

VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS ANTE RESONANCIA SÍSMICA EN GUADALAJARA Y ZAPOPAN POR EL SISMO DEL 11 DE MAYO DE 2016 $M_w=4.9$

*Adolfo Preciado¹, Alejandro Ramirez-Gaytán², Salvador Lazcano⁴, Iván Preciado³, Nayar Gutierrez¹
y Juan Carlos Santos⁵*

- ¹ Profesor-Investigador, Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). Periférico Sur Manuel Gómez Morín 8585, 45604, Tlaquepaque, Jalisco, México, adolfopreciado@iteso.mx, nayar@iteso.mx
- ² Profesor-Investigador, Departamento de Ciencias Computacionales, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara, Boulevard Marcelino García Barragán # 1421, 44430, Guadalajara, Jalisco, México. polkovodets1945@gmail.com
- ³ Ingeniero Civil Graduado, Departamento de Ingeniería Civil, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad de Guadalajara, Boulevard Marcelino García Barragán # 1421, 44430, Guadalajara, Jalisco, México. ivanpreciadoguzman@gmail.com
- ⁴ Investigador independiente, Suelo-Estructura. Cauda 964-1 Jardines del Bosque, 44520, Guadalajara, Jal. lazcano@sueloestructura.com.mx
- ⁵ Ingeniero Civil Graduado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima, Carretera Colima Coquimatlán Kilómetro 9, 28400, Coquimatlán, Col. juancarlos_santos11@outlook.com

RESUMEN

El 11 de mayo de 2016 ocurrió un sismo $M_w=4.9$ en la zona metropolitana de Guadalajara. El sismo con una intensidad V-VI generó daños leves y fue registrado en dos estaciones en Guadalajara y Zapopan. Se obtuvieron los cocientes espectrales H/V, frecuencia y periodos fundamentales del suelo. Los periodos medidos en las dos estaciones se usan para analizar la respuesta sísmica de diferentes edificios ante resonancia. Alrededor de la estación Zapopan los edificios entre 12 y 30 m son los más vulnerables. Caso contrario para todas las tipologías de edificios entre 9 y 21 m cercanos a la estación Guadalajara.

ABSTRACT

On May 11, 2016 occurred an earthquake of $M_w=4.9$ in the metropolitan zone of Guadalajara. The earthquake presented an intensity V-VI with slight damages and was registered at two stations in Guadalajara and Zapopan. The H/V spectral ratio was obtained, as well as the frequency and soil fundamental period. The measured periods at the two stations are used to analyze the seismic response of different buildings against resonance. Around the Zapopan station, the buildings between 12 and 30 m are the most vulnerable. Conversely, to all the typologies of buildings between 9 and 21 m close of the Guadalajara station.

EL SISMO DEL 11 DE MAYO DE 2016 $M_w=4.9$

El 11 de mayo de 2016 ocurrió un sismo $M_w=4.9$ en el área metropolitana de Guadalajara (AMG). De acuerdo con GDACS (2016) y SSN (2016), el evento ocurrió a una distancia de 1km de la ZMG, al norte de la Ciudad de Guadalajara y con una profundidad de 15km. El evento se sintió en diferentes partes de la ZMG (ver figura 1) con intensidades variables de V y VI en la escala de Mercalli modificada y presentó una zona de ruptura de aproximadamente 92 km² (10.3 x 8.9km), calculada tomando como base las réplicas de los días siguientes a lo largo del mes. La sismicidad de la región ha incrementado recientemente desde finales del 2015, con la presencia de cuatro sismos en la localidad de Tesistan, Jalisco, el cual forma parte del municipio de Zapopan.

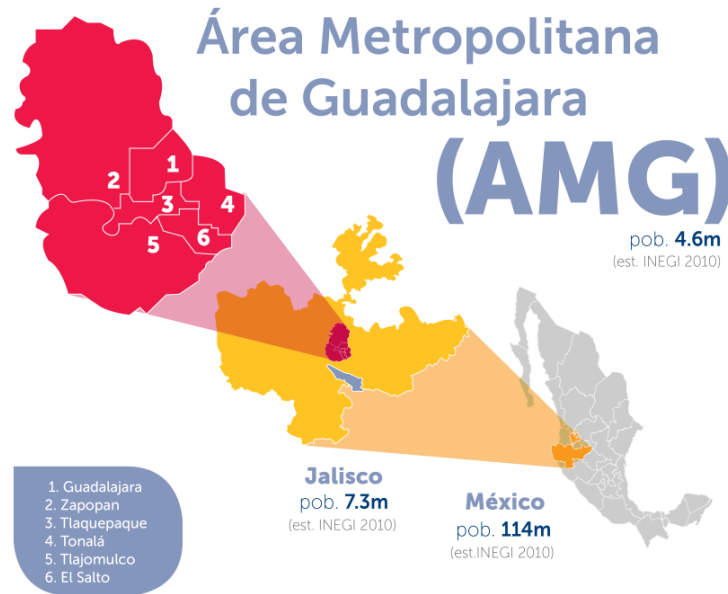
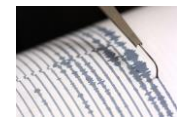
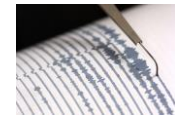


Figura 1 Extensión territorial y población de la AMG (JCV, 2017)

Por fortuna, la reciente sismicidad de la región no ha causado pérdidas humanas, aun cuando la AMG es reconocida nacional e internacionalmente como una zona altamente poblada y con diferentes tipologías estructurales que van desde edificios de gran altura de concreto y acero con diseño sismo-resistente, hasta estructuras de mampostería y adobe (ver figura 2) auto-construidas. Por otro lado, las autoridades reportaron la presencia de diferentes daños en elementos no estructurales de edificios como aplanados y algunos colapsos parciales de muros perimetrales de azoteas y algunos agrietamientos leves en muros.



Figura 2 Vista general de edificios típicos construidos en la AMG



El sismo del 11 de mayo fue registrado en dos estaciones localizadas en puntos estratégicos de la AMG. La primera estación se encuentra en la Ciudad de Guadalajara dentro de las instalaciones del Colegio Cervantes (GDLC), y la segunda en la Universidad Panamericana (GDLP) en Zapopan. Las aceleraciones registradas en ambas estaciones son de gran utilidad para tener una idea de las características del subsuelo a través de la extracción de los periodos fundamentales y amplificaciones máximas en relación con la proximidad de la fuente sísmica. Al combinar los periodos fundamentales del suelo con los de diferentes tipologías de edificios es posible contar con una estimación bastante aceptable para predecir el fenómeno de resonancia. Este efecto se presenta cuando existe un acoplamiento entre los periodos fundamentales del suelo y el de la estructura, el cual puede generar un colapso súbito de la edificación o golpeteo entre ellos debido a la amplificación dinámica inducida.

El objetivo principal de este artículo es la investigación de la vulnerabilidad ante resonancia de diferentes tipologías de edificios localizados en los alrededores de las estaciones de Guadalajara y Zapopan. El periodo fundamental del suelo en los alrededores de estas estaciones es obtenido por medio de las aceleraciones registradas y el cociente espectral H/V. Para obtener el periodo fundamental de vibración de diferentes tipologías de estructuras con variaciones en materiales, altura, niveles y sistema resistente se usan fórmulas reportadas en la literatura. Los sistemas resistentes de edificios bajo investigación consisten con mampostería confinada y no reforzada, sistemas de marcos resistentes (MRF) de concreto reforzado y acero, así como muros de cortante de concreto reforzado.

Los registros de aceleraciones del suelo fueron procesados con los cocientes espectrales H/V y las frecuencias, con el objetivo principal de determinar el periodo fundamental del suelo que se muestra en la figura 3. Las líneas continuas delgadas de colores rojo, verde y azul representan 3 ventanas de 10 segundos cada una, las líneas punteadas negras muestran la desviación estándar y las líneas gruesas negras representan el promedio de los cocientes espectrales H/V. El promedio del periodo fundamental del suelo en la estación GDLC en Guadalajara (figura 3a) es del orden de 1.66 Hz ($T=0.602$ s), con una amplificación máxima de 11.699. Por otro lado, en la estación GDLP en Zapopan se observó un periodo fundamental del suelo de 1.180 Hz ($T=0.847$ s), con una amplificación máxima de aproximadamente 7.524 como se muestra en la figura 3b.

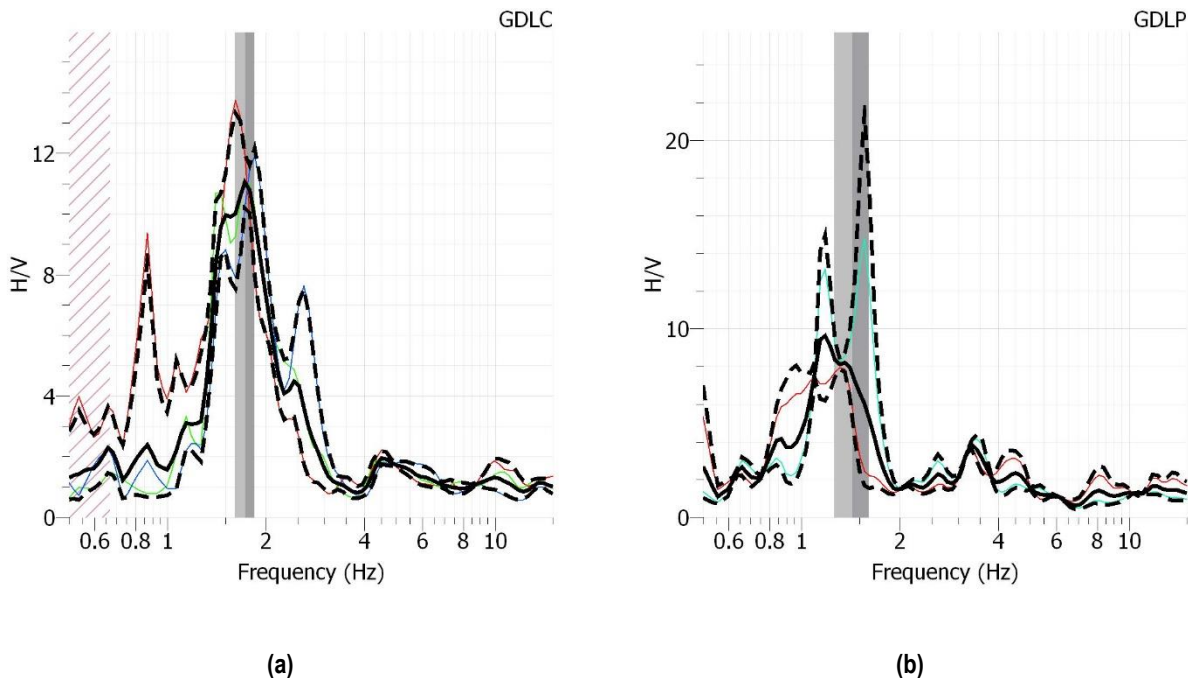
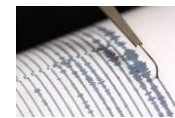


Figura 3 Periodos fundamentales del suelo extraídos del sismo del 11 de mayo de 2016 medido en las dos estaciones en la AMG; (a) estación GDLC en Guadalajara and (b) estación GDLP en Zapopan



La principal diferencia entre los periodos fundamentales medidos en las dos estaciones de la figura 3 se debe a la variabilidad entre las condiciones del subsuelo de un sitio a otro, presentando mejores condiciones la estación de Guadalajara. Esta mejoría en condiciones del subsuelo tiene que ver con el periodo fundamental más corto presentado en la estación Guadalajara, comparada con las condiciones del suelo un poco más blando en el caso de la estación de Zapopan. De acuerdo con los resultados de amplitud mostrados en las gráficas de la figura 3, la estación GDLC registró una mayor amplitud que la medida en la estación GDLP, debido a la proximidad de la fuente sísmica (Tesisatan) con la Ciudad de Guadalajara.

La estación GDLP se encuentra a una distancia de 8 km de la estación GDLC en Guadalajara. Los registros de aceleración del suelo (en sus tres componentes NS, EW y Z) en ambas estaciones también permitieron la construcción de los espectros de respuesta elástica. La respuesta es representada a través de un sistema de 1 grado de libertad (1GDL) con un amortiguamiento crítico del 5% y con una excitación inducida por el registro de aceleración del sismo. El asterisco rojo en el espectro de respuesta elástico de la estación GDLC muestra valores de aceleración máxima absoluta y su correspondiente periodo. La componente EW muestra una aceleración máxima de 208.705 gales, lo que corresponde a 0.21 g, asociados con un periodo de 0.2 s como se muestra en la figura 4. Por otro lado, el espectro de respuesta elástico de la estación GDLP (figura 5) mostró aceleraciones máximas en la componente EW, pero en este caso con una aceleración menor en el orden de 195.87 gales (0.20 g) y un periodo de 0.1 s. La diferencia en aceleración se debe a que la estación GDLP se encuentra más alejada de la fuente sísmica que la estación GDLC.

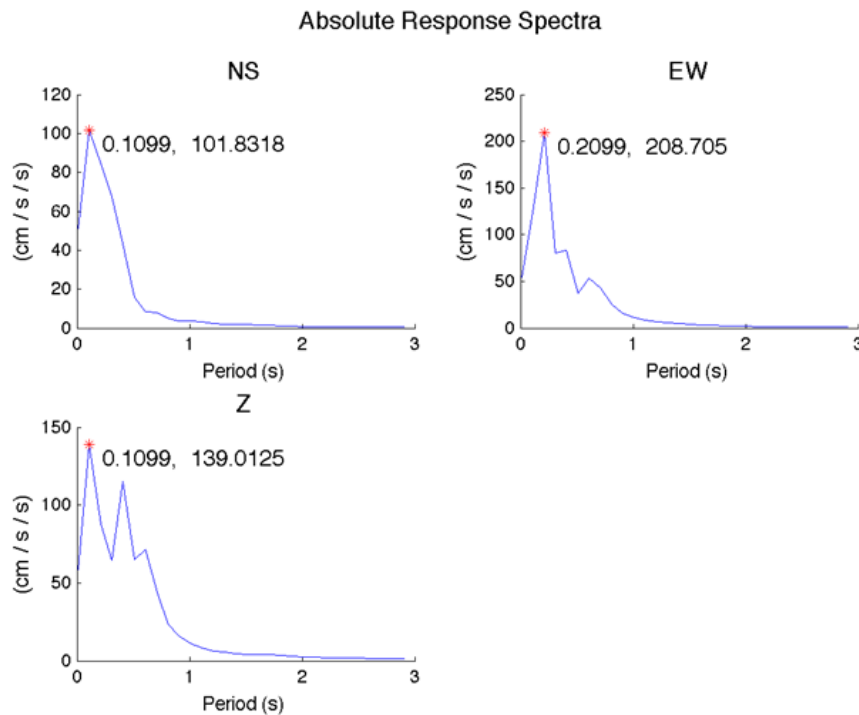


Figura 4 Espectro de respuesta elástico para un sistema de 1GDL con 5% de amortiguamiento crítico ante el sismo del 11 de mayo de 2016 medido en la estación GDLC en Guadalajara

Como se puede observar en las figuras 4 y 5, el espectro de respuesta elástica representado por un sistema de 1GDL es una herramienta muy útil para tener una idea inicial y de forma simplificada sobre la respuesta estructural de diferentes edificios con respecto a su periodo y su relación con la aceleración medida en la estación. Los periodos fundamentales estructurales en ambos espectros de respuesta se encuentran entre 0.1-0.2 s, lo que corresponde a los periodos fundamentales de la mayoría de los edificios compactos de mampostería y adobe. En cuanto a la respuesta de

diversos edificios a la aceleración medida en ambas estaciones, más daño se espera en este tipo de edificios compactos en comparación con edificios de gran altura cuyo periodo fundamental se encuentra comprendido entre 1 y 2 s.

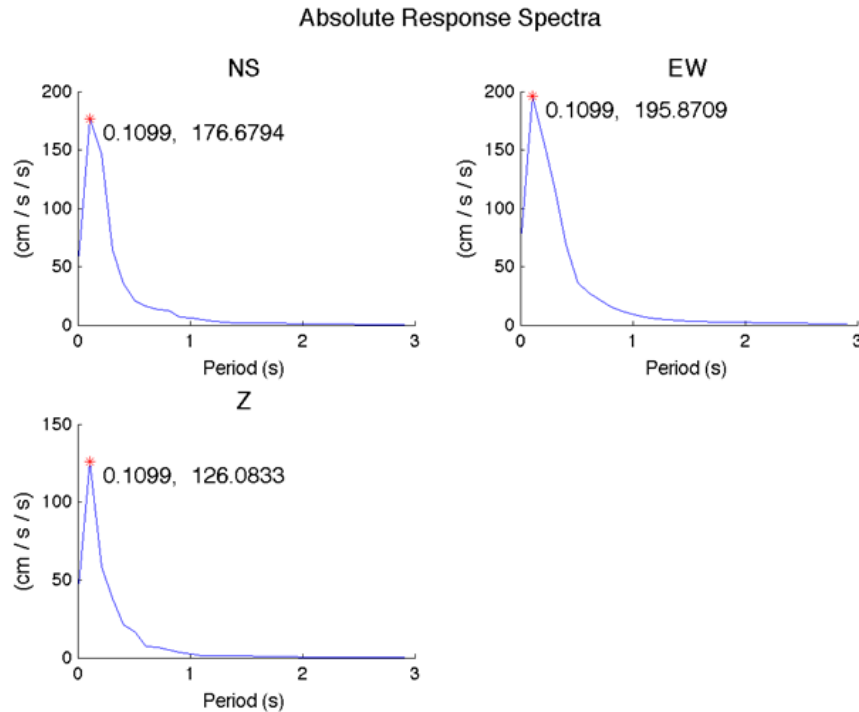


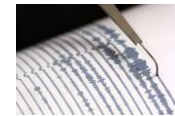
Figura 5 Espectro de respuesta elástico para un sistema de 1GDL con 5% de amortiguamiento crítico ante el sismo del 11 de mayo de 2016 medido en la estación GDLP en Zapopan

EFFECTOS DE SITIO Y EL DAÑO QUE PUEDEN GENERAR EN LAS EDIFICACIONES

Como se mencionó en párrafos anteriores, la amplificación dinámica inducida por el efecto de resonancia puede generar fuertes daños estructurales que induzcan colapsos parciales o totales en los edificios. Este efecto se activa cuando el periodo fundamental de la estructura está en el rango de proximidad del periodo fundamental del suelo (o viceversa), lo que conlleva a consecuencias catastróficas como las ocurridas en la Ciudad de México debido al efecto del sismo de 1985. Los edificios de gran altura con periodos fundamentales similares a los del periodo fundamental del suelo de características pobres en la zona del centro histórico (lo que alguna vez fuera el lago de Texcoco). Los edificios de reducida altura como los de mampostería confinada, no reforzada y adobe también son vulnerables a este efecto. Principalmente la mampostería no confinada y las estructuras de tierra como la tapia (tierra compactada) y adobe carecen de una integridad estructural entre elementos estructurales, lo que conlleva a presentar colapsos frágiles. En el caso de la mampostería confinada o reforzada internamente puede presentar un mecanismo cuasi-frágil con una mayor disipación de energía que la presentada por estructuras frágiles.

Preciado (2015) y Preciado et al. (2016) mencionan que los mecanismos de colapso frágiles y cuasi-frágiles son relacionados con el bajo desempeño sísmico de la mampostería y las estructuras de tierra, debido a que presentan un comportamiento no-lineal inclusive ante esfuerzos muy pequeños. Este mal comportamiento se encuentra gobernado por la baja resistencia a la tensión de este material, mostrando agrietamientos ante fuerzas laterales reducidas que pueden generar la formación de un mecanismo de colapso completo que finalice en la falla del edificio.

Estas fallas estructurales se pueden presentar principalmente debido a fuerzas de inercia inducidas en el plano y fuera de este o a combinaciones complejas de golpeteo entre elementos y transmisión de fuerzas que dependen del



comportamiento ante la transmisión de estas cargas (e.g. muros, contrafuertes, domos, cubiertas abovedadas, etc.). Otro factor importante que determina el comportamiento y modo de falla de estructuras es la cantidad de carga vertical que el elemento sostiene y la vulnerabilidad estructural, esto puede generar la formación de un mecanismo que finalice con el colapso completo del edificio.

Preciado et al. (2015) afirman que los edificios más vulnerables ante la acción de sismos en la AMG han sido construidos con mampostería confinada o no reforzada, así como adobe, siendo muy vulnerables ante la acción de sismos, especialmente en el caso de mampostería no reforzada y adobe. Los autores clasifican a los edificios de mampostería no reforzada en 3 grupos principales: 1) estructuras de adobe con cubierta ligera y en algunos casos pesada; 2) mampostería de tabique de barro rojo recocido, tabicón o block ligero con mortero de cemento-arena o yeso sin ningún confinamiento y 3) mampostería con un confinamiento deficiente o que no sigue los reglamentos de construcción sismo-resistente en México. Este último grupo y las de adobe se refieren a estructuras auto-construidas o vernáculas que no siguen ningún reglamento o especificaciones acerca de un diseño sísmico adecuado de elementos estructurales y de confinamiento adecuado.

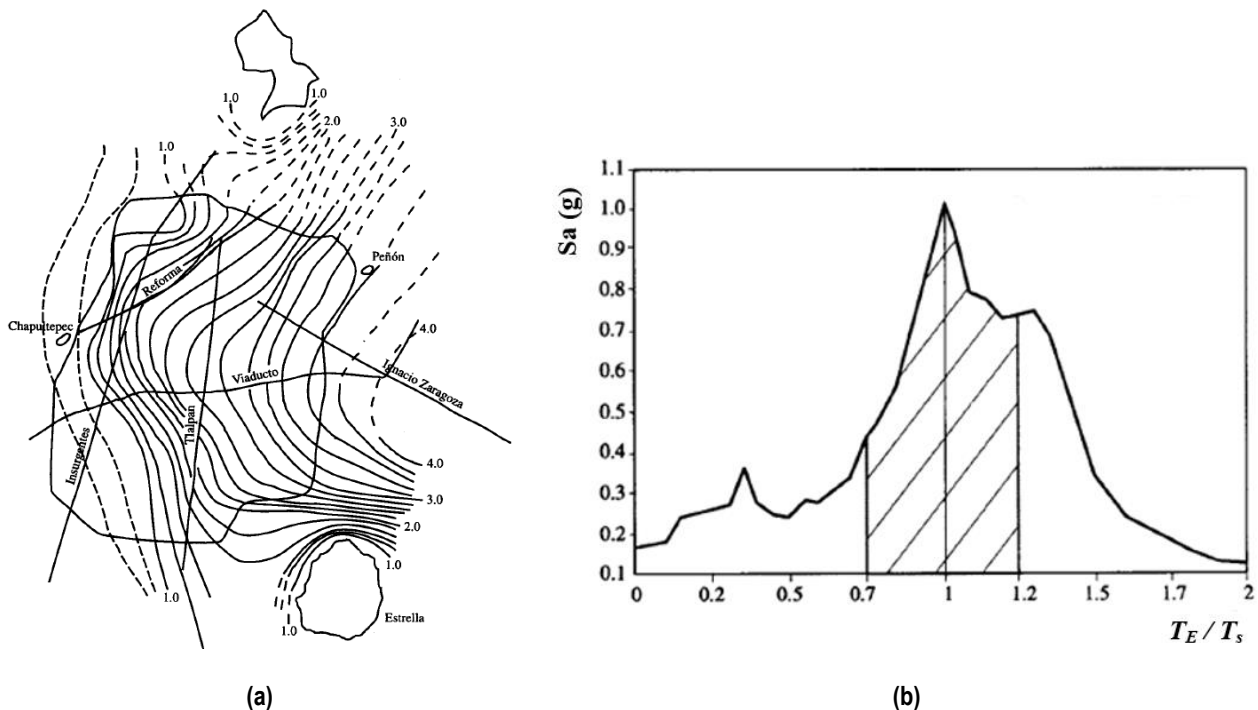
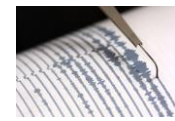


Figura 6 Regulaciones sísmicas de la Ciudad de México; (a) mapa de periodos fundamentales del suelo (en segundos) y (b) cociente entre el periodo fundamental de la estructura T_E y el del suelo T_S (Bazan y Meli, 2003)

Debido a la reciente explosión demográfica y desarrollo económico de la AMG de los últimos años, la demanda por casas habitación y oficinas corporativas en edificios verticales (ver figura 2) ha crecido exponencialmente, afectando el ambiente urbano de la ciudad y poniendo en riesgo a las personas debido a que el diseño sísmico y niveles de desempeño de estos edificios es dudoso ante diferentes niveles de amenaza. Este riesgo se aumenta aún más si tomamos en cuenta el daño que se puede generar en estos edificios debido al efecto de resonancia. Estas incertidumbres se hacen más puntuales al analizar los daños sufridos por diversos edificios esbeltos de gran altura como consecuencia del sismo de 1985 en la Ciudad de México $M_w = 8.1$, la cual se encuentra en una zona lejana a la fuente sísmica.

Como consecuencia de esta desafortunada experiencia en 1985, ocurrieron múltiples pérdidas humanas y colapsos totales y parciales de edificios. Posteriormente, los reglamentos en México fueron modificados y se instalaron diversas estaciones de medición sísmica en la Ciudad. Con los registros de aceleraciones del sismo de 1985 en algunas estaciones de la Ciudad fue posible el desarrollo de una zonificación del Valle de México, con el objetivo de proponer



un mapa de periodos fundamentales del suelo en diferentes puntos por medio de curvas de nivel como se muestra en la figura 6a. Por medio del espectro de la figura 6b y la ecuación 1 propuesta por el RCDF (2004) es posible determinar si el edificio existente o por diseñar es vulnerable ante los efectos de resonancia en caso de la ocurrencia de un sismo de mediana a gran intensidad:

$$0.7 \leq T_E/T_S \leq 1.2 \quad (1)$$

donde T_E representa el periodo fundamental de la estructura y T_S el periodo fundamental del suelo. Por otro lado, en la AMG no existe una zonificación del subsuelo en diferentes puntos de esta zona, lo que permitiría en caso de existir el contar con periodos fundamentales del suelo y zonas vulnerables a efectos de sitio. Además, en el contexto sinológico nacional, la AMG se encuentra localizada en una zona sísmica alta (C), con amenazas sísmicas debidas a la zona de subducción entre las costas de los estados de Colima y Jalisco y el llamado bloque de Jalisco, zona donde se han presentado sismos de gran magnitud e intensidades altas en diferentes puntos de ambos estados. La sismicidad en la zona de subducción se encuentra representada por el contacto entre las macro-placas del Pacífico y Norteamericana con las micro-placas de Cocos y Rivera. Por otro lado, en el bloque de Jalisco por la macro-placa Norteamericana y la de Rivera.

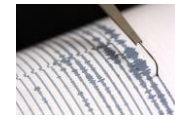
La sismicidad de la región ha demostrado en los eventos sísmicos pasados, que tanto estructuras de baja altura como de gran altura de la AMG son susceptibles a sufrir daños severos. En cuanto a la vulnerabilidad ante los efectos de resonancia en la AMG, no existen trabajos o evidencias de daños por amplificación dinámica. Aparte de la gran amenaza y cercanía de la fuente sísmica a esta área metropolitana, no se cuenta con una zonificación adecuada de efectos de sitio y periodos fundamentales del suelo.

VULNERABILIDAD A RESONANCIA DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE EDIFICIOS EN GUADALAJARA Y ZAPOPAN ANTE EL SISMO DEL 11 DE MAYO DE 2016 $M_w=4.9$

Los sistemas de 1GDL mostrados en las figuras 4 y 5 con las aceleraciones medidas en dos estaciones, la GDLC en Guadalajara y la GDLP en Zapopan son de suma importancia para conocer la respuesta de diferentes tipologías estructurales representadas a través de su periodo con respuesta a la aceleración del sismo del 11 de mayo de 2016. Sin embargo, los sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL) son más representativos de la respuesta estructural de un edificio, ya que representan por medio de masas concentradas, rigideces y amortiguamientos, a los diferentes entresijos del edificio. El análisis dinámico de este tipo de sistemas representa un mayor consumo de tiempo y se necesitan varios modelos de análisis. Además, un cierto edificio puede ser representado tridimensionalmente con el uso de metodologías numéricas más aproximadas como el elemento finito, elemento discreto y análisis límite. El modelo puede ser calibrado con información experimental obtenida en el edificio para tener modelos del edificio más representativos. Sin embargo, los modelos tridimensionales detallados para un edificio en particular convierten esta estrategia en no practica para analizar la respuesta sísmica de edificios a escala territorial, siendo más prácticas las estrategias basadas en modelos de 1GDL y MGDL, para establecer además una relación entre la aceleración y la respuesta a través del periodo.

Las componentes que determinan el periodo fundamental de vibración de una estructura son la masa, altura total, numero de niveles, materiales, sistema resistente, rigidez lateral y elementos no estructurales. El periodo fundamental de edificaciones existentes puede evaluarse a través de la medición de sismos reales en edificio instrumentados con acelerómetros y que no hayan alcanzado niveles importantes de daño más allá de agrietamientos leves o principalmente en el rango elástico. Además, el periodo se puede obtener en una estructura al realizar mediciones de ruido ambiental de corta duración inducidos por tráfico y viento que le induzcan pequeñas vibraciones.

La simulación numérica también permite obtener el periodo a través de un análisis modal elástico lineal. Existen en la actualidad un gran número de formulaciones que permiten estimar el periodo fundamental de diferentes tipologías de estructuras. La primera de las formulas (ver ecuación 2) fue propuesta por NEHRP (1994), y es considerada como una forma simplificada de obtener el periodo de edificios de concreto reforzado y acero debido a que solo involucra como variable el número de niveles.



$$T = 0.1N \quad (2)$$

donde en (2), N representa el número de niveles que no excedan de 12 y una altura mínima de 3 m en entrepiso. Otra de las fórmulas importantes encontrada en la literatura es la desarrollada por Goel y Chopra (1997), en donde los autores usaron una extensa base de datos de aceleraciones y periodos fundamentales medidos en diferentes tipologías de edificios como consecuencia de 8 sismos ocurridos en Estados Unidos, desde el sismo de San Fernando en 1971 hasta el sismo de Northridge en 1994. La ecuación 3 propuesta por Goel y Chopra (1997) superó por mucho a la fórmula general de $T = 0.1N$ incluida en la mayoría de los reglamentos de diseño sísmico de edificios a base de marcos (MRF) de acero y concreto reforzado.

$$T = \alpha H^\beta \quad (3)$$

donde H representa la altura del edificio y las constantes β y α pueden variar dependiendo del tipo de material de construcción y sistema resistente. Se recomienda tomar a la constante β como 0.75 y $\alpha = 0.075$ para MRF de concreto reforzado, 0.085 para MRF de acero, 0.05 para edificios con muros de cortante y atezadores. La ecuación 3 propuesta por Goel y Chopra (1997), se incluyó además en los códigos de diseño sísmico de Estados Unidos y Canadá (UBC, 1997 y NBCC, 2005) y en el Eurocódigo 8 (Eurocode 8, 2004).

Analizando los resultados obtenidos de vibración ambiental en edificios con sistema MRF de concreto reforzado localizados en Canadá, Chiauzzi et al. (2012) afirman que los códigos de diseño sísmico de Estados Unidos, Canadá y Europa solo consideran el material de construcción, tipología estructural y altura del edificio, despreciando otros factores que afectan el comportamiento dinámico como lo son la distribución de masas, rigidez y muros diafragma estructurales y de relleno. Estas suposiciones pueden ser la razón de que los periodos fundamentales en edificios medidos a través de vibración ambiental sean menores que los medidos en condiciones de sismos reales como los estudiados por Goel y Chopra (1997) con el uso de la ecuación 3. Esta tendencia también fue observada por diferentes investigadores alrededor del mundo como Hong y Hwang (2000), que analizaron datos de vibración ambiental en edificios con sistema MRF de concreto reforzado diseñados con el código de diseño UBC (1997). Por otro lado, Gallipoli et al. (2009 y 2010) observaron lo mismo en edificios con sistema MRF también de concreto reforzado instrumentados en Europa, así como Oliveira y Navarro (2010) en Portugal por medio de simulaciones numéricas y experimental. Crowley y Pinho (2004 y 2006) proponen la siguiente expresión (ecuación 4) para obtener el periodo fundamental en edificios (existentes) con sistema a base de muros de cortante de concreto reforzado con sección agrietada:

$$T = 0.055H \quad (4)$$

y la ecuación 3 para edificios (nuevos) con muros de cortante de concreto reforzado no agrietados. En la AMG, los materiales de construcción más comunes en viviendas y locales comerciales es la mampostería no reforzada y la confinada, que van desde 1 a 5 niveles máximo. Estos edificios de baja a mediana altura ocupan la mayoría del contenido de edificaciones con una altura de entrepiso típica de entre 2.70 y 3 m. El resto de las construcciones en el AMG se encuentran representadas por estructuras que van de mediana a gran altura como lo es el caso de sistemas a base de marcos MRF de acero y concreto reforzado, así como por muros de cortante en edificios de baja a mediana altura de concreto reforzado. Estas tipologías de edificios se encuentran concentradas en la tabla 1.

La máxima altura que se considera en este trabajo para las edificaciones de mampostería es de 15 m y para los edificios con sistemas MRF y muros de cortante 30 m. No existe mucha información reportada sobre formulaciones para obtener el periodo fundamental de estructuras de mampostería no reforzada y confinada. Para este propósito se tomará en cuenta los periodos de 0.3-0.5 s recomendados por Ingham y Griffith (2011a y b), como resultado de las observaciones post-sismo en edificaciones fuertemente dañadas de mampostería no reforzada por los sismos de Canterbury 2010/2011.

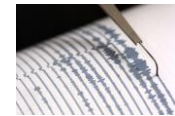


Tabla 1: Periodos fundamentales de edificios típicos de la AMG dependiendo del material de construcción, sistema resistente, numero de niveles y altura total

Altura (m)	# Niveles	General	MRF Concreto	MRF Acero	Muros de Cortante	Mampostería
		T=0.1N (s)	T=0.075H ^{0.75} (s)	T=0.085H ^{0.75} (s)	T=0.055H (s)	T (s)
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	0.10	0.17	0.19	0.17	0.30
6	2	0.20	0.29	0.33	0.33	0.35
9	3	0.30	0.39	0.44	0.50	0.40
12	4	0.40	0.48	0.55	0.66	0.45
15	5	0.50	0.57	0.65	0.83	0.50
18	6	0.60	0.66	0.74	0.99	NA
21	7	0.70	0.74	0.83	1.16	NA
24	8	0.80	0.81	0.92	1.32	NA
27	9	0.90	0.89	1.01	1.49	NA
30	10	1.00	0.96	1.09	1.65	NA

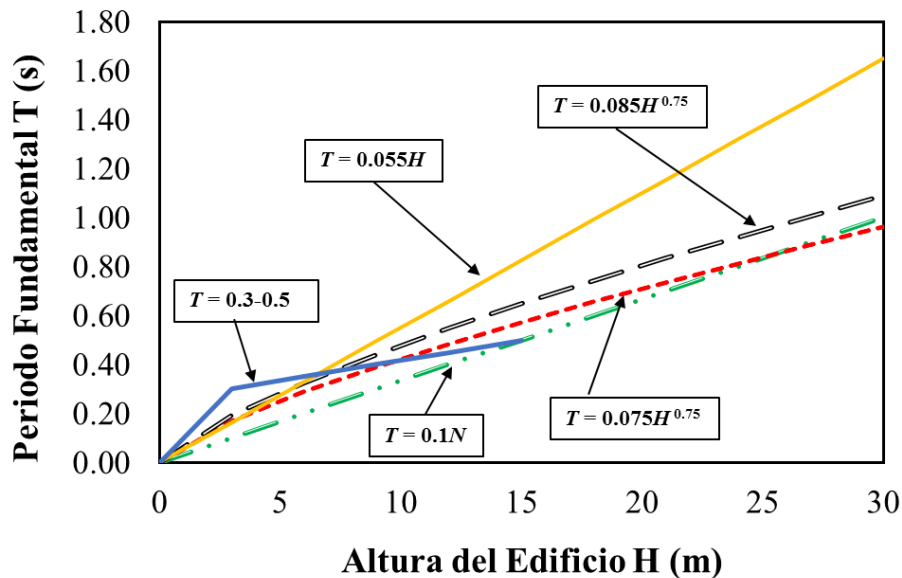
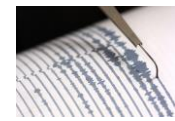


Figura 7 Comparativa entre fórmulas para estimar el periodo fundamental de diversos edificios en la AMG dependiendo de los materiales de construcción, sistema resistente y altura

La figura 7 muestra la relación entre la altura y los periodos fundamentales de diferentes tipologías de edificios de la AMG hasta una altura máxima de 30 m (15 m para los de mampostería) tomando como base la tabla 1 y las ecuaciones 2-4 para los diferentes sistemas resistentes tal y como edificios en general, MRF de concreto reforzado y acero y los rangos recomendados en la literatura para estructuras de mampostería de baja a mediana altura. Además, se puede observar en la figura 7, que los sistemas (MRF) a base de marcos de acero y concreto presentan un comportamiento similar con el obtenido para edificios en general. Estas expresiones fueron obtenidas por diversos autores e incluidas en los códigos de diseño sísmico de varios países y se obtuvieron como se explicó anteriormente por medio de edificios



instrumentados sujetos a diversos sismos. Los edificios con sistema resistente a base de muros de cortante de concreto presentaron un comportamiento más rígido en comparación con el presentado por los sistemas a base de marcos de acero y concreto reforzado que se caracterizan por ser más flexibles (cuando no cuentan con muros diafragma y contra-venteos diagonales). En contraste, los edificios de mampostería se estudiaron tomando en cuenta una altura máxima de 15 m, presentando un comportamiento más rígido que los sistemas de marcos MRF y muros de cortante de concreto reforzado hasta una altura de 6 m. Los edificios de mampostería de más de 6 m muestran un comportamiento más flexible que los de a base marcos y muros de cortante de concreto, pero menos flexibles que los periodos obtenidos para edificios en general con la fórmula básica (figura 7).

Tabla 2: Vulnerabilidad ante resonancia sísmica en edificios cercanos a la estación GDLC en Guadalajara

Altura (m)	# Niveles	General	MRF Concreto	MRF Acero	Muros de Cortante	Mampostería
		T_E/T_S	T_E/T_S	T_E/T_S	T_E/T_S	T_E/T_S
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	0.17	0.28	0.32	0.27	0.50
6	2	0.33	0.48	0.54	0.55	0.58
9	3	0.50	0.65	0.73*	0.82*	0.66
12	4	0.66	0.80*	0.91*	1.10*	0.75*
15	5	0.83*	0.95*	1.08*	1.37	0.83*
18	6	1.00*	1.09*	1.23	1.64	NA
21	7	1.16*	1.22	1.39	1.92	NA
24	8	1.33	1.35	1.53	2.19	NA
27	9	1.50	1.48	1.67	2.47	NA
30	10	1.66	1.60	1.81	2.74	NA

T_E = periodo fundamental de la estructura, T_S = periodo fundamental del suelo, *vulnerable a resonancia

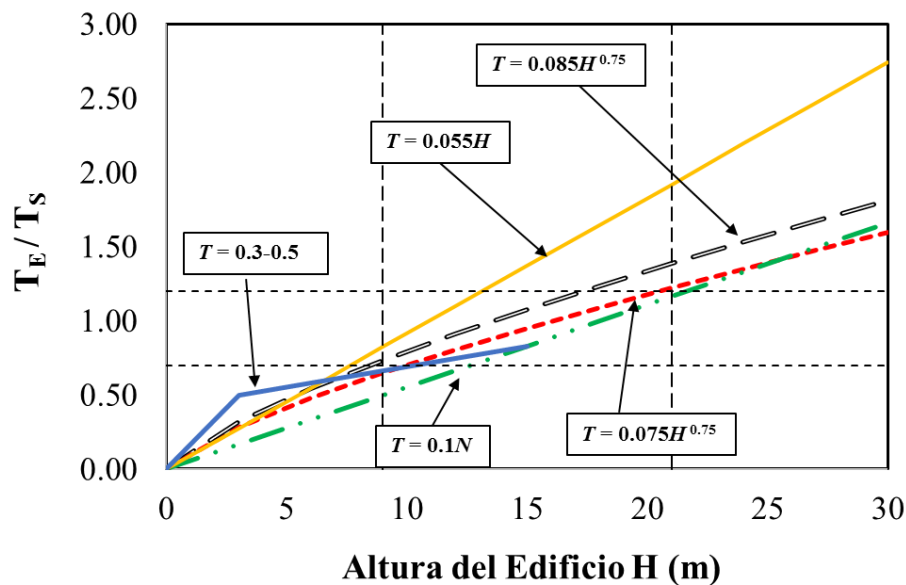
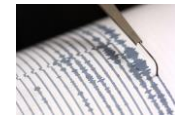


Figura 8 Evaluación de vulnerabilidad ante resonancia sísmica en edificios de concreto, acero, muros de cortante y mampostería alrededor de la estación GDLC en Guadalajara



Para evaluar la vulnerabilidad ante resonancia de diversas tipologías de edificios en los alrededores de la estación GDLC en Guadalajara, empleamos los periodos fundamentales de acuerdo con su altura de la tabla 1 y figura 7, en combinación con el periodo natural del suelo ($T = 0.602$ s) obtenido con los cocientes espectrales H/V de la figura 3a. Enseguida, con el uso de la ecuación 1 es posible determinar la vulnerabilidad ante resonancia de los edificios como resultado de los efectos de sitio inducidos por el sismo del 11 de mayo de 2016 $M_w=4.9$. La tabla 2 muestra los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad ante resonancia en la que se muestran indicados con un asterisco los edificios de determinada altura y sistema constructivo con vulnerabilidad alta a presentar daño ante este efecto. Los edificios más vulnerables son los de sistema a base de marcos MRF de concreto reforzado de 12-18 m, marcos de acero de 9-15 m, muros de cortante de concreto reforzado de 9-12 m y de mampostería de mediana altura (4-5 niveles) de 12-15 m. El cálculo de la vulnerabilidad ante resonancia para edificios en general con la ecuación 2, predice que todos los edificios de una altura entre 15 y 21 m pueden resultar dañados por este fenómeno (ver tabla 2). Si bien este sismo de magnitud reducida e intensidades bajas no generó daños importantes estructurales, otro sismo de mayor intensidad podría disparar la amplificación dinámica generada por el fenómeno de resonancia.

Los resultados de la evaluación ante vulnerabilidad por resonancia en edificios en los alrededores de la estación Guadalajara se muestran en la figura 8. Se puede observar que los edificios de entre 9 y 21 m de altura de todas las tipologías son los más vulnerables y se encuentran encerrados en la ventana formada por las líneas punteadas verticales (representan el rango de las alturas de los edificios) con las horizontales (representan el rango vulnerable medido con el radio de T_E/T_S de 0.7 a 1.2).

La evaluación de la vulnerabilidad ante resonancia también se aplicó a los edificios localizados en los alrededores de la estación GDLP en Zapopan, la que presentó un periodo fundamental del suelo ($T = 0.847$ s) a través de la técnica de los cocientes espectrales H/V de la figura 3a. Anteriormente se mencionó que el suelo alrededor de la estación Zapopan es un poco más blando que la de Guadalajara debido a la diferencia en periodos fundamentales del suelo. Esta diferencia en las características de vibrar del suelo tiene impacto en la evaluación del fenómeno ante resonancia como se observa en los resultados de la tabla 3 y figura 9, donde los edificios de mayor altura resultaron ser más vulnerables. Los resultados de vulnerabilidad ante resonancia para edificios de 18-30 m son similares con la fórmula para MRF de concreto y la general. Por otro lado, los sistemas MRF de acero de 15-27 m resultaron ser vulnerables, así como los edificios de muros de cortante de 12-18 m. Los edificios de mampostería resultaron ser no vulnerables ante el fenómeno de resonancia, pero no quiere decir que estén exentos de presentar daño estructural ante un sismo, ya que esto depende de su propia vulnerabilidad estructural. La ventana de rangos de vulnerabilidad ante resonancia de la figura 9, va de 12 a 30 m de altura para el radio T_E/T_S de 0.7 a 1.2.

Tabla 3: Vulnerabilidad ante resonancia sísmica en edificios cercanos a la estación GDLP en Zapopan

Altura (m)	# Niveles	General	MRF Concreto	MRF Acero	Muros de Cortante	Mampostería
		T_E/T_S	T_E/T_S	T_E/T_S	T_E/T_S	T_E/T_S
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	0.12	0.20	0.23	0.19	0.35
6	2	0.24	0.34	0.38	0.39	0.41
9	3	0.35	0.46	0.52	0.58	0.47
12	4	0.47	0.57	0.65	0.78*	0.53
15	5	0.59	0.67	0.76*	0.97*	0.59
18	6	0.71*	0.77*	0.88*	1.17*	NA
21	7	0.83*	0.87*	0.98*	1.36	NA
24	8	0.94*	0.96*	1.09*	1.56	NA
27	9	1.06*	1.05*	1.19*	1.75	NA
30	10	1.18*	1.14*	1.29	1.95	NA

T_E = periodo fundamental de la estructura, T_S = periodo fundamental del suelo, *vulnerable a resonancia

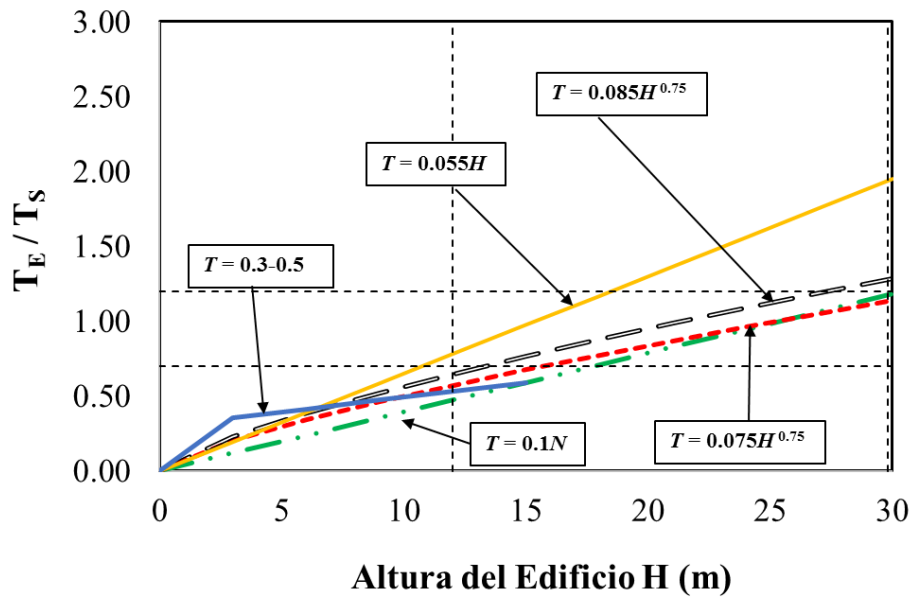
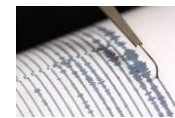


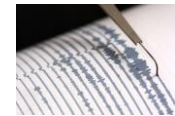
Figura 9 Evaluación de vulnerabilidad ante resonancia sísmica en edificios de concreto, acero, muros de cortante y mampostería alrededor de la estación GDLP en Zapopan

CONCLUSIONES

El 11 de mayo de 2016 ocurrió un sismo con una magnitud $M_w=4.9$ en el área metropolitana de Guadalajara (AMG), en la población de Tesistan, municipio que se encuentra localizado en dirección norte de las Ciudades de Guadalajara y Zapopan. A pesar de su reducida magnitud, debido a la cercanía del evento sísmico a la AMG, principalmente a Guadalajara, generó pánico entre la población y el desalojo de emergencia de múltiples edificios. El sismo generó la caída de algunos muretes de fachadas en casa habitación y agrietamientos leves en elementos estructurales, así como el desprendimiento de aplanados. El sismo fue catalogado con una intensidad entre V y VI en la escala de Mercalli modificada, con una zona de ruptura de 91.67 km^2 calculada tomando como base las réplicas de los siguientes días. El evento fue registrado en dos estaciones localizadas en Guadalajara y Zapopan. Con los registros de aceleraciones del suelo fue posible obtener por medio de los cocientes espectrales H/V las frecuencias y los periodos fundamentales del terreno alrededor de las dos estaciones. Diferentes fórmulas reportadas en la literatura se usaron para estimar el periodo fundamental de diferentes tipos de edificios con variaciones en sistema constructivo resistente y altura.

De los resultados obtenidos se usó el periodo fundamental del suelo en combinación con el de los edificios para obtener la vulnerabilidad ante efectos de resonancia. Los edificios más vulnerables a este fenómeno alrededor de la estación Guadalajara son de una altura de entre 9 y 21 m de todas las tipologías. Caso contrario para los edificios en los alrededores de la estación Zapopan, en la que son más vulnerables ante el efecto de resonancia edificios más altos de entre 12 y 30 m de marcos de concreto y acero, así como de muros de cortante de concreto reforzado. Los edificios de mampostería no resultaron ser vulnerables al efecto de resonancia en Zapopan, pero sin embargo si son vulnerables estructuralmente ante efectos sísmicos de otro tipo. Este contraste en rangos de vulnerabilidad a resonancia entre los edificios alrededor de la estación Guadalajara y Zapopan se debe a las diferencias en el periodo natural del suelo, siendo un poco más blando el de Zapopan, por esta razón, los edificios más altos resultaron vulnerables a este fenómeno.

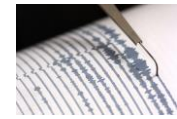
El estudio de los efectos de sitio en los alrededores de las estaciones de Guadalajara y Zapopan permitieron contar con estimaciones de vulnerabilidad ante resonancia en diferentes tipologías de edificaciones de diversas alturas. Estos primeros indicadores hacen evidente la necesidad de contar con más estaciones de medición en diferentes puntos



estratégicos de la AMG para la generación de mapas de periodos fundamentales del suelo que permitan la estimación de vulnerabilidad ante resonancia en edificios existentes y un mejor diseño sísmico basado en diferentes niveles de desempeño en los edificios por construir.

REFERENCIAS

- Bazan, E. and Meli, R. (2003). "Seismic design of buildings (in Spanish)." Limusa Editorial, Mexico.
- Chiauszi L., Masi A., Mucciarelli M., Cassidy J. F., Kutyn K., Traber J., Ventura C. and Yao F. (2012). "Estimate of fundamental period of reinforced concrete buildings: code provisions vs. experimental measures in Victoria and Vancouver (BC, Canada)". 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Lisbon.
- Crowley H. and Pinho R. (2004). "Period-height relationship for existing European reinforced concrete buildings". *Journal of Earthquake Engineering*. 8(1): 93–119.
- Crowley H. and Pinho R. (2006). "Simplified equations for estimating the period of vibration of existing buildings". *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper 1122.
- Eurocode 8 (2004). "Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings". European Standard.
- Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Vona M. (2009). "Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(8): 973–988.
- Gallipoli M. R., Mucciarelli M., Šket-Motnikar B., Zupancic P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipcevic, J., Herak D., Milutinovic Z., Olumceva T. (2010). "Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:593–607.
- GDACS (2016). Global Disaster Alert and Coordination System "Overall Green Earthquake alert in Mexico on 11 May 2016 22:35 UTC." The United Nations and the European Commission.
- Goel, K. R. and Chopra, K. A. (1997). "Period formulas for moment-resisting frame Buildings". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 123: 1454-1461.
- Hong L. L. and Hwang W. L. (2000), "Empirical formula for fundamental vibration periods of reinforced concrete buildings in Taiwan". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 29: 327-337.
- Ingham, J. M. and Griffith, M. C. (2011a). "The Performance of Unreinforced Masonry Buildings in the 2010/2011 Canterbury Earthquake Swarm". Report to the Royal Commission of Inquiry. Christchurch, New Zealand: Canterbury Earthquakes Royal Commission.
- Ingham, J. M. and Griffith, M. C. (2011b). "The Performance of Earthquake Strengthened URM Buildings in the Christchurch CBD in the 22 February 2011 Earthquake". Addendum Report to the Royal Commission of Inquiry. Christchurch, New Zealand: Canterbury Earthquakes Royal Commission.
- JCV (2017). "Extensión territorial y población del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG)". Organización Jalisco como vamos.
- NBCC (2005). National Building Code of Canada. National Research Council Canada.
- NEHRP (1994). Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings. Building Seismic Safety Council. Washington. D.C.



Oliveira C. S. and Navarro M. (2010). “Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(3): 609-642.

Preciado, A. (2015). “Seismic vulnerability and failure modes simulation of ancient masonry towers by validated virtual finite element models”. *Engineering Failure Analysis*, 57: 72-87.

Preciado, A., Rodriguez, O., Caro-Becerra, J. L. and Lujan-Godinez, R. (2015). “Seismic damage scenarios at territorial scale on unreinforced masonry in Tlajomulco, Jalisco (in Spanish).” XX National Congress on Earthquake Engineering, Mexican Society of Civil Engineering (SMIS), November 24-28, Acapulco, Mexico.

Preciado, A., Sperbeck, S. T. and Ramirez-Gaytan, A. (2016). “Seismic vulnerability enhancement of medieval and masonry bell towers externally prestressed with unbonded smart tendons”. *Engineering Structures*, 122: 50-61.

RCDF (2004). “Construction Code of Mexico City”. Government of Mexico City.

SSN (2016). National Seismological Service “Report of the Mw=4.9 on 11th of May 2016 earthquake at north of Guadalajara, Jalisco.” National Autonomous University of Mexico (UNAM).

UBC (1997) Uniform Building Code. International conference of building officials. Whittier, CA.