

PROPIEDADES DINÁMICAS EXPERIMENTALES EN EDIFICIOS UBICADOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

C. ARCE LEÓN¹, H. HERNÁNDEZ BARRIOS², I. HUERGO RÍOS³

¹ Unidad de Investigación Multidisciplinaria, FES Acatlán, México, arce@acatlan.unam.mx

² Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, hugohernandezbarrios@yahoo.com.mx

³ Programa de Doctorado en Ingeniería, UNAM, CDMX, México, ing.huergo@hotmail.com

Resumen

En los últimos años, el occidente del Valle de México ha tenido un gran desarrollo urbano. La construcción de numerosos edificios que superan los 30 niveles de altura se ha llevado a cabo utilizando diferentes sistemas estructurales. Se utilizan diferentes normas en el diseño y la construcción con el fin de garantizar la calidad y la seguridad para los ocupantes, sin embargo, rara vez se realizan pruebas que determinen la respuesta dinámica real. En este trabajo, se realizaron pruebas de vibración ambiental en tres edificios con diferentes sistemas de resistencia lateral; estos, fueron seleccionados como estructuras típicas representativas de las tendencias actuales. Se determinaron diferentes disposiciones de distribución de sensores para identificar sus propiedades dinámicas relevantes. Los datos recogidos se procesaron mediante técnicas de análisis de señales con el fin de identificar los periodos de vibración y las relaciones de amortiguación modal de cada edificio.

Palabras clave: Vibración ambiental; edificios esbeltos; procesamiento de señales; Valle de México.

Summary

In recent years, the west of the Valley of Mexico has had a great urban development. The construction of numerous buildings that exceed height of 30 levels has been carried out using different structural systems. Different standards are used in the design and construction of buildings to ensure quality and safety for owners and users. However, tests that determine the actual dynamic response are rarely performed. In this paper, ambient vibration tests were performed in three buildings with different lateral resisting systems, which were chosen as representative structures of current trends. Different arrangements of distribution of accelerometers were chosen to identify their relevant dynamic properties. The collected data were processed through signal analysis techniques to identify the periods of vibration and modal damping ratios of each building

Keywords: Ambiental vibration test; slender building; signal processing; México City Valley.

1. Introducción

Los modelos utilizados en los análisis dinámicos de estructuras son idealizaciones creadas para representar la respuesta de estructuras reales a diversas cargas dinámicas (terremotos, viento, etc.). Estos modelos se pueden verificar mediante la realización de pruebas de vibración ambiental y forzada a gran escala para identificar las propiedades dinámicas de las estructuras (frecuencias de vibración, relación de amortiguación y formas modales) [1].

Las amplitudes del movimiento en el caso de las vibraciones ambientales dependen principalmente de la velocidad del viento. Por lo tanto, existe la posibilidad de que las pruebas de vibración ambiental y las pruebas de vibración forzada puedan conducir a resultados diferentes si las estructuras se responden de manera diferente ante varios niveles de excitación [2]. En este documento, las propiedades dinámicas de tres edificios se estudian a través de pruebas de vibración ambiental.

2. Diseño de ensayos de vibración ambiental

Se realizaron las pruebas de vibración ambiental en tres edificios regulares ubicados en la Ciudad de México: un edificio de 25 niveles, un edificio de 37 niveles y un edificio de 11 niveles.

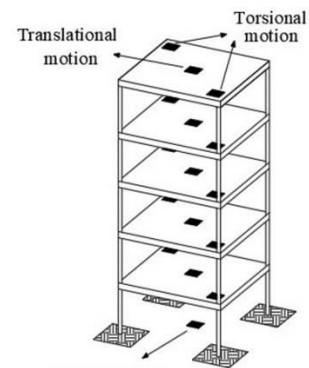
En la realización de las pruebas de vibración ambiental se emplearon cuatro acelerómetros triaxiales FBA EpiSensor de Kinometrics (Figura 1a). Las señales se registraron en digitalizadores Makalu (ver Figura 1b). Según Henao et al. [3], la disposición de los acelerómetros se llevó a cabo para calcular los períodos traslacional y torsional de vibración del edificio (Figura 1c)



a) Acelerómetro Kinometrics



b) Digitalizador Makalu



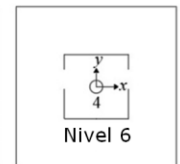
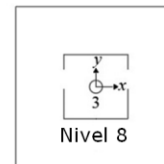
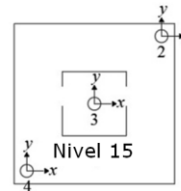
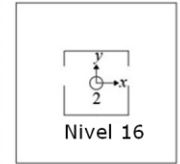
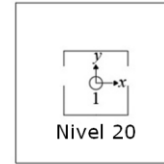
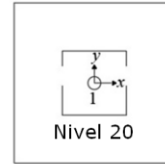
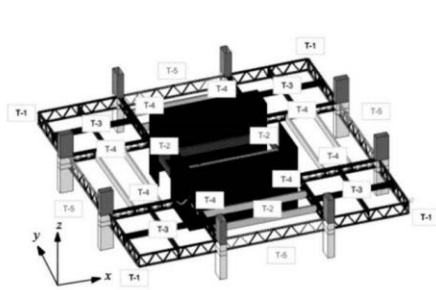
c) Esquema de colocación

Figura 1 Equipo empleado en las pruebas

2.1 Edificio de 25 niveles

La estructura fue construida sobre la zona de transición, es decir, capas aluviales arenosas y limosas con intervalos ocasionales de capas de arcilla. Las dimensiones en planta y elevación del edificio de 25 pisos son de 25 m, 25 m y 93.65 m, respectivamente. Cada piso tiene una altura de 3.746 m. La masa por unidad de longitud del edificio es de 112,500 kg/m. El sistema de resistencia lateral es una combinación de marcos arriostrados y muros de cortante. Los marcos de acero están reforzados por diagonales que constan de secciones huecas circulares de 32.4 cm x 0.84 cm. Cuenta con losas de concreto reforzado de 10 cm sostenidas por una retícula de armaduras de acero (T-1, T-4 y T-5), que se apoyan sobre ocho columnas de acero y un núcleo de concreto reforzado de 30 cm de espesor. El sistema de piso dispone de armaduras secundarias de acero entre las armaduras principales: dos armaduras de acero paralelas (T-2) en tableros de 10 m x 7.5 m y dos armaduras de acero perpendicular (T-3) en paneles de 7.5 m x 7.5 m. Las cuerdas superior e inferior de las armaduras están compuestas por dos ángulos iguales espalda con espalda, las diagonales son secciones cuadradas huecas. La vista general y el sistema de se muestran en la Figura 2. Las propiedades mecánicas y dimensiones de los elementos estructurales son descritas en detalle por Huergo y Hernández [4].

Se utilizaron dos arreglos de acelerómetros se muestran en la Figura 3. Los ejes locales de los 4 acelerómetros de cada disposición se alinearon con los ejes globales Figura 2(b). Se realizaron tres medidas. La duración aproximada de las señales fue de 300 s.



a) Vista lateral

b) Sistema de piso

Figura 2 Edificio de 25 niveles

a) Arreglo N1

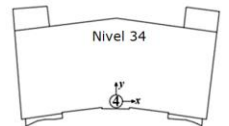
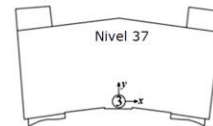
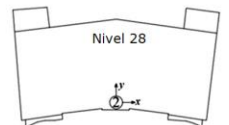
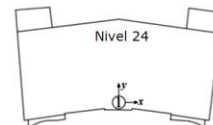
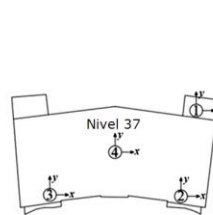
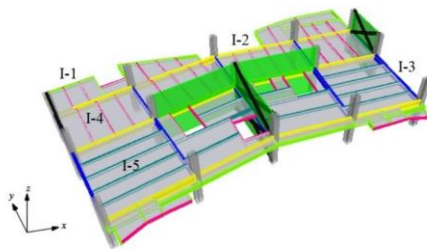
b) Arreglo N2

Figura 3 Esquemas de sensores

2.2 Edificio de 37 niveles

La estructura fue construida en la zona montañosa del Valle de México, que está compuesta por una capa superficial de flujos de lava o toba volcánica. Las dimensiones en planta y la elevación del edificio de 37 pisos son de 44 m, 22 m y 144.24 m, respectivamente. Cada piso tiene una altura de 3.89 m. La masa por unidad de longitud del edificio es de 235,664 kg/m. El edificio tiene un sistema de piso del tipo losacero con colados de concreto de 4 cm. El sistema de resistencia lateral del edificio en dirección X consiste en marcos rígidos. Por otro lado, en la dirección Y consiste en una combinación de muros de diafragma de mampostería de 12 cm y marcos arriostrados. Las vigas primarias de sección I de acero (I-2 e I-3) dividen el plano x-z y el plano y-z en marcos de 4 crujeías y marcos de 2 crujeías, respectivamente. La vista general y el sistema de piso se muestran en la Figura 4. Las propiedades mecánicas y las dimensiones de los elementos estructurales del edificio de 37 pisos son descritas en detalle por Huergo et al. [5]

Se utilizaron dos arreglos de acelerómetros Figura 5. Los ejes locales de los 4 acelerómetros de cada disposición se alinearon con los ejes globales que se muestran en la Figura 4(b). Se realizaron cuatro mediciones para cada arreglo. La duración media de las señales fue de 300 s.



a) Arreglo N1

b) Arreglo N2

a) Vista general

b) Sistema de piso

Figura 5 Edificio de 37 niveles

Figura 4 Esquemas de arreglos edificio 37 niveles

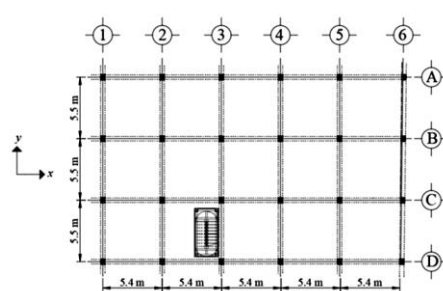
2.3 Edificio de 11 niveles

La estructura fue construida en la zona del lecho del lago del Valle de México, que consiste en depósitos de 10 a 80 m de arcilla altamente compresible y con alto contenido de agua cubierta por arenas resistentes. Las dimensiones en planta y elevación de la edificación de 11 niveles son de 27 m, 16.5 m y 34.65 m, respectivamente. Los entrepisos tienen una altura de 3.15 m. La masa por unidad longitud del edificio es de 88,993 kg/m. El sistema de resistencia lateral consiste en marcos rígidos de concreto reforzado. Cuenta con losas macizas de concreto reforzado de 10 cm de espesor soportadas perimetralmente por una retícula de vigas de concreto reforzado formada por secciones rectangulares de 40 cm x 60 cm. Las columnas de concreto reforzado son de sección rectangular de 60 cm x 80 cm, 40 cm x 60 cm y 40 cm x 50 cm para los pisos 1-2, 3-5 y 6-11, respectivamente. Se asumen las siguientes propiedades del material de concreto armado: peso volumétrico 240 N/m³, módulo de elasticidad de 25 GPa y relación de Poisson de 0,2. La vista general y el sistema de pisos se muestran en la Figura 6.

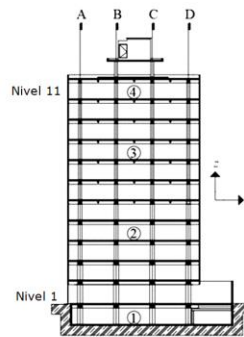
Se utilizaron dos arreglos de acelerómetros Figura 7. Los ejes de los acelerómetros en cada arreglo se alinearon con los ejes globales Figura 6(b). Se realizaron cuatro mediciones para cada arreglo y la duración media de las señales fue de 300 s.



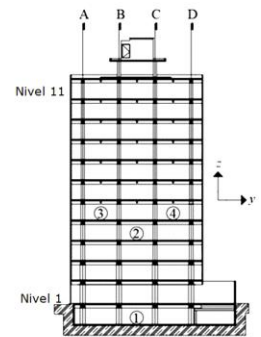
a) Vista general



b) Sistema de piso



a) Arreglo N1



b) Arreglo N2

Figura 6 Edificio de 11 niveles

Figura 7 Esquemas de arreglos edificio 11 niveles

3. Procesamiento de señales

El procesamiento de la señal se realizó mediante rutinas en MATLAB siguiendo los siguientes pasos [6]:

- Corrección de línea base mediante el método de mínimos cuadrados.
- Filtro pasa banda de 0.1 a 10 Hz.
- Cálculo de espectros de Fourier.
- Cálculo de espectros de Fourier promedio. Para el edificio de 11 pisos, cocientes espectrales.
- Cálculo de períodos y relaciones de amortiguación modal a través del ajuste de amplitud mejorado propuesto por Rinawi y Clough [7].

Los espectros Fourier promedio del edificio de 25 pisos se muestran en la Figura 8, mientras que los espectros promedio de Fourier del edificio de 37 pisos se muestran en las Figuras 9-10. Por otro lado, las relaciones espectrales promedio (estructura/suelo) del edificio de 11 pisos se muestran en las Figuras 11-12.

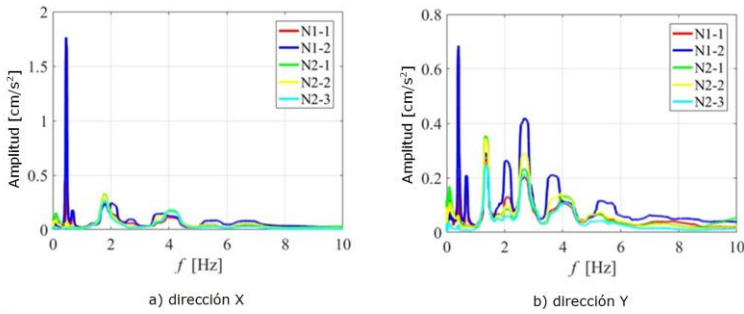


Figura 8 Espectros Fourier promedio edificio de 25 pisos: Arreglos N1 y N2

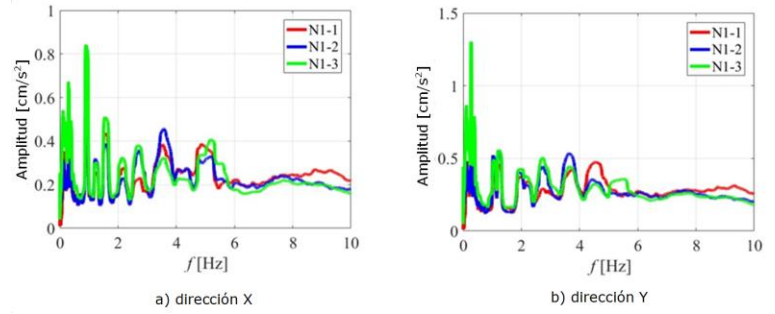


Figura 9 Espectros de Fourier promedio del edificio de 37 pisos: Arreglo N1

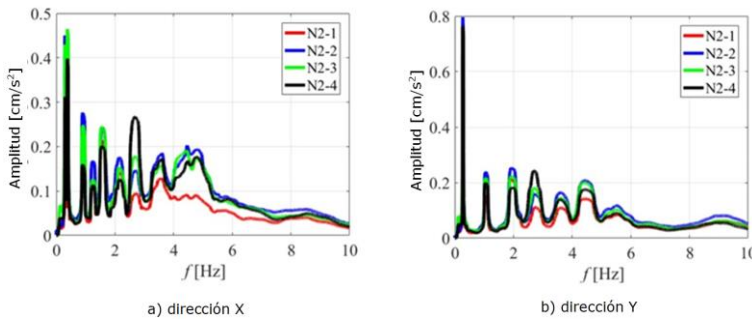


Figura 10 Espectros de Fourier promedio del edificio de 37 pisos: Disposición N2

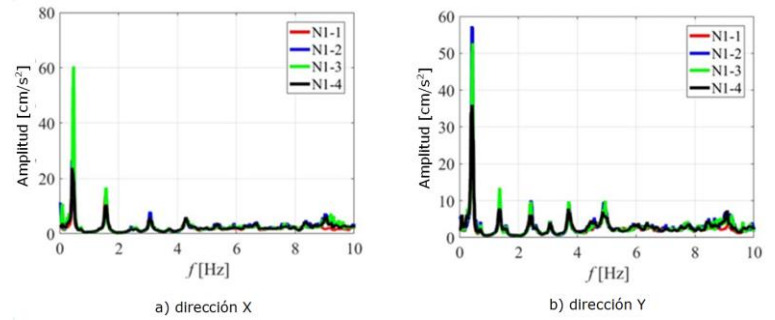


Figura 11 Relación espectral promedio (estructura/suelo) edificio de 11 pisos: Disposición N1

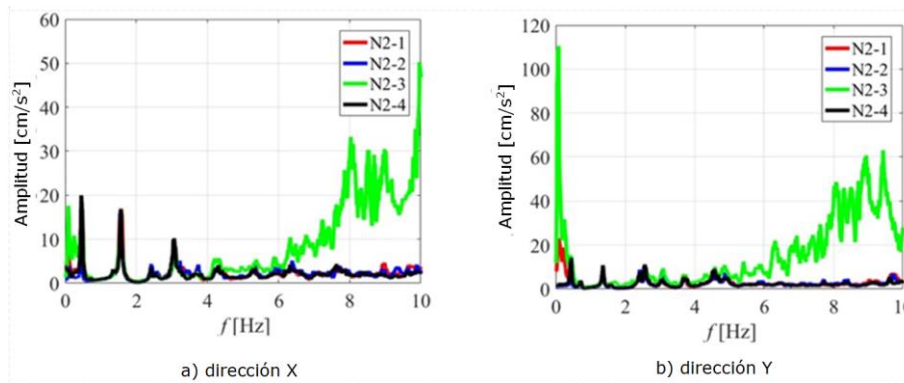


Figura 12 Relación espectral media (estructura/suelo) del edificio de 11 pisos: Disposición N2

4. Conclusiones

Se realizaron pruebas de vibración ambiental en 3 edificios ubicados en la Ciudad de México. Los valores medios de los períodos y las relaciones de amortiguación modal se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente. El efecto de la interacción suelo-estructura se observa para los edificios de 25 y 11 pisos.

Tabla 1 Períodos [s] de los tres edificios

Estructura	x-dirección			y-dirección			Torsión	
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 1	Modo 2
25 pisos	2,17	0,56	0,26	2,51	0,74	0,38	1,47	0,49
37 pisos	3,28	1,08	0,63	3,60	0,94	0,51	2,58	0,80
11 pisos	2,16	0,64	0,32	2,31	0,74	0,41	1,41	0,39

Tabla 2 Ratios de amortiguación modal [%] de los tres edificios

Estructura	x-dirección			y-dirección			Torsión	
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 1	Modo 2
25 pisos	6,15	6,70	6,33	5,79	6,02	6,24	5,94	6,13
37 pisos	4,60	3,05	3,96	5,77	2,94	3,56	3,92	3,79
11 pisos	4,76	1,49	1,42	3,71	1,95	1,50	3,90	2,14

5. Referencias

- [1] IVANOVIC, Sanja S.; TRIFUNAC, Mihailo D.; TODOROVSKA, M. I. Ambient vibration tests of structures-a review. *ISET Journal of earthquake Technology*, 2000, vol. 37, no 4, p. 165-197.
- [2] TRIFUNAC, Mihailo D. Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1972, vol. 1, no 2, p. 133-150.
- [3] HENAO ÁNGEL, David; BOTERO PALACIO, Juan Carlos; MURIÁ VILA, David. Identificación de propiedades dinámicas de un modelo estructural sometido a vibración ambiental y vibración forzada empleando mesa vibradora. *Ingeniería sísmica*, 2014, no 91, p. 54-73.
- [4] HUERGO, IF, HERNÁNDEZ, H. Coupled shear-flexural model for dynamic analysis of fixed-base tall buildings with tuned mass dampers. *Struct Design Tall Spec Build*. 2019; 28:e1671. <https://doi.org/10.1002/tal.1671>.
- [5] HUERGO, Iván F.; HERNÁNDEZ-BARRIOS, Hugo; PATLÁN, Carlos M. A continuous-discrete approach for pre-design of flexible-base tall buildings with fluid viscous dampers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, vol. 131, p. 106042.
- [6] WENZEL, Helmut; PICHLER, Dieter. *Ambient vibration monitoring*. John Wiley & Sons, 2005.
- [7] RINAWI, Abdulkarim M.; CLOUGH, Ray W. Improved amplitude fitting for frequency and damping estimation. En *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE*. SEM SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS INC, 1992. p. 25-25.

