y horizontales, en superficie; incluso propone una estimación muy aproximada del factor de amplificación del estrato de suelo (Nakamura, 1989).

El punto de partida de dicha técnica es el principio de que los microtemores se propagan como ondas Rayleigh sobre un estrato único blando en un semiespacio infinito. Nakamura supone que el movimiento de la componente vertical no es amplificado por el estrato de suelo blando.

En base a lo anterior y asumiendo que las fuentes locales no afectarían el movimiento de los microtemores en el basamento, entonces podemos considerar los efectos de sitio como el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical.

En base a lo anterior, el método considera tres puntos importantes:

- Las microtempidaciones constan de ondas Rayleigh, que se propagan en una capa sobre un espacio infinito.
- El movimiento en su totalidad es producido por fuentes locales, y las fuentes profundas son despreciadas.
- Las microtempidaciones en la base del estrato de suelo no se ven afectadas por las fuentes locales.

Tomando en consideración los tres puntos anteriores se puede dar una simple explicación del desarrollo del método de Nakamura.

Los efectos de sitio, en general, pueden estar dados por la siguiente expresión:

$$S_E = \frac{H_S(w)}{H_B(w)}$$

Donde

S_E = *Espectro de los efectos de sitio.*

$H_S(w)$ = *Espectro de ondas horizontal en superficie.*

$H_B(w)$ = *Espectro de ondas horizontal en base.*

Las ondas internas de las microtrepidaciones contienen además ciertas ondas superficiales por lo que es necesaria su corrección removiendo estas ondas. Como Nakamura supone que el efecto de las ondas Rayleigh está incluido en los espectros de ondas verticales, pero únicamente en las superficiales y no en las de la base del movimiento, por lo que:

$$A_S(w) = \frac{V_S(w)}{V_B(w)}$$

Donde

$A_S(w)$ = Efecto de las ondas Rayleigh.

$V_S(w)$ = Espectro de ondas verticales en superficie.

$V_B(w)$ = Espectro de ondas verticales en base.

Tomando en cuenta las dos expresiones anteriores y removiendo los efectos de las ondas Rayleigh encontramos el efecto de sitio modificado (S_M).

$$S_M = \frac{S_E(w)}{A_S(w)} = \frac{H_S/V_S}{H_B/V_B}$$

Usando registros de Borehole y algunos registros de microtrepidaciones, Nakamura logro demostrar experimentalmente que:

$$\frac{H_B}{V_B} = 1$$

Por lo que

$$S_M(w) = \frac{H_S(w)}{V_S(w)} = N_S(w)$$

Es así como Nakamura concluyó que el cociente espectral entre la componente horizontal y la componente vertical en un mismo sitio puede ser utilizado como una aproximación de los efectos de sitio para ondas internas, y así poder eliminarlos. De esta manera podemos ver la técnica de Nakamura como una técnica muy atractiva ya que elimina los efectos de fuente, elimina el patrón de radiación y elimina la directividad.

De igual manera, existen algunos otros métodos como lo son; el Método de análisis Espectral F-K o el Método de análisis de autocorrección Espectral SPAC (propuesto por Aki, 1957) por citar algunos. Sin embargo, los dos métodos descritos, el SSR y el de Nakamura son los más utilizados en la actualidad.

Por su parte el Método de análisis de autocorrección Espectral SPAC es utilizado propiamente para el análisis de una superficie y no de una estructura, ya que este método propone un arreglo instrumental de tipo circular o semicircular para poder obtener una estimación de las velocidades de fase sin importar la dirección de propagación de las ondas (Aki, 1957).

El Método de análisis Espectral F-K asume que los registros son espacialmente estacionarios, lo cual es razonable dado que las fuentes generadoras están alejadas del arreglo a una distancia mucho mayor que la distancia entre arreglos y la localización del arreglo es “no dispersivo” para la propagación de las ondas. Este método provee información respecto a la velocidad de fase y al azimut de la fuente dando buenos resultados en su aplicación para la determinación de velocidades de fase comparables con los modelos de velocidad obtenidos a partir de perforaciones de pozos (Capón, 1969). Al igual que el Método de análisis de autocorrección Espectral SPAC, también es utilizado propiamente para el análisis de una superficie.

Para el presente trabajo se decidió aplicar el método conocido como Peak Picking, ya que este método es el más sencillo para la obtención de los parámetros modales de estructuras sometidas a cargas de servicio.

Este método se basa en que la función de respuesta en frecuencia alcanza valores extremos en torno a las frecuencias naturales. Dichas frecuencias se obtienen simplemente observando la gráfica de la función de densidad espectral. Dicho en otras palabras, estas frecuencias alcanzan los picos más elevados y sobresalen de la gráfica (Bendat et al, 1993).

Las frecuencias naturales se determinan como los picos de la función de densidad espectral promediada y normalizada. Esta función se obtiene básicamente convirtiendo las medidas de aceleraciones al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier.

2.3. Simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas comprenden la recreación matemática de algún proceso natural. A diferencia del modelado numérico, una simulación nos permite encontrar una solución continua, es decir, no se limita a la solución en un instante dado. Sin embargo, debemos entender estos dos conceptos como parte de un solo proceso el cual parte de una modelación numérica para poder llevar a cabo una simulación numérica, y posteriormente poder partir de los resultados de la simulación para la mejora de la modelación.

Las aplicaciones de las simulaciones numéricas son muy bastas, puede comprender desde su utilización para fines médicos (en el procesamiento de imágenes médicas) hasta su desarrollo para dar solución a algunas interrogantes en la ingeniería civil, tales como las presentadas en el análisis de las características dinámicas de estructuras.

Como ya se mencionó en el trabajo de Huerta et al, (2009), se realizó la instrumentación y estudio en base a vibraciones ambientales de un edificio de nueve niveles en la Cd. de Tijuana, B.C., adicionalmente y como parte del proyecto para poder realizar una etapa comparativa se trabajo también en un modelo teórico.

Este análisis partió de la recopilación de datos pertenecientes al proyecto ejecutivo, posteriormente se realizó un modelado numérico del edificio considerando las propiedades mecánicas y geométricas, así como el dimensionamiento en los elementos estructurales que en conjunto forman la edificación. Esta etapa se realizó haciendo uso del programa SAP 2000 versión 10.

Para la posterior simulación (utilizando la misma herramienta que para el modelado) se realizó una investigación referente a los registros sísmicos para así localizar una estación que estuviera instalada en un suelo con características similares a las del suelo de desplante de la estructura en estudio.

Después de haber determinado que registro se apegaba en mayor proporción a la respuesta sísmica que pudiera tener el sitio de estudio y con los acelerogramas de este sitio se realizó la simulación numérica, que consistió en inducir una excitación en las tres componentes del modelo (N-S, E-O y vertical).

La importancia de realizar lo anterior recae en la posibilidad de poder hacer un análisis comparativo entre los resultados de los dos tipos de estudio y así poderse complementar entre ellos para la obtención de un mejor y más fundamentado resultado.

En la figura 9, por ejemplo, se muestran las frecuencias de vibrar de uno de los arreglos del trabajo anterior, en las gráficas de la parte superior tenemos la planta baja y en el segundo la azotea, de izquierda a derecha tenemos los movimientos longitudinales, transversales y verticales, y de rojo se muestran los resultados del modelo numérico y de azul los de las PVA. En dichas graficas se muestra en el eje horizontal la frecuencia y en el eje vertical la pseudo aceleración espectral.

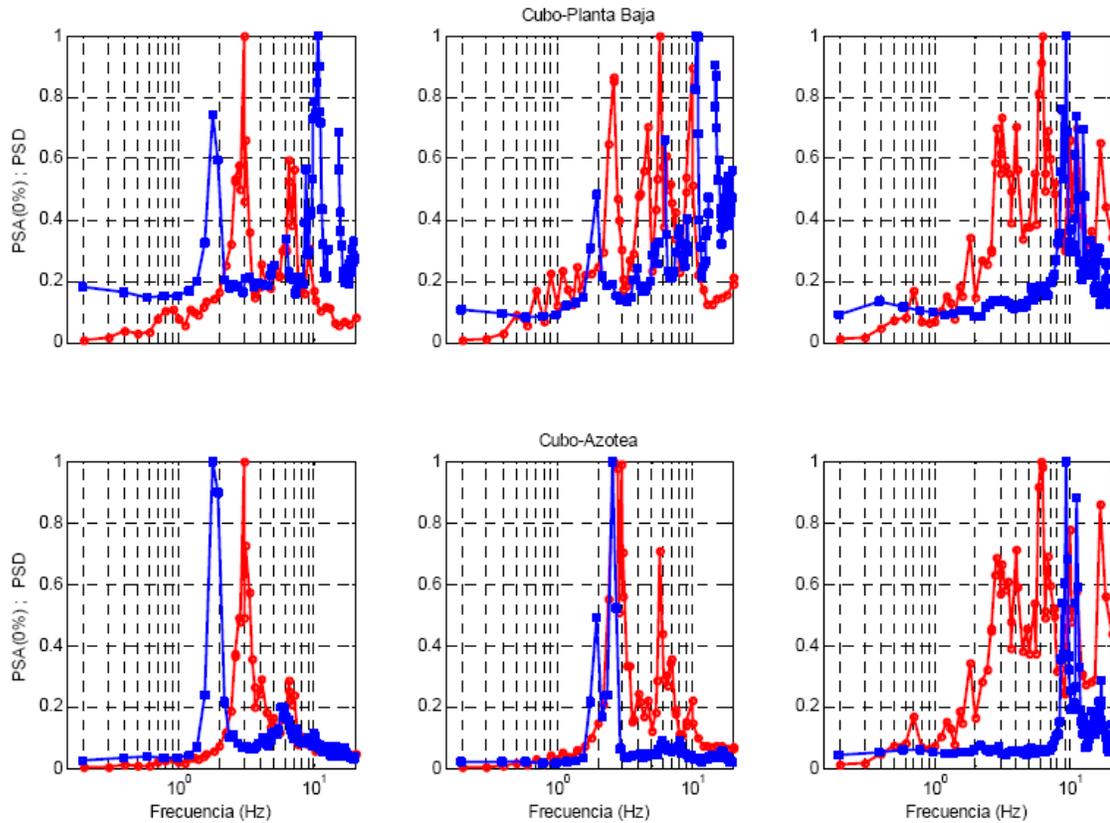


Fig. 9 Frecuencias de vibrar correspondientes a planta baja y azotea.

Estudios como el anterior nos deja en claro la importancia de la simulación numérica y su aplicación en estudios de carácter dinámico estructural, así mismo dá una muestra de la importancia de realizar, en un mismo proyecto, diferentes técnicas o métodos de estudio como en este caso el uso de técnicas de vibración ambiental aunado a el uso de el modelado y simulación numérica.

3. EDIFICIOS ESTUDIADOS

Los edificios que se seleccionaron para la realización del estudio de vibración ambiental y modelado numérico, pertenecen al conjunto habitacional denominado “Las Espigas”. Cabe señalar que los edificios estudiados son propiedad de “Desarrolladora Inmobiliaria Can-ik S.A. de C.V.”. Los edificios seleccionados fueron construidos en base a muros de mampostería confinada.

El fraccionamiento se encuentra ubicado en el municipio de Tarimbaro Mich., teniendo dos lugares de acceso; uno por San Pedro de los Sauces y el segundo por la carretera a Salamanca. Utilizando la herramienta del google maps se indica con una elipse roja la ubicación del fraccionamiento en la figura 10. Esta ubicación también fue referenciada en base a los datos capturados con el GPS durante la realización de las pruebas.



Fig. 10 Ubicación del fraccionamiento.

En relación al tipo de suelo del municipio, los estratos de suelo datan de los periodos cenozoico, terciario, cuaternario y plioceno; corresponden principalmente a los del tipo chernozem que es un tipo de suelo negro rico en humus (del 3 al 13%), además de serlo en potasio, fósforo y microelementos, lo anterior nos indica que se trata de un suelo blando.

En la figura 11 se muestra diferentes vistas de uno de los edificios seleccionados para la realización del estudio.



Fig. 11 Edificio estudiado.

El municipio de Tarímbaro se encuentra conurbado a la capital del estado, y es ese municipio el que los desarrolladores han elegido para la construcción de numerosos desarrollos habitacionales de mediana altura por ende es de gran importancia realizar estudios en este tipo de estructuras que nos permitan conocer y entender su comportamiento. Uno de estos estudios se pretende sea el presente por las características que lo rodean y que ya se han mencionado. Por otra parte la conurbación que existe entre el municipio y la capital hacen que las características de los edificios sean muy similares a otros que se encuentran en la capital, lo que permitirá que el presente trabajo sirva como referencia para la realización de estudios posteriores en edificios de la capital. La figura 12 muestra la ubicación de los edificios dentro del fraccionamiento.



Fig. 12 Localización de los edificios dentro del fraccionamiento.

3.1. Descripción de los edificios estudiados

Para el presente trabajo se seleccionaron cuatro edificios iguales entres si, cada edificio consta de cuatro niveles, cada nivel dividido en cuatro apartamentos, conformados estructuralmente por muros de mampostería confinada y algunos muros de concreto en la fachada principal y posterior.

Prácticamente los edificios son simétricos en planta, tanto en el eje transversal como en el eje longitudinal; excepto en planta baja, ya que los apartamentos que se ubican de lado de la fachada principal se modificaron debido al acceso del edificio y no son simétricos respecto a un eje horizontal. Cuentan con escalera localizada al centro del edificio apoyada en las losas y muros. Los detalles descritos se muestran en la figura 13.

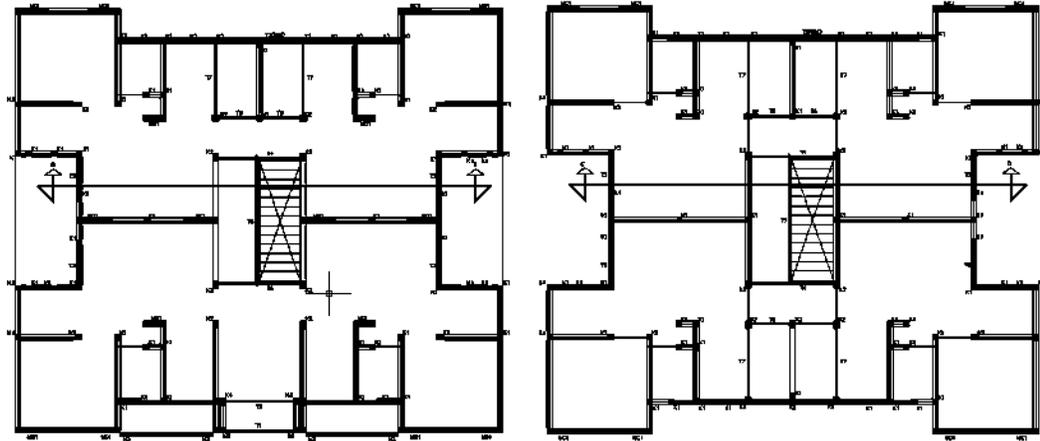


Fig. 13 Planta baja y planta tipo.

Los edificios cuentan con otros detalles importantes principalmente en la planta baja y en la planta del 3er nivel. En la planta baja, concretamente en el acceso principal, se cuenta con dos muros de celosía y cuatro castillos, elementos con los cuales se enmarcan los patios de servicio de dos apartamentos ya que la distribución de los espacios en estos cambia debido al área que se emplea para el acceso principal.

Por su parte en la planta del 3er nivel se sustituyen dos muros de concreto de la fachada principal por cuatro castillos y en azotea se cuenta con dos travesaños más al centro para poder apoyar domos que sirven como traga luz principal de los edificios.

Los edificios están desplantados sobre una losa de cimentación de concreto reforzado con una resistencia específica de $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ con un espesor de 15 cm, previo al desplante de la losa se colocó una plantilla de concreto pobre con 5 cm de espesor; desplantado sobre una plataforma de material de banco debidamente compactada.

Los muros se construyeron con tabique industrializado tipo TABIMAX de 12X12X23 cm juntado con mortero tipo I con proporcionamiento cemento-cal-arena 1:0.25:3, confinados con castillos y dalas. Adicionalmente en algunos espacios se utilizó celosía, línea Mazatlán de 12X6X24 cm.

Las losas de entrepiso son del tipo vigueta y bovedilla de poliestireno y capa de compresión de concreto. Se utilizaron viguetas de alma abierta 12-64, fueron colocadas en el sentido corto de la losa y la separación a centro de ejes varía entre 79 y 52 cm, se colocó malla electro soldada 6x6-10x10 en la capa de compresión de la losa, con un espesor de 4 cm.

Se utilizó concreto con peso volumétrico mayor de 2400 kg/m^3 y $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ en todos los elementos, a excepción de los castillos donde se utilizó concreto con $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$. Se distinguen cinco secciones diferentes en los castillos. En el caso de las trabes solo se distinguen dos secciones distintas, como se muestra en la tabla 3.

Para el refuerzo en estos elementos se utilizó acero de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ en varillas de $3/8''$ y mayores, acero de $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ en varillas de $1/4''$, así como acero $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$ para las mallas.

Visto en planta el dimensionamiento de cada edificio es de $14.25 \times 12.4 \text{ m}$ con una altura de entrepiso de 2.57 m .

Los diferentes tipos de castillos y trabes que se distinguen en los edificios son descritos con mayor detalle en la tabla 3.

Tabla 3 Propiedades de los diferentes tipos de castillos y trabes.

NOMENCLATURA	DIMENSIONES (m)
K1	0.12 X 0.12
K2	0.12 X 0.20
K3	0.10 X 0.10
K4	0.36 X 0.20
K5	0.36 X 0.15
T1	0.15 X 0.25
T2	0.15 X 0.30

3.2. Modelación y calibración numérica de los edificios

El modelo numérico se generó en el programa SAP2000 versión 14, ya que es un programa fácil de usar. Adicionalmente nos permite realizar análisis de tipo estático y de tipo dinámico modal espectral, siendo el segundo el de nuestro interés.

Afortunadamente se contó con los planos del proyecto estructural de los edificios, lo que permitió realizar el modelo detallado. Se tuvo especial cuidado en el modelado de los diferentes elementos estructurales tales como castillos, trabes y dalas, los cuales se modelaron con elementos barra. De igual manera se modelaron los muros de mampostería y los elementos de celosía ambos se modelaron como elementos Shell con las propiedades correspondientes al material; asimismo se modeló la capa de compresión de las losas con elementos Shell.

Propiamente no se le asignó un número determinado de elementos a cada sección o elemento analizado, puesto que el modelo se realizó en base al proyecto arquitectónico, fue este mismo el que determinó el número de elementos finitos de cada sección del modelo. En base al proyecto arquitectónico se trazaron líneas auxiliares continuas, es decir que recorrían de lado a lado el modelo, que marcaran la ubicación de cada uno de los elementos barra, así como la ubicación de huecos de ventanas, puertas, etc., para conformar la estructura, a su vez estas líneas fueron marcando intersecciones en los elementos por los que pasaban y fueron estas intersecciones las que marcaron el número de elementos finitos que conforma cada sección.

Trabajando propiamente en la calibración se tuvo especial cuidado en las características de la mampostería, tales como la resistencia a la compresión, el peso por unidad de volumen y el módulo de elasticidad, se partió del valor del módulo de elasticidad obtenido en base a las fórmulas de las NTC-M(2004), las cuales toman en cuenta la resistencia de diseño a la compresión de la mampostería y a partir de ese valor se calibró el modelo hasta lograr el primer modo de vibrar obtenido experimentalmente. Este proceso se utilizó para los cuatro modelos correspondientes a los cuatro edificios medidos.

En el modelo (ver fig. 14) se pueden distinguir propiamente tres tipos de elementos Shell dado el material utilizado en ellas (concreto, mampostería y celosía), la importancia de la distinción de estas áreas es la presencia de muros de concreto en la fachada principal y en la posterior.

También se tuvo especial cuidado en la presencia de la escalera y en los detalles de las losas, es decir, se modelaron las viguetas y la capa de compresión. Los detalles se muestran de la figura 15.

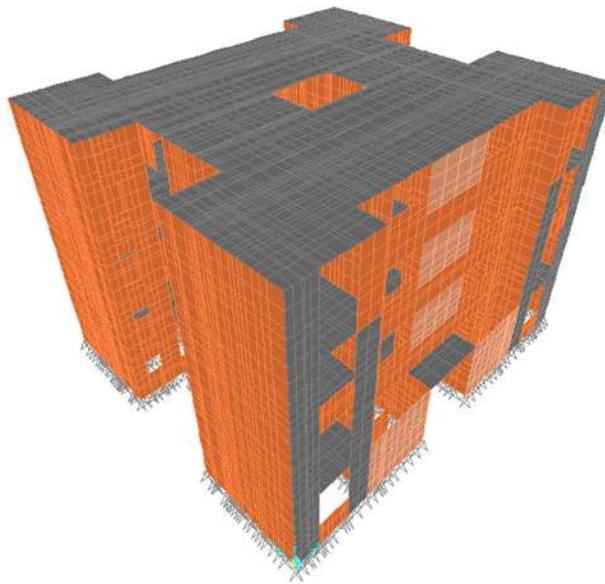


Fig. 14 Perspectiva del modelo numérico.

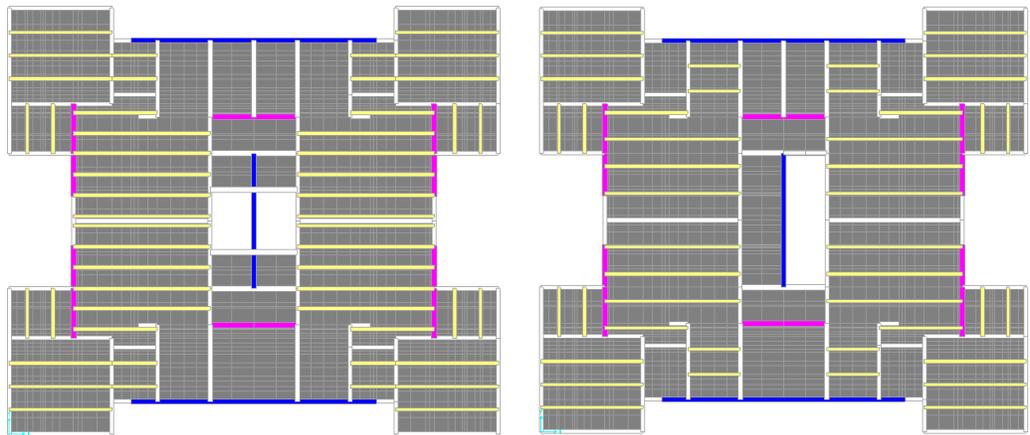


Fig. 15 Detalles de las viguetas de la losa de azotea y de la losa tipo

Como se mencionó anteriormente para la calibración del modelo se tomaron principalmente en cuenta dos características de la mampostería; el módulo de elasticidad y el peso específico. La primera se obtuvo a partir del f^*m dado por el fabricante el cual es igual a 60 kg/cm^2 . Las NTC-M, (2004) distinguen dos fórmulas según el tipo de carga que se presente las cuales son:

$$E_m = 600 f^*m \quad \text{para cargas de corta duración}$$

$$E_m = 350 f^*m \quad \text{para cargas sostenidas}$$

El peso que nos indica el fabricante ya incluye los recubrimientos y es de 1700 kg/m^3 .

Para los elementos de concreto se utilizaron dos resistencias, una con $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ y otra con $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$. De acuerdo con el reglamento de construcción del Distrito Federal el módulo de elasticidad del concreto se obtiene en base a la siguiente expresión:

$$E_c = 14000 \sqrt{f'c}$$

Por lo que para el primer tipo de concreto se obtiene un $E_c = 171464 \text{ kg/cm}^2$ y para el segundo $E_c = 197990 \text{ kg/cm}^2$. El peso por unidad de volumen se consideró de 2.4 t/m^3 , según lo indicado en las NTC-M, (2004).

En lo que respecta a la celosía, el fabricante no brinda muchas de las características que se consideran útiles, sin embargo partiendo de la resistencia de diseño a la compresión simple de la pieza f^*p y con ayuda de las NTC-M, (2004) podemos estimar el f^*m (ver tabla 4).

Tabla 4 Resistencia de diseño a compresión de la mampostería de piezas de barro (f^*m , sobre área bruta), NTC-M, 2004.

f_p^* , MPa (kg/cm ²) ¹	f_m^* , MPa (kg/cm ²)		
	Mortero I	Mortero II	Mortero III
6 (60)	2 (20)	2 (20)	2 (20)
7.5 (75)	3 (30)	3 (30)	2.5 (25)
10 (100)	4 (40)	4 (40)	3 (30)
15 (150)	6 (60)	6 (60)	4 (40)
20 (200)	8 (80)	7 (70)	5 (50)
30 (300)	12 (120)	9 (90)	7 (70)
40 (400)	14 (140)	11 (110)	9 (90)
≥ 50 (500)	16 (160)	13 (130)	11 (110)

¹ Para valores intermedios de f_p^* se interpolará linealmente para un mismo tipo de mortero.

Por lo anterior tenemos que el f^*m para la celosía será igual a 20 kg/cm² y el módulo de elasticidad calculado con las fórmulas anteriormente mencionadas para cargas de larga duración será de 7000 kg/cm² y para cargas de corta duración de 12000 kg/cm².

El peso dado por el fabricante es de 58.5 kg/m² incluyendo las juntas de concreto, en este caso solo se consideró el espesor del muro para obtener el peso por unidad de volumen ya que la celosía, obviamente, no cuenta con recubrimientos.

Ya teniendo el modelo terminado se decidió realizar la calibración para cada uno de los edificios estudiados ya que las pruebas de vibración ambiental mostraron propiedades dinámicas distintas en cada edificio. Principalmente para observar la variación en el módulo de elasticidad de la mampostería que pudiera presentarse en ellos a pesar de tener un mismo proyecto arquitectónico y estructural.

En la tabla 5 se observan los módulos de elasticidad de la mampostería con las cuales se obtuvo una mejor calibración en cada uno de los edificios.

Tabla 5 Módulo de elasticidad de la mampostería en los distintos modelos.

MODELO	MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/ cm ²)
1	32000
2	28500
3	29800
4	32700

Aunado a la mampostería se consideraron también como importantes en los modelos otros tres tipos de materiales, en la tabla 6 se muestran las propiedades utilizadas en los modelos de estas propiedades.

Tabla 6 Propiedades de los materiales.

MATERIAL	E (kg/cm ²)	PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN (kg/cm ³)
Celosia	7000	975
f'c 150	197990	2400
f'c 200	171464	2400

Cabe mencionar que en el modelo también se incluyó una carga adicional, correspondiente al peso del pretil por metro lineal, esta carga es uniformemente repartida en todo el perímetro de la azotea, la carga es igual a 120 kg/m.

Ya con el modelo calibrado se obtuvieron los periodos y frecuencias de los primeros tres modos de vibrar mostrados en la tabla 7, así como en las figuras 16, 17 y 18.

Tabla 7 Propiedades dinámicas de los modelos.

MODELO	PRIMER MODO		SEGUNDO MODO		TERCER MODO	
	PERIODO	FRECUENCIA	PERIODO	FRECUENCIA	PERIODO	FRECUENCIA
1	0.2266	4.41	0.1966	5.08	0.1817	5.5
2	0.2349	4.25	0.2037	4.9	0.1891	5.28
3	0.2317	4.32	0.2009	4.97	0.1862	5.36
4	0.2251	4.44	0.1953	5.12	0.1804	5.54

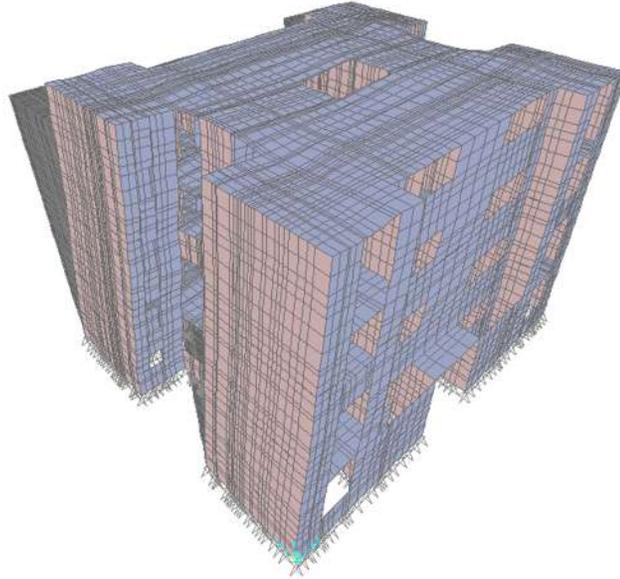


Fig. 16 Primer modo de vibrar del edificio 1 $T_1= 0.2266$.

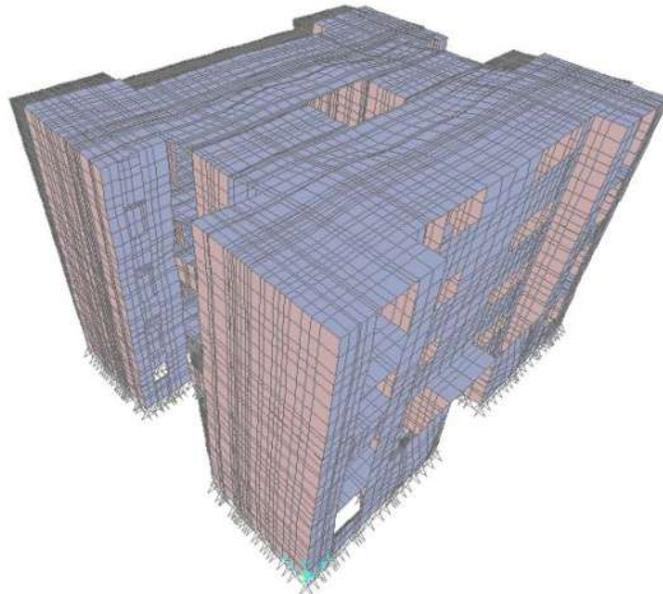


Fig. 17 Segundo modo de vibrar del edificio 1 $T_2= 0.1966$.

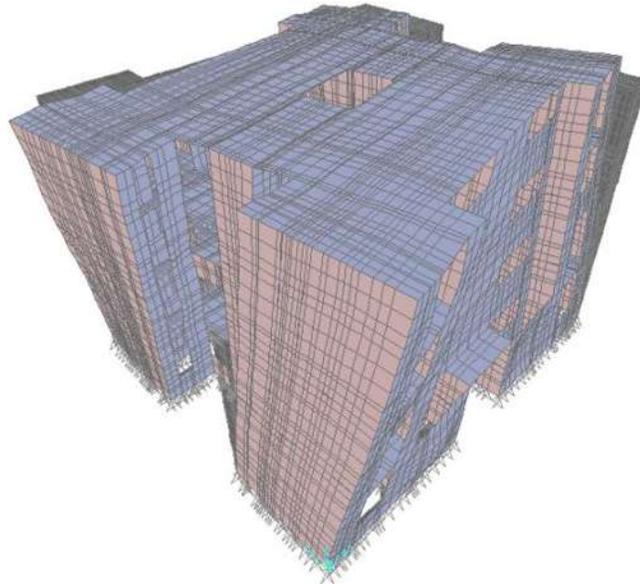


Fig. 18 Tercer modo de vibrar del edificio $1T_3 = 0.1817$.

En la figura 16 se puede observar que el primer modo de vibrar se presenta en la dirección longitudinal de la estructura, es decir en la dirección X y corresponde a una traslación, así mismo en la figura 17 vemos que el segundo modo tiene lugar en la dirección transversal correspondiendo de nuevo a una traslación pero ahora en la dirección Y, por último en la figura 18, vemos que el tercer modo corresponde a torsión.

4. MEDICIONES DE LOS EDIFICIOS CON VIBRACIÓN AMBIENTAL

A grandes rasgos para la instrumentación de un edificio y para la realización de un estudio de vibración ambiental se utiliza el acelerógrafo, el cual es un aparato que puede contar con tres sensores ortogonales que registran el movimiento en tres componentes ortogonales. Dicho aparato nos permite la obtención de un registro llamado acelerograma, el cual nos permite conocer, en nuestro caso, los valores de las aceleraciones máximas producidas en la estructura.

Para la ubicación de los sensores existen algunas recomendaciones dependiendo del objetivo del estudio, pero partiendo de la forma más elemental y de la idea de que el edificio sea de varios niveles, se colocarían tres sensores; uno en la azotea del edificio, otro en la planta baja o sótano (si contara con este) y el último fuera del edificio. Se deberán de tener interconectados a los tres sensores para que estos trabajen de forma simultánea.

La idea es que los aparatos localizados en el edificio nos brinden los registros necesarios para conocer el movimiento que tienen los niveles superiores con respecto a los inferiores y así poder estudiar el comportamiento del edificio. Por otra parte, el sensor colocado fuera del edificio nos dá la posibilidad de conocer el comportamiento del suelo sin contar con la interferencia de la estructura, a esto se le conoce como campo libre y nos permite el estudio del edificio con respecto al suelo en que esta desplantado.

No obstante lo anterior, cualquier edificio se puede instrumentar con una cantidad indeterminada de acelerógrafos, esta cantidad dependerá principalmente del alcance del estudio y la ubicación de los aparatos dependerá de los objetivos que se persigan.

4.1. Equipo utilizado

Para la realización de las mediciones de vibración ambiental se utilizó una grabadora digital Altus K2, la cual se puede apreciar en la figura 19 c. La grabadora digital cuenta con 12 canales de registro simultáneos, los cuales sirvieron para la utilización de nueve sensores acelerométricos uniaxiales modelo EpiSensor ES-U2 y un sensor acelerométrico triaxial modelo EpiSensor ES-T. Adicionalmente y como complemento se utilizó también un equipo GPS.

El EpiSensor ES-U2 de Kinometrics, es un acelerómetro uniaxial de fuerza balanceada para superficie diseñado primordialmente para estudios de ingeniería estructural, sin embargo, puede ser usado en una gran variedad de medición de aceleración hasta $\pm 4g$ y niveles más bajos como vibración ambiental. Con rangos de registro de escala completa desde ± 0.25 hasta $\pm 4g$ (seleccionable por el usuario), el ES-U2 proporciona una gran escala de registro de sismos, inclusive en localizaciones muy cercanas a la falla y en una gran variedad de diferentes estructuras.

Debido a que el ES-U2 es extremadamente de bajo ruido, puede detectar movimientos de vibración ambiental en campo, sitios urbanos y estructuras civiles desde 1Hz a 200Hz.

Por su parte el EpiSensor ES-T cuenta con características muy similares a las de ES-U2 y ambos permiten una calibración sencilla en campo. Gracias a su salida amplificada, ninguno de los dos modelos de sensores necesita electrónica externa adicional distinta, únicamente requiere un equipo de adquisición de datos.

Para la toma de registros en los edificios los sensores ES-U2 fueron colocados en grupos de tres en tres sobre placas metálicas de 35X35X2.54 cm como se muestra en la figura 19 b, esto con el fin de poder registrar movimientos en las tres direcciones y de poder tener los sensores correctamente nivelados y calibrados (longitudinal, transversal y vertical) en el sitio de su colocación. De igual manera el EpiSensor ES-T se colocó sobre una placa de las mismas dimensiones, como se observa en la figura 19 a.

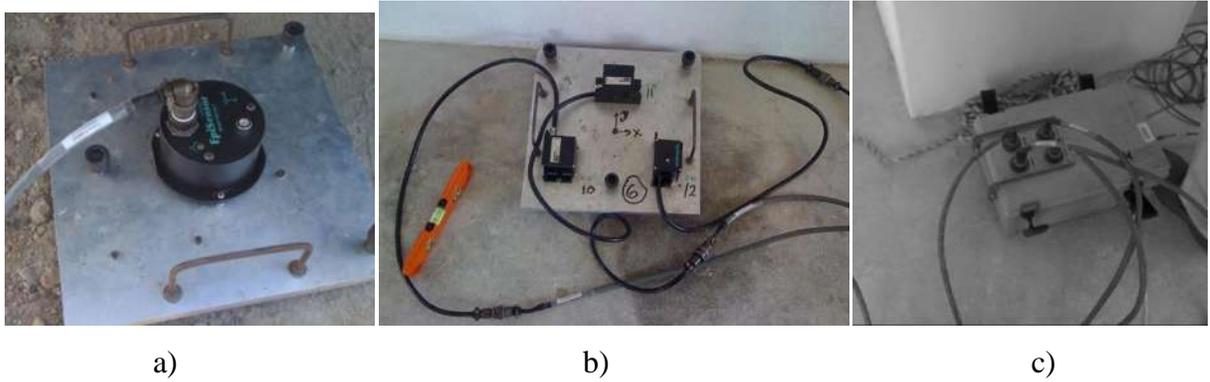


Fig. 19 Equipo utilizado.

4.2. Localización de los sensores

Los edificios se encontraban en la etapa final de su construcción, por lo que se tuvo que tener especial cuidado en la colocación del equipo, de tal manera que no se interrumpiera las actividades que se realizaban dentro del edificio y más aún para que no se dañara ni se viera afectado el correcto funcionamiento del equipo. Una medida al respecto fue que se decidió instrumentar los edificios en fin de semana y una vez terminada la jornada laboral de la constructora.

El sensor acelerométrico triaxial se utilizó para medir las aceleraciones del suelo por lo que fue colocado en campo libre alejado del edificio a una distancia de 20 metros aproximadamente y protegido del sol.

Las tres placas con los nueve sensores acelerométricos uniaxiales, fueron colocadas siempre de la misma manera en cada uno de los edificios y de frente a uno de los muros centrales como se muestra en la figura 20.

En elevación, se colocó en el primer nivel la placa con los canales 10, 11 y 12, en el tercer nivel los canales 4, 5 y 6 y finalmente en el nivel de azotea los canales 7, 8 y 9 (fig. 21).

Los canales 10, 4 y 7 se orientaron en la dirección longitudinal al edificio (dirección X en la figura 20), los canales 11, 5 y 8 en la dirección transversal (dirección Y) y finalmente los canales 12, 6 y 9 en dirección vertical al edificio (dirección Z en la figura 21). Adicionalmente el sensor triaxial correspondió a los canales 1, 2 y 3, registrando el canal 1 la dirección transversal, el canal 2 la dirección longitudinal y el canal 3 la dirección vertical en campo libre.

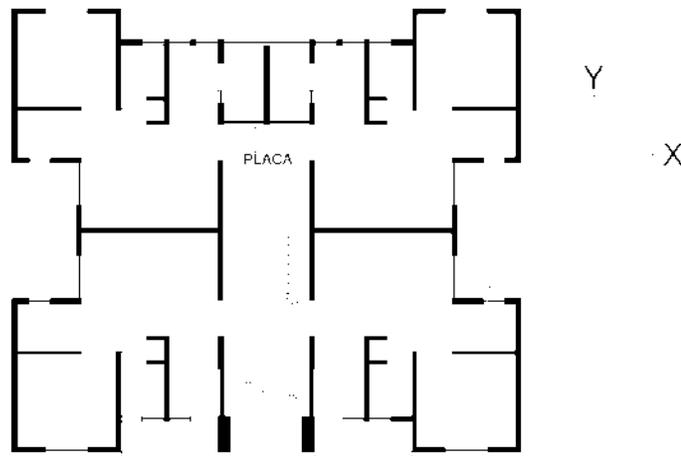


Fig. 20 Ubicación en planta de las placas.

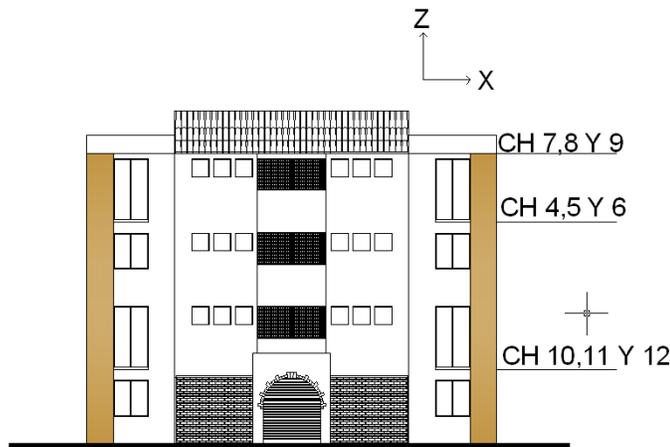


Fig. 21 Ubicación de las placas y acomodo de los canales.

4.3. Mediciones de vibración ambiental

Las mediciones se realizaron con duración de 3.5 minutos aproximadamente, 4 mediciones en el edificio 1 y en el edificio 2, y 3 para el edificios 3 y para el edificio 4. En las 14 mediciones se utilizó el mismo arreglo por motivos ya mencionados en el apartado anterior.

Los registros de datos se obtuvieron mediante el equipo Altus K2, el cual se acondicionó con los siguientes parámetros; 200 muestras por segundo, para un total de 42000 puntos adquiridos aproximadamente y una frecuencia de muestro de 0.0244 Hz.

A continuación se muestran los registros de algunos de los sensores colocados en el edificio 1 durante la segunda medición en este.

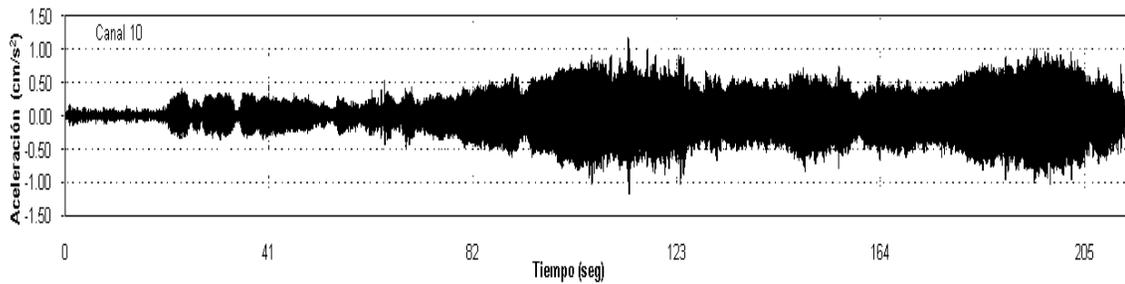


Fig. 22 Registro correspondiente a la dirección X.

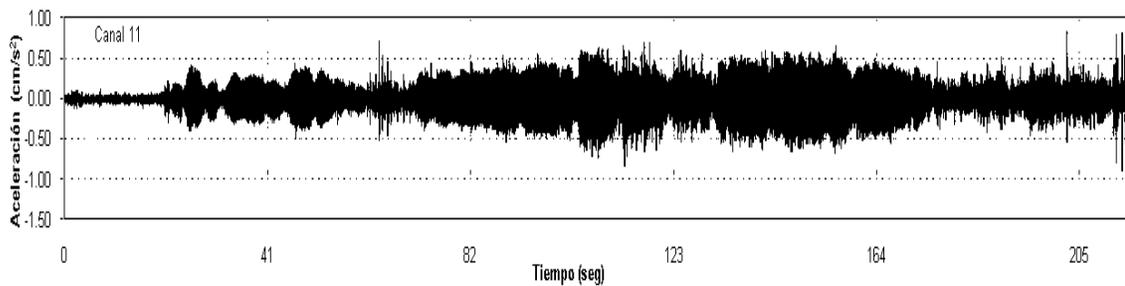


Fig. 23 Registro correspondiente a la dirección Y.

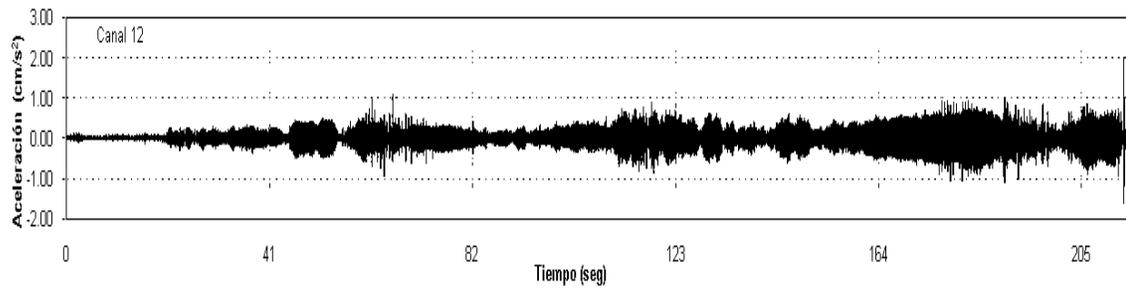


Fig. 24 Registro correspondiente a la dirección Z.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la correcta utilización de los acelerogramas y de la información que contiene es necesario realizar algunas correcciones. Básicamente se tienen que realizar dos tipos de correcciones las cuales son; la corrección instrumental y la corrección de la línea base. La primera se refiere propiamente a la calibración del o los instrumentos, como por ejemplo el ajuste de la sensibilidad. Es muy común que los valores de los acelerogramas se encuentren desplazados respecto a la línea cero de la aceleración, a este problema se refiere la segunda corrección. Adicionalmente deberán considerarse los ruidos externos, es decir ruidos con una frecuencia muy marcada que altere los resultados, por lo que una tercera corrección sería el filtrado de estos ruidos, lo anterior permitirá considerar al acelerograma como una suma de la señal de las vibraciones de la estructura más las posibles frecuencias ya mencionadas.

Posteriormente los acelerogramas pueden ser analizados de distintas formas, en el presente trabajo se realizó un análisis espectral basado principalmente en la transformada de Fourier.

Este análisis se realizó separando todo el registro en ventanas de 41 segundos aproximadamente, se obtuvieron cinco ventanas con un total de 8192 puntos cada una. El análisis de cada ventana se realizó de forma independiente, como si se trata de cinco registros por medición y no de uno.

5.1. Análisis de las señales

El análisis comenzó con la transformación del formato de los datos por medio del programa Strong Motion, se pasó de un formato EVT a un formato ASCII. Posteriormente se utilizó un programa elaborado en Matlab, el cual nos permite obtener los espectros de amplitudes llevando a cabo el siguiente proceso: a partir de las aceleraciones en formato ASCII, el registro completo se divide en 5 ventanas de 8192 puntos cada una y considera cada división como un registro independiente, posteriormente se calculó la transformada rápida de Fourier para cada registro analizado por separado cada ventana y por último el espectro de potencia a partir del cual se identificó la frecuencia fundamental, finalmente nos permite observar en formato xlsx los espectros de amplitudes para su análisis.

A continuación se muestran los promedios de las frecuencias obtenidas en los primeros tres modos de vibrar de cada uno de los edificios. Únicamente se promediaron los sensores colocados en el tercer nivel, ya que fue en los canales 4, 5 y 6 donde se hizo más notable la apreciación de los primeros tres modos de vibrar.

Cabe mencionar que como los registros completos de cada medición se dividieron en cinco ventanas que fueron tratadas como registros independientes determinando un espectro de potencia para cada ventana, primero se realizó un promedio de los cinco espectros de potencia para obtener un solo espectro de potencia que correspondiera a cada una de las mediciones de los edificios y posteriormente se realizó el promedio de las frecuencias obtenidas en todas las mediciones de cada uno de los cuatro edificios, los ejemplos de los espectros de potencia que se muestran en las figuras son los obtenidos del promedio por medición y las frecuencias mostradas en las tablas son los promedios obtenidos de las mediciones por edificio.

Cada promedio se acompaña con dos ejemplos de los espectros de potencia de los cuales se obtuvieron dichas frecuencias, en los espectros se puede apreciar en el eje horizontal las frecuencias en Hz hasta un valor máximo de 10, ya que se consideró que el valor de la frecuencia fundamental no excedería este valor, y en el eje vertical las amplitudes de dichas frecuencias.

En la figura 25 se observa una frecuencia de 4.81 Hz la cual corresponde al segundo modo de vibrar, la frecuencia mostrada corresponde al promedio de una de las mediciones y en la tabla 8 se muestran las frecuencias promediadas de todas las mediciones del edificio 1. La figura 26 nos muestra una frecuencia de 4.44 Hz la cual corresponde al primer modo de vibrar de la estructura y a el promedio de una de las mediciones.

Tabla 8 Resultados del edificio 1.

PROMEDIO EDIFICIO 1			
	MODO 1	MODO 2	MODO 3
FRECUENCIA	4.44	4.86	5.45
PERIODO	0.22535211	0.20569078	0.18340211

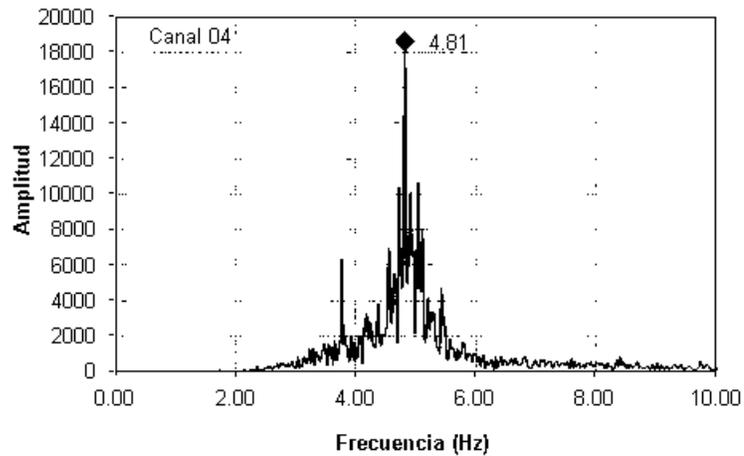


Fig. 25 Segunda medición edificio 1.

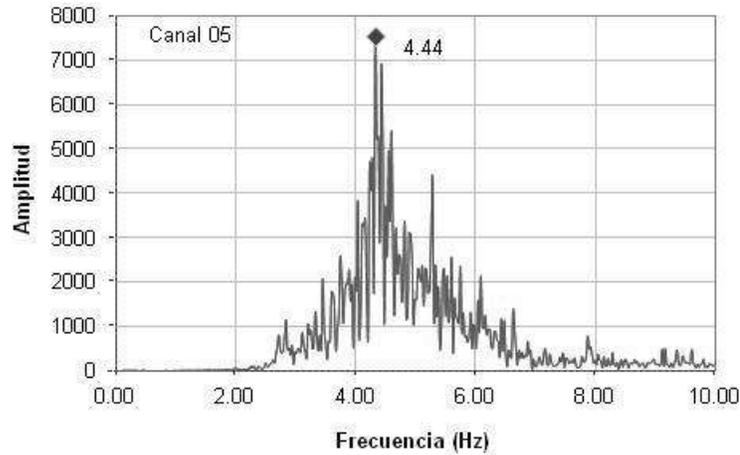


Fig. 26 Primera medición edificio 1.

En la figura 27 se observa una frecuencia de 4.71 Hz la cual corresponde al segundo modo de vibrar, la frecuencia mostrada corresponde al promedio de una de las mediciones y en la tabla 9 se muestran las frecuencias promediadas de todas las mediciones del edificio 2. La figura 28 nos muestra una frecuencia de 4.44 Hz la cual corresponde al primer modo de vibrar de la estructura y a el promedio de una de las mediciones.

Tabla 9 Resultados del edificio 2.

	PROMEDIO EDIFICIO 2		
	MODO 1	MODO 2	MODO 3
FRECUENCIA	4.44	4.75	5.45
PERIODO	0.22514071	0.21037868	0.18365473

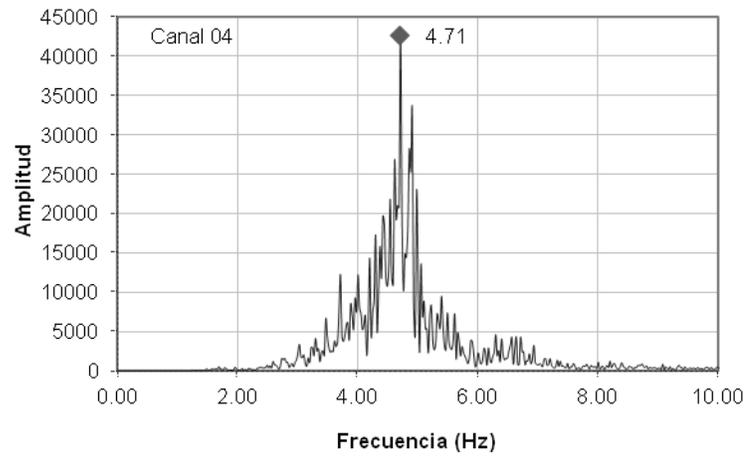


Fig. 27 Segunda medición edificio 2.

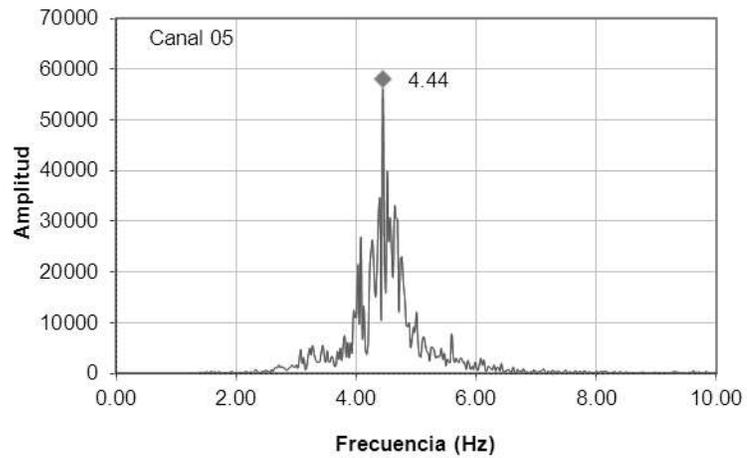


Fig. 28 Segunda medición edificio 2.

En la figura 29 se observa una frecuencia de 4.71 Hz la cual corresponde al segundo modo de vibrar, la frecuencia mostrada corresponde al promedio de una de las mediciones y en la tabla 10 se muestran las frecuencias promediadas de todas las mediciones del edificio 3. La figura 30 nos muestra una frecuencia de 4.32 Hz la cual corresponde al primer modo de vibrar de la estructura y a el promedio de una de las mediciones.

Tabla 10 Resultados del edificio 3.

	PROMEDIO EDIFICIO 3		
	MODO 1	MODO 2	MODO 3
FRECUENCIA	4.33	4.68	5.36
PERIODO	0.23112481	0.21367521	0.18645121

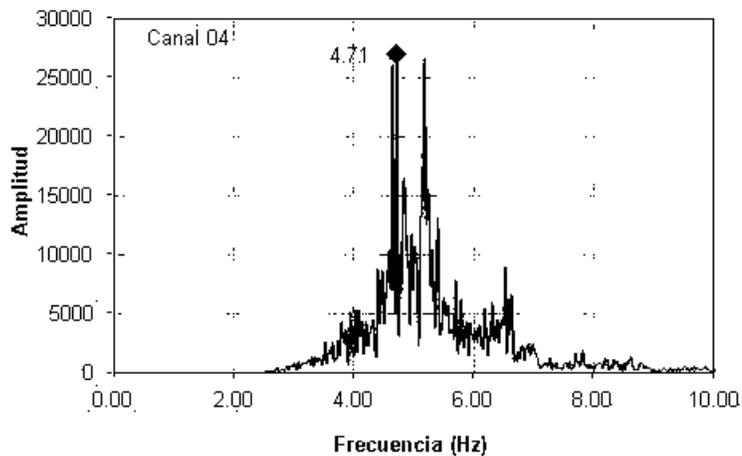


Fig. 29 Tercera medición edificio 3.

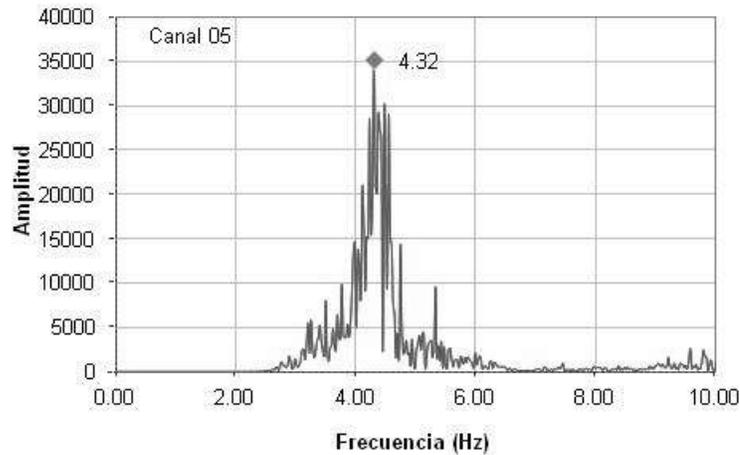


Fig. 30 Primera medición edificio 3.

En la figura 31 se observa una frecuencia de 4.81 Hz la cual corresponde al segundo modo de vibrar, la frecuencia mostrada corresponde al promedio de una de las mediciones y en la tabla 11 se muestran las frecuencias promediadas de todas las mediciones del edificio 4. La figura 32 nos muestra una frecuencia de 4.57 Hz la cual corresponde al primer modo de vibrar de la estructura y a el promedio de una de las mediciones.

Tabla 11 Resultados del edificio 4.

	PROMEDIO EDIFICIO 4		
	MODO 1	MODO 2	MODO 3
FRECUENCIA	4.59	4.80	5.27
PERIODO	0.21810251	0.20833333	0.189753321

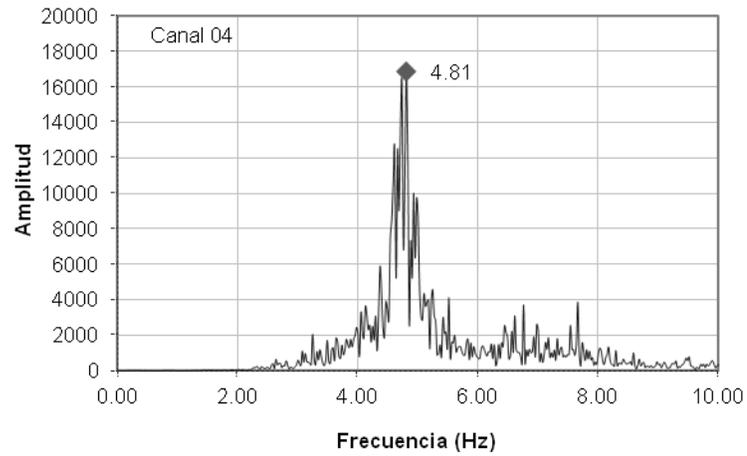


Fig. 31 Primera medición edificio 4.

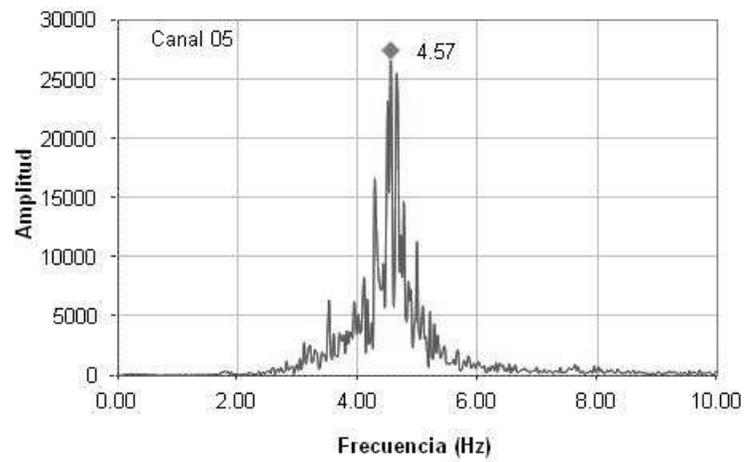


Fig. 32 Tercera medición edificio 4.

6. COMENTARIOS FINALES

En el presente trabajo se obtuvieron las características dinámicas mediante vibración ambiental de cuatro edificios de mampostería confinada de cuatro niveles; los edificios forman parte de un complejo habitacional construido en serie por lo que en principio todos los edificios son iguales arquitectónicamente.

Los resultados de vibración ambiental mostraron diferencias importantes en los periodos de vibrar de las estructuras, por lo que para la calibración de los modelos numéricos fue necesario ajustar los módulos de elasticidad de la mampostería para lograr el primer modo de vibrar de las estructuras. Se encontraron diferencias hasta del 13% en los módulos de elasticidad. Esta variación en los módulos de elasticidad se puede atribuir, entre otros factores, al control de calidad tanto de los materiales como de la mano de obra en la construcción de los edificios.

Respecto al modulo de elasticidad para cargas de corta duración propuesto por las NTC-M (2004), ya que fue de este el que se tomo como referencia, hay que señalar que su valor de 36000 kg/cm^2 no corresponde a los valores con que se obtuvo la mejor calibración en cada uno de los cuatro edificios y que se muestran en la tabla 5, teniendo una variación del 9 hasta el 20% lo que nos hace considerar dos posibles panoramas; el primero seria considerar modificar las NTC-M (2004) para lo que se propone la realización de trabajos en relación a su comportamiento dinámico, como el presentado, y de ahí partir para la obtención de los nuevos módulos de elasticidad, el segundo panorama sería el de realizar más normativas que regulen con más eficiencia la producción de los materiales utilizados en construcción, más concretamente la producción de elementos de mampostería.

Se pretende que los resultados puedan ser utilizados como punta de lanza para la elaboración de estudios en estructuras similares.

7. REFERENCIAS

Aki, K., (1957), "Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremores", Earthquake Research Institute, 35, p. 415-456.

Bazán, E. y Meli, R. (1992). "Manual de diseño sísmico de edificios" Editorial Limusa S. A., México.

Bendat J. S., Piersol A. G. (1993), "Engineering applications of correlation and spectral analysis" 2nd ed. USA, New York: Wiley Interscrena.

Borcherdt, R. D. (1970). "Effects of local geologyon ground motions near San Francisco Bay"En: Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 60, pp. 29 – 61.

Capon, J., (1969), "High-resolution frequency-wave number spectrum analysis", Proceedings, IEEE, 57-8, p. 1408-1418.

Carrillo, W.J., (2009), "Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto", Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 19-1, pp. 39-54.

Cuadra, P. E., (2007) "Aplicación de técnicas de vibración ambiental: análisis de microtremores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio", Proyecto de grado, Como requisito parcial para obtener el Título de Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar.

De Barcia, A. y Barboza, J.C.,(2003), "Determinación de períodos predominantes en edificaciones de mediana altura en la ciudad de Mérida", Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 24 No 1. 2003

Flores, H., Cárdenas, M., y Lomnitz, C., (2009), "Respuesta sísmica en el lago de Texcoco. Resultados apartir de registros de movimientos fuertes", Revista de Ingeniería Sísmica No. 81 37-51.

<http://es.scribd.com/doc/96082526/Analisis-modal-operacional>

http://www.construaprende.com/Tablas/Modulos_elasticidad.html

<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/michoacan/mpios/16088a.htm>

http://www.ingcivil.uchile.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=121&Itemid=417

http://www.lis.ucr.ac.cr/ieca/instrum_edificios3.pdf

Huerta, C. I., Lomelí, D. S., Esparza, M., Espinoza, F., Contreras, R. S., y Cifuentes, Y. B., (2009) “Frecuencias de vibración teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles localizado en la vecindad de la zona río de Tijuana, BC, México”, 98 Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 9(1-2)

Murià, D. (2007). “Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica en edificios instrumentados”.

Murià, D. y González, R. (1995). “Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. En: Revista de Ingeniería Sísmica”, No. 51, pp.25-45. México.

Nakamura, Y. (1989), “A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface”, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.

Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería, (2004), Gaceta Oficial del Distrito Federal.

Ordaz M y Montoya D, (1997), “Programa DEGTRA”, UNAM, México.

Ramírez, M., Guerrero J.J., “Cambio en los periodos naturales de vibración de una estructura de mampostería reforzada de 5 niveles”, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, Departamento de Materiales.

Sánchez, T.A., Flores, L. y Alcocer, S.M., (1997) “Estudio experimental sobre una estructura de mampostería confinada tridimensional, construida a escala natural y sujeta a cargas laterales,” X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Mérida. Pp.587-596.

Yauri, S. A., (2006), “Microtremores”, Compendio de Trabajos de Investigación CNDG –Biblioteca Instituto Geofísico del Perú. V. 7 p. 43 -56.

Zúñiga, O., (2005), “Evaluación analítica de la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería”, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México D. F., diciembre 2005.