



La aproximación de una evaluación analítica a un efecto sísmico real: el caso del templo de Santa Lucía, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México

The Approximation of an Analytical Evaluation to a Real Seismic Effect: the Case of the Temple of Santa Lucía, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, Mexico

Carla Ángela Figueroa Esquinca

Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Morelos, México

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

figueroaesquinca@gmail.com

José Manuel Jara Guerrero

División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Michoacán, México

jmjara70@gmail.com

Miguel Ángel Pacheco Martínez

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

mapmexico2000@gmail.com

Resumen

Este INFORME muestra los resultados de la comparación entre la respuesta estructural y daños registrados de monumentos históricos (iglesias y templos) sujetos a movimientos sísmicos en México y la obtenida de un modelo analítico. El caso de estudio es la iglesia de Santa Lucía, en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, zona de alta sismicidad. El modelo numérico emplea elementos finitos, y se le sometió a sismos de diversas intensidades con periodos de retorno de 30, 100, 500 y 1 000 años. El 7 de septiembre de 2017 se presentó un sismo de gran intensidad, que alcanzó una aceleración de 500 gales en zonas cercanas al epicentro. Los daños generados en el templo coincidieron con los deterioros detectados en el trabajo de investigación.

Palabras clave

vulnerabilidad sísmica; sismos; arquitectura religiosa; daños; modelo de elementos finitos; monumento histórico; Chiapas; México

Abstract

This REPORT presents the results from the structural response and recorded damages to historical monuments (churches and temples) subject to seismic movements in Mexico and those from an analytical model. The case study is the Temple of Santa Lucía, located in San Cristóbal de las Casas, Chiapas, an area of high seismic activity. The methodology implemented the finite element method, analyzing the temple under different seismic intensities with return intervals of 30, 100, 500, and 1000 years. On September 7, 2017, a powerful earthquake struck Mexico achieving an acceleration of 500 gal in areas near the epicenter. The damages caused to the temple coincided with those predicted in the research work.

Key words

seismic vulnerability; earthquakes; religious architecture; damages; finite element model; historical monument; Chiapas; Mexico

Introducción

El 7 de septiembre de 2017 la población al sur y centro de México experimentó un sismo de gran intensidad, cuyo foco se localizó en las cercanías de la ciudad de Pijijiapan, en la costa del estado de Chiapas (Figura 1). El Servicio Sismológico Nacional (SSN 2017) reportó el sismo con magnitud 8.2 grados Richter y profundidad de 58 km. En zonas cercanas al epicentro, el movimiento alcanzó aceleraciones de hasta 500 gales (cm/s^2), de acuerdo con la Unidad de Instrumentación Sísmica (SMIS 2017).

En la figura 2 se observan algunas mediciones de estaciones sismológicas del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (CIRES), que registraron el sismo del 7 de septiembre de 2017.

El Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH 2017), como organismo del gobierno federal cuyo objeto es la protección y conservación del patrimonio cultural tangible e intangible, reportó que los estados de Chiapas y Oaxaca sufrieron las mayores afectaciones y daños graves debidos a ese sismo.

La preservación del patrimonio histórico es un esfuerzo multidisciplinario, ya que requiere la participación de expertos en distintas materias, como son antropólogos, historiadores, ingenieros, arquitectos, restauradores y otros, con la única finalidad de prolongar la vida de una construcción histórica.

En las últimas décadas se ha realizado un importante esfuerzo por entender desde el punto de vista estructural el comportamiento de los edificios históricos, puesto que no satisfacen muchas de las hipótesis utilizadas en el estudio de las estructuras modernas (Orozco-Rivas 2005).

Por lo tanto, el objeto fundamental de este INFORME es comparar los resultados de la predicción de daño del

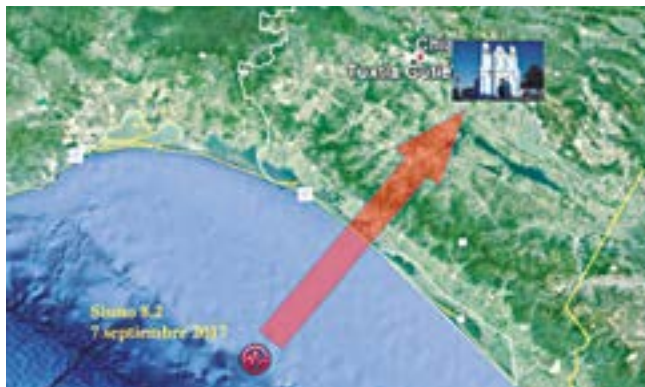


FIGURA 1. Localización del sismo del 7 de septiembre de 2017 (Fuente: Pacheco Martínez, 2017).

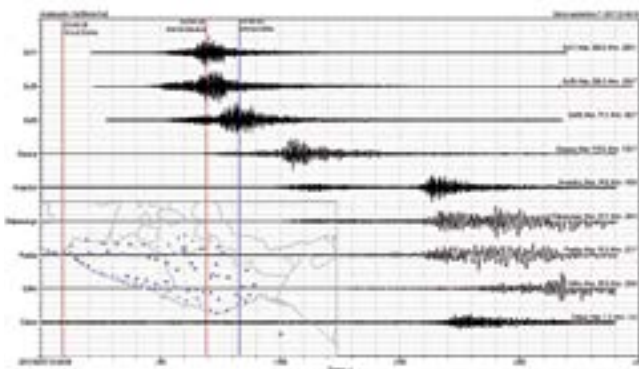


FIGURA 2. Registros sísmicos en estaciones del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C., del temblor del 7 de septiembre de 2017 (Fuente: CIRES, 2017).

modelo analítico realizado con información fundamental del inmueble (caracterización de materiales mediante observación y levantamiento geométrico) frente al comportamiento estructural y los daños observados de un sismo real para, así, conocer la utilidad de esa metodología en el diagnóstico de elementos vulnerables y de daños a edificios históricos. Ese conocimiento reforzará la toma de medidas preventivas para salvaguardar el patrimonio arquitectónico y cultural y la integridad física de sus usuarios, y permitirá establecer procesos de rehabilitación eficientes y económicos.

Vulnerabilidad y referentes histórico-culturales de las primeras fundaciones poblacionales de origen prehispánico

La gran mayoría de las actuales ciudades mexicanas nacieron durante la época virreinal (Anda 1995). El siglo XVI fue la época durante la cual los frailes mendicantes realizaron la mayor parte de las refundaciones coloniales españolas donde ya existían asentamientos prehispánicos, los cuales eran elegidos por los indígenas por la interdependencia paisaje-asentamiento-misticismo según las creencias de la comunidad:

Las fuentes etnohistóricas del siglo XVI en México evidencian diversidad de cognitividades referencialmente empleadas por las etnias emigrantes mesoamericanas, cuando era su propósito localizar lugares para asentarse. Dentro de esta conceptualización se demostraba preferencia por ocupar lugares rocallosos donde brotaban manantiales en medio de verdeantes frondas boscosas (García-Zambrano 2009: 18).

La presencia de cañadas o barrancas como “montañas sagradas” proporcionaba un entorno propicio para fundaciones indígenas debido a la creencia religiosa de que esos lugares eran un conducto expulsor de seres vivientes (Olay-Barrientos 1987).

Otros elementos simbólicos, como manantiales, arroyos, ríos, cerros, montañas sagradas, cuevas o árboles sagrados (ceibas, nopales, sabinos o ahuehuetes) fueron factores determinantes para la selección de sitios destinados a servir como centros ceremoniales y habitacionales (García-Zambrano 1992).

Lo anterior sugiere que las comunidades prehispánicas vinculaban estrechamente el medio ambiente circundante con la elección y fundación de sus centros urbanos por una cosmovisión mágico-religiosa, lo que era desconocido para los colonizadores, que decidieron establecer las nuevas ciudades en esos centros sin considerar los riesgos del sitio, lo que derivó en edificaciones altamente vulnerables.¹

Antecedentes sísmicos en México

La República mexicana se encuentra entre cinco placas tectónicas: Cocos, Pacífico, Norteamérica, Caribe y Rivera. El movimiento relativo entre esas placas es lo que hace que nuestro país esté asentado en una peligrosa zona sísmica (Figueroa-Esquinca 2009).

Aunque muchos de los sismos se originan en las fronteras entre las placas tectónicas, un número menor lo hace en el interior del territorio mexicano (CNPC 2014).

Entre los años 1965 y 1995, el Sistema Sismológico Nacional (SSN) determinó un promedio de los sismos que se presentan al año en el país así como sus magnitudes según la escala de Richter:² 100 con magnitudes mayores

¹ Se le llama *vulnerabilidad* al grado en el cual un sistema es susceptible de ser afectado. Se puede ser vulnerable ante un tipo de peligro y simultáneamente no serlo respecto de otros (CNPC 2014).

² La escala de Richter mide la magnitud de un temblor, y puede relacionarse con medidas subjetivas de intensidad: magnitud menor de 3.5: generalmente no se siente, pero es registrado; magnitud entre 3.5 y 5.4: a menudo se siente, pero sólo causa daños menores; magnitud entre 5.5 y 6.0: ocasiona daños ligeros a edificios; magnitud entre 6.1 y 6.9: puede ocasionar daños graves en áreas muy pobladas; magnitud entre 7.0 y 7.9: terremoto mayor, causa graves daños; magnitud mayor a 8: gran terremoto, destrucción total de comunidades cercanas al epicentro.

o iguales a 4.5; 3 con magnitudes mayores o iguales a 6.0; 1 cada 5 años con magnitud mayor o igual a 7.5 grados.

Históricamente, en México existen regiones donde han ocurrido grandes sismos, como en el año 1787 en las costas de Oaxaca, con magnitud entre 8.4 y 8.7; en 1932, en las costas de Colima y Jalisco, con magnitud 8.2; en 1985 en las costas de Michoacán, con magnitud de 8.1; en 1995 en las costas de Colima, con magnitud de 8.1, y en 2017 en las costas de Chiapas con magnitud de 8.2 grados.

Entre los años 1990 y 2016 el SSN reportó un total de 75 561 sismos en la República mexicana, de los cuales 20 712 se registraron en el estado de Chiapas, 26 626 en el de Oaxaca y 2 111 en Jalisco. De éstos, tuvieron una magnitud mayor de 6.0 grados: 37 en Chiapas; 11 en Oaxaca, y 11 en Jalisco.

Aun hasta el 11 de septiembre de 2017 se presentaron 17 sismos con magnitud mayor o igual a 5.5, de los cuales 8 se registraron en Chiapas (los máximos, de 7 y 8.2 grados), 7 en Oaxaca (con magnitud máxima de 6.1) y 2 en el norte del país (con magnitud máxima de 5.6 grados en la escala citada).

Como es de apreciarse, el mayor peligro ocurre con los sismos originados en las costas del Pacífico, entre los estados de Jalisco y Chiapas, y en el norte del país, por la falla de San Andrés; las primeras entidades son donde se producen sismos con mayor frecuencia y donde se han registrado los epicentros de temblores de mayor magnitud.

Caso práctico de estudio

El templo de Santa Lucía se encuentra en el municipio de San Cristóbal de Las Casas (antes llamado Ciudad Real), dentro del perímetro del centro histórico (protegido por el INAH). Se eligió por ser uno de los centros culturales más importantes y representativos de la ciudad, ya que mantiene la estructura tradicional —poco estudiada (Meli 2011)— de la región: una sola nave cubierta de madera y teja. El templo es una obra estilo neoclásico, realizada por el ingeniero Carlos Z. Flores en 1884. Sus torres originales se afectaron por el terremoto que azotó la Ciudad Real en 1902, por lo que se sustituyeron por unas más pequeñas y con un estilo distinto del resto del inmueble (INAH 1999). El 20 de octubre de 1995 el templo sufrió una vez más graves daños, en esa ocasión por el sismo con epicentro en Chiapas.

El inmueble presenta elementos arquitectónicos característicos, como capillas adosadas, fachada principal de pared gruesa; en los dos extremos de la fachada existían torres con campanarios (antes del sismo de septiembre de 2017), muros gruesos, cúpula en el altar y techumbre de madera.

El material constructivo original del inmueble es mampostería de ladrillo, con mortero cal-arena, revestida por



FIGURA 3. Templo de Santa Lucía (Fotografía: Figueroa Esquinca, 2009).

gruesa argamasa de cal. En la figura 3 se muestra la imagen del templo previo al sismo de 2017.

Modelos de análisis

Los modelos analíticos³ se realizaron con el programa SAP2000, utilizando un análisis modal en la historia del tiempo.⁴

Los sismos se normalizaron para generar las aceleraciones del suelo máximas esperadas para periodos de

retorno⁵ de 30, 100, 500 y 1 000 años, pertenecientes a la zona donde se ubica el modelo.

Cúpula

El modelo cuenta con 6 985 nodos y 6 720 elementos *shell*⁶ de 20 cm de espesor. El material considerado para este elemento es de baja resistencia; algunas de sus propiedades mecánicas son un peso volumétrico de 1.8 t/m³, un módulo de elasticidad de 12 500 kg/cm² y un coeficiente

³ Los modelos analíticos buscan representar numéricamente una estructura y utilizan métodos donde es necesaria cierta información básica, como características de las edificaciones y de los materiales con los que se construyeron, planos de la estructura, entre otros (Safina 2003).

⁴ El análisis modal en la historia del tiempo se emplea para obtener en cada instante del movimiento del terreno el propio movimiento de la estructura y, con ello, evaluar los daños que va presentando. Se utilizan registros de aceleración y se emplean los modos de vibrar de la estructura para determinar su comportamiento (Bazán y Meli 1999).

⁵ El periodo de retorno es el periodo en años en el que se espera que la intensidad del sismo alcance o exceda cierto nivel de referencia (Benito y Jiménez 1999).

⁶ Los nodos son los puntos de conexión entre dos o más elementos en una estructura, mientras que los elementos tipo *shell* son elementos finitos, utilizados para modelar el comportamiento esfuerzo-deformación de áreas como membranas, cáscaras y placas en estructuras planas y tridimensionales (CSIAmerica 2012); éstos permiten modelar los diferentes componentes estructurales de la iglesia.

de Poisson de 0.25. Los esfuerzos de mayor interés son los de tensión, pues son los que generan los primeros agrietamientos en los elementos construidos de mampostería.

Fachada

Formada por 2234 nodos y 1651 elementos *shell*, variando sus espesores entre 40 y 80 cm. Las propiedades mecánicas dadas al material de esta estructura son las mismas que para el modelo de la cúpula, variando los espesores de los elementos *shell*; es necesario tomar en cuenta que, aunque se trate del mismo material, sus propiedades pueden diferir en cada una de las piezas.

Modelo tridimensional

Integrado por todos los elementos estructurales pertenecientes a la iglesia, el modelo incluye elementos *shell* para formar los muros, la fachada, la cúpula, etc., y marcos para representar su techumbre. La figura 4 ilustra el modelo tridimensional introducido en el programa.

Consideraciones sísmicas

La Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes es un proyecto iniciado en 1992, cuyo propósito es recopilar toda la información disponible sobre redes, estaciones, instrumentos, acelerogramas y sismos recolectados en México desde 1960 (Quaas *et al.* 1995). De ese catálogo se eligieron 10 sismos representativos de la zona en estudio con aceleraciones máximas variables, 4 pertenecientes a fuentes sísmicas de subducción y 6 a fuentes de fallamiento normal.⁷ También se utilizan los espectros de respuesta elásticos⁸ calculados por Galván (2008), cuyos resultados arrojan que el valor medio de la demanda máxima de pseudoaceleración⁹ para un pe-

⁷ La fuente sísmica de subducción se localiza en el Pacífico entre Chiapas y Jalisco y es producto del proceso de subducción de la placa del Pacífico por debajo de la placa de Norteamérica. La fuente de fallamiento normal corresponde al rompimiento de la placa del Pacífico subducida; normalmente tiene focos a profundidades mayores de 45 km. Los esfuerzos generados por el proceso de subducción producen sistemas de fallas de carácter regional; tales fallas se caracterizan por la generación de sismos de magnitudes locales intermedias y con foco superficial, por lo cual los sismos generalmente son más destructivos cuando ocurren cerca de una localidad (Climent, Salgado, Slob y Van Westen 2003).

⁸ Los espectros de respuesta elásticos son figuras que muestran parámetros de respuesta máxima (aceleración, velocidad o desplazamiento) para un sismo determinado. Se utilizan para estudiar las características del sismo y su efecto sobre las estructuras (Crisafulli y Villafane 2002).

⁹ La pseudoaceleración es el producto del desplazamiento máximo esperado por el cuadrado de la frecuencia de vibrar del sistema estructural.



FIGURA 4. Modelo tridimensional en elemento finito (Modelo: Figueroa Esquinca, 2009).

riodo de retorno de 100 años es de 390 gales; para uno de 500 años se presenta una pseudoaceleración media de 680 gales, y a un periodo de retorno de 1 000 años le corresponden 830 gales para las fuentes sísmicas de subducción.

Para las fuentes sísmicas de fallamiento normal con un periodo de retorno de 100 años se obtiene una pseudoaceleración media de 444 gales; para el periodo de retorno de 500 años, de 778 gales, y para 1 000 años le pertenece una pseudoaceleración de 942 gales.

Considerando como una condición de servicio un periodo de retorno de 30 años, para la fuente de subducción se obtuvo una pseudoaceleración máxima de 240 gales, mientras que para la de fallamiento normal fue de 274 de estas unidades.

Resultados obtenidos

Cúpula

Este elemento bajo peso propio trabaja a compresión, pero, al estar sometido a distintas combinaciones (carga vertical, sismo en dirección x y sismo en dirección y: transversal y longitudinal), se generan esfuerzos de tensión, de menor magnitud en su cúspide y mayores en sus apoyos, como lo muestra la figura 5.

Conforme aumenta la aceleración para cada periodo de retorno, los esfuerzos obtenidos aumentan en forma gradual: como se ha observado en la práctica, durante la ocurrencia de un sismo los primeros agrietamientos aparecen en la parte interior de este elemento, donde se encuentran los valores máximos de esfuerzos de tensión.

En promedio, en la parte inferior de la cúpula, para un periodo de 30 años, se encontraron esfuerzos de tensión del orden de 95 kg/cm²; para 100 años, de 170 kg/cm²; para 500 años, de 300 kg/cm², y para 1 000 años, de 400 kg/cm². Los valores obtenidos son altos comparados con los correspondientes a los esfuerzos últimos de tensión, que para este material varían entre 5-15 kg/cm², pero

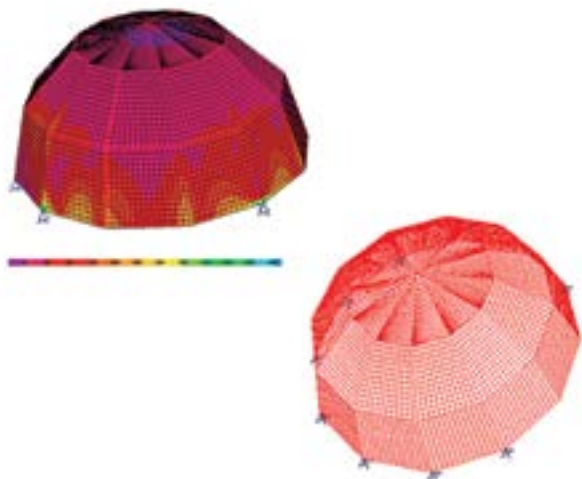


FIGURA 5. Modelo de elemento finito de la cúpula (Modelo: Figueroa Esquinca, 2009).

dichos esfuerzos se localizan en pequeñas áreas, por lo que se esperan daños en pequeñas superficies, lo que no provocaría colapsos. Sin embargo, su importancia radica en que, al iniciar el agrietamiento del elemento, éste, a su vez, puede agrietarse por esfuerzos de menor magnitud.

Fachada

Para este elemento son importantes tanto los esfuerzos de tensión como los desplazamientos producidos por movimientos sísmicos en dirección x y en dirección y, pues esas deformaciones pueden ser las que hagan que colapse la fachada o parte de ella.

Se observa que, para los periodos de retorno de 30 y 100 años, la parte inferior de la fachada conserva esfuerzos de tensión y compresión aceptables, mientras que, para los periodos de 500 y 1 000 años se generan esfuerzos de tensión que producirían grietas en el elemento.

En promedio, para un periodo de retorno de 30 años, las torres en sus extremos generan esfuerzos de tensión del orden de 140 kg/cm^2 ; para un periodo de retorno de 100 años, de 210 kg/cm^2 ; para un periodo de 500 años, de 320 kg/cm^2 , y de 370 kg/cm^2 para un periodo de 1 000 años.

Los esfuerzos máximos se generan en áreas más amplias que en la cúpula, por lo que se esperan agrietamientos más graves en esas superficies. En la figura 6 se ilustran los esfuerzos máximos generados en los extremos de las torres.

Como es de esperarse, los desplazamientos de mayor magnitud están en las torres, por lo que estos elementos probablemente son los primeros que colapsarían.

En promedio, los desplazamientos obtenidos del modelo —en dirección longitudinal en todos los casos— indican que para un periodo de retorno de 30 años oscilan entre 4.66 y 8.18 cm; para 100 años, entre 7.46 y 13.14 cm; para 500 años, entre 12.83 y 22.87 cm, y para 1 000

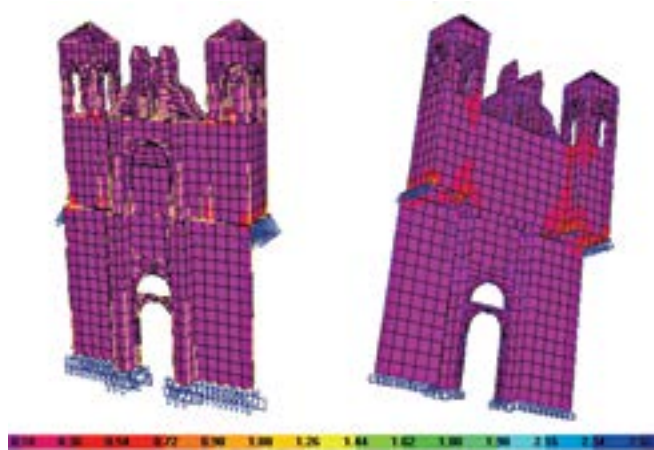


FIGURA 6. Modelo de elemento finito de la fachada (Modelo: Figueroa Esquinca, 2009).

años, entre 15.63 y 27.64 cm para fuentes sísmicas de subducción y de fallamiento normal respectivamente.

Los desplazamientos límite varían, según la NTC-2004,¹⁰ entre 0.005h y 0.010h, por lo que, para la altura total de $h=13.80 \text{ m}$, los desplazamientos límite varían de 6.90 cm a 13.80 centímetros.

Es notorio que los mayores esfuerzos que se presentan son de tensión, por lo que el inicio temprano del agrietamiento disminuiría la rigidez del elemento, incrementando los desplazamientos anteriormente comentados.

Modelo tridimensional

El modelo de elementos finitos nos da una idea muy cercana del comportamiento real de esta estructura bajo cada solicitación; sin embargo, no debe considerarse como un resultado “exacto”, pues existen varias incertidumbres en las propiedades mecánicas de los materiales que lo constituyen, y las juntas suelen tener un comportamiento no lineal, que podría incorporarse en un modelo más refinado. Con todo rigor, para este tipo de análisis se debería realizar la toma de muestra de materiales y ensayos experimentales que permitieran obtener sus propiedades índice; dicha intervención, sin embargo, requiere licencias y permisos, además de que causa afectaciones históricas, por lo que la caracterización de los materiales es de forma visual. Adicionalmente, un modelo refinado podría incorporar el comportamiento no lineal de las juntas en cada uno de los macroelementos estructurales (torres, muros, fachada, etc.) de la iglesia.

Los resultados de los modelos tridimensionales de este caso de estudio muestran que los elementos con mayor vulnerabilidad son la cúpula, las torres y la fachada de la iglesia, razón por la que esos elementos se trabajaron como macroelementos separados.

¹⁰ Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 2004.

Indudablemente, este tipo de construcciones suele tener un comportamiento adecuado bajo cargas gravitatorias, pero, al ser sometidas a sismos, los elementos y materiales que las conforman, con baja resistencia a la tensión, presentan daños, como ha sucedido en sismos anteriores.

Evaluación de la vulnerabilidad

En este apartado se establecerá la vulnerabilidad sísmica de los elementos del templo utilizando densidades de probabilidad, usualmente empleadas en estudios de peligro sísmico.

Resultados de vulnerabilidad en cúpula

Con base en los resultados obtenidos, las conclusiones respecto de la aceleración máxima de cada periodo de retorno y los esfuerzos obtenidos se resumen en la figura 7.

En dicha tabla se indica lo siguiente: en promedio, la probabilidad de que se generen esfuerzos máximos de tensión en la cúpula de 95 kg/cm² para un periodo de retorno de 30 años es de 54%; de 170 kg/cm² para un periodo de retorno de 100 años, de 57%; de 300 kg/cm² para un periodo de 500 años, de 60%, mientras que de 400 kg/cm² para un periodo de retorno de 1 000 años es de 60 por ciento.

Las tablas subsecuentes indican probabilidades para cada elemento.

Resultados de vulnerabilidad en fachada

La figura 8 indica lo siguiente: en promedio, la probabilidad de que se generen esfuerzos máximos de tensión en la fachada de 140 kg/cm² para un periodo de retorno de 30 años es de 55%; que resulten de 210 kg/cm² para un periodo de retorno de 100 años es de 57%; que sean de 320 kg/cm² para un periodo de 500 años es de 47%, mientras que sean de 370 kg/cm² para un periodo de retorno de 1 000 años es de 47%. En la figura 9 se muestra la probabilidad de que se generen desplazamientos máximos en la fachada.

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	ESFUERZO MÁXIMO DE TENSIÓN	PROBABILIDAD
30	95 kg/cm ²	54%
100	170 kg/cm ²	57%
500	300 kg/cm ²	60%
1 000	400 kg/cm ²	60%

FIGURA 7. Tabla de probabilidad de ocurrencia de esfuerzos máximos con su respectivo periodo de retorno en cúpula (Tabla: Figueroa Esquina, 2009).

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	ESFUERZO MÁXIMO DE TENSIÓN	PROBABILIDAD
30	140 kg/cm ²	55%
100	210 kg/cm ²	57%
500	320 kg/cm ²	47%
1 000	370 kg/cm ²	47%

FIGURA 8. Tabla de probabilidad de ocurrencia de esfuerzos máximos con su respectivo periodo de retorno en fachada (Tabla: Figueroa Esquina, 2009).

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS	PROBABILIDAD
30	4.66 cm - 8.18 cm	65%
100	7.46 cm - 13.14 cm	59%
500	12.83 cm - 22.87 cm	64%
1 000	15.63 cm - 27.64 cm	58%

FIGURA 9. Tabla de probabilidad de ocurrencia de desplazamientos máximos con su respectivo periodo de retorno en fachada (Tabla: Figueroa Esquina, 2009).

Daños esperados (modelación de predicción de elementos vulnerables)

Basados en el modelo de elementos finitos, los primeros daños esperados en la estructura son en los elementos con mayor vulnerabilidad: las torres y la fachada de la iglesia (Figura 10). Unas y otra, así como las zonas de los arcos y muros de mampostería de las torres, presentan mayores concentraciones de esfuerzos, por lo que es de esperarse que ante la ocurrencia de un sismo real dichas zonas presenten mayor daño.

Daños reales en la iglesia debido al sismo del 7 de septiembre de 2017

Derivado de la acción sísmica del 7 de septiembre de 2017, el templo de Santa Lucía presentó daño estructural en diversos elementos portantes, como muros y cúpula, y colapso parcial de sus torres y fachada, como se observa en la figura 11. El estado de daño del inmueble es tal que tanto su resistencia global como la estabilidad de algunos de sus muros y fachada se ven altamente reducidas.

Conclusiones

Los esfuerzos máximos a tensión resultantes en la cúpula fueron excesivamente mayores al esfuerzo límite del material estructural, pero únicamente en superficies pequeñas, por lo que los agrietamientos se esperarían en pequeñas áreas, lo que no colapsaría al elemento, a menos que las grietas se expandieran.

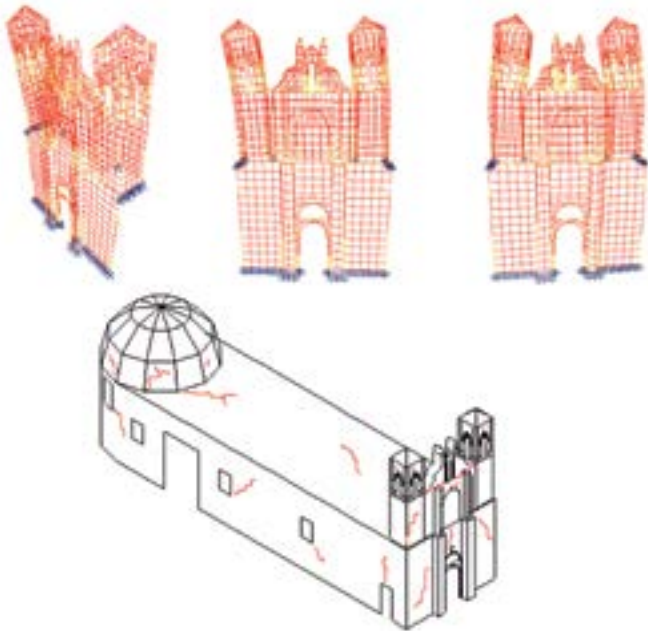


FIGURA 10. Predicción de daños (Fuente: Pacheco Martínez, 2017).



FIGURA 11. Daños en Santa Lucía debido al sismo del 7 de septiembre de 2017 (Fotografía: Figueroa Esquinca, 2017)

Los esfuerzos máximos a tensión resultantes de la fachada se concentran en los extremos de las torres y arcos, donde se espera que el elemento se agriete considerablemente, y es precisamente en esas zonas donde se han producido colapsos.

Dentro de los parámetros empleados en la modelación se empleó el sismo del 20 de octubre de 1995, con epicentro en Chiapas y aceleración máxima de 442 gales—valor muy cercano a la aceleración esperada para un sismo característico de fallamiento normal con un periodo de retorno de 100 años, donde se espera una aceleración de 444 gales—. Ese sismo ocasionó graves daños a

la fachada, lo que fue comprobable en el modelo analítico y de vulnerabilidad.

Bajo sollicitaciones gravitatorias, los elementos estructurales y materiales del modelo de estudio trabajan eficientemente, pero al ser sometidos a movimientos sísmicos que generan esfuerzos de tensión, no demuestran eficiencia.

Los daños que manifestó el inmueble con el sismo del 7 de septiembre de 2017 concuerdan con los daños previstos en el modelo analítico en las dos torres de campanarios, el remate central y el entablamiento entre el primero y el segundo cuerpos de la fachada, sin coincidencia aparente en lo previsto en las pilastras de la puerta principal, lo cual permite calibrar este método como un procedimiento de verificación observacional confiable en la evaluación de la vulnerabilidad estructural para los templos sujetos a sismos (Figura 12).

Agradecimientos

Los apoyos económicos para el desarrollo de este INFORME fueron concedidos por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), México, mediante la beca nacional para estudios de posgrado. La facilidad para la obtención de información de campo fue otorgada por el gobierno del estado de Chiapas.

Referencias

- Anda, E. de
1995 *Historia de la arquitectura mexicana*, México, Gustavo Gili.
- Bazán-Enrique, M. y Roberto Meli
1999 *Diseño sísmico de edificios*, México, Limusa.
- Benito, B. y E. Jiménez
1999 "Peligrosidad sísmica", *Física de la Tierra*, vol. 11: 13-47.
- Climent, A., D. Salgado, S. Slob y C. van Westen
2003 *Caso de estudio. Amenaza sísmica y vulnerabilidad física en la ciudad de Cañas, Guanacaste, Costa Rica*, Guanacaste, CBNDR.
- CNPC
2014 *Atlas nacional de riesgos*, documento electrónico disponible en [<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx>], consultado en septiembre de 2017.
- Crisafulli, F. y E. Villafane
(2002) *Espectros de respuesta y de diseño. Guía de estudio*, Ingeniería Sismorresistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, documento electrónico disponible en [<http://blog.uca.edu.ni/estructuras/files/2011/02/espectros-de-respuesta-y-de-dise%C3%B1o.pdf>], consultado en septiembre de 2017.

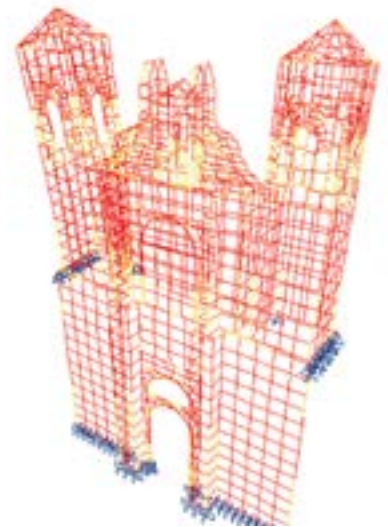
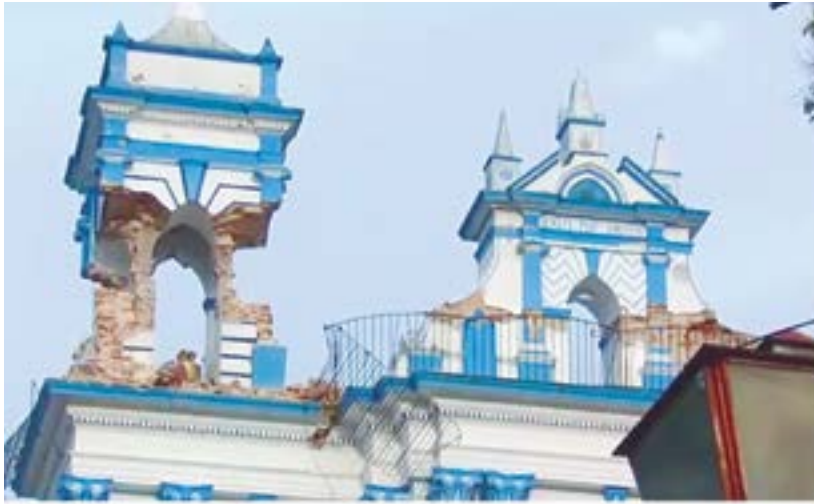


FIGURA 12. Correlación de daños (predicción-realidad) (Modelo: Figueroa Esquinca, 2017).

CSIAmerica

2012 *Tutorial shells*, documento electrónico disponible en [<https://wiki.csiamerica.com/display/tutorials/Shell>], consultado en septiembre de 2017.

Figueroa-Esquinca, C. A.

2009 *Vulnerabilidad sísmica en iglesias mexicanas. Caso de estudio: Templo de Santa Lucía, SCLC, Chiapas, Morelia*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Galván, C.

2008 *Vulnerabilidad sísmica del puente Infiernillo II*, Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

García-Zambrano, A. J.

1992 "El poblamiento de México en la época del contacto, 1520-1540", *Mesoamérica*, vol. 13, núm. 24: 239-298.

2009 "Fronteras boscosas y parajes rocallosos: determinantes ambientales en los asentamientos indígenas de Mesoamérica colonial", *LiminaR*, vol. 7, núm. 11: 1-21.

INAH

1999 *Catálogo nacional de monumentos históricos inmue-*

bles. Estado de Chiapas, México, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

2017 *Sin daños en museos y recintos culturales; se registran afectaciones en templos religiosos a raíz del sismo de este jueves*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, documento electrónico disponible en [<http://www.inah.gob.mx/es/boletines/6502-sin-danos-en-museos-y-recintos-culturales-se-registran-afectaciones-en-templos-religiosos-a-raiz-del-sismo-de-este-jueves>], consultado en septiembre de 2017.

Meli, R.

2011 *Los conventos mexicanos del siglo XVI: construcción, ingeniería estructural y conservación*, México, Porrúa.

Olay-Barrientos, M. de los Á.

1987 *El Sumidero, Chiapas: un sitio del Clásico Tardío*, México, Gobierno del Estado de Chiapas.

Orozco-Rivas, B.

2005 "Catedral Metropolitana de la Ciudad de México: comparación entre la respuesta sísmica registrada y la obtenida de un modelo analítico", tesis de maestría, México.

Quaas, R. *et al.*

1995 "Base mexicana de datos de sismos fuertes. Un sistema que integra la información acelerográfica registrada en México en los últimos 35 años", *Revista de Ingeniería Sísmica*, núm. 51: 1-12.

Safina, S.

2003 *Vulnerabilidad sísmica en edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico: 2003*, Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

SMIS

2017 *Boletín Sismos Recientes: Boletín de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica sobre los sismos recientes ocurridos en México*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, documento electrónico disponible en [<http://www.smis.org.mx/pdf/SMIS-BoletinSismosRecientes.pdf>], consultado en septiembre de 2017.

SSN

2017 *Reporte de sismo*, Grupo de trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM, documento electrónico disponible en [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Chiapas_M84.pdf], consultado en septiembre de 2017.

Síntesis curricular del/los autor/es

Carla Ángela Figueroa Esquinca

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, México

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

figueroaesquinca@gmail.com

Ingeniera civil por la Universidad del Valle de México (UVM), campus Tuxtla, y maestra en ingeniería en el área de estructuras por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México. Doctorante del programa en Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), México. Ha publicado artículos técnicos y ha dirigido proyectos de investigación. Actualmente es profesora en la Universidad Nacional Autónoma de México en la licenciatura en ingeniería de minas y metalurgia.

José Manuel Jara Guerrero

División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán,
México

jmjara70@gmail.com

Realizó estudios de licenciatura en ingeniería civil en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), maestría en ingeniería (estructuras) por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), doctorado en ingeniería (estructuras) por la UNAM y posdoctorado en el European Laboratory for Structural Assessment del Joint Research Centre de la Comunidad Europea, Ispra, Italia. Ha sido miembro de comités científicos, revisor de artículos en revistas nacionales e internacionales y responsable de proyectos nacionales. Ha publicado libros, capítulos de libros, artículos en revistas indizadas, y ha participado en conferencias internacionales, congresos nacionales e internacionales y revistas arbitradas. Actualmente es profesor investigador titular "C" tiempo completo en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Miguel Ángel Pacheco Martínez

Facultad de Ingeniería Civil

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

mapmexico2000@gmail.com

Ingeniero civil por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con campo de conocimiento en las áreas: legislación y normatividad de la construcción e infraestructura mexicana, análisis de riesgos y evaluaciones estructurales, normatividad en materiales, normatividad en construcción de edificaciones, investigación experimental sobre materiales y sistemas estructurales, desarrollo de metodologías de mitigación y reducción de riesgos para protección civil y análisis de peligros, riesgos y medidas de mitigación para infraestructura escolar, unidades de salud y edificio de gobierno. Experiencia profesional en actividades relacionadas con la evaluación, reducción y mitigación de riesgos (modelación experimental y matemática); aspectos normativos en seguridad estructural y ensayos de laboratorio y resistencia de materiales. Docente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

