



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Acatlán

“Caracterización dinámica de fachadas de iglesias
coloniales ”

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
Ingeniero Civil

PRESENTA:
Claudia Elisa Cruz Cazañas

TUTOR:
Dr. Fernando Peña Mondragón



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Ing. Carlos Arce León

Secretario: Dr. Darío Rivera Vargas

Vocal: Dr. Fernando Peña Mondragón

1^{er}. Suplente: Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano

2^{do}. Suplente: Mtro. Luis Nuñez Quiroz

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Fernando Peña Mondragón

DEDICATORIA

A mis padres Francisco y Cristina, a quienes jamás encontraré la forma de agradecer el cariño, comprensión y apoyo brindados en las derrotas y logros obtenidos. Haciendo de éste, un triunfo más que también es suyo, por la forma en que lo hemos compartido. Espero que comprendan que mis ideales, esfuerzos y logros han sido también suyos e inspirados por ustedes.

A mis hermanos Francisco y Fátima, que son mi motor de fortaleza y motivación para seguir siempre adelante y ser mejor cada día. Para así poder llegar a ser un buen ejemplo en sus vidas como su hermana mayor y principalmente como ser humano.

A mis abuelos, en testimonio del cariño que me han brindado y la sabiduría de sus experiencias que si bien me han valido en el recorrer de mi vida, para ustedes como muestra de un gran afecto.

A todos mis amigos y compañeros, con los que tuve la oportunidad de compartir experiencias y que ahora son buenos y gratos recuerdos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
CAPÍTULO 1. Antecedentes	8
1.1. Descripción arquitectónica y estructural de iglesias coloniales.....	8
1.2. Materiales tradicionales	15
1.3. Técnicas de construcción.....	16
CAPÍTULO 2. Iglesias coloniales de estudio	18
2.1. Parroquia de San Bartolomé Apóstol de Naucalpan, Estado de México.....	19
2.2. Parroquia de Santa María Nativitas de Naucalpan, Estado de México	20
2.3. Parroquia de Santiago Apóstol de Ocuituco, Estado de Morelos	24
2.4. Parroquia de San Juan Bautista de Tetela del Volcán, Estado de Morelos	26
2.5. Geometría de las fachadas bajo estudio.....	30
CAPÍTULO 3. Descripción del método y modelos de análisis	35
3.1. Descripción del método de análisis (Peña y Casolo, 2010).....	35
3.2. Sismos utilizados en el análisis	36
3.3. Modelos de análisis	39
CAPÍTULO 4. Resultados	42
4.1. Validación de resultados.....	42
4.2. Peso Propio y Factor de Seguridad.....	42

4.3. Modos de vibrar.....	44
4.4. Análisis dinámico no lineal	46
4.4.1. Desplazamientos.....	47
4.4.2. Cortante basal	50
4.4.3. Modos de vibrar al final del análisis.....	57
CONCLUSIONES	63
AGRADECIMIENTOS	64
REFERENCIAS	65

INTRODUCCIÓN

En México, el estudio de las edificaciones históricas lleva poco tiempo en práctica, a pesar de que en la actualidad se cuenta con teorías y técnicas de análisis que permiten modelar numéricamente y con gran precisión el comportamiento de estructuras complejas. El análisis de edificios históricos de mampostería continúa siendo un desafío (Peña, 2010), ya que el comportamiento estructural de un edificio antiguo de mampostería difiere sustancialmente de una estructura moderna. Esto se debe, principalmente al tipo de estructuración, a las técnicas de construcción y a los materiales utilizados. Por lo tanto, ambos tipos de edificación no pueden ser estudiados de la misma forma. Es por ello, que no es posible aplicar de manera directa los métodos de análisis y las normas de diseño utilizados en las estructuras modernas a las estructuras antiguas.

Los edificios religiosos, constituidos, entre otros, por templos parroquiales y conventuales, están dentro del conjunto de construcciones históricas y por su extenso número constituyen gran parte del inventario de monumentos históricos de México. Las condiciones estructurales de estos edificios así como las problemáticas que de ellas se derivan son muy diversas y representan un amplio campo de aplicación para la ingeniería estructural.

Las iglesias o templos parroquiales fueron diseñados como estructuras de gravedad (García, 2007), por lo que su resistencia a compresión generalmente no es un problema para el comportamiento estructural. Sin embargo, el comportamiento que presentan estas edificaciones ante los sismos, es uno de los aspectos más importantes, ya que han sido una de las causas principales de su deterioro y destrucción, especialmente las edificaciones que se encuentra en regiones de alto peligro sísmico. La evaluación de la vulnerabilidad sísmica del Patrimonio Arquitectónico es uno de los medios más eficaces para entender las debilidades estructurales de este tipo de construcciones.

Tomando en cuenta las incertidumbres del material de la mampostería antigua y la compleja geometría de las iglesias, no es fácil tratar con un análisis dinámico no lineal mediante programas de elementos finitos, aún con los programas de análisis y capacidad de cómputo actuales. Hoy en día, se ha tratado de reducir el tiempo de evaluación estructural de una iglesia mediante el conocimiento del comportamiento dinámico particular de cada elemento arquitectónico/estructural (llamado macroelemento, Fig.1) que la compone y los patrones de daños que frecuentemente presentan después de un evento sísmico (Lourenço, 1996).

Es por esa razón que en este trabajo se recurrirá a evaluar únicamente el comportamiento dinámico no lineal correspondiente al macroelemento fachada, como parte de un procedimiento tipológico que facilita la evaluación global de un edificio religioso. Así pues, se consideraron dos tipologías diferentes de fachadas de cuatro iglesias coloniales, dos correspondientes al Estado de México y las otras dos, al Estado de Morelos. Para evaluar el comportamiento dinámico de las fachadas, se recurrirá a modelos de elementos rígidos, que se someterán a análisis dinámicos no lineales, utilizando registros sísmicos reales, con las características dinámicas que provocan daño a este tipo de edificaciones. Para calibrar los resultados, se tomarán los resultados de un modelo de elemento finito calibrado con pruebas de vibración ambiental.

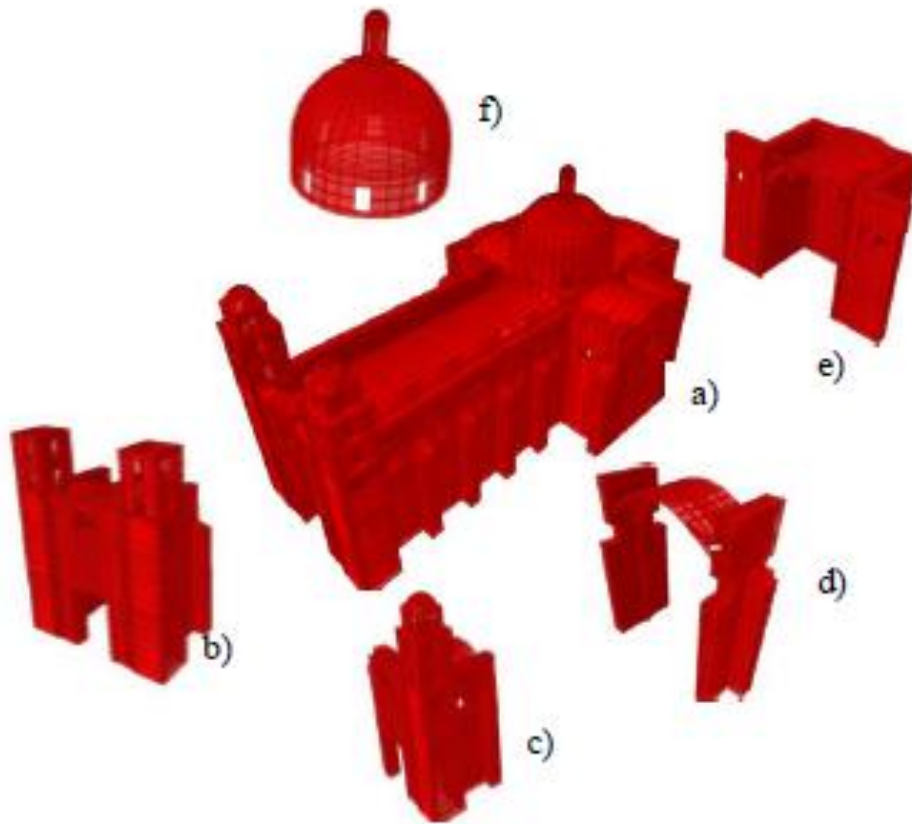


Fig. 1. Macroelementos típicos de una iglesia en forma de cruz latina: a) modelo de la iglesia completa; b) macroelemento fachada; c) macroelemento torre de campanario; d) macroelemento nave; e) macroelemento ábside; f) macroelemento cúpula (Peña, 2010)

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es conocer el comportamiento dinámico de dos tipologías diferentes de fachadas, correspondientes a iglesias construidas en la época colonial en el Estado de México y en el Estado de Morelos. Las dos tipologías se localizan lejos de la zona de subducción, pero sufren sismos frecuentes. La tipología del Estado de México se encuentra cerca de fallas locales activas, mientras que la tipología del Estado de Morelos se encuentra cerca de fallas normales.

El alcance de este trabajo considera únicamente el macroelemento de la fachada, además de que el análisis se realizará dentro del plano, es decir, en dos dimensiones, debido a que las fachadas son más vulnerable por las acciones en el plano. El comportamiento dinámico será obtenido por medio de análisis dinámicos no lineales, mediante el uso de diferentes registros sísmicos reales, los cuales cuentan con las características dinámicas que provocan daño en este tipo de construcciones. Este estudio se llevará a cabo utilizando modelos de elementos rígidos. Para validar los resultados obtenidos, se tomarán los resultados de un modelo de elemento finito calibrado con pruebas de vibración ambiental, para verificar que los modelos en este trabajo se asemejen a la realidad.

CAPÍTULO 1. Antecedentes

La construcción de los conjuntos monásticos fue resultado de un proceso evolutivo que ocurrió paralelo a la evangelización. Al principio de este proceso, los frailes realizaban su labor en simples cobertizos; ya avanzada la conversión, se instalaban en un predio adecuado, de gran tamaño y situado en una posición prominente. Posteriormente, procedían a construir el convento y, años después, el templo definitivo. Entre las distintas etapas pasaban varios años, lo que se refleja en diferencias significativas de refinamiento entre algunas partes de la edificación. En la actualidad existe un gran número de construcciones pertenecientes al periodo de consumación de la conquista y la colonia española. A estas construcciones se ha otorgado la categoría de construcciones históricas por lo que su preservación ha adquirido gran interés histórico y cultural.

1.1. Descripción arquitectónica y estructural de iglesias coloniales

En el siglo XVI se logró la conjunción urbanística, con sorpresas mutuas. Para el indígena la novedad de la arquitectura europea, con sus muros y bóvedas capaces de cubrir y delimitar inmensos espacios interiores. Para el europeo, la novedad del espacio abierto con una configuración arquitectónica y la funcionalidad de lo no cubierto. Así surgen los conjuntos conventuales (Fig. 2) en los que prevalece la disposición prehispánica, con la gran iglesia y el convento frente al atrio bardeado; semejante a las estructuras piramidales construidas frente al vacío de las plazas en el antiguo México (González, 1966).

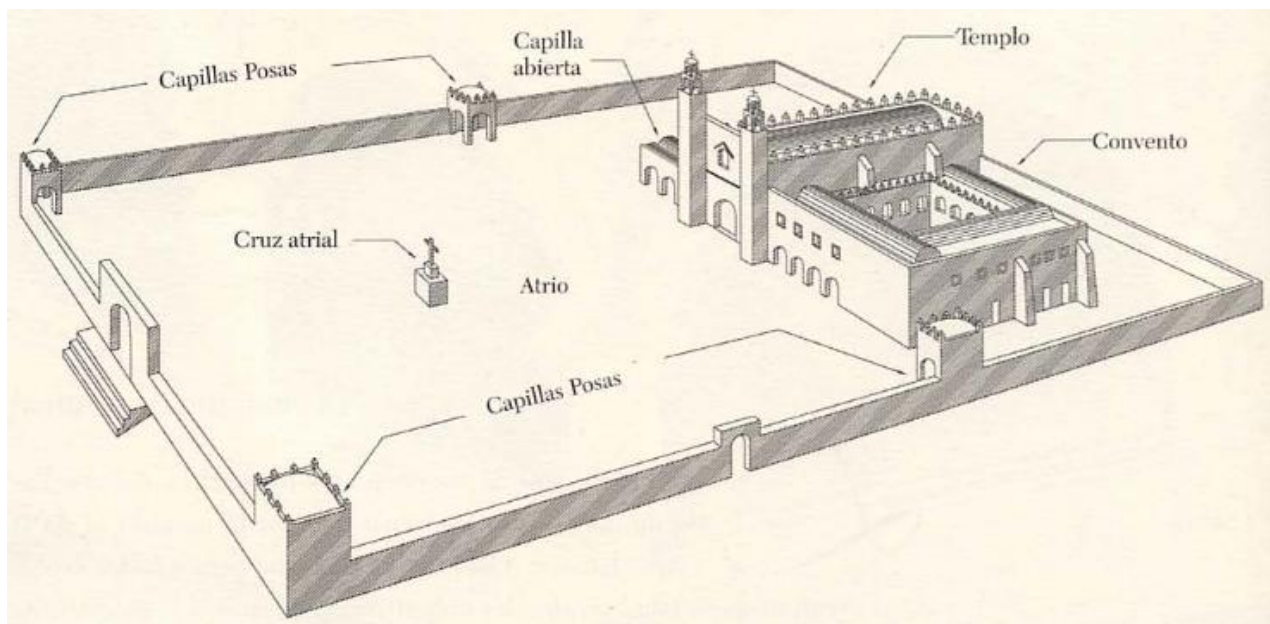


Fig. 2. Organización típica de un conjunto conventual (Meli, 2011)

De manera general se puede decir que durante la primera mitad del siglo XVI, en la arquitectura colonial imperó el estilo medieval con influencia del estilo gótico. Las bóvedas de nervaduras de las iglesias demuestran que los proyectistas aun conociendo las novedades renacentistas, se resistían a sustraerse de la tradición constructiva medieval. Las primeras estructuras a base de cúpulas se enmascaraban con la retícula de nervios góticos que a veces también se prolongaban innecesariamente a lo largo de las bóvedas de cañón. A partir de mediados del siglo XVI y hasta buena parte del siglo siguiente predominó la arquitectura renacentista. Los templos de los franciscanos están generalmente cubiertos por bóvedas de cañón con nervaduras (Fig. 3), mientras que las de los agustinos suelen cubrirse con bóvedas de cañón corrido (Fig. 4), reservando las nervaduras para el presbiterio (Fig. 5). Aún cuando la bóveda de cañón parece haber sido empleada preferentemente por los agustinos, en la posterioridad, fue empleada también por los dominicos y los franciscanos (Cómez, 1989).

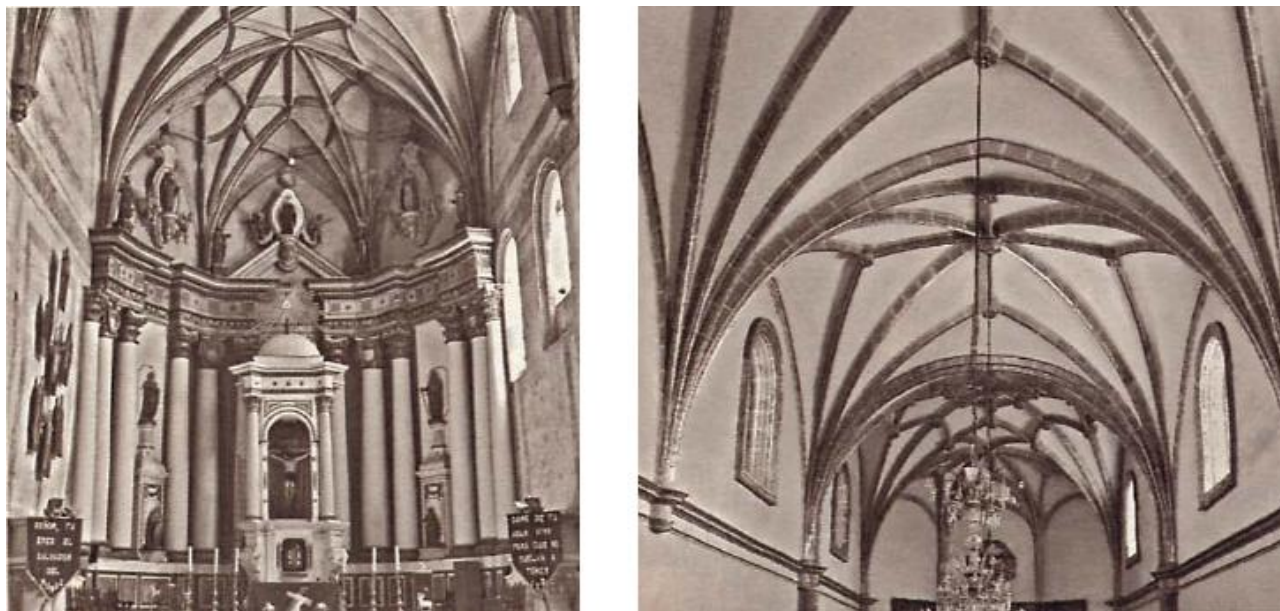
Las naves de las iglesias cubiertas con este tipo de bóvedas suelen ser de mayor longitud que las de las cubiertas por bóvedas de nervaduras. En el extradós tiene una superficie muy homogénea en la que resalta el volumen de la bóveda del presbiterio. En este contexto, la bóveda de cañón corrido ofrecía la ventaja de poder cubrir tramos más largos sin enfrentarse todavía al problema de la colocación de nervaduras. Por ello el cañón corrido es el abovedamiento característico de los templos de contrafuertes. Al respecto, Kubler (1983) afirma que estructuralmente están más próximas a las bóvedas de cañón de diseño Románico (Fig. 6) que a las bóvedas del renacimiento.



Fig. 3. Bóvedas de cañón corrido (Tepoztlán, Morelos), con arcos fajones (Tlayacapan, Morelos) y con lunetos (Jonacatepec, Morelos) (Meli, 2011)



*Fig. 4. Bóvedas de cañón con nervaduras decorativas (Tochimilco y Huaquechula, Puebla)
(Meli, 2011)*



*Fig. 5. Bóveda de nervaduras en presbítero (Actopan, Hidalgo), y en la nave (Tula, Hidalgo)
(Meli, 2011)*



Fig. 6. Bóveda de medio cañón con arcos fajones (Palencia, España) (arteguias.com, 2015)

Las fachadas de los templos comenzaron siendo una pared lisa y, con una abertura para la puerta y otra para la ventana que ilumina el coro (Fig. 7); con el tiempo fue tomando formas más elaboradas y fue teniendo mayor altura y mayor variedad volumétrica. El frontispicio se hizo más alto y la portada adquirió prestancia y decoración (Meli, 2011).

Las torres de campanarios no fueron elementos muy comunes de la arquitectura de los templos del siglo XVI. La mayoría de los templos de esta época carecía del todo de torres, y en ellos las campanas se colocaban en una espadaña, o sea en una sobreelevación de la fachada que tiene perforaciones para la colocación de las campanas (Fig. 8). La espadaña, es uno de los rasgos más representativos de la arquitectura conventual y llega a formas muy elaboradas, sobre todo en Yucatán. En algunos casos había una sola torre, ubicada del lado derecho de la fachada, de poca altura, muy robustas y sin campanario, y de arquitectura muy simple.

Esto contrasta con las altas y esbeltas torres que se acostumbraron en las iglesias de las ciudades, sobre todo en los siglos posteriores. Se sabe que la orden franciscana había emitido una disposición que prohibía que los templos tuvieran torres. En diversos templos los campanarios fueron agregados en siglos posteriores; estos casos se identifican porque cuentan con espadaña como con campanarios.

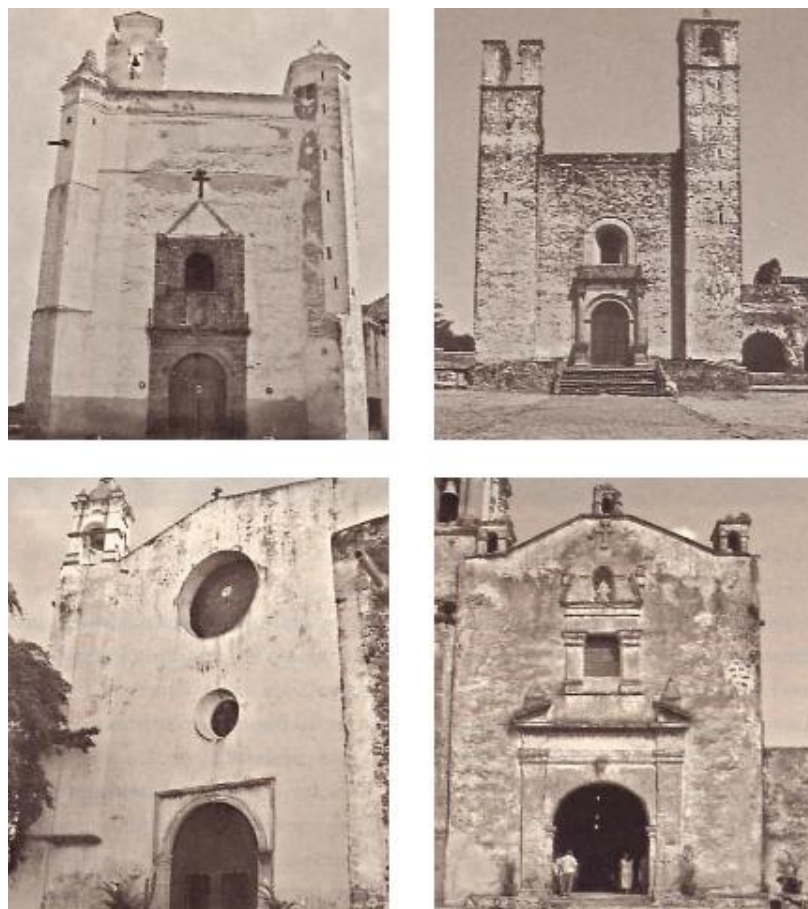


Fig. 7. Fachadas lisas tempranas (Acatzingo y Cuautinchan, Puebla; Pazulco y Oaxtepec, Morelos) (Meli, 2011)



Fig. 8. Componentes típicos de una fachada de un templo conventual: Portada, espadaña, capilla abierta y portería (Acolmán, Estado de México) (Meli, 2011)

Resulta interesante y original la adición de contrafuertes diagonales en los extremos de las fachadas (Fig. 9). Esta solución se empleó con bastante frecuencia en los templos de la primera época, para confinar la fachada. Esta fue la primera medida tomada específicamente para mejorar el desempeño sísmico de los templos, los que deben haber experimentado daños en sus fachadas por los fuertes sismos. Los contrafuertes se habrían puesto con la intención de evitar que la fachada se separara del cuerpo principal del templo.



Fig. 9. Fachadas con contrafuertes diagonales (Atlatlahuacan, Morelos; Tochimilco, Puebla) (Meli, 2011)

En los templos posteriores fue común que la fachada tuviera dos torres a ambos lados, al menos una de ellas con un campanario de baja altura. Las torres también producen un confinamiento de la fachada, de manera semejante al efecto de los contrafuertes diagonales (Fig. 10). Kubler (1983) atribuye también esa modalidad al propósito de mejorar el comportamiento sísmico de la fachada. Adicionalmente, es de considerarse si la práctica de mantener las torres de baja altura en los templos se derivó de la intención de conservar la impresión de austeridad y el aspecto militar del conjunto, o si tuvo el propósito de evitar los daños frecuentes que los terremotos habían ocasionado en esos elementos (Meli, 2011).



Fig. 10. Fachadas con torres (Tepoztlán, Morelos; Actopan, Hidalgo) (Meli, 2011)

A medida que avanzaba el siglo se fue dando mayor importancia a la portada de la fachada principal (Fig. 11) y también a la de la fachada lateral opuesta al templo. La puerta de entrada se enmarcaba con relieves escultóricos, frecuentemente, muy refinados y que demostraban la gran capacidad artística alcanzada por los canteros locales. El estilo era preferentemente plateresco y los motivos aludían a la orden a la que pertenecía el templo.



Fig. 11. Detalles de algunas portadas de la fachada principal de templos conventuales (Cholula, Puebla; Tula, Hidalgo; Tepoztlán, Morelos) (Meli, 2011)

1.2. Materiales tradicionales

Las primeras construcciones utilizaron como materiales básicos la piedra, el barro, la cal, la madera, la caña y la paja, o sea los mismos que se empleaban en la construcción prehispánica. El uso de estos materiales varió de manera importante en las distintas regiones, según su disponibilidad, las condiciones climáticas y, en buena medida, dependiendo de la familiaridad de la mano de obra indígena en su empleo (Meli, 2011).

La mampostería fue el material más utilizado en la construcción de estructuras hasta mediados del siglo XIX. La eficacia de su utilización quedó manifestada en la gran diversidad de edificios, los cuales se han mantenido en pie hasta nuestros días. Siendo el marco de estudio de este trabajo las estructuras históricas, resulta indispensable una descripción del material que determina su comportamiento. La mampostería es un material compuesto por piezas (bloques de piedra, ladrillos, adobe de diferentes formas y tamaños) que se encuentran unidas entre sí mediante un adherente, habitualmente mortero, o en ocasiones colocadas a hueso (sin mortero), con un comportamiento anisótropo, heterogéneo y en determinadas condiciones discontinuo. Por su composición la mampostería engloba distintos materiales que se encuentran en estado y condición variable. Estas condiciones afectan directa o indirectamente su comportamiento (Ibarra, 2012).

La mampostería puede clasificarse, en función del arreglo existente entre sus elementos constituyentes, en dos tipos: mampostería regular y mampostería irregular. El primer tipo está compuesto por elementos ordenados, bien labrados y escuadrados, recibidos con o sin mortero y dispuestos en hiladas regulares (Fig. 12a). Por otra parte, la mampostería irregular es un conglomerado que cuenta con elementos de diferentes tamaños colocados sin labrar. Los elementos están distribuidos en forma irregular dentro de una matriz de mortero (Fig. 7b). Es común que algunos elementos, como en el caso de muros, tengan una composición regular en el exterior y el interior irregular (Fig. 12c y 12d), debido a que el arreglo entre las piezas y el mortero tiene gran influencia en el comportamiento mecánico de las estructuras de mampostería (Ibarra, 2012).

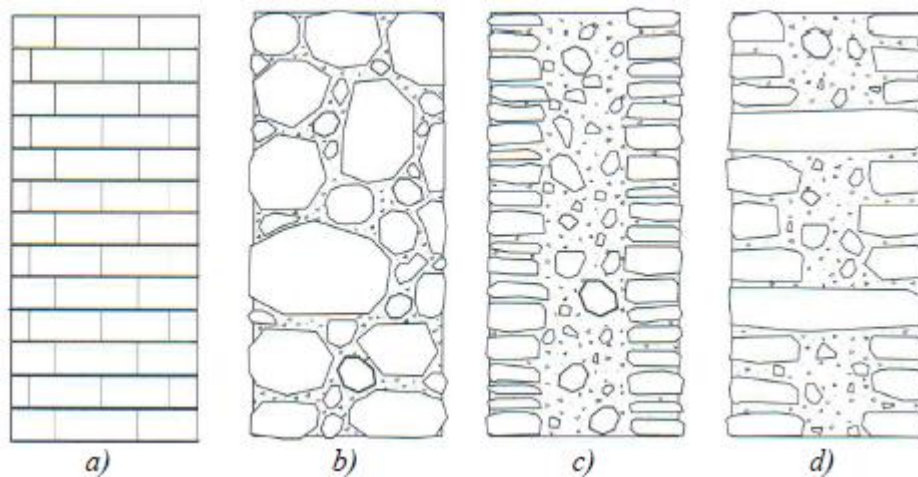


Fig. 12. Tipos de arreglo de mampostería de piedra. a) Regular, b) Irregular, c) Con parámetro regular, desconectado del interior, d) Con piedras de amarre (Meli, 1998)

1.3. Técnicas de construcción

Los colonizadores llevaron e impusieron en la Nueva España los tipos de edificaciones, los estilos y las técnicas que eran propios de la construcción de esa época en su país de origen: su anhelo era reproducir en el Nuevo Mundo una forma de vida similar a la que habían dejado, pero a mayor escala y con mayor riqueza. Con ese propósito, emprendieron una enorme tarea de construcción que se prolongó por todo el siglo XVI y en la cual se enfrentaron con condiciones locales diferentes de España y que los llevaron a modificar sus intenciones originales (Meli, 2011).

Las herramientas y los equipos comunes en la construcción europea, basados en el hierro y la rueda, eran desconocidos en el mundo prehispánico, por lo que se difundieron muy lentamente en la Nueva España. Esto, no tanto por el necesario proceso de adaptación, sino porque su precio era muy elevado, comparado con el bajo o nulo costo de la mano de obra. De manera que los constructores preferían emplear fuerza masiva de trabajo y técnicas constructivas que no requirieran herramientas refinadas. Solo hasta 1570 se llegó a generalizar el empleo de las herramientas metálicas de mano y los albañiles profesionales pudieron hacerse de sus propias herramientas (Fig. 13). Conviene señalar, sin embargo, que en la construcción prehispánica ya se empleaban los equivalentes a la mayoría de las herramientas europeas, pero hechos de piedra o de madera (Meli, 2011).



Fig. 13. Indígenas usando herramientas metálicas (Meli, 2011)

En el Nuevo Mundo había una inclinación natural hacia la construcción de las grandes obras, por la costumbre ancestral de edificar grandiosos y refinados conjuntos religiosos, aún así, les eran extraños muchos de los procesos tecnológicos que las nuevas obras implicaban. Como resultado de la contribución de los dos mundos, se dio el desarrollo de una construcción con características propias.

Ejemplos destacados de adaptación y aculturación en la Colonia son las cimentaciones de plataformas de mampostería sobre pilotes cortos de madera (estacones), y los emparrillados de vigas de madera colocados debajo de plataformas de tierra o de mampostería pobre. Ambas modalidades se aplicaron para reducir los hundimientos en la cimentación de edificios sobre suelos blandos, como los que se encontraron en la Ciudad de México. El aligeramiento de la mampostería con el empleo de piedra volcánica porosa (tezontle) fue adoptado con entusiasmo por los españoles, principalmente porque permitía mayor velocidad de construcción, además de que reducía los problemas de hundimientos en suelos blandos. Los contrafuertes de tierra apisonada y adobes, recubiertos de sillares de piedra, a la manera de las pirámides y plataformas prehispánicas, son otro ejemplo de incorporación de procedimientos prehispánicos a la construcción virreinal. También, proviene de la construcción prehispánica el empleo de juntas de mortero rejoneadas para defenderlas de ser deslavadas por el escurrimiento del agua de lluvia (Meli, 2011).

Hubo gran variación en el tiempo empleado en la construcción de las edificaciones conventuales. Los primeros edificios provisionales se realizaban en cuestión de días o semanas, pero sus versiones definitivas llevaron mucho más tiempo, algunas décadas, y algunas otras tardaron más de un siglo en terminarse. En estos últimos casos se encuentra la superposición de estilos y de soluciones constructivas y de materiales, de acuerdo con las preferencias de cada época, lo que permite, en general, la identificación de las distintas etapas (Meli, 2011).

CAPÍTULO 2. Iglesias coloniales de estudio

Las construcciones religiosas que se realizaron en el siglo XVI en los centros urbanos habitados por los españoles, fueron muy numerosas y, con frecuencia muy refinadas, pero de ellas quedan sólo unos cuantos ejemplos muy alterados. Por el contrario, la mayoría de los conjuntos monásticos construidos fuera de las ciudades, en los llamados *pueblos de indios*, subsiste en buen estado de conservación y con pocas alteraciones de sus características originales. Estos conventos están distribuidos en regiones con condiciones geográficas y geológicas diferentes; además, presentan muchas variantes en la cuantía de los recursos económicos y de mano de obra que se destinaron a su construcción, así como en los estilos y refinamiento de su arquitectura.

Por todo ello, son estos últimos los que mejor permiten el analizar los factores que influyeron en el nacimiento de la primera arquitectura nacional y de la práctica constructiva correspondiente (Meli, 2011). Éste trabajo consideró dos tipologías típicas de iglesias coloniales construidas en el centro de México. La primera tipología se localiza en el municipio de Naucalpan, Estado de México, y corresponde a iglesias construidas lejos de la zona de subducción pero cerca de fallas locales activas. La segunda tipología se localiza en el Estado de Morelos y corresponde a iglesias construidas lejos de fallas locales activas y de la zona de subducción pero cerca de fallas normales (profundidad intermedia). Sin embargo, ambas zonas sufren frecuentes sismos generados en la costa del Pacífico.

Para cada tipología, se estudiaron las fachadas de dos iglesias coloniales. Con la primera tipología se tienen fachadas de poca altura, con gruesos muros y contrafuertes debido a la experiencia de los antiguos constructores ante la actividad sísmica, mientras, con la segunda tipología se tienen fachadas más altas y esbeltas, dado a que la actividad sísmica en su lugar de localización es menor,

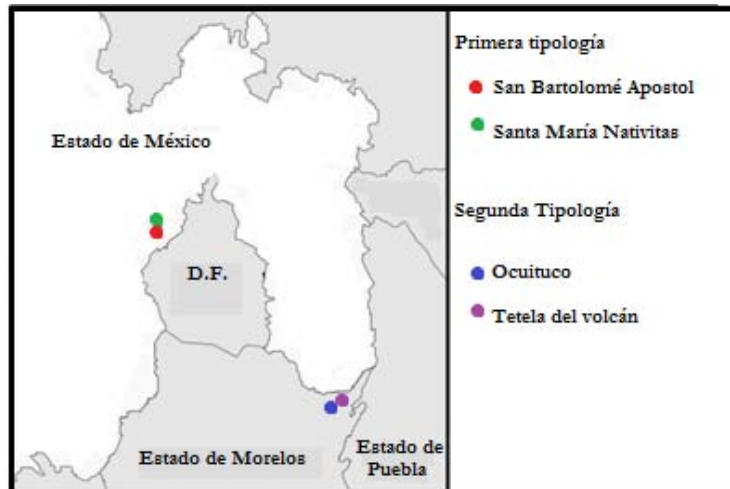


Fig. 14. Mapa de localización de las fachadas de las iglesias de estudio

2.1. Parroquia de San Bartolomé Apóstol de Naucalpan, Estado de México

La Parroquia de San Bartolomé Apóstol se encuentra ubicada en el municipio de Naucalpan, Estado de México (Fig. 15). La orden sacerdotal por la que estuvo dirigida fue la franciscana, que fue la primera en llegar a la Nueva España en el año 1524 (Robles, 2012). La parroquia fue fundada entre 1600 y 1750 (Gutiérrez, 2011). La orden franciscana se caracterizó por su arquitectura modesta y simple, siendo poco afectos a la decoración excesiva de sus templos (Astorga y Rodríguez, 2009), visible en el templo de San Bartolomé (Fig. 16).

En la época colonial era común crear poblaciones de indios en los alrededores de los centros religiosos de este tipo, esto con la finalidad de facilitar la evangelización, además en el pueblo de San Bartolo se encontraban las casas de gobierno locales (López y Córdoba, 2011). Con base en lo anterior y por su tamaño, se puede considerar que la Parroquia de San Bartolomé Apóstol es el segundo centro religioso más importante de la zona. Debido a la época en la que fue construido dicho templo, es considerado, por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), un monumento histórico (Robles, 2012).



Fig. 15. Vista aérea de la zona donde se encuentra ubicada la Parroquia de Santiago Apóstol



Fig. 16. Vista actual de la Parroquia de San Bartolomé Apóstol

2.2. Parroquia de Santa María Nativitas de Naucalpan, Estado de México

La Parroquia de Santa María Nativitas se encuentra localizada en el municipio de Naucalpan, Estado de México (Fig. 17). En un principio, al iniciarse la conquista espiritual por los franciscanos, existieron varios pueblos de visita en los que no se oficiaba misa, uno de ellos fue Santa María Nativitas. En los pueblos de visita los frailes construyeron pequeñas capillas con materiales perecederos ayudados por la mano indígena. Probablemente eso también sucedió en Nativitas (Fig.18).



Fig. 17. Vista aérea de la zona donde se encuentra ubicada la Parroquia de Santiago Apóstol



Fig. 18. Vista actual de la fachada de la Parroquia de Santa María Nativitas

En Nativitas existe una historia que ha ido de generación en generación. Se habla de que originalmente el pueblo se encontraba en un lugar distinto al actual, en un terreno al que llamaban La Virgen en la colonia Modelo en el mismo municipio de Naucalpan. Se dice que este lugar se inundaba constantemente y debido a esto fue abandonado. Cuando los pobladores se trasladaron a un lugar más propicio para su desarrollo, tuvieron miedo de que su capilla fuera robada junto con las imágenes valiosas que en ella se encontraban. Por esta razón decidieron demolerla y llevar esas piedras para construir con ellas una nueva iglesia, la que ahora se puede ver.

Esta edificación tiene una piedra con la fecha 1660 labrada (Fig. 19), probablemente sea este el año de su construcción. Sin embargo, a principios del siglo XVII, Santa María Nativitas formó parte del programa de los centros de congregación, en los que se ordenó la concentración de las poblaciones de toda la región de Tlalnepantla en distintas locaciones. Esto podría explicar por qué se trasladó la iglesia, siendo posiblemente sumado a las inundaciones que sufría el pueblo en su ubicación original, ya que en algunos casos las congregaciones sirvieron no sólo para juntar a la población sino también para ubicarla en sitios más benéficos (Gutiérrez, 2011).

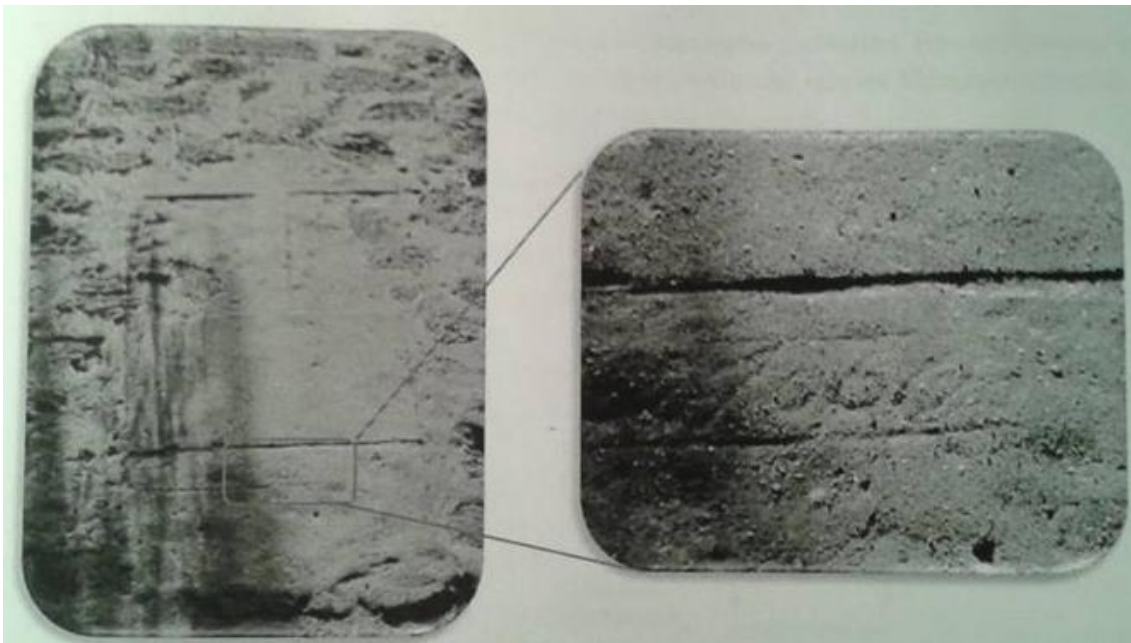


Fig. 19. Piedra labrada que indica la fecha 1660, probablemente sea esté el año en que se construyó la parroquia de Santa María Nativitas (Gutiérrez 2011).

La iglesia de Santa María Nativitas se convirtió en Parroquia en 1970 y tomó el nombre de La Preciosa Sangre por la preciada imagen que se ha venerado en ella desde mucho tiempo atrás y que aún se aloja en este inmueble. Durante el siglo XX, la iglesia sufrió varios cambios. Entre ellos la sustitución del techo de bóveda catalana por una bóveda de cañón corrido construida con concreto armado en 1950 (Fig. 20) y la construcción del campanario del mismo material en el mismo año (Fig. 21) (Gutiérrez, 2011).



Fig. 20. La bóveda de cañón corrido construida de concreto reforzado sustituyó una techumbre de bóveda catalana en 1950 (Gutiérrez, 2011)



Fig. 21. El campanario no existió sino hasta 1950 (Gutiérrez, 2011)

Otra situación que se presentó entre 1930 y 1950 fue el desfase del arco toral, para solucionarlo se insertó un tensor a todo lo ancho de la nave que se sujetó por el exterior con un par de cruceros de

acero con la finalidad de evitar que los juros se abrieran en la parte superior (Fig. 22). Con la situación de la cubierta, este implemento dejó de funcionar ya que se colocaron traveses en la azotea que realizan la función de unir los muros (Gutiérrez, 2011).



Fig. 22. Vista del refuerzo que se colocó en los muros para evitar que abrieran y provocaran la fractura del arco toral (Gutiérrez, 2011).

Ya en la década de 1990 se creó una Comisión Pro-obras, materiales y fiestas patronales en el pueblo. Fue así como en 1999 se inició el procedimiento para cambiar el piso del templo que durante mucho tiempo fue de barro, por uno más fácil de limpiar y de mayor durabilidad; se decidió usar mármol. Una vez sustituido el piso, se colocaron dos candiles nuevos y se realizó la instalación del alumbrado exterior. La Parroquia de la Preciosa Sangre forma parte del Patrimonio Histórico construido del municipio y como tal se ha tratado de mantener en buenas condiciones.

2.3. Parroquia de Santiago Apóstol de Ocuituco, Estado de Morelos

Ocuituco, al oriente del Estado de Morelos, es un pequeño poblado, cabecera de la municipalidad del mismo nombre, y que se encuentra en las faldas suroccidentales del volcán Popocatepetl (Fig. 23). Ocuituco fue cristianizado por los agustinos que llegaron al pueblo en 1534, un año después de su arribo en México, y en él fundaron la primera casa que su orden tuvo en el Nuevo Mundo fuera de la ciudad de México (Fig. 24).



Fig. 23. Vista aérea de la zona donde se encuentra ubicada la Parroquia de Santiago Apóstol



Fig.24. Vista actual de la Parroquia de Santiago Apóstol

Una vez asentados en el pueblo, los religiosos iniciaron la construcción del templo y del convento, y sustituyeron la “pobre cabaña” y las “pajizas chozas” en las que se realizó el primer capítulo de la orden, por un suntuoso edificio. Los trabajos realizados en su construcción entre 1534 y 1536 fueron tan ambiciosos que los indígenas sufrieron muchos abusos. La Corona amonestó a los frailes por ello, y por el hecho de haber iniciado el convento antes de la terminación de la iglesia, pero los religiosos no hicieron caso. La autoridad les retiró la administración eclesiástica del pueblo y la dio a un cura secular. El pueblo estaba en encomienda del arzobispo de México, fray Juan de Zumárraga, quien terminó, entre 1536 y 1541, la iglesia iniciada por los agustinos (Rubial, 1981).

Este templo agustino dedicado al apóstol Santiago, Santo protector de España, se compone de las partes fundamentales en este género de conjuntos como son: atrio, templo, convento y huerta, además es considerado el más antiguo en toda América Latina. En la actualidad no existe en ellos la unidad de concepto arquitectónico debido a las transformaciones que ha sufrido desde los primeros años hasta la actualidad.

Como parte de la arquitectura religiosa se conservan dos fuentes de piedra labradas característica del siglo XVI (Fig. 25), una de ellas situada en el centro del claustro; la otra mutilada, proveía de agua al centro de la población por lo que se localiza en la plaza principal. La fuente de la plaza consta de vaso y del vástago central, rematando éste último en un racimo de delfines que expulsaban el agua por las fauces sobre un recipiente de planta circular provisto de varios orificios que, a su vez, vertían el líquido sobre otro vaso más, el cual se ornamenta con relieves que representan querubines renacentistas, es muy posible que de ésta fuente sean las llamadas "sirenas", que están ubicadas en las escalinatas de acceso al atrio y en el patio del claustro.



Fig.25.Fuente de piedra labrada.

2.4. Parroquia de San Juan Bautista de Tetela del Volcán, Estado de Morelos

Entrada la segunda mitad del siglo XVI, las fundaciones dominicas del Estado de Morelos tuvieron un cambio en la ruta geográfica que hasta ese momento habían seguido. Los frailes de Santo Domingo decidieron establecerse en la zona este del actual Estado de Morelos, específicamente en el poblado de Tetela del Volcán (Fig. 26), convirtiéndose éste (cronológicamente) en el cuarto establecimiento de la Orden en aquella región (Harfush, 1995). La historia de la construcción del convento abarca los años 1559 a 1580 para tal caso nos referimos a los finales del siglo XVI. En la figura 27 se tiene la vista actual de este templo.



Fig. 26. Vista aérea de la zona donde se encuentra ubicada la Parroquia de San Juan Bautista



Fig.27. Vista actual de la Parroquia de San Juan Bautista de Tetela del Volcán

El conjunto conventual está localizado sobre un terreno muy irregular debido a que el mismo poblado se encuentra enclavado entre los montes que forman las estribaciones del Popocatepetl. Esta fue la causa por la que los frailes tuvieron que levantar una especie de plataforma, para así poder nivelar el terreno y poder construir (Fig. 28).

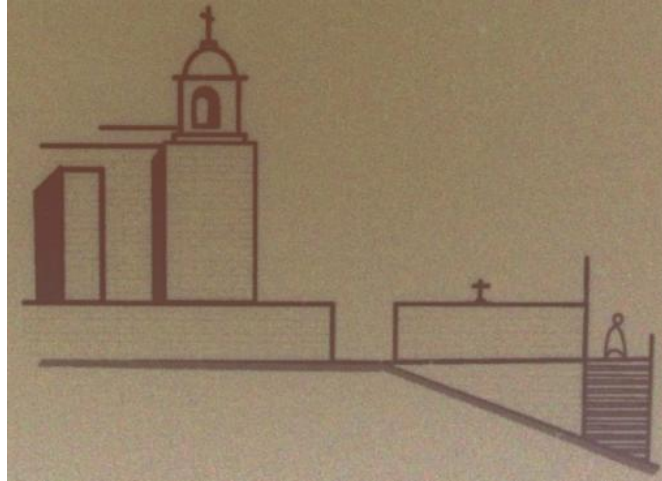


Fig. 28. Esquema del terreno sobre el que ubica el convento de Tetela del Volcán (Harfush, 1995)

Como se ha mencionado, el conjunto conventual fue construido en el siglo XVI, sin embargo el templo no resistió el paso del tiempo y tuvo que ser necesaria su reconstrucción a principios de siglo XIX (Harfush, 1995). En la figura 29 se puede observar el deterioro que presentaba esta parroquia en el año de 1964.



Fig. 29. Parroquia de San Juan Bautista 1964 (Cama, 2006)

En 1994 catorce conventos, Tetela del Volcán entre ellos, fueron nominados por la UNESCO Patrimonio Mundial. Como resultado de la nominación el INAH realizó prácticas de campo con el fin de atender la conservación del soporte de la pintura mural que se localiza en las pilastras del corredor oriente del monumento. En 2003, se derivaron fondos atraídos por la Dirección de Patrimonio Mundial del INAH y la UNESCO, para realizar tareas de conservación de su pintura mural, suficientes para realizar acciones de limpieza, eliminación y consolidar muros y pilastras del claustro bajo. Ese mismo año se formó el comité encargado de buscar algún sistema que permitiese mejorar las condiciones de la pintura y del monumento (Cama, 2006).

Las características plásticas de las pinturas de Tetela tienen que ver con la época de la construcción del convento que las alberga; cuando los frailes agustinos de Ocuituco ya habían realizado su labor evangelizadora. Ciertamente se trata de una manifestación pictórica atribuida al siglo XVI, que se aparta con singulares características de lo que tradicionalmente se presupone sobre la pintura de ese periodo. La pintura mural del momento evangelizador se ha tipificado, con un criterio bastante extendido, como una pintura dirigida a la conversión de los naturales del Nuevo Mundo y en todo momento dirigida a la conquista espiritual y a la enseñanza de la nueva religión; por lo que con frecuencia, se recurrió a la utilización de grabados europeos para representar en los muros, como elementos didácticos, imágenes consagradas a los beneficios de la nueva fe (Cama, 2006). En la figuras 30, 31, 32 y 33 se muestran algunas de las pinturas que alberga el convento.



a)

b)

*Fig.30. Puerta de entrada. a) 1964; b) 2006.
(Cama, 2006)*



*Fig. 31. Santo Domingo, fundador de la orden. a) 1964; b) 2004; c) 2006.
(Cama, 2006)*



Fig. 32. Corredor (Cama, 2006)



Fig. 33. Corredor, 2013

2.5. Geometría de las fachadas bajo estudio

En cuanto a la geometría que tiene la parroquia de San Bartolomé Apóstol, esta que cuenta con un campanario de 13.4 m de altura considerando el cupulín, posee una sección rectangular de 5.2 m por 4.25 m en los muros exteriores, además el espesor de los muros se encuentra entre 0.85 m a 1 m. En la figura 34 se muestra la geometría correspondiente a la parroquia, en elevación y en planta, respectivamente.

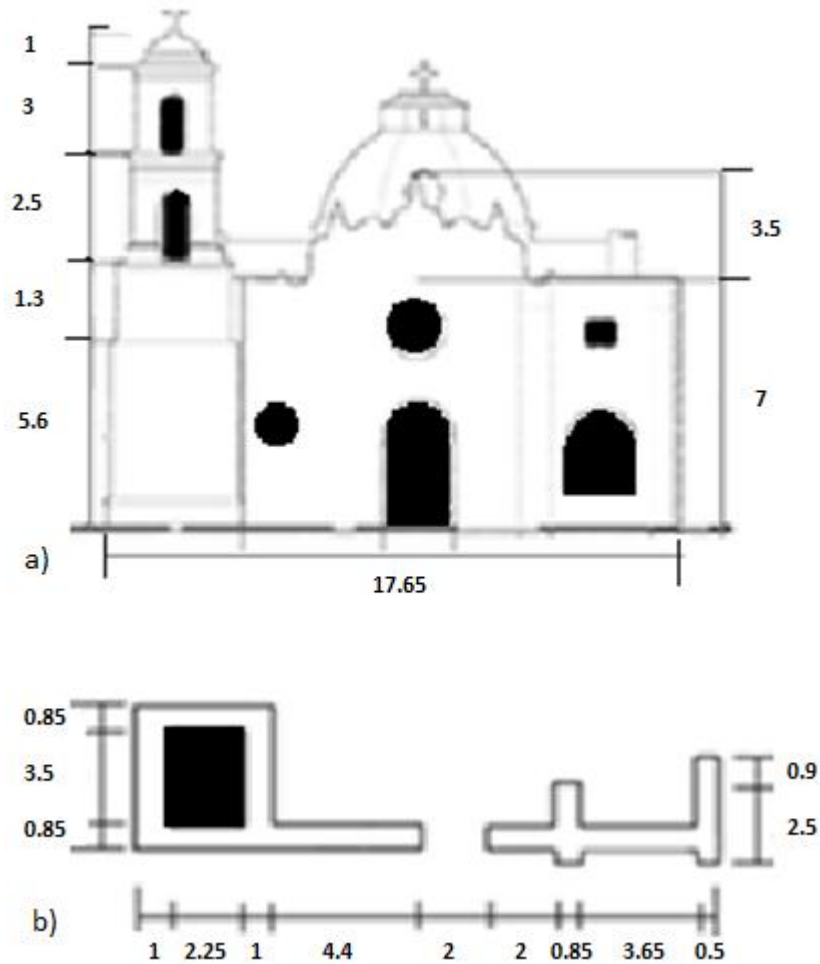


Fig.34. Geometría de la fachada de la Parroquia de San Bartolomé Apóstol (dimensiones en m)
a) Elevación, b) Planta. (Robles, 2012)

Respecto a la geometría que tiene la parroquia de Santa María Nativitas, se tiene que cuenta con muros de 0.66 m a 1.2 m de espesor. También, cabe mencionar que la torre de campanario no existió sino hasta 1950. Esta torre de campanario es de 13.44 m de altura considerando el cupulín. En la figura 35 se muestra la geometría correspondiente a la parroquia, en elevación y en planta, respectivamente.

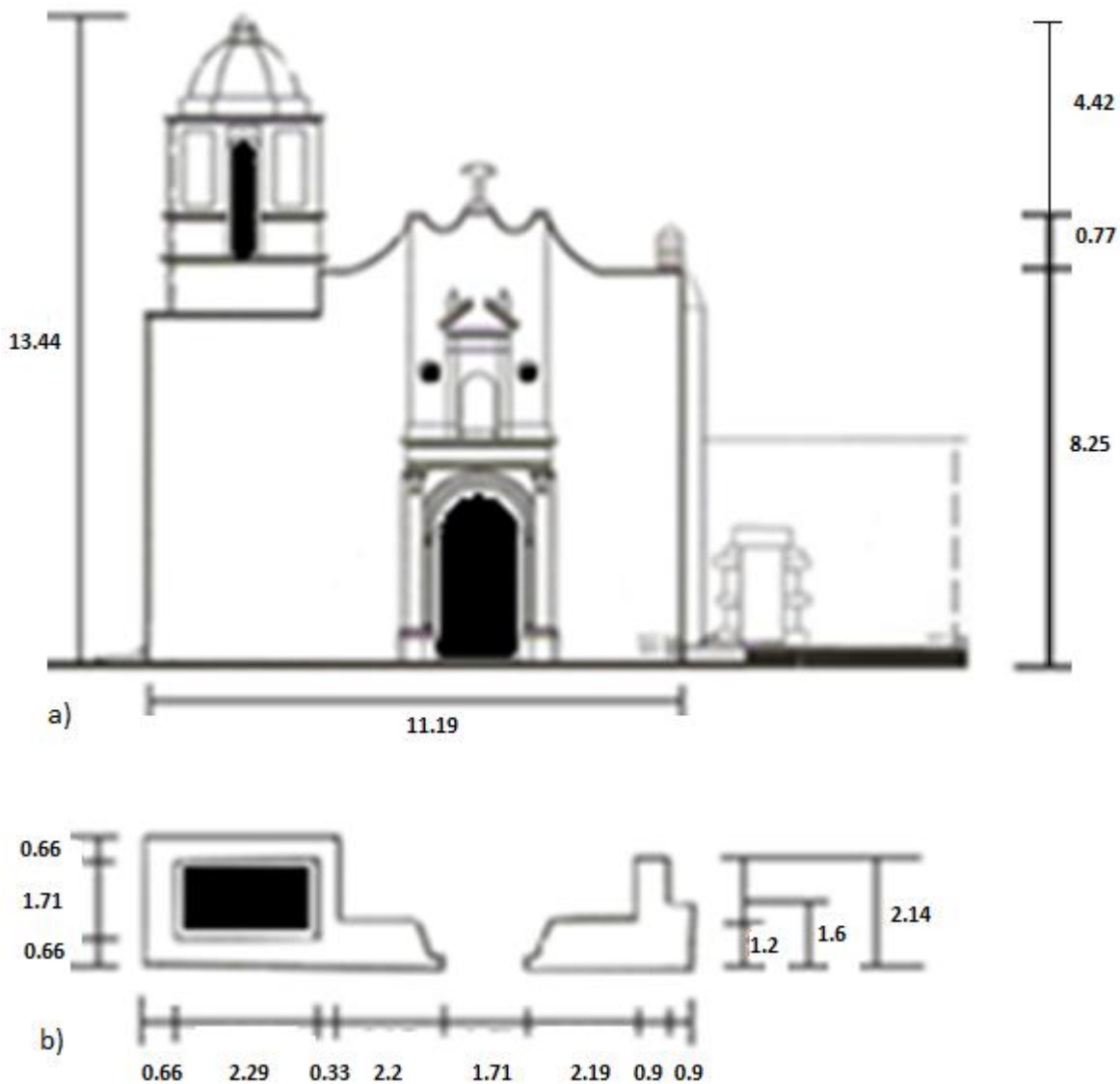


Fig. 35. Geometría de la fachada de la Parroquia de Santa María Nativitas (dimensiones en m)
a) Elevación, b) Planta. (Gutiérrez, 2011)

La geometría que tiene la parroquia de Santiago Apóstol, cuenta con una torre de campanario de 21.7 m de altura considerando el cupulín. Los muros del templo varían de 1.3 m a 1.9 m. En la figura 36 se muestra la geometría correspondiente a la parroquia, en elevación y en planta, respectivamente.

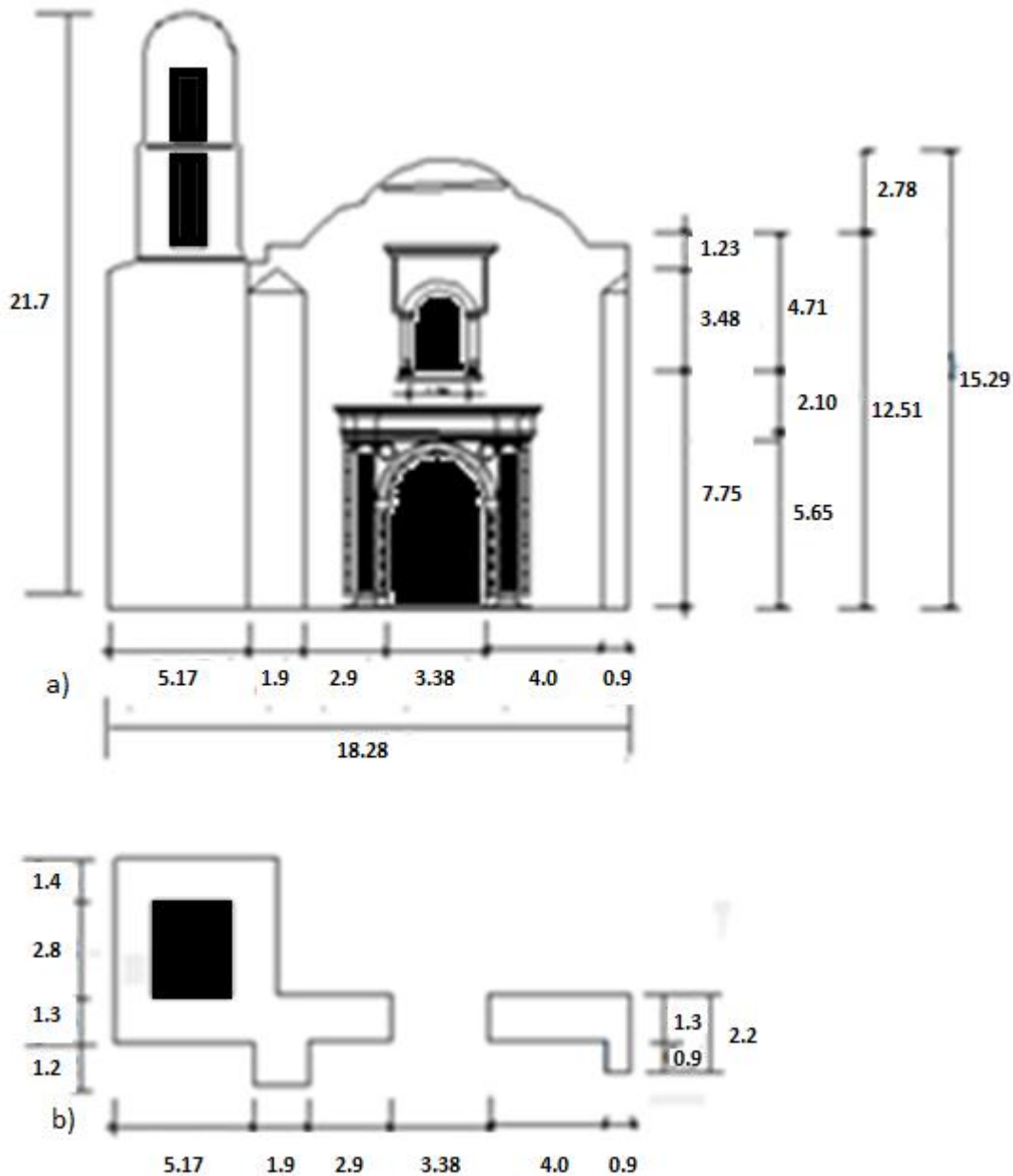


Fig. 36. Geometría de la fachada de la Parroquia de Santiago Apóstol (dimensiones en m)
a) Elevación, b) Planta.

Finalmente, la geometría de la parroquia de San Juan Bautista, cuenta con una torre de campanario de 20.86 m de altura considerando el cupulín. Los muros del templo varían de 1.2 m a 1.7 m. En la figura 37 se muestra la geometría correspondiente a la parroquia, en elevación y en planta, respectivamente.

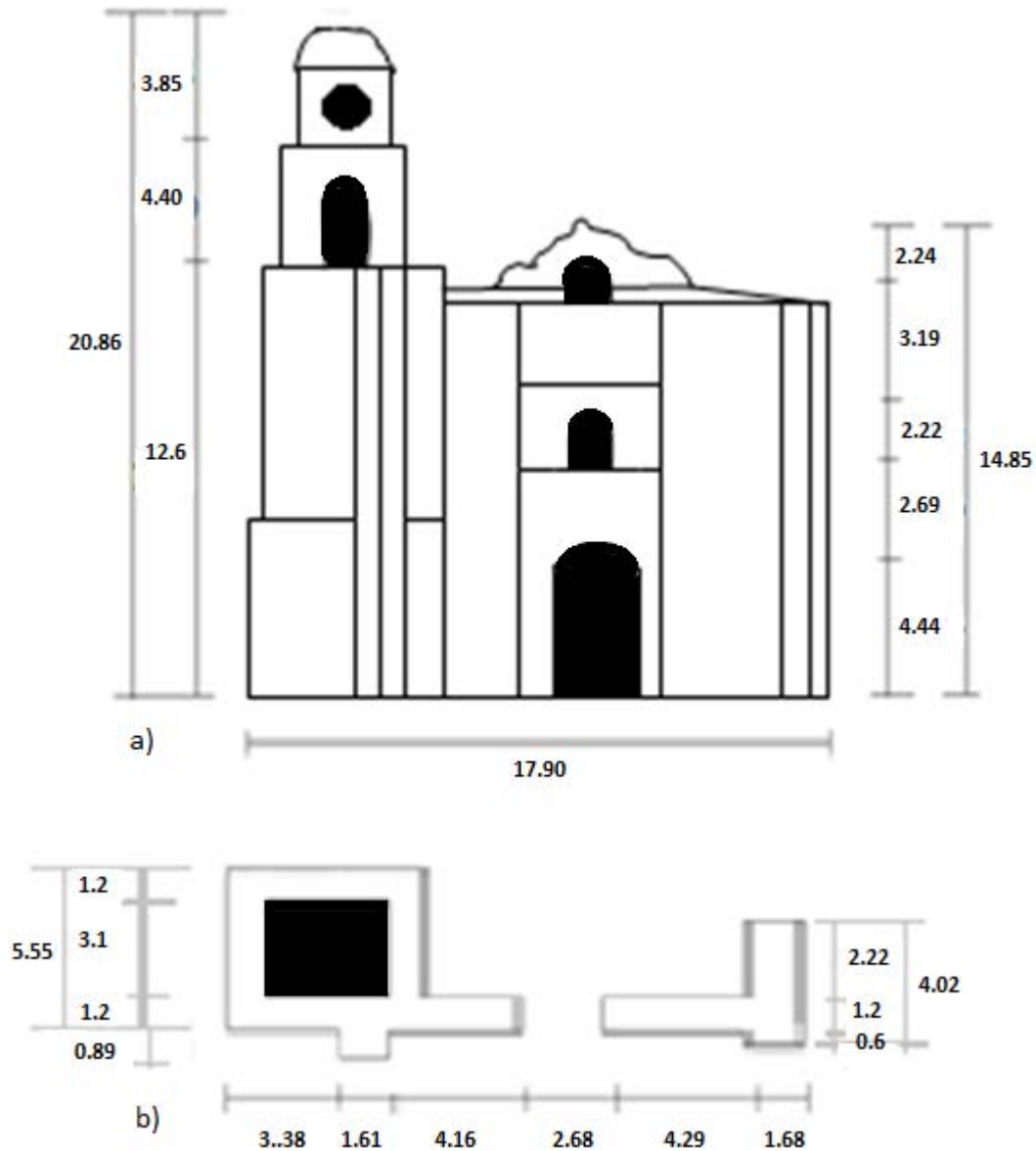
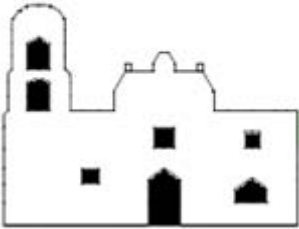


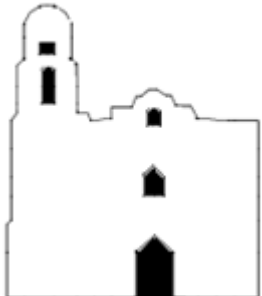


Fig.37. Geometría de la fachada de la Parroquia de San Juan Bautista (dimensiones en m)
a) Elevación, b) Planta.

En la Tabla 1 se presentan las diferencias que existen en la tipología de cada una de las fachadas de estudio, que como ya se había mencionado anteriormente, los templos de la zona de Naucalpan del Estado de México presentan poca altura comparados con los del Estado de Morelos, que presentan mayor altura y son esbeltos. Se puede observar que la altura de las torres de campanario en los casos de Tetela y Ocuituco es aproximadamente el doble de la altura de Naucalpan y Nativitas.

Tabla 1. Fachadas de estudio (escala relativa)

Fachadas de Iglesias del Estado de México		Fachadas de Iglesias del Estado de Morelos	
Bartolomé	Nativitas	Tetela	Ocuituco
			

CAPÍTULO 3. Descripción del método y modelos de análisis

Para evaluar las propiedades dinámicas de las fachadas se utilizó una herramienta de análisis dinámico no lineal. Dicha herramienta es el Programa de Elementos Rígidos para el análisis dinámico no lineal de estructuras de mampostería, RIGID. Este programa de cómputo fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y está basado, como su nombre lo indica, en el método de los elementos rígidos (Peña y Casolo, 2010).

El uso del programa RIGID optimiza el trabajo comparado con otras herramientas de análisis, pues permite determinar esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, así como la evolución de daños del material, sin la necesidad de una gran cantidad de recursos computacionales lo que vuelve a RIGID una herramienta eficaz, particularmente rápida y sencilla.

Respecto al Método de los Elementos Rígidos se dice que es un método sencillo, eficaz y particularmente rápido para el estudio dinámico no lineal, dado que son necesarios pocos elementos, aún para geometrías complejas. Sin embargo, presenta la limitante de que permite solamente el análisis en dos dimensiones, así como su formulación no es muy conocida.

3.1. Descripción del método de análisis (Peña y Casolo, 2010)

El método de los elementos rígidos es un método simplificado de análisis dinámico no lineal que analiza las estructuras de mampostería como una serie de elementos rígidos interconectados entre sí mediante resortes con comportamiento inelástico. Los puntos de conexión representan las características del material y en ellos se concentran los esfuerzos y deformaciones, al mismo tiempo representan la capacidad del modelo para tomar en cuenta la separación o deslizamiento entre elementos (Fig. 38a). Estos elementos tienen un movimiento de cuerpo rígido con dos desplazamientos lineales y una rotación (Fig. 38b) generando modelos con un menor número de grados de libertad.

Un modelo de elementos rígidos puede ser considerado como un modelo semicontinuo, asumiendo que cada elemento es independiente en su movimiento, debido a que parte de la deformación en las estructuras de mampostería resulta de un movimiento relativo entre elementos y por tanto no pueden ser consideradas como continuas. Sin embargo, sigue existiendo una relación entre los esfuerzos y las deformaciones. Teniendo en cuenta que las conectividades iniciales no cambian durante el proceso del análisis y que se generó un menor número de grados de libertad, el tiempo de cómputo se simplifica. De este modo, “la idea principal de este método es la de poder analizar en forma simplificada cualquier tipo de estructura de mampostería sin refuerzo (no importa la geometría o las características del material), que presente un comportamiento en el plano” (Peña y Casolo, 2010).

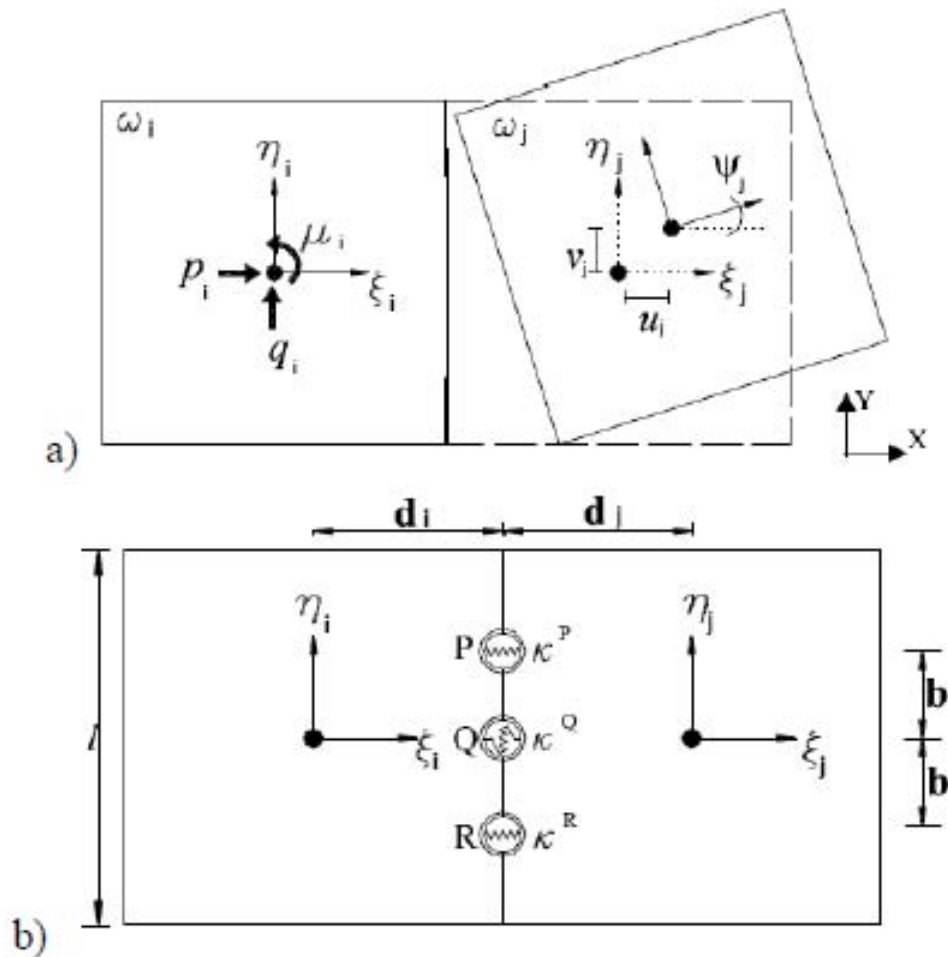


Fig. 38. Estructura de los nodos: a) fuerzas y desplazamientos; b) interconexión entre elementos. (Peña y Casolo, 2010)

3.2. Sismos utilizados en el análisis

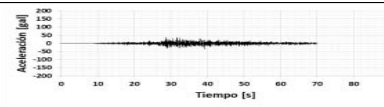
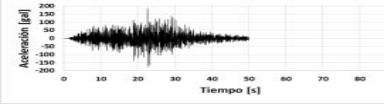
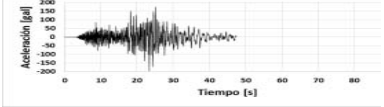
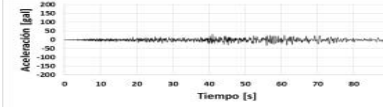
El comportamiento estructural de las construcciones históricas ante movimientos sísmicos es uno de los más críticos y que pueden afectar su estabilidad. Debido a esto, los modelos de las fachadas fueron analizados aplicando diferentes registros sísmicos reales, para así poder evaluar la influencia de sus características sobre las dos tipologías de fachadas.

Los sismos que se consideraron fueron, principalmente los suscitados en el año de 1999 en Oaxaca y Puebla, debido a que estos cuentan con las características dinámicas capaces de producir daños a este tipo de construcciones históricas, ya que provocaron que varios de los templos de esos sitios, presentaran daños importantes.

Para poder estudiar la influencia de estos sismos, se consideraron dos registros para cada uno de ellos, es decir, un registro correspondiente a la estación del epicentro y otro registro correspondiente a una estación en un sitio diferente del epicentro. Las dos estaciones a las que se hace referencia son la de Oaxaca y la de Ciudad Serdán, Puebla.

En la Tabla 2 se resumen las características de cada registro utilizado. Como se puede observar, la mayor aceleración máxima del suelo se registró en Ciudad Serdán el 15 de julio de 1999; sin embargo, tiene la duración más corta de todos. Caso contrario con el registro del 30 de septiembre de 1999, en la misma estación de Ciudad Serdán tiene la duración más larga, pero la aceleración máxima más baja.

Tabla 2. Características generales de los registros sísmicos utilizados

Registro	Sitio de registro	Epicentro	Fecha	Duración [s]	Magnitud	Aceleración máxima del terreno [g]	Tipo de sismo	Acelerograma
1	Oaxaca	Puebla	15-06-99	70.0	6.5	38	Intraplaca	
2	Oaxaca	Oaxaca	30-09-99	50.0	7.5	186	Subducción	
3	Ciudad Serdán, Puebla	Puebla	15-06-99	47.5	6.5	195	Intraplaca	
4	Ciudad Serdán, Puebla	Oaxaca	30-09-99	96.4	7.5	34	Subducción	

En la figura 39 se muestran los espectros de respuesta correspondientes a cada registro. Cada uno de los espectros de respuesta fue obtenido a través de un programa computacional desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM: Degtra A4. Cabe hacer notar, que los espectros de respuesta fueron cortados cuando el periodo es igual a 1 s, esto debido a que, dentro del rango 0 a 1 s que se tiene la mayor respuesta sísmica.

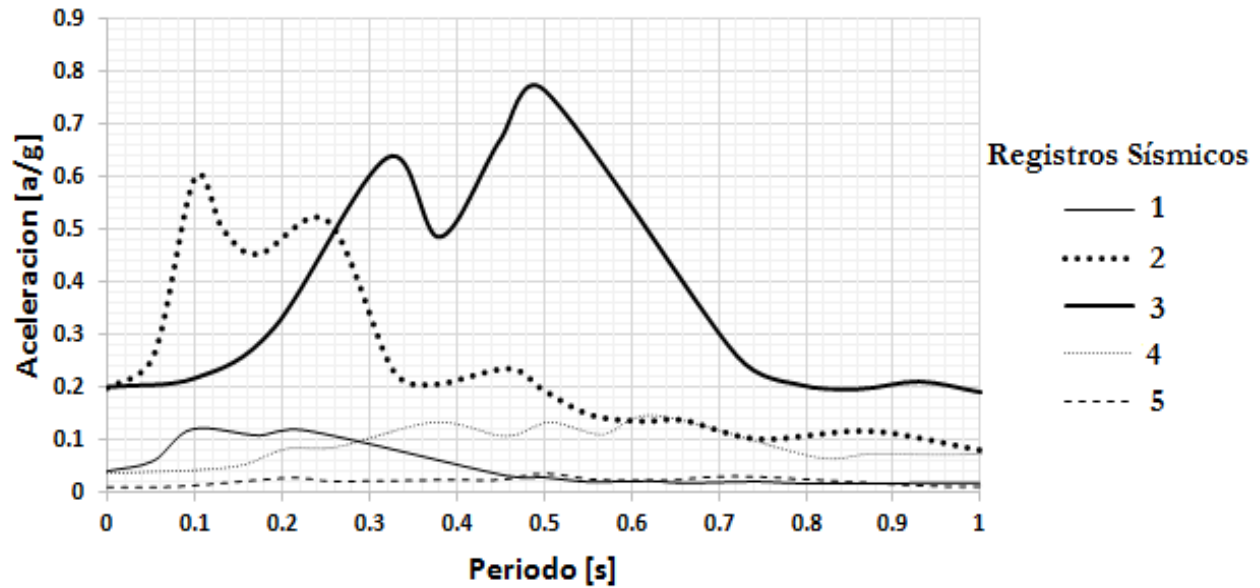


Figura 39. Espectros de respuesta de aceleraciones de los registros seleccionados

3.3. Modelos de análisis

En total se realizaron cinco modelos, de los cuales, el primer modelo de análisis que se elaboró, corresponde a la fachada de la parroquia de San Bartolomé Apóstol, teniendo como antecedente el trabajo de Robles (2012). En el cual, por medio de la calibración de un modelo de elementos finitos fue posible conocer las propiedades mecánicas de los materiales de este templo (Tabla 3) y evaluar adecuadamente su comportamiento global. Es por ello que se tomó como referencia para poder validar los resultados del modelo de elementos rígidos.

Este primer modelo correspondiente a Bartolomé, fue analizado con los tres tipos diferentes de materiales que se observan en la tabla 3, y que conforman las propiedades mecánicas, que proporcionan el estado actual de la estructura, y que aclaro solo se utilizó para validar que los modelos que se elaborarán en este trabajo son una buena idealización de la realidad.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los materiales (Robles, 2012)

Parámetro	Mampostería irregular	Mampostería irregular (campanario)	Concreto del imafronte
Densidad[kg/m ³]	163.10	203.87	244.65
Módulo de elasticidad [MPa]	360.68	303.07	20727.28
Poisson	0.1	0.1	0.2
Resistencia a compresión [MPa]	1.5	1.5	19.61
Resistencia a tensión [MPa]	0.07	0.07	0.98
Resistencia a cortante[MPa]	0.05	0.05	2.94
Ángulo de fricción interna [°]	25	25	35
Módulo de cortante[MPa]	163.94	137.76	94211.49

Una vez hecho el modelo para la validación de resultados, se prosiguió con el objetivo de este trabajo, elaborando los cuatro modelos de elementos rígidos, para ser evaluados con un solo tipo de material, que corresponde a una mampostería de tipo irregular (Tabla 3.1), con el fin de tener una generalidad en los modelos y así poder tener un punto de comparación.

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas de los materiales (Robles, 2012)

Parámetro	Mampostería irregular
Densidad[kg/m ³]	163.10
Módulo de elasticidad [MPa]	360.68
Poisson	0.1
Resistencia a compresión [MPa]	1.5
Resistencia a tensión [MPa]	0.07
Resistencia a cortante[MPa]	0.05
Ángulo de fricción interna [°]	25
Módulo de cortante[MPa]	163.94

Para poder formar los elementos de cada modelo, RIGID acepta elementos formados con tres y hasta diez nodos (Fig. 40), aunque se recomienda que se utilicen mallas solo con elementos rectangulares (cuatro nodos). Los elementos triangulares o de más de cuatro nodos sólo se deberían utilizar para obtener geometrías complejas, donde la malla quedaría muy distorsionada si se usaran únicamente elementos de cuatro lados.

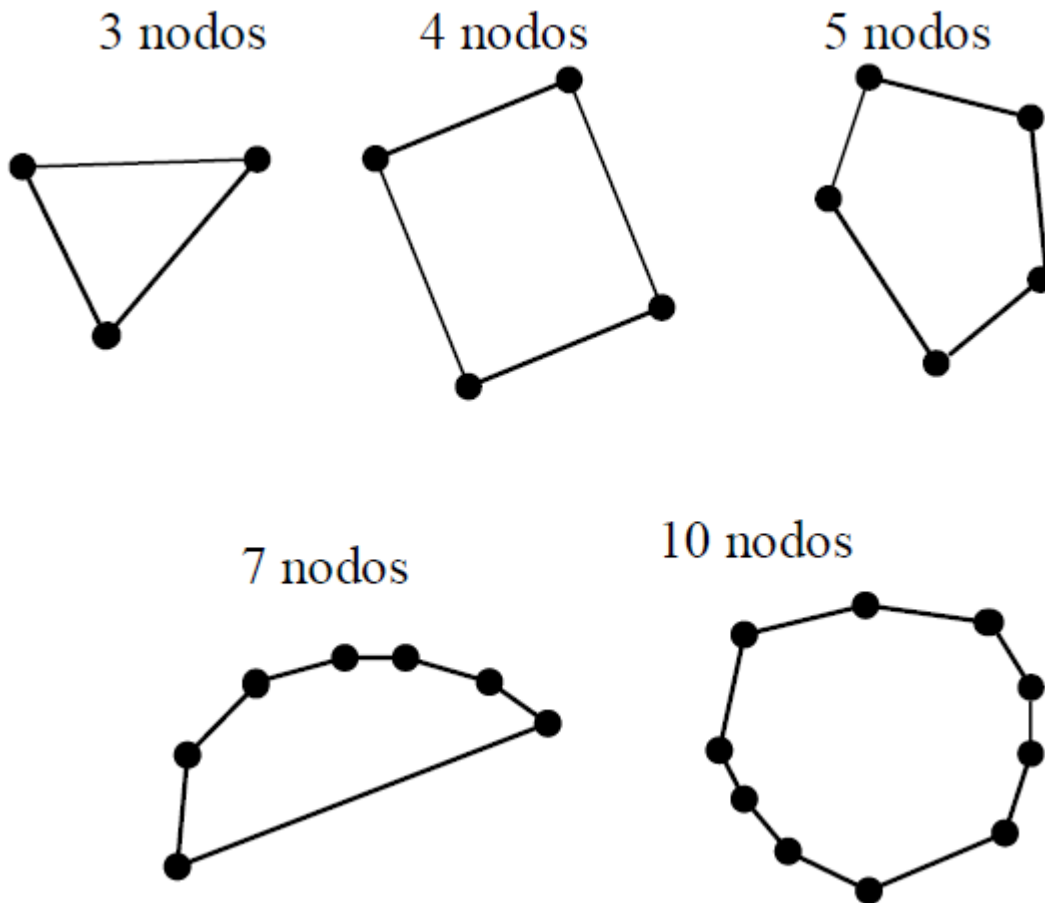
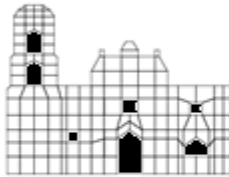
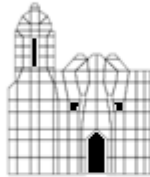
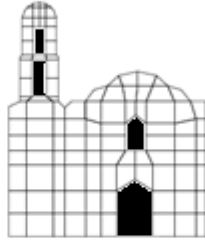
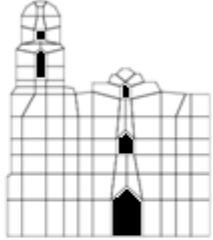






Fig. 40. Geometría de los elementos (Peña y Casolo, 2010)

Con referencia a lo anterior, se decidió formar elementos con cuatro y cinco nodos en la mayoría del cuerpo de las fachadas, mientras que para la parte que delimita el cupulín, se formaron elementos con más de cinco nodos, para obtener lo más cercano a la geometría original de esta parte que tiende a ser una curva.

Los modelos de elementos rígidos realizados, consideran los espesores correspondientes a cada parte de la fachada, por ejemplo, la torre de campanario y el muro principal, tienen valores diferentes con a la planta de la fachada, por lo tanto, se puede decir, que cada elemento y su respectivo espesor en planta, representan un volumen.

En la Tabla 4, se pueden observar los cuatro modelos con sus respectivas características: planta esquemática, número de nodos y número de elementos que lo forman. Respecto a la discretización de los elementos, se debe recordar que este es un método sencillo, eficaz y particularmente rápido para el estudio dinámico no lineal, dado que son necesarios pocos elementos, aún para geometrías complejas (Peña y Casolo, 2010)

Tabla 4. Modelos de elementos rígidos (Escala relativa)			
Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela
			
			
Nodos 207	Nodos 189	Nodos 150	Nodos 143
Elementos 148	Elementos 145	Elementos 108	Elementos 97
Grados de libertad:444	Grados de libertad:435	Grados de libertad:324	Grados de libertad:291

CAPÍTULO 4. Resultados

4.1. Validación de resultados

Todo modelo analítico se basa en la idealización de la realidad, por lo tanto, es necesario que sea lo más apropiado posible. Es por eso que, el modelo debe ser validado con el fin de que la idealización sea correcta. En forma general, los análisis de peso propio y cálculo de frecuencias y modos de vibrar se pueden utilizar como una forma sencilla de calibración y validación preliminar de los modelos numéricos.

El peso propio de una estructura se puede calcular de forma sencilla el cual se compara con el obtenido con el modelo numérico. Por otro lado, el cálculo de las frecuencias y modos de vibrar permite conocer que la relación entre masas y rigideces es la adecuada. Con este análisis también, es posible detectar algunos errores en el mallado. Generalmente una propuesta que ha dado buenos resultados es la de usar modelos simplificados en combinación con modelos refinados (Peña *et al.*, 2007).

Una forma de obtener las propiedades mecánicas de los materiales puede ser mediante la calibración de las frecuencias y modos de vibrar del modelo analítico con respecto a pruebas de vibración ambiental, y es por esta razón que la validación de los resultados de los modelos elaborados en este trabajo, se realizará en función de los resultados obtenidos de un modelo de elementos finitos tridimensional. Este último fue calibrado por medio de pruebas de vibración ambiental. Los detalles del modelo, la calibración y las pruebas de vibración ambiental se pueden consultar en el trabajo de Robles (2012).

4.2 Peso Propio y Factor de Seguridad

El primer análisis realizado en los cuatro modelos de elementos rígidos, fue el que corresponde al peso propio. En primera instancia se hizo la bajada de cargas para obtener los pesos de las fachadas y después poder compararlos con los pesos que resultaron del análisis de los modelos. Esta información se encuentra en la Tabla 5, donde podemos notar que los modelos del Estado de Morelos son prácticamente el triple de pesadas que las del municipio de Naucalpan. El porcentaje de diferencia entre los pesos se encuentra aceptable, debido a que RIGID se basa en un método simplificado y no considera la geometría exacta de zonas como el cupulín al tener que utilizar líneas rectas, por ello la variación de los pesos, aunque la diferencia realmente es despreciable.

Tabla 5. Peso propio

Modelo	Pesos		
	Bajada de cargas [Ton]	RIGID [Ton]	Diferencia %
Bartolomé	379.33	379.79	0.12
Nativitas	242.09	243.74	0.68
Ocuituco	920.60	922.11	0.16
Tetela	1017.29	1018.29	0.10



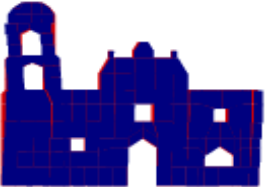

Para calcular el esfuerzo promedio en la cimentación de las fachadas, se obtuvo el área de la bases de cada una de ellas y utilizando el peso propio respectivo, obtenido de los modelos de análisis se generó la Tabla 6, donde de acuerdo con el resultado de la relación de peso entre área, estos esfuerzos no superan la resistencia a compresión de la mampostería que es de 15.3 kg/cm^2 en ninguno de los casos, por lo tanto se considera que los factores de seguridad que resultaron por peso propio para los dos primeros modelos están del orden de 9 a 11, mientras que para los otros dos modelos el factor de seguridad es menor en un rango de 5 a 6, esto puede ser que se debido a la esbeltez de estos últimos modelos.

Tabla 6. Factor de seguridad

Modelo	Peso W [Ton]	Peso W [kg]	Área de la base A [cm^2]	Esfuerzo promedio a compresión $\bar{\sigma}_{cimentación} = \frac{W}{A}$ [kg/cm^2]	Factor de seguridad
					$F.S. = \frac{f' c_{mampostería}}{\bar{\sigma}_{cimentación}}$ $f' c_{mampostería} = 1.5 \text{ MPa}$ $= 15.3 \text{ kg/cm}^2$
Bartolomé	379.79	379790	269000	1.41	10.85
Nativitas	243.74	243740	144500	1.69	9.05
Ocuituco	922.11	922110	371500	2.48	6.17
Tetela	1018.29	1018290	398200	2.56	5.98

En la Tabla 7, se presentan las formas modales así como las frecuencias de cada modelo. Como se observa, estas características son similares en los dos modelos numéricos. El modelo de los elementos rígidos presenta un porcentaje de error de 18.8%. Si bien es relativamente alto este error, se puede considerar aceptable; debido a que el método de los elementos finitos es un método más refinado en comparación con el método de los elementos rígidos, el cual se trata de un método simplificado, haciendo un análisis dentro del plano (2D), mientras que el de método refinado es en el espacio (3D) y por tanto la geometría y ciertas características de la estructura se simplifican.

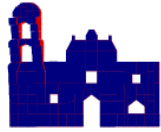
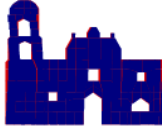








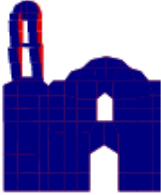

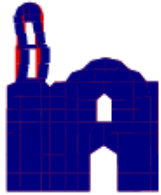







Tabla 7. Validación de resultados por medio de frecuencias y modos de vibrar

Método de Elementos Rígidos			Forma modal	Método de Elementos Finitos			Error %
Diagrama	Modo	Frecuencia		Modo	Frecuencia	Diagrama	
	1	2.6977	Movimiento a flexión del campanario	2	3.3218		18.8
	2	6.5794	Movimiento lateral del campanario	4	6.0757		-8.3

4.3. Modos de vibrar

En cuanto a los modos de vibrar, la Tabla 8 muestra el valor de los periodos (T) y las forma modales de los primeros cinco modos de vibrar de cada modelo. Cabe mencionar que se necesitaron al menos 180 modos de vibrar para obtener el 90% de la masa total. Como se observa, los modelos más flexibles son Ocuituco y Tetela. Las formas modales de los dos primeros modos en todos los modelos tienen la misma forma, correspondiente a un movimiento de flexión de la torre de campanario. El primer modo vertical para Nativitas y Tetela se presenta en el modo 3, y para Bartolomé, y Ocuituco en el modo 4. Se puede observar que para el modo 3 y 4, los periodos de vibrar son muy cercanos para los modelos Bartolomé, Ocuituco y Tetela, sin embargo las formales modelos son diferentes, ya que mientras unas corresponden a un movimiento lateral del campanario debido a flexión, el otro corresponde al primer modo vertical.

Tabla 8. Modos de vibrar de los modelos

Iglesia	Forma modal				
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
Bartolomé					
	Primer modo horizontal. Movimiento de flexión del campanario	Modo horizontal de la fachada	Modo horizontal del campanario a desfase con el resto de la fachada	Primer modo vertical	Movimiento Vertical del campanario y horizontal del resto de la fachada
	$T=0.2692$ s	$T=0.1379$ s	$T=0.0983$ s	$T=0.0842$ s	$T=0.0763$ s
Nativitas					
	Primer modo horizontal. Movimiento de flexión del campanario	Modo horizontal del campanario a desfase con el resto de la fachada	Primer modo vertical	Movimiento vertical del extremo opuesto del campanario	Modo horizontal del campanario a desfase con el resto de la fachada
	$T=0.2381$ s	$T=0.1281$ s	$T=0.0911$ s	$T=0.0721$ s	$T=0.0558$ s
Ocuiluco					
	Primer modo horizontal. Movimiento de flexión del campanario	Modo horizontal del campanario a desfase con el resto de la fachada	Movimiento a flexión del campanario	Primer modo vertical	Segundo modo vertical
	$T=0.5660$ s	$T=0.2646$ s	$T=0.1338$ s	$T=0.1235$ s	$T=0.1157$ s
Tetela					
	Primer modo horizontal. Movimiento de flexión del campanario	Modo horizontal del campanario a desfase con el resto de la fachada	Primer modo vertical	Movimiento de la torre y el resto del cuerpo de la fachada a desfase	Movimiento de la torre y el resto del cuerpo de la fachada a desfase
	$T=0.3542$ s	$T=0.1880$ s	$T=0.1298$ s	$T=0.1130$ s	$T=0.1069$ s

4.4. Análisis dinámico no lineal

A partir de los resultados del análisis dinámico no lineal se procedió a determinar las condiciones más desfavorables que se presentaron en los modelos. Para ello fue necesario evaluar parámetros como desplazamientos, esfuerzos, daños, deformada dinámica y cortante basal. Se consideró un criterio de falla tipo Mohr Coulomb como modelo de daño. Por lo tanto, fue importante conocer la historia de desplazamientos generados a lo largo del tiempo en puntos estratégicos de cada uno de los modelos, como son: el cuerpo de la torre, la esquina de la fachada, el imafronte y el cupulín. Estos se muestran en la figura 41.

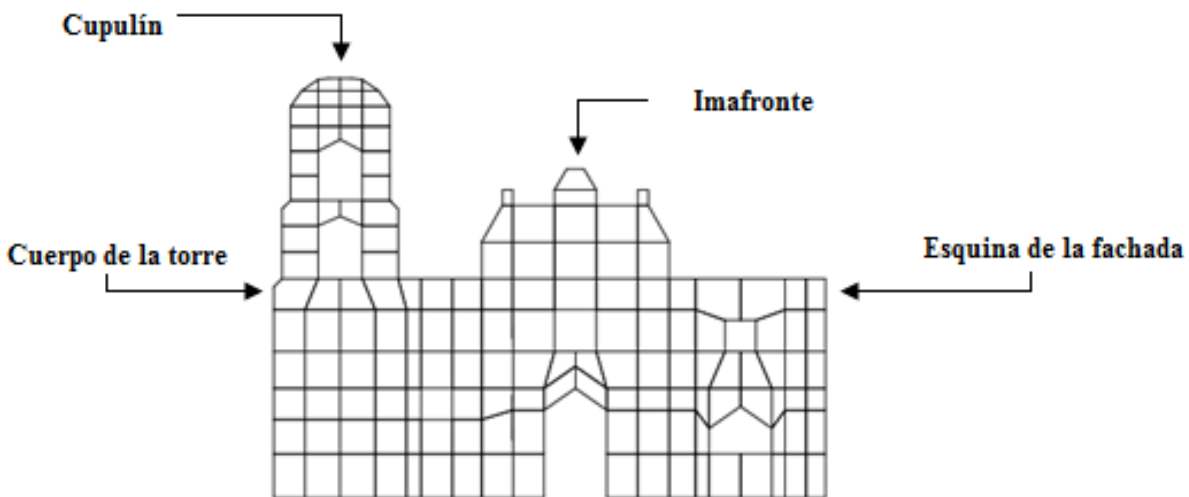


Fig. 41. Puntos en los que se determinaran los desplazamientos

4.4.1. Desplazamientos

En las Tablas 9, 10, 11 y 13 se presentan la historia de los desplazamientos generados en los modelos para los diferentes registros sísmicos, así como el valor del desplazamiento máximo y el tiempo en que este se registra. De acuerdo con estos los resultados, la zona que más se desplaza es el Cupulín, en comparación con las otras zonas, en especial en los modelos Ocuituco y Tetela. Así como también, se observa que los registros sísmicos que provocan los desplazamientos más grandes son 2 y 3, correspondientes a los registros sísmicos de las estaciones ubicadas en los epicentros, es decir, donde se originó el sismo.

Tabla 9. Desplazamientos máximos [mm] generados por el registro 1

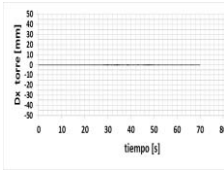
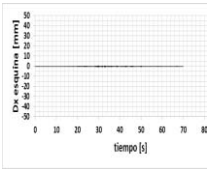
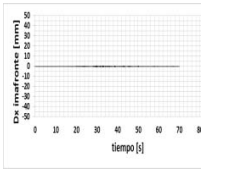
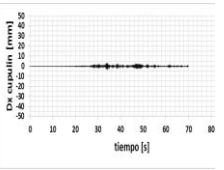
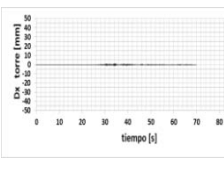
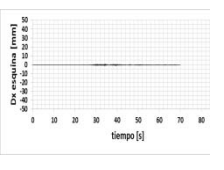
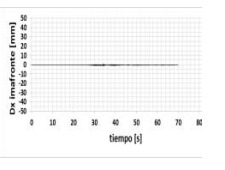
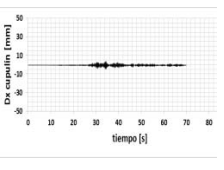
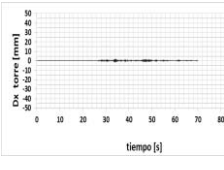
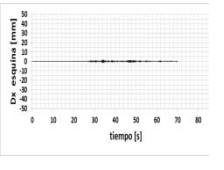
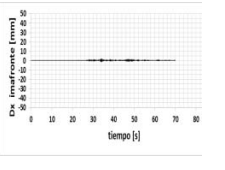
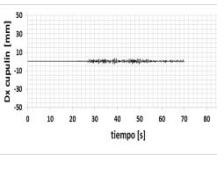
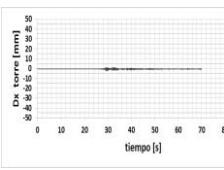
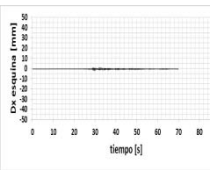
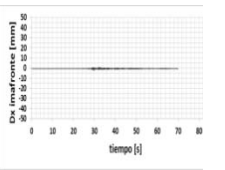
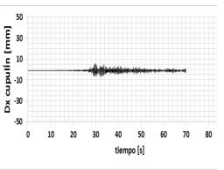
Modelo	Cuerpo de la Torre	Esquina cuerpo de la fachada	Imafronte	Cupulín	Tiempo [s]	
Bartolomé	0.61	0.86	0.88	4.04	34.24	
						
	1.35	1.13	1.38	5.13		
						
	2.08	1.98	2.19	3.56		
Ocuituco					38.99	
	2.61	2.30	2.33	7.04		
	Tetela					
		2.61	2.30	2.33		7.04
		2.61	2.30	2.33		7.04

Tabla 10. Desplazamientos máximos [mm] generados por el registro 2

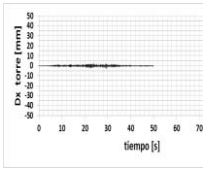
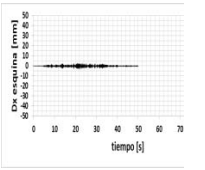
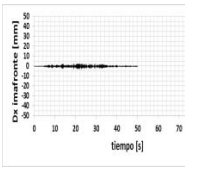
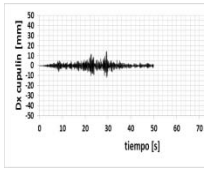
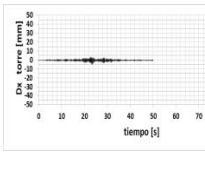
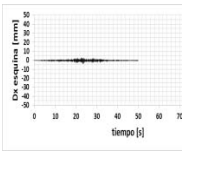
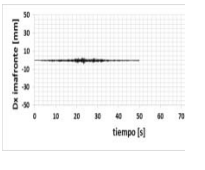
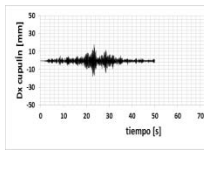
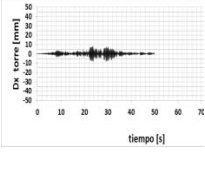
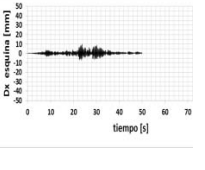
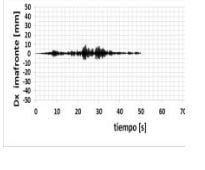
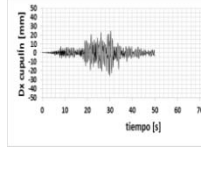
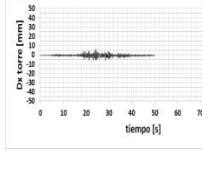
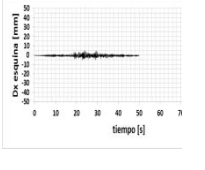
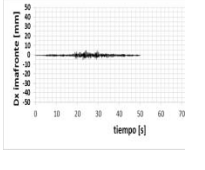
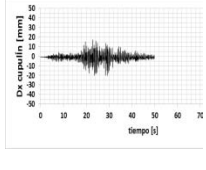
Modelo	Cuerpo de la Torre	Esquina cuerpo de la fachada	Imafronte	Cupulín	Tiempo [s]
Bartolomé	3.27	3.35	3.38	14.61	24.05
					
Nativitas	5.23	3.90	4.05	18.00	22.79
					
Ocuituco	8.18	10.13	10.18	25.49	30.01
					
Tetela	6.48	5.36	5.35	20.24	29.35
					

Tabla 11. Desplazamientos máximos [mm] generados por el registro 3

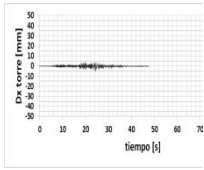
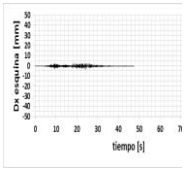
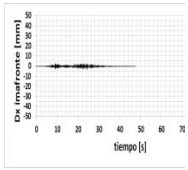
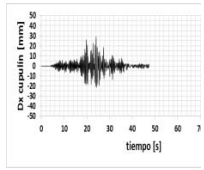
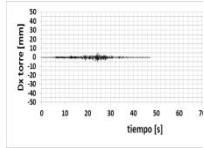
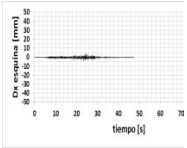
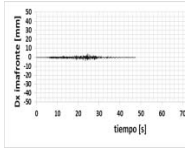
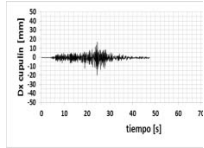
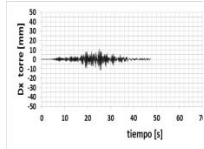
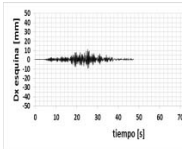
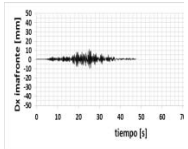
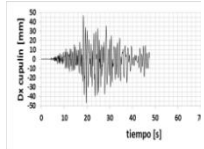
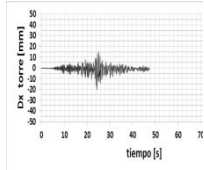
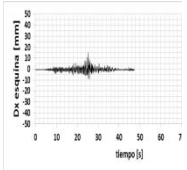
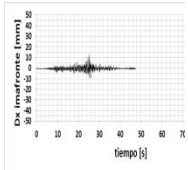
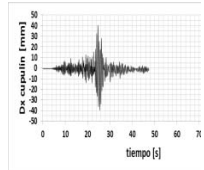
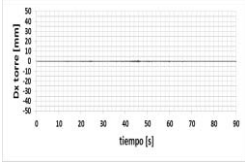
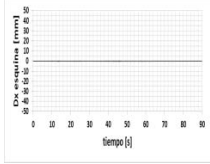
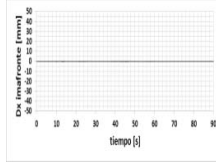
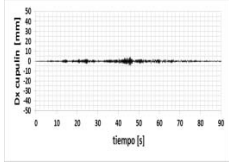
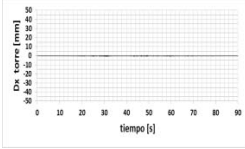
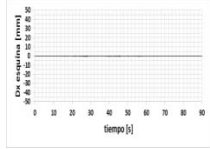
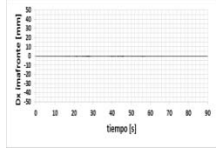
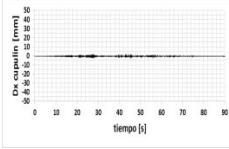
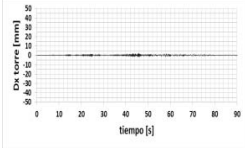
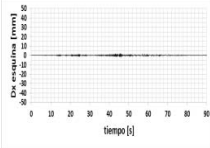
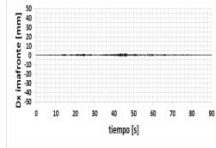
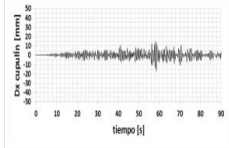
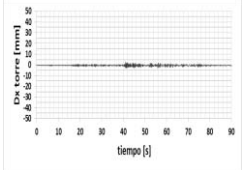
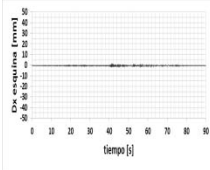
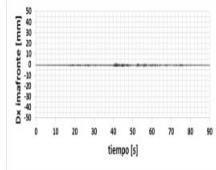
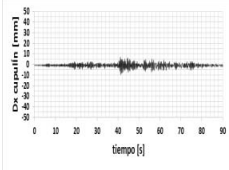
Modelo	Cuerpo de la Torre	Esquina cuerpo de la fachada	Imafronte	Cupulín	Tiempo [s]
Bartolomé	3.68	3.39	3.40	27.12	24.13
					
Nativitas	5.27	3.97	4.12	20.10	24.42
					
Ocuituco	11.49	11.35	11.20	47.01	19.75
					
Tetela	20.39	14.71	12.36	40.46	24.7
					

Tabla 12. Desplazamientos máximos [mm] generados por el registro 4

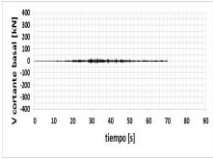
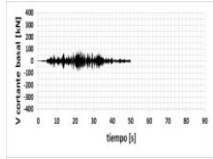
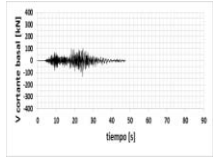
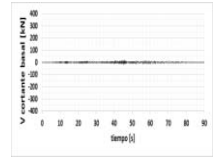
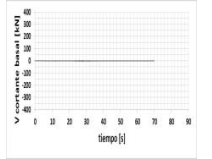
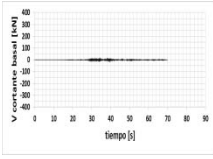
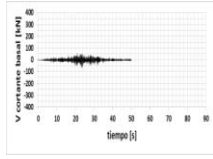
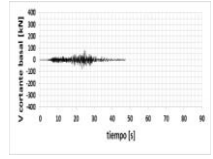
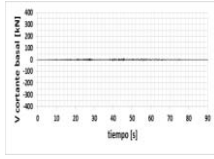
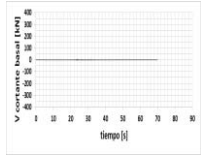
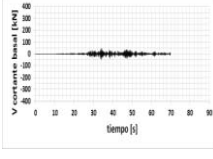
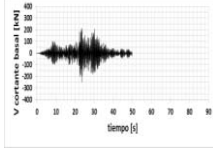
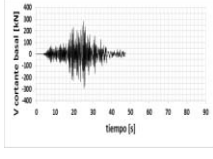
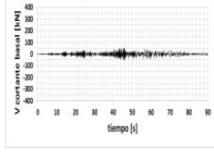
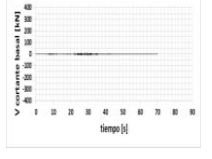
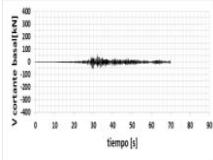
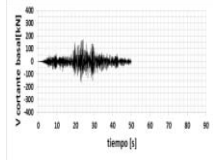
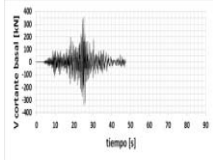
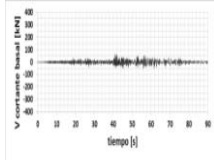
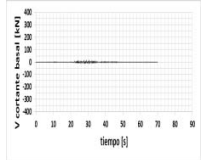
Modelo	Cuerpo de la Torre	Esquina cuerpo de la fachada	Imafronte	Cupulín	Tiempo [s]
Bartolomé	0.68	0.69	0.69	3.89	34.2
					
	1.07	0.97	1.06	3.08	
					
	2.35	2.09	2.35	17.21	
					
Tetela	3.22	2.07	2.09	9.57	41.22
					

4.4.2. Cortante basal

Los resultados obtenidos del cortante basal se muestran en la Tabla 13. En ella se presentan los valores máximos y el tiempo en el que suceden. Así como también se presenta la variación de este parámetro con respecto al tiempo en que suceden. De manera general, en todos los modelos analizados con los registros 2 y 3, el cortante basal presenta los valores mayores comparados con los

generados por los otros registros. También se puede notar, que el modelo al que se le demanda mayores cortantes basales es el de Tetela, y de manera particular, el registro 3 le provoca el cortante basal máximo.

Tabla 13. Cortante basal máximo [kN]

		Registro				
		1	2	3	4	5
		$V=22.75$ $t=29.83$ s	$V=88.70$ $t=22.80$ s	$V=127.72$ $t=24.37$ s	$V=18.74$ $t=45.25$ s	$V=4.82$ $t=29.12$ s
Bartolomé						
		$V=19.91$ $t=39.33$ s	$V=65.91$ $t=23.55$ s	$V=83.81$ $t=24.56$ s	$V=13.87$ $t=55.94$ s	$V=3.68$ $t=23.82$ s
Nativitas						
		$V=46.81$ $t=34.35$ s	$V=249.22$ $t=23.61$ s	$V=295.22$ $t=25.34$ s	$V=54.95$ $t=46.11$ s	$V=14.61$ $t=29.12$ s
Ocuiluco						
		$V=57.59$ $t=32.16$ s	$V=173.42$ $t=24.18$ s	$V=353.39$ $t=25.18$ s	$V=63.70$ $t=41.02$ s	$V=16.92$ $t=29.16$ s
Tetela						

En el tiempo en que se presentan los valores máximos de cortante basal, también se obtuvieron los diagramas de esfuerzos por carga vertical, los mapas de daño y la deformada correspondiente a cada registro. En estos resultados obtenidos no se observa daño por compresión ni por cortante en ninguno de los modelos.

En los análisis solo se presentó daño por tensión, siendo los sismos críticos, los registros 2 y 3. En las Tablas 14, 15, 16 y 17 se encuentran los mapas de las deformadas, de esfuerzos y de daño correspondientes a cada registro sísmico. De esta manera se puede observar esquemáticamente el comportamiento de los modelos.

Tabla 14. Mapas de los Parámetros máximos del análisis con el registro 1


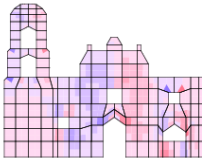
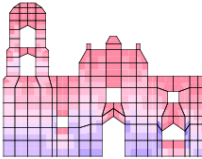
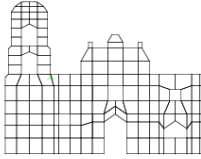
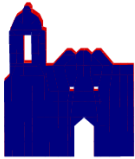
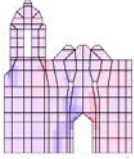
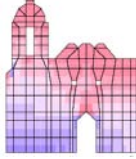
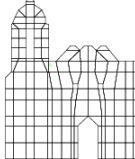
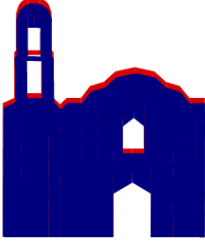
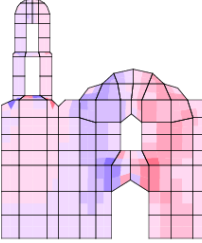
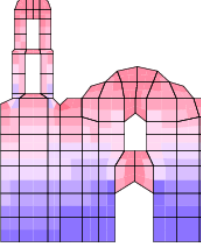
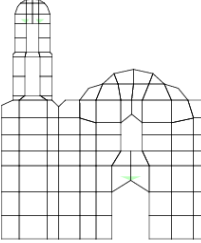
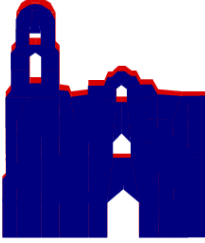
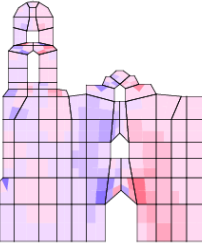
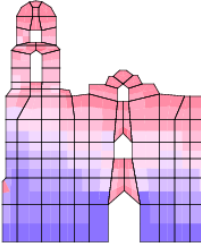
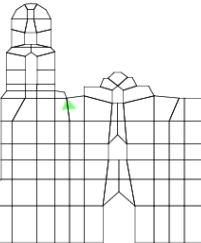
Modelo	Deformada	Esfuerzos cortantes	Esfuerzos axiales verticales	Daño a tensión
Bartolomé				
Nativitas				
Ocuituco				
Tetela				

Tabla 15. Mapas de los Parámetros máximos del análisis con el registro 2


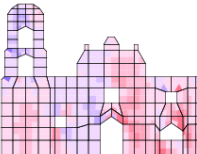
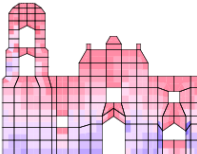
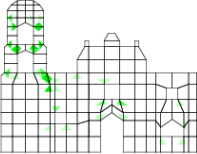

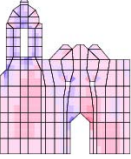
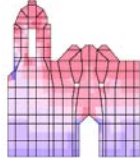
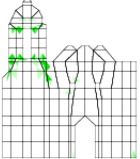
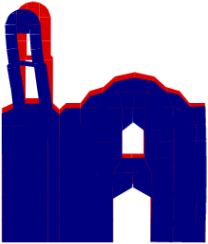
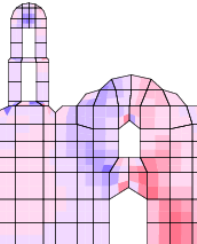
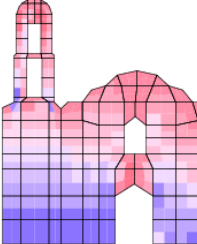
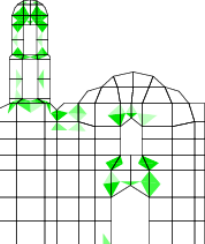
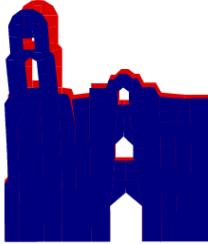
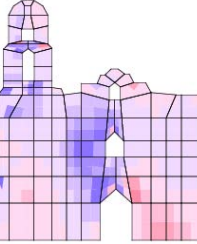
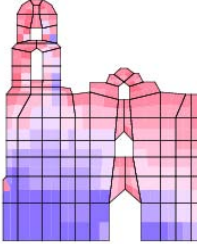
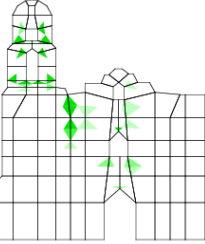
Modelo	Deformada	Esfuerzos cortantes	Esfuerzos axiales verticales	Daño a tensión
Bartolomé				
Nativitas				
Ocuituco				
Tetela				

Tabla 16. Mapas de los Parámetros máximos del análisis con el registro 3


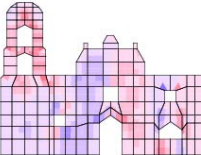
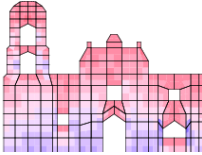
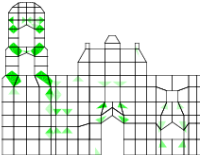
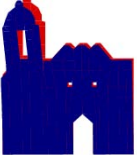
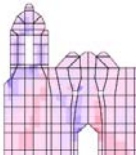
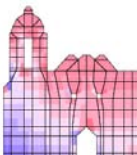
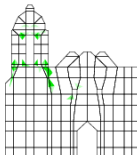
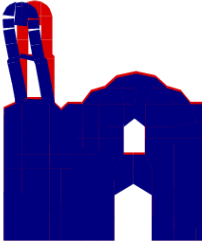
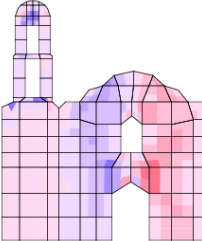
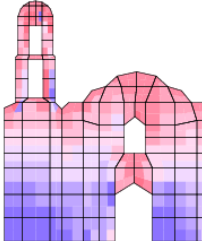
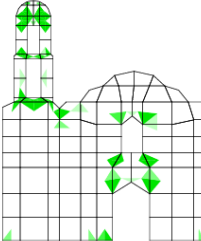

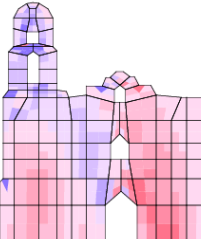
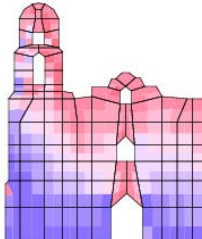
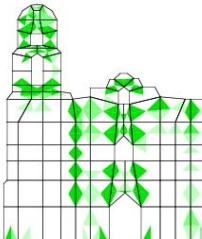

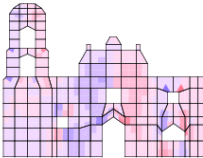
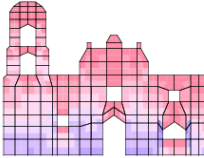
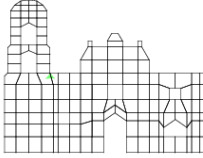
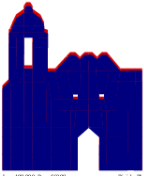
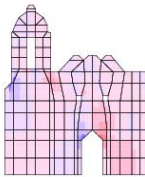
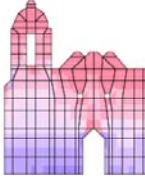
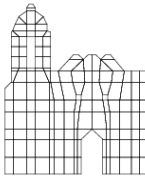
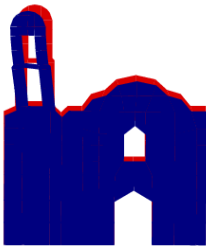
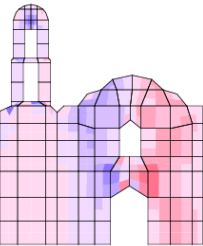
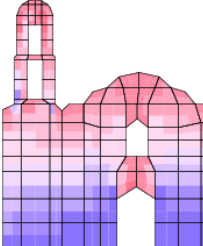
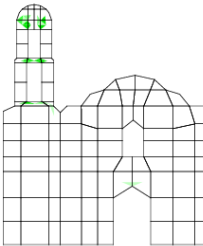
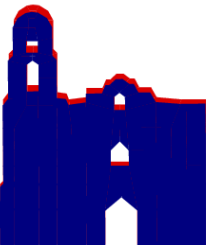
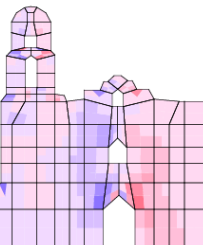
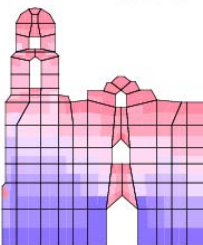
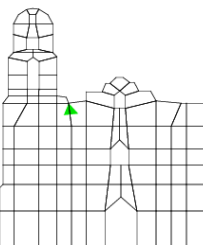
Modelo	Deformada	Esfuerzos cortantes	Esfuerzos axiales verticales	Daño a tensión
Bartolomé				
Nativitas				
Ocuituco				
Tetela				

Tabla 17. Mapas de los Parámetros máximos del análisis con el registro 4

Modelo	Deformada	Esfuerzos cortantes	Esfuerzos axiales verticales	Daño a tensión
Bartolomé				
Nativitas				 Sin daño
Ocuituco				
Tetela				

Se puede observar que la mayor concentración de esfuerzos axiales verticales para todos los modelos se presenta en las esquinas de las ventanas y las puertas, así como también en la unión entre el cuerpo de la torre y el cuerpo de la fachada. Esto debido a que el área de muros en esas zonas se

reduce sustancialmente por las aberturas antes mencionadas y en lo que respecta al cuerpo de la torre y el cuerpo de la fachada, se le atribuye al a esa misma variación de área.

Además el daño que se presenta en el campanario se debe a un movimiento de flexión. Por tanto, se puede deduce que la torre tiende a separarse del cuerpo de la fachada debido a un agrietamiento vertical en el cuerpo de la torre y que debido a este comportamiento, la parte crítica de la fachada es el campanario.

En las zonas mencionadas los daños son ocasionados por la concentración de esfuerzos, tal y como se observa en los mapas de daño. Además que se incrementa conforme aumenta la intensidad de las amplitudes de los registros sísmicos en sus espectros de respuesta. También, se observa que los modelos de las fachadas que son más vulnerables ante los registros sísmicos de análisis, son las correspondientes al Estado de Morelos: Ocuituco y Tetela, a diferencia de los modelos de las fachadas que corresponden al municipio de Naucalpan. Respecto al daño a tensión, los sismos críticos para los modelos son los registros 2 y 3, debido a que fueron registrados en la zona del epicentro, por tanto su respuesta sísmica es mayor.

4.4.3. Modos de vibrar al final del análisis

Una forma sencilla de dimensionar el daño en una estructura, es la de obtener los modos de vibrar al final del análisis. Es decir, cuando la estructura ya está dañada. Al dañarse el modelo numérico, la matriz de rigideces cambia, esto hace que los modos de vibrar también cambien. En la Tablas 18, 19, 20, 21 y 22 se presentan los primeros cinco modos de vibrar resultantes al final de los análisis, correspondientes a los registros sísmicos críticos 2 y 3, que son los registros que mayor daño causaron a los modelos de las fachadas. Para entender el comportamiento de la fachada ante esos registros se hizo una comparación con los resultados de los modos de vibrar iniciales de los modelos y de esa manera obtener el porcentaje de alargamiento (A) y poder visualizar mejor que tipologías resultaron con mayor daño.

Tabla 18. Modo 1 de vibrar inicial y final de los modelos analizados con 2 y 3




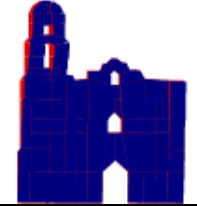

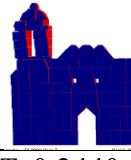
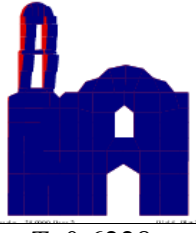
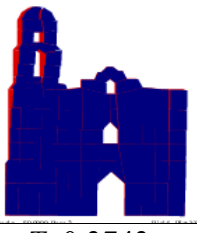

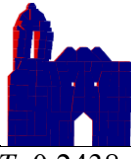
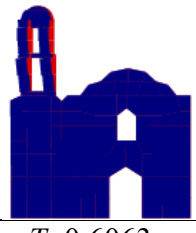

Modo	Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela
1	Inicial			
				
	$T=0.2692$ s	$T=0.2381$ s	$T=0.5660$ s	$T=0.3542$ s
2	Final Registro 2			
				
	$T=0.2991$ s $A=11.10\%$	$T=0.2440$ s $A=2.50\%$	$T=0.6228$ s $A=10.05\%$	$T=0.3743$ s $A=5.68\%$
3	Final Registro 3			
				
	$T=0.3071$ s $A=14.06\%$	$T=0.2438$ s $A=2.40\%$	$T=0.6063$ s $A=7.13\%$	$T=0.4373$ s $A=23.45\%$

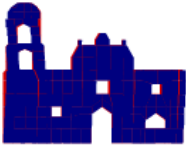


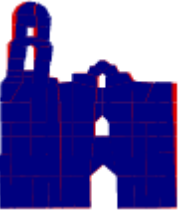
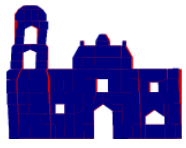

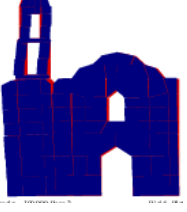
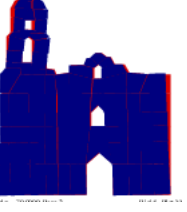

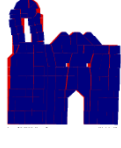
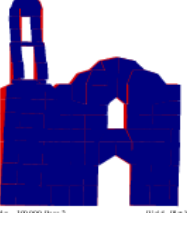
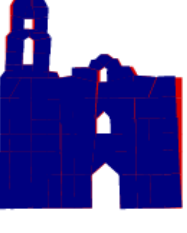
Tabla 19. Modo 2 de vibrar inicial y final de los modelos analizados con 2 y 3					
Modo	Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela	
2	Inicial				
		$T=0.1379$ s	$T=0.1281$ s	$T=0.2646$ s	$T=0.1880$ s
	Final Registro 2				
	$T=0.1422$ s $A=3.18\%$	$T=0.1310$ s $A=2.32\%$	$T=0.2780$ s $A=5.06\%$	$T=0.1946$ s $A=3.49\%$	
	Final Registro 3				
	$T=0.1455$ s $A=5.52\%$	$T=0.1307$ s $A=2.09\%$	$T=0.2773$ s $A=4.79\%$	$T=0.2122$ s $A=12.90\%$	

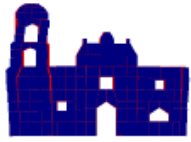




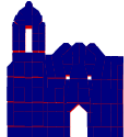
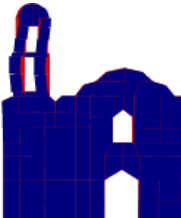




Tabla 20. Modo 3 de vibrar inicial y final de los modelos analizados con 2 y 3					
Modo	Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela	
3	Inicial				
		$T=0.0983$ s	$T=0.0911$ s	$T=0.1338$ s	$T=0.1298$ s
		Final Registro 2			
$T=0.1043$ s $A=6.04\%$	$T=0.0935$ s $A=2.68\%$		$T=0.1461$ s $A=9.40\%$	$T=0.1339$ s $A=3.09\%$	
Final Registro 3					
	$T=0.1023$ s $A=4.02\%$	$T=0.0934$ s $A=2.57\%$	$T=0.1428$ s $A=6.67\%$	$T=0.1582$ s $A=21.81\%$	

Tabla 21. Modo 4 de vibrar inicial y final de los modelos analizados con 2 y 3


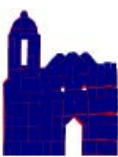




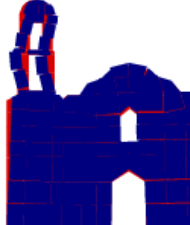
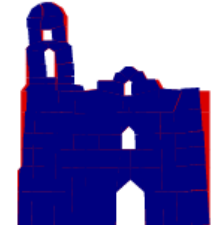


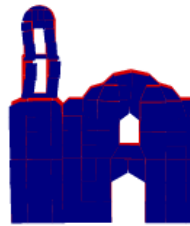



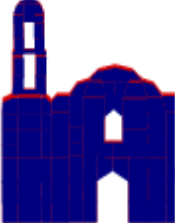


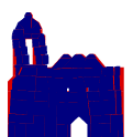
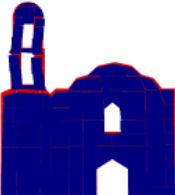



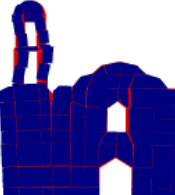

Modo	Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela
Inicial				
	$T=0.0842$ s	$T=0.0721$ s	$T=0.1235$ s	$T=0.1130$ s
4 Final Registro 2				
	$T=0.0862$ s $A=2.29\%$	$T=0.0736$ s $sA=2.08\%$	$T=0.1303$ s $sA=5.48\%$	$T=0.1189$ s $A=5.26\%$
Final Registro 3				
	$T=0.0865$ s $A=2.69\%$	$T=0.0737$ s $A=2.16\%$	$T=0.1283$ s $A=3.83\%$	$T=0.1352$ s $A=19.64\%$

Tabla 22. Modo 5 de vibrar inicial y final de los modelos analizados con 2 y 3

Modo	Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela
5	<p>Inicial</p>  <p>$T=0.0763$ s</p>	<p>Inicial</p>  <p>$T=0.0558$ s</p>	<p>Inicial</p>  <p>$T=0.1157$s</p>	<p>Inicial</p>  <p>$T=0.1069$ s</p>
	<p>Final Registro 2</p>  <p>$T=0.0778$ s $A=1.93\%$</p>	<p>Final Registro 2</p>  <p>$T=0.0564$ s $A=1.05\%$</p>	<p>Final Registro 2</p>  <p>$T=0.1269$ s $A=9.74\%$</p>	<p>Final Registro 2</p>  <p>$T=0.1099$ s $A=2.85\%$</p>
	<p>Final Registro 3</p>  <p>$T=0.0775$ s $A=1.61\%$</p>	<p>Final Registro 3</p>  <p>$T=0.0570$ s $A=2.12\%$</p>	<p>Final Registro 3</p>  <p>$T=0.1254$ s $A=8.38\%$</p>	<p>Final Registro 3</p>  <p>$T=0.1113$ s $A=4.15\%$</p>

Comparando los modos iniciales y los modos al final de análisis para el registro 2, tenemos presente un incremento en los periodos, que nos dice que el modelo de la fachada se volvió más flexible, es decir, perdió rigidez. Las formas modales siguen correspondiendo a movimientos de flexión en la torre del campanario en los tres primeros modos y los últimos dos modos corresponden a la vibración vertical.

El alargamiento expresado en las tablas anteriores, fue calculado como el incremento porcentual en los periodos de vibración final con respecto al los periodos iniciales. Por tanto, Bartolomé, Ocuituco y Tetela fueron los modelos con mayor alargamiento en sus periodos. Interpretando los resultados, se dice que, en esas tipologías se generó un daño mayor al perder rigidez. En cuanto al dimensionamiento de daño, se deduce que existe un daño moderado, con un máximo alargamiento de 23.45% que corresponde al primer modo del modelo Tetela analizado con el registro 3. Mientras que para el modelo de Nativitas los porcentajes de alargamiento son menores en un rango de 1.05 a 2.68% por lo tanto, este modelo es el que sufre un daño mínimo en todos los análisis, en comparación con los demás.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la interpretación de los resultados de los análisis dinámicos no lineales, se concluye que:

1. Las fachadas de las iglesias cercanas a las fallas locales, que se ubican en el municipio de Naucalpan, de acuerdo con su tipología, es decir, al ser más pequeñas, con torres de campanarios de 13 metros aproximadamente, presentan daños moderados aún para grandes aceleraciones del suelo.
2. Las fachadas de las iglesias del Estado de Morelos que se ubican lejos de las fallas locales y la zona de subducción, pero cerca de fallas normales, con aproximadamente el doble de altura que las de Naucalpan, presentan mayor vulnerabilidad por sus características geométricas ante un evento sísmico como sucedió con los registros críticos con los que fueron analizadas, llegando al grado de la separación del cuerpo de la torre con el cuerpo de la fachada, por lo que las fachadas de las iglesias de Morelos presentan daños considerables, aún para aceleraciones medianas.
3. El sismo que tuvo mayor capacidad destructiva fue de tipo intraplaca.
2. De manera general para las dos tipologías, los campanarios son los elementos que resultaron ser más vulnerables, al mostrar un comportamiento tipo apéndice.
3. Además, el mecanismo de daño es diferente en ambas tipologías. La principal diferencia es que para la tipología correspondiente a las iglesias del Estado de Morelos, el cuerpo de la torre tiende a separarse de la pared de la fachada, comportamiento observado de acuerdo a los mapas de daños. Mientras que para la primera tipología correspondiente a Naucalpan, tienden a permanecer unidos debido a que son muy robustas.
4. Resulta interesante que las iglesias construidas cerca de fallas locales son más bajas y más robustas que las iglesias construidas lejos de las zonas sismogénicas. Esto podría ser debido a las experiencias de los antiguos constructores sobre la actividad sísmica de las diferentes zonas.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por darme la oportunidad de pertenecer a una gran familia de la que he recibido incondicional apoyo y amor durante todos estos años.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Estudios Superiores Acatlán donde recibí la formación y conocimientos que me han hecho llegar a esta instancia.

Al Instituto de Ingeniería UNAM por el apoyo otorgado a través del programa de becas del Instituto de Ingeniería, durante el desarrollo de mi tesis como partícipe del proyecto de investigación *Caracterización dinámica de iglesias coloniales (1561)*.

Al Dr. Fernando Peña Mondragón por la confianza depositada en mi persona al aceptarme como parte de sus tutorados. Agradezco también el apoyo y la paciencia que me ha otorgado en el proceso de este trabajo. También agradezco las enseñanzas compartidas que en cada plática he tomado y que me han ayudado para mi crecimiento personal.

A la Dra. Natalia García Gómez por la visita a los templos del Estado de Morelos así como el apoyo con la información histórica brindada para la realización de este trabajo.

A la Ing. María Laura Robles Avilés por el apoyo para la realización de este trabajo.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU” J. VASCONCELOS – UNAM

REFERENCIAS

1. Astorga, C. y Rodríguez, J.L. (2009), “Historia de la Arquitectura en México: Época Virreinal”, UNAM, México.
2. Cama, J. (2006), “Tetela del Volcán. Un ejercicio de conservación”, Instituto Nacional de Antropología, México.
3. Cómez, R. (1989), “Arquitectura y feudalismo en México: los comienzos del arte novohispano en México”, Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, México.
4. García, N. (2007), “Funcionamiento y seguridad estructural de los templos conventuales del siglo XVI en México”, Tesis doctoral, Instituto de Ingeniería UNAM, México D.F.
5. González, M. (1966), “El espacio en la arquitectura religiosa virreinal de México”, Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM, México.
6. Gutiérrez, M. (2011), “Análisis arquitectónico e histórico de la Parroquia de Santa María Nativitas en Naucalpan, Estado de México”, Tesis de licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM, México.
7. Harfush, I. P. (1995), “La predicación dominica en el siglo XVI. El caso de sus monasterios en el actual Estado de Morelos”, Tesis de licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Historia UNAM, México.
8. Ibarra, J.A. (2012), “Influencia de la resistencia a tensión de la mampostería en la estabilidad de bóvedas y arcos”, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, México.
9. Kubler, G. (1983), “Arquitectura Mexicana del siglo XVI”, Fondo de Cultura Económica, México.
10. López, R. y Córdoba, L. (2011), “Parroquia de San Bartolomé Apóstol el Corazón de Naucalpan” arquidiócesis de Tlalnepantla; Estado de México.
11. Lourenço P.B., (1996), “Computational strategies for masonry structures”, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Delft, Editorial de la Universidad de Delft, Delft, Holanda.
12. Meli, R. (1998), “Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos”, Fundación ICA, México D.F.

13. Meli, R. (2011), “Conventos mexicanos del siglo XVI. Construcción, Ingeniería Estructural y Conservación”, Ed. Porrúa, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
14. Peña, F, Casolo, S y Lourenço P.B. (2007), “Seismic analysis of masonry monuments by an integrated approach that combines the finite element models with a specific mechanistic model”, IX International Conference on Computational Plasticity, COMPLAS IX, Barcelona, Artículo 235.
15. Peña, F. (2010), “Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas”, Revista de Ingeniería Sísmica No. 83 43-63
16. Peña, F. y Casolo, S. (2010), “Programa de Elementos Rígidos para el Análisis Dinámico No Lineal de Estructuras de Mampostería”, Manual de usuario, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
17. Peña, F. y Meza, J.M. (2013), “Comportamiento sísmico de torres de campanario de iglesias coloniales”, Revista de Ingeniería Sísmica.
18. Robles, L. (2012), “Análisis Estructural de la Parroquia de San Bartolomé Apóstol”, Tesis de licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM, México.
19. Rubial, A. (1981), “Santiago de Ocuituco. La organización económica de un convento rural agustino a mediados del siglo XVI en Estudios de Historia Novohispana, México”, Instituto de Investigaciones Históricas, UNAM, México.

<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM17morelos/municipios/17016a.html>

<http://www.arteguias.com/iglesia/sanmartinfromista.htm>