



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización Dinámica De
Naves De Templos Coloniales
Mexicanos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero civil

P R E S E N T A:

Alonso Danilo Durán Ortega

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Fernando Peña Mondragón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Agradecimientos

Esta tesis es el fruto del esfuerzo y dedicación propio, pero también el de otras personas, sin ellas alcanzar esta meta no hubiera sido posible. Quiero agradecer especialmente:

A mis **padres y hermanos**, su amor, orientación y apoyo ha sido y seguirá siendo fundamental para mí.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, la que amo desde que entré a la secundaria, en Iniciación Universitaria. Siempre estaré agradecido y en deuda con una institución que tanto me ha dado.

Al **Instituto de Ingeniería**, por las facilidades para realizar mi servicio social y por el apoyo económico que me otorgó para la elaboración de esta tesis.

A mi asesor, el **Dr. Fernando Peña Mondragón**, por su confianza, paciencia y cada uno de los consejos y lecciones que no solamente me han servido en mi formación como ingeniero, sino también en mi vida.

A mis **profesores de la Facultad de Ingeniería**, su continuo esfuerzo y dedicación me permitió llegar hasta aquí.

A mis **amigos**, que en muchas ocasiones me aconsejaron y me acompañaron para superar varios desafíos.

A **Gabriela Contreras** por todo su apoyo, cariño y sobre todo por estar siempre de mi lado.

Mis **compañeros de la Facultad de Ingeniería y del Instituto de Ingeniería**, por sus comentarios y porque en más de alguna ocasión me ayudaron a resolver algún problema o alguna duda.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/097/16

Señor
ALONSO DANILO DURÁN ORTEGA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. FERNANDO PEÑA MONDRAGÓN, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE NAVES DE TEMPLOS COLONIALES MEXICANOS"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. DESCRIPCIÓN DE LOS TEMPLOS COLONIALES DE ESTUDIO
- III. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS Y MODELOS DE ANÁLISIS
- IV. RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 1 de diciembre del 2016.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LOPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Contenido

Introducción	1
0.1. Objetivos	2
0.2. Alcances	3
1. Antecedentes	4
1.1. Arquitectura de conjuntos conventuales coloniales en México	4
1.2. Elementos estructurales de las naves de templos coloniales	8
1.2.1. Bóvedas	8
1.2.2. Muros	9
1.2.3. Contrafuertes	10
1.3. Mecanismos de colapso en arcos y naves de mampostería	11
1.3.1. Arcos	11
1.3.2. Naves de templos	12
2. Descripción de los templos coloniales de estudio	14
2.1. Selección de templos	14
2.2. San Bartolomé Apóstol, Naucalpan, Estado de México	16
2.3. Santa María Nativitas, Naucalpan, Estado de México	18
2.4. Santiago Apóstol de Ocuituco, Estado de Morelos	20
2.5. San Juan Bautista de Tetela del Volcán, Estado de Morelos	22
3. Descripción de los métodos y modelos de análisis	24
3.1. Método de los macroelementos	24
3.2. Método de los elementos rígidos	25
3.3. Geometría de las secciones de nave	27
3.4. Modelos de análisis	31
3.5. Registros sísmicos utilizados	32

4. Resultados	34
4.1. Validación de resultados	35
4.1.1. Bajada de cargas	35
4.1.2. Factor de seguridad por peso propio	35
4.1.3. Comparación de resultados con el método de elementos finitos	36
4.2. Análisis modales	40
4.3. Análisis dinámicos no lineales con San Bartolomé	42
4.3.1. Desplazamientos	42
4.3.2. Cortante basal	44
4.3.3. Energía histerética	45
4.3.4. Diagramas de esfuerzos y daños	46
4.4. Análisis dinámicos no lineales con Nativitas	48
4.4.1. Desplazamientos	48
4.4.2. Cortante basal	50
4.4.3. Energía histerética	51
4.4.4. Diagramas de esfuerzos y daños	51
4.5. Análisis dinámicos no lineales con Ocuituco	53
4.5.1. Desplazamientos	53
4.5.2. Cortante basal	55
4.5.3. Energía histerética	56
4.5.4. Diagramas de esfuerzos y daños	56
4.6. Análisis dinámicos no lineales con Tetela	58
4.6.1. Desplazamientos	58
4.6.2. Cortante basal	60
4.6.3. Energía histerética	61
4.6.4. Diagramas de esfuerzos y daños	61
4.7. Comparaciones entre el comportamiento sísmico de las dos tipologías de estudio	63
4.7.1. Desplazamientos residuales	63
4.7.2. Energía histerética	64
4.7.3. Mapas de daños	65
4.7.4. Formas modales al final de los análisis	67
4.8. Comparación entre los mecanismos de colapso obtenidos y los teóricos	70

Conclusiones	72
Referencias	73
Índice de figuras	76
Índice de tablas	80

Introducción

México tiene un gran número de edificios históricos que hasta nuestros días se conservan de pie, un ejemplo de éstos son las pirámides, las zonas arqueológicas prehispánicas y los templos coloniales. Éstos representan la historia, las tradiciones, el arte y la identidad del pueblo mexicano. Sin embargo, a lo largo del tiempo han sido deteriorados por distintas causas, como el intemperismo, los hundimientos diferenciales y en especial la permanente actividad sísmica del país. Para evitar que estos monumentos desaparezcan y puedan ser disfrutados por futuras generaciones, es necesario preservarlos.

En las últimas dos décadas, ingenieros civiles se han involucrado más en las tareas de preservación, que antes eran realizadas principalmente por restauradores y arquitectos. Las técnicas y los conocimientos actuales de la ingeniería civil, además de las herramientas tecnológicas disponibles, pueden aprovecharse para encontrar soluciones óptimas en cualquier tipo de proyecto de intervención de estructuras antiguas. De acuerdo con Peña [2010] estas soluciones deben garantizar la seguridad física de las personas, la salvaguarda de los valores intrínsecos del inmueble y el uso actual y futuro que se le dé a la construcción. De manera general, los valores intrínsecos de los edificios históricos engloban: la arquitectura (estilo, ubicación e historia), el arte (obras de arte situadas al interior y exterior del edificio), la economía (ciudades beneficiadas por el atractivo turístico que representa el inmueble), la historia (acontecimientos importantes ocurridos dentro del inmueble) y la ingeniería (materiales y técnicas constructivas antiguas).

Tomando en cuenta lo descrito en los dos párrafos anteriores, este trabajo se enfocó en el estudio del comportamiento sísmico de las naves de los templos coloniales mexicanos. Para ello se realizaron análisis paramétricos con cuatro templos típicos mexicanos, dos pertenecientes al Estado de México y dos al Estado de Morelos, con lo cual se consideraron distintas geometrías y características estructurales. Estos templos fueron sometidos a diferentes registros sísmicos reales, para así tomar en consideración distintas características dinámicas. Entre estos sismos se escogieron los de Puebla y Oaxaca, ocurridos en junio y septiembre de 1999. De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED), estos sismos ocasionaron daños severos en varias estructuras de mampostería, incluyendo algunos templos coloniales de los estados mencionados. La herramienta de análisis utilizada fue el programa computacional Rigid, que está basado en el método de los elementos rígidos y permite realizar análisis dinámicos no lineales.

Se tiene conocimiento que en el caso de las naves de los templos coloniales, los muros absorben eficazmente el empuje generado por el peso propio de las bóveda, ya que tienen espesores suficientes, además de que cuentan con contrafuertes que en conjunto contrarrestan este empuje. Sin embargo, ante acciones sísmicas se ha observado que los muros son muy susceptibles a flexionarse fuera de su plano, lo que induce importantes esfuerzos de tensión en varias partes de la nave. Estos esfuerzos pueden ocasionar grietas, las que a su vez pueden convertirse en un número suficiente de articulaciones que desarrollen un mecanismo de colapso. Con base en esto, se establecieron los siguientes objetivos y alcances:

0.1. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es estudiar el comportamiento sísmico de las naves de templos coloniales típicos mexicanos. Los objetivos particulares incluyen: identificar los elementos estructurales de las naves que son más susceptibles a dañarse por acciones sísmicas, comparar los resultados obtenidos de los análisis paramétricos realizados con las dos tipologías de naves seleccionadas y evaluar si los mecanismos de colapso obtenidos de estos análisis, son similares a los que se presentan comúnmente en este tipo de estructuras.

0.2. Alcances

Únicamente se realizaron análisis dinámicos no lineales del macroelemento nave, por medio del método de elementos rígidos. Estos análisis solo contemplaron el comportamiento estructural en el plano y la componente horizontal de los sismos. Es importante mencionar que el enfoque de esta tesis no considera evaluar las condiciones de un inmueble específico. Por tal motivo, queda fuera de los alcances hacer una investigación detallada de cada uno de los templos de estudio. Para la obtención de las características arquitectónicas y estructurales se consultaron trabajos previos, los cuales se encuentran en las referencias de esta tesis.

Capítulo 1

Antecedentes

Este capítulo contiene una breve descripción de la arquitectura conventual mexicana, se menciona cuáles fueron sus orígenes y cuáles son sus características. Posteriormente se describe cuáles son los elementos estructurales que componen a las naves de templos mexicanos coloniales y se mencionan sus características. Al final del capítulo se exponen los mecanismos de colapso que comúnmente se presenta en arcos y naves de mampostería.

1.1. Arquitectura de conjuntos conventuales coloniales en México

A finales del siglo XV, lo que inicialmente surgió como un viaje en búsqueda de una nueva ruta comercial desde España hacia varias regiones asiáticas, acabó siendo el descubrimiento de un nuevo continente, este hecho significó para los españoles la oportunidad de expandir su imperio. La conquista del continente americano fue un proceso largo y complicado, pues cada una de las civilizaciones prehispánicas tenía arraigadas sus propias costumbres y creencias. En el caso de México, para facilitar el proceso de colonización, llegaron inicialmente los franciscanos, después los dominicos y finalmente los agustinos. De acuerdo con Espinosa [1998] estas órdenes mendicantes tenían como principal objetivo la conversión religiosa de los pobladores prehispánicos, para ello construyeron iglesias primitivas con materiales perecederos y paulatinamente fueron refinando sus diseños, importando algunos conceptos arquitectónicos europeos de aquella época.

En los conjuntos conventuales mexicanos se aprecia la influencia de dos arquitecturas diferentes. Por una parte destacan elementos de la arquitectura europea que construía edificios cubiertos por bóvedas de mampostería y por otra, se observan características de la arquitectura prehispánica, como los grandes espacios abiertos, donde los antiguos pobladores solían realizar al aire libre actividades culturales y religiosas. Los españoles se percataron de las costumbres prehispánicas e incluyeron en sus diseños arquitectónicos espacios no cubiertos, que permitieron albergar a una mayor cantidad de personas y facilitar la transformación de las creencias religiosas prehispánicas, aun cuando no se habían acabado de construir los templos coloniales [García, 2007].

Inicialmente los españoles trataron de reproducir los mismos conjuntos religiosos de la Corona Española en la Nueva España, pero al enfrentar ciertas adversidades locales, tuvieron que modificar sus planes originales e incluir algunas técnicas constructivas prehispánicas. Los españoles importaron equipos y herramientas de hierro que no se conocían en el Nuevo Mundo, pero incluyeron técnicas indígenas como la utilización de pilotes de madera en las cimentaciones, así como el aligeramiento de la mampostería utilizando tezontle, para evitar problemas de hundimientos en suelos blandos. Los materiales usados por los españoles durante el siglo XVI, fueron los mismos que usaban los indígenas, estos incluyen la piedra, el barro, la cal, la madera, la caña y la paja [Cruz, 2014].

Es destacable la experiencia y el conocimiento acumulado logrado por los constructores prehispánicos, pues estos encontraron soluciones adecuadas para cimentar sus edificaciones en el suelo arcilloso del Valle de México, el cual es altamente deformable y sigue representando un reto para la Ingeniería actual. García [2007] señala que la mezcla de las técnicas constructivas de dos continentes, permitió que se construyeran durante el siglo XVI, casi 300 conjuntos conventuales a lo largo de todo el país.

Durante la primera mitad del siglo XVI no se puede definir un estilo único en la arquitectura mexicana, pero el estilo arquitectónico predominante fue el medieval con influencia del gótico y en la segunda mitad de este siglo, el estilo predominante fue el renacentista [Ibarra, 2012]. Espinosa [1998] menciona que hay cierta homogeneidad en la arquitectura de los conjuntos religiosos coloniales del siglo XVI en México y señala que esto se atribuye a las regulaciones que estableció la Corona Española durante su construcción. Para los siglos XVII y XVIII se observa la influencia del estilo barroco en las construcciones religiosas, éstas ya no están tan apegadas a las normas del Renacimiento, esto se constata al observar la arquitectura de los templos mexicanos de esas épocas, los cuales tienen acabados más finos y son estructuralmente más complejos y variados [Almanza, 2009].

En cuanto a las tipologías de templos, los de una sola nave fueron los preferidos durante el siglo XVI debido a que su geometría alta y estrecha permitía una mejor visibilidad tanto para la población que asistía a los rituales religiosos, como para los frailes que vigilaban a los asistentes [García, 2007]. En la figura 1 se observa la planta típica de los templos conventuales del siglo XVI y los elementos que la componen.

En los siglos XVII y XVIII, se empezaron a construir templos más complejos, de acuerdo con Almanza [2009] la planta más utilizada en ese tiempo fue la de cruz latina. Los templos con forma de cruz latina constan de dos brazos, uno más largo que el otro, éstos se intersecan perpendicularmente para formar un crucero, el cual queda ubicado más próximo al ábside que a la fachada principal, ver figura 2.

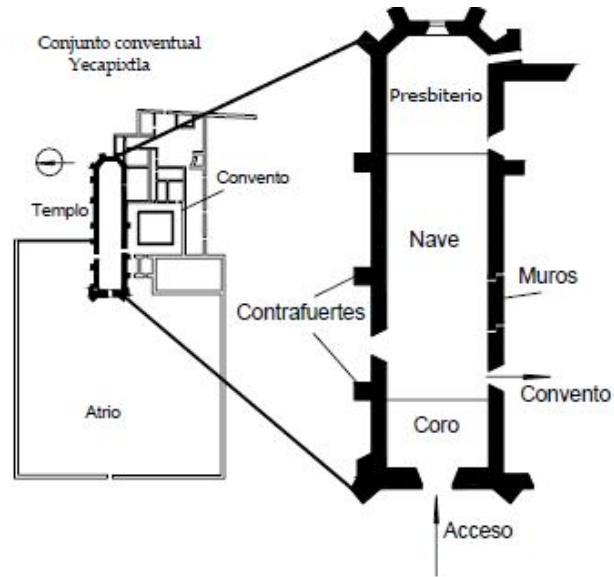


Figura 1: Planta típica de templos de una nave [Meli, 2011]

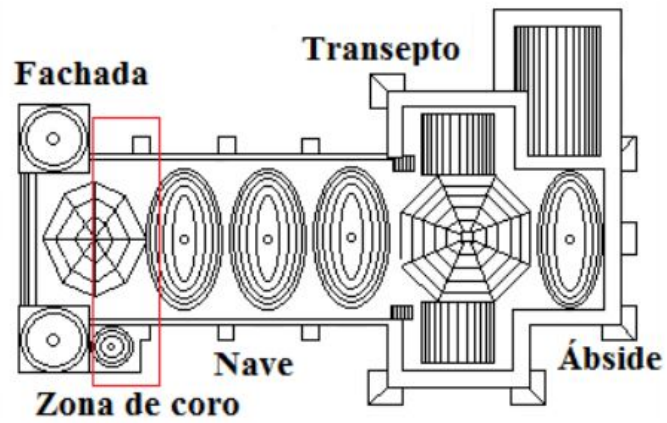


Figura 2: Planta típica de templos en cruz latina [Meza, 2013]

1.2. Elementos estructurales de las naves de templos coloniales

Tomando en cuenta los objetivos de este trabajo, es preciso describir cuáles son las partes estructurales que componen a las naves de templos coloniales y sus características. Las naves de templos coloniales mexicanos abarcan desde el final del sotocoro (parte de la iglesia ubicada exactamente debajo del coro), hasta donde inicia el presbiterio, como se observa en la figura 1. Las naves generalmente están cubiertas por bóvedas de mampostería, mismas que se apoyan sobre muros del mismo material. En los templos mexicanos se han observado diferentes etapas constructivas, en algunos casos se han añadido elementos estructurales de reforzamiento, como contrafuertes, arcos, columnas y pilastras. Cabe señalar que, aunque la cimentación es un elemento estructural fundamental de las naves de templos, los objetivos y alcances de este trabajo no permiten contemplar su análisis.

1.2.1. Bóvedas

La bóveda más representativa de las naves de templos coloniales mexicanos, es la de cañón corrido, ver figura 3a. Según Kubler [1983] este tipo de bóveda se prefirió por ser una opción económica y rápida de construir. La bóveda de cañón corrido se apoya directamente a lo largo de los muros laterales, la principal desventaja de este tipo de bóveda, es que por su geometría hay poca iluminación al interior del templo, para resolver esto, en algunos casos se realizaron perforaciones a los muros. También se construyeron naves con bóvedas de cañón que cuentan con arcos y pilastras, que pudieron haber sido añadidos para reforzar la nave después de la construcción del templo, en algunos casos son de un material distinto al de la bóveda, ver figura 3b. Algunas naves se construyeron usando bóvedas de cañón con lunetos, ver figura 3c, este tipo de cubierta se forma con la intersección de una bóveda principal con dos o más bóvedas de cañón de menor altura. Otra bóveda que se encuentra en algunos templos coloniales mexicanos es la de nervaduras, en la que se dispone una serie de arcos en distintas configuraciones (algunas son muy complejas) para salvar un claro, ver figura 3d. En algunos casos se observa que solo el coro y/o el presbiterio está techado con bóvedas nervadas, en otros, todo el templo queda cubierto por este tipo de bóveda [García, 2007].

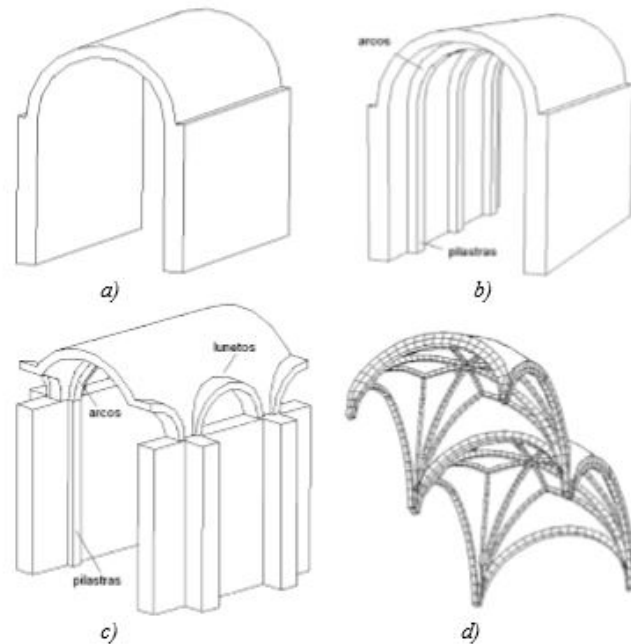


Figura 3: Tipos de bóvedas de templos mexicanos: a) Cañón corrido, b) Cañón con arcos y pilastras, c) Con lunetos, d) De nervaduras, [Meli, 2011]

1.2.2. Muros

Los muros tienen la función de soportar el peso de la cubierta y su peso propio, éstos además deben ser capaces de resistir los empujes laterales, producidos por el coceo de la cubierta, por efectos de viento y sismo [Meli, 1998]. En las primeras etapas constructivas, los templos contaban con techumbres de madera, las cuales fueron sustituidas posteriormente por cubiertas de mampostería. Esto hubiera presentado inestabilidad en toda la estructura, de no haber sido porque los constructores coloniales consideraron cambios futuros en el tipo de cubierta y realizaron diseños de muros con espesores suficientes, capaces de contrarrestar los empujes laterales de las bóvedas de mampostería. Los muros generalmente son de mampostería, tienen pocas aberturas y carecen de ornamentación [Kubler, 1983].

1.2.3. Contrafuertes

De acuerdo con Meli [1998], el peso propio de los muros contrarresta el momento de volteo que ocasionan los empujes laterales de la cubierta; sin embargo, para muros muy altos o para cubiertas muy pesadas, los muros requerirían grandes espesores para garantizar la estabilidad y esto resultaría impráctico. Resulta más adecuado reforzar los muros con contrafuertes, ya que éstos engrosan únicamente un tramo de un muro. Los contrafuertes son elementos estructurales que se disponen verticalmente y su función estructural principal es absorber el coceo de la cubierta. En los templos mexicanos coloniales es frecuente que los contrafuertes estén adosados a los muros, aunque también los hay de tipo Botarel, ver figuras 4a y 4b. Los contrafuertes pueden tener la misma altura que los muros o inclusive ser más altos [García, 2007].



(a) Contrafuertes adosados



(b) Contrafuertes tipo Botarel

Figura 4: Contrafuertes comúnmente utilizados en templos coloniales mexicanos

1.3. Mecanismos de colapso en arcos y naves de mampostería

1.3.1. Arcos

De acuerdo con Heyman [1995] después del descimbramiento de un arco de medio punto, sus apoyos son sometidos por el peso propio a empujes laterales, lo que obliga que se desplazan lateralmente. Ante estos desplazamientos el arco sufre agrietamientos, como los que se observan en la figura 5a. El arco es capaz de adaptarse al movimiento lateral de sus apoyos, por lo que las grietas se cierran y permanece estable. En la figura 5b se muestran las grietas que se generan cuando los apoyos del arco se acercan entre sí.

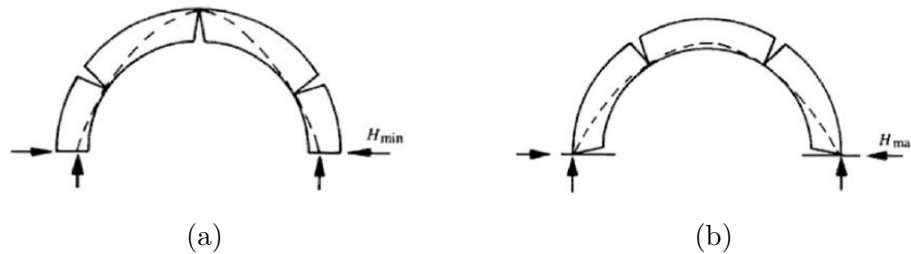


Figura 5: Agrietamientos típicos en arcos de medio punto: a) separación de los apoyos del arco y b) acercamiento de los apoyos del arco, [Heyman, 1995]

Meli [1998] señala que los mecanismos de colapso en los arcos ocurren cuando se forman cuatro articulaciones. La posición de estas articulaciones depende de la geometría del arco y de las condiciones de carga. La aparición de grietas y de articulaciones se debe principalmente al coceo del arco y a la poca resistencia de la mampostería a esfuerzos de tensión. En la figura 6 se muestran las configuraciones típicas de agrietamientos, algunas llevan a la formación de mecanismos de colapso.

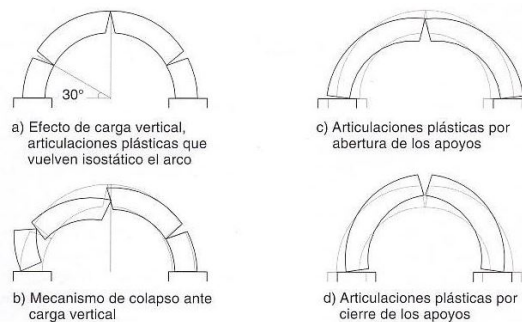


Figura 6: Configuraciones típicas de articulaciones y de mecanismos de colapso en arcos [Meli, 1998]

1.3.2. Naves de templos

Los templos coloniales mexicanos fueron diseñados como estructuras de gravedad, ya que la mampostería es poco resistente a esfuerzos de tensión. La resistencia a tensión suele tener un rango del 5% al 15% de la resistencia a compresión. Por tanto, los antiguos constructores realizaron diseños de templos en donde sus elementos estructurales están sometidos principalmente a esfuerzos de compresión [García, 2007]. En el caso específico de las naves de estos templos, sus muros son muy flexibles lateralmente y se flexionan por el empuje lateral de la bóveda. Este movimiento de flexión, por peso propio, no suele generar problemas de inestabilidad, ya que los muros tienen grandes espesores y suelen estar reforzados por contrafuertes.

Huerta [2004] argumenta que los mecanismos de colapso en las naves pueden ocurrir cuando los muros se desploman, ya que la flexión fuera del plano de éstos obliga a que el claro de la nave aumente y la clave de la bóveda descienda, como se observa en la figura 7. Según Huerta, desplomos en los muros de un 1° provocan aumentos en el claro de la bóveda en una proporción $L/30$ (figura 7 a) y desplomos de 3.5° aumentos en proporción $L/10$ (figura 7 b), en este último caso se genera un mecanismo de colapso.

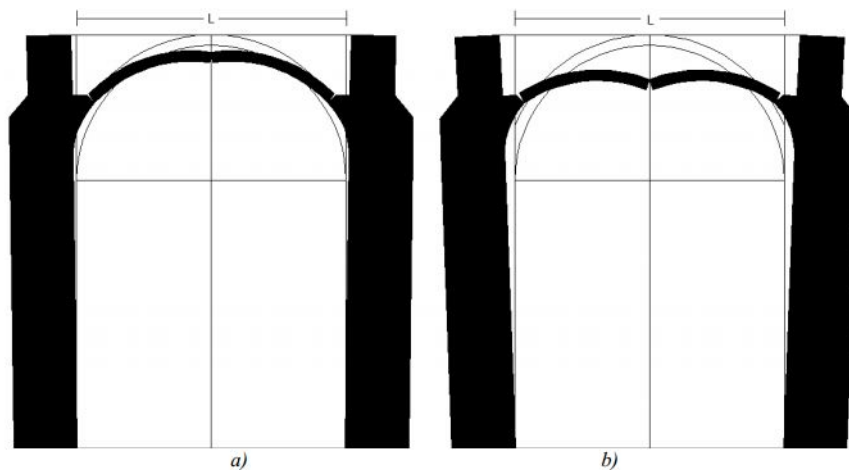


Figura 7: Mecanismo de colapso de la bóveda de un templo, por desplomo de sus muros: a) inclinaciones de 1° provocan un aumento del claro en proporción $L/30$, b) inclinaciones de 3.5° provocan un aumento del claro en proporción $L/10$, [Huerta, 2004]

Meli [2011] señala que ante acciones sísmicas laterales, las bóvedas de los templos tienden a distorsionarse, como se observa en la figura 8. Esto se atribuye a lo siguiente: durante un instante en uno de los muros, los desplazamientos debidos a las acciones sísmicas se suman a los del empuje de la bóveda; pero, en el muro opuesto ambos desplazamientos tienden a cancelarse, pues tienen signo contrario. El movimiento de los muros por acciones sísmicas induce esfuerzos de tensión, que a su vez genera agrietamientos en la base de los muros y en los riñones de la cubierta. En algunos casos, estos agrietamientos se extienden y se forman cuatro articulaciones que forman el mecanismo de colapso mostrado en la figura 9.

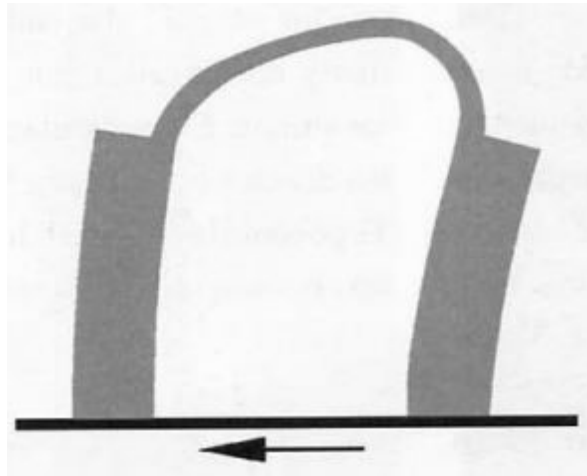


Figura 8: Esquema de la acción sísmica lateral en naves de templos [Meli, 2011]

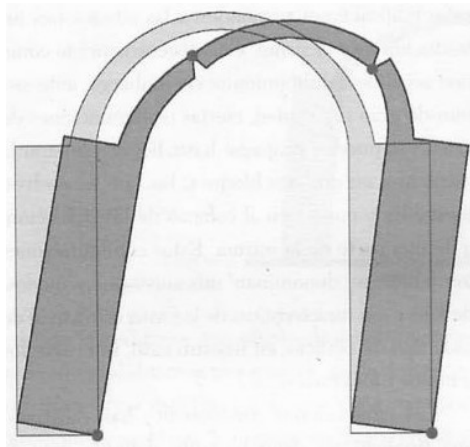


Figura 9: Mecanismo de colapso de la bóveda de un templo, por desplazamiento lateral de los muros [Meli, 2011]

Capítulo 2

Descripción de los templos coloniales de estudio

Se escogieron cuatro templos coloniales típicos mexicanos. En este capítulo se explica cuáles son éstos y porqué fueron elegidos. Es importante recordar que los objetivos y alcances de este trabajo no consideran el estudio de casos específicos, por lo que únicamente se estudió de forma general cada templo, con el fin de obtener los modelos numéricos requeridos para los distintos análisis estructurales de esta investigación.

2.1. Selección de templos

México cuenta con un número considerable de edificios religiosos coloniales, por lo que para la selección de las iglesias, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- a. Los templos de una sola nave, son los más comunes en la arquitectura colonial mexicana
- b. De acuerdo con Peña y Meza [2010] las características arquitectónicas y estructurales de los templos coloniales varían dependiendo la zona sísmica donde éstos fueron construidos
- c. Meli [2011] señala que las construcciones religiosas ubicadas fuera de grandes ciudades han sufrido pocas alteraciones a lo largo de su historia, por tanto éstas son las más representativas de la arquitectura mexicana.

Tomando en cuenta los aspectos anteriormente mencionados, las iglesias seleccionadas son: **San Bartolomé Apóstol**, **Santa María Nativitas**, **Santiago Apóstol de Ocuiluco** y **San Juan Bautista de Tetela del Volcán**. Las primeras dos iglesias se encuentran en el Estado de México, por lo que se encuentran lejos de la zona de subducción, pero cerca de fallas locales activas. Las últimas dos iglesias se encuentran también lejos de la zona de subducción, pero lejos de fallas locales. En la figura 10 se muestra en el mapa la ubicación de todas las iglesias. Es importante señalar que los templos del Estado de México son menos altos y con claros de bóveda más pequeños que los del Estado de Morelos.

Gutiérrez [2011], Robles [2012], Saldaña [2014] y Zapata [2014] estudiaron de forma particular las iglesias mencionadas en el párrafo anterior. Estos trabajos se tomaron como base en esta investigación, para la obtención de la información relevante a las características estructurales y arquitectónicas de los templos de estudio.

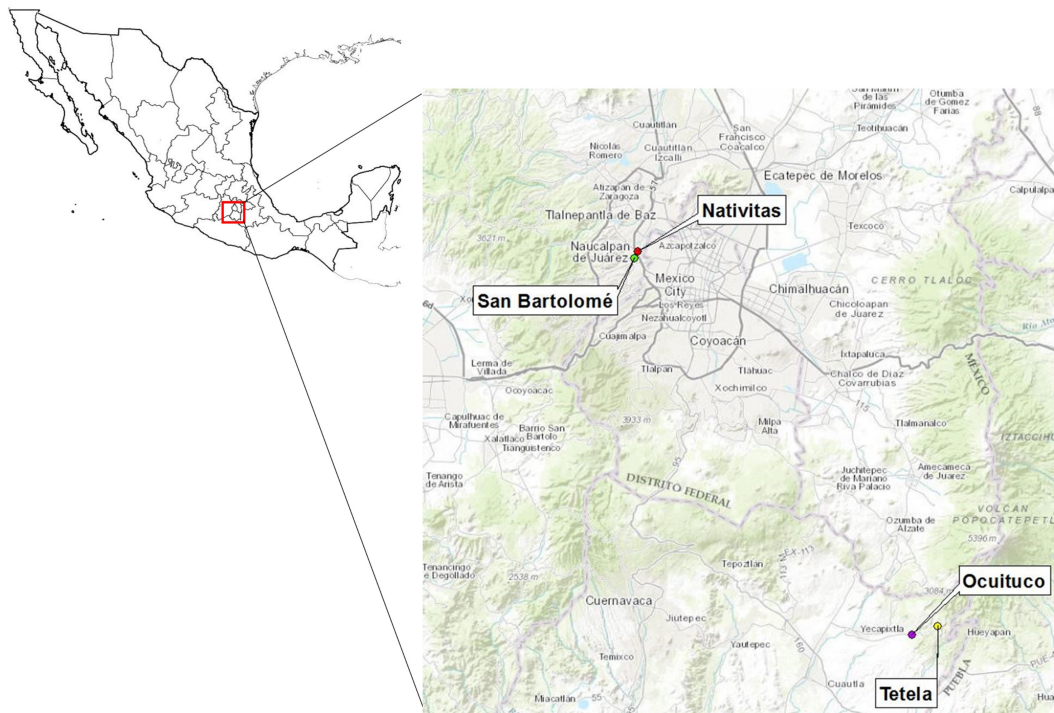


Figura 10: Localización de los templos seleccionados

2.2. San Bartolomé Apóstol, Naucalpan, Estado de México

La Parroquia de San Bartolomé Apóstol está ubicada en el Municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México. Su ubicación exacta es la esquina de las calles Vicente Guerrero y Jardín, en la figura 11 se aprecia la vista aérea del inmueble. San Bartolomé fue fundada por la orden franciscana, por lo que su arquitectura es simple y tiene poca ornamentación, como se puede apreciar en la figura 12 de la fachada principal. La construcción de este templo finalizó aproximadamente en el año 1649 [López y Córdoba, 2011].

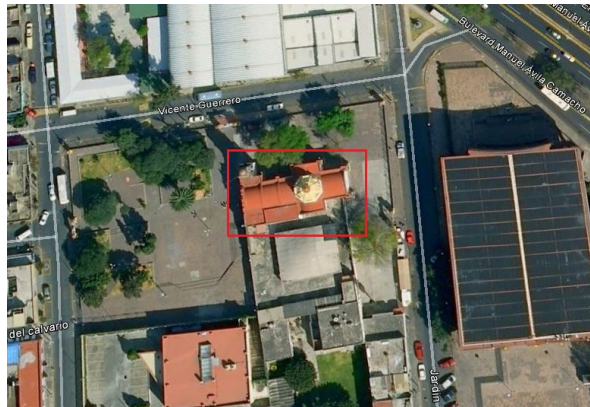


Figura 11: Vista aérea del templo de San Bartolomé



Figura 12: Vista de la fachada principal del templo de San Bartolomé [Robles, 2012]

San Bartolomé es un templo de una sola nave con planta en forma de cruz latina. A través de un levantamiento arquitectónico realizado por Robles [2012], fue posible reconocer y obtener las medidas de los elementos arquitectónicos y estructurales del templo. Los muros del templo son de mampostería. La cubierta es de bóveda de cañón corrido, construida con concreto. En el extradós, la cubierta está reforzada por cinco costillas del mismo material y en el interior está reforzada por seis arcos de mampostería, cuatro de éstos sostienen a la cúpula. Los arcos son soportados por columnas de mampostería unidireccionales y bidireccionales (en la zona del crucero). El templo cuenta con once contrafuertes de mampostería, que están adosados a las distintas fachadas.

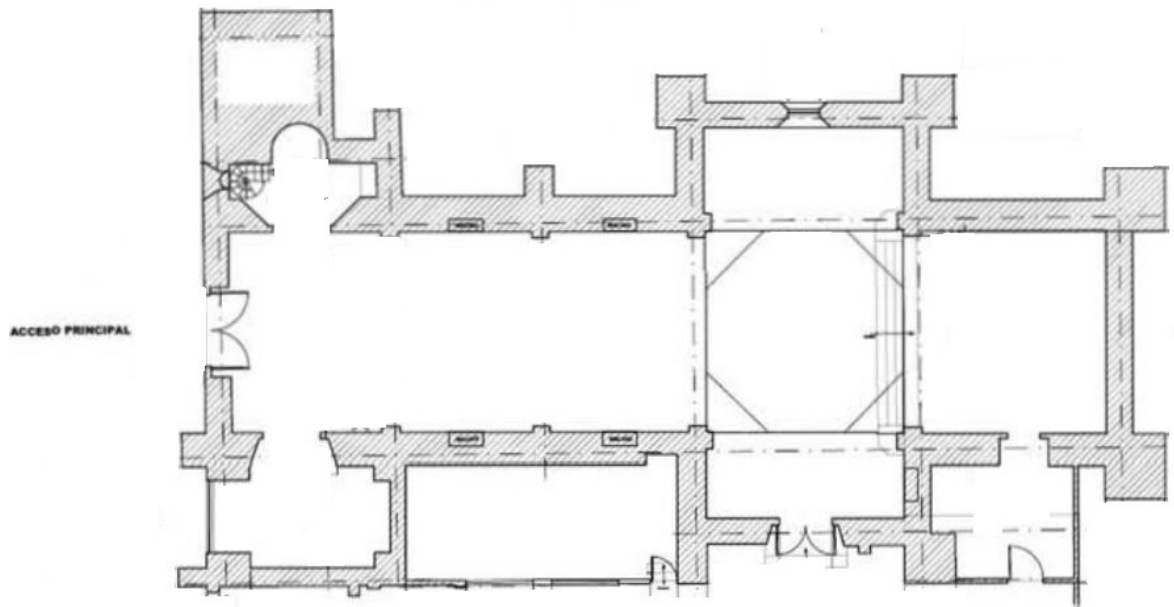


Figura 13: Vista en planta del templo de San Bartolomé [Robles, 2012]

2.3. Santa María Nativitas, Naucalpan, Estado de México

La Parroquia de Santa María Nativitas se ubica en el municipio de Naucalpan, Estado de México, en la calle Cuauhtémoc, entre la avenida Gustavo Baz y la calle Emiliano Zapata. En la figura 14 se observa la vista aérea del templo de Santa María Nativitas, el cual pertenece a la orden mendicante franciscana. Los franciscanos acostumbraban establecer una cabecera y pueblos de visita aledaños, en éstos últimos se construían pequeñas capillas con materiales perecederos, ya que no se oficiaba misa cada semana. Santa María Nativitas fue un pueblo de visita, por lo que su iglesia es pequeña y modesta, en la figura 15 se aprecia su fachada principal. Gutiérrez [2011] estima que la construcción de este templo se culminó en el año 1660.



Figura 14: Vista aérea del templo de Nativitas



Figura 15: Vista de la fachada principal del templo de Nativitas [Cruz, 2014]

Gracias al levantamiento arquitectónico realizado por Gutiérrez [2011], se pudo obtener la estructuración y la geometría actual del templo de Nativitas, el cual consta de una sola nave, como se puede ver en la figura 16. La nave está cubierta por una bóveda de cañón corrido de concreto, mientras que el presbiterio por una bóveda de pañuelo del mismo material. Adicionalmente, el templo cuenta con tres contratraveses que sujetan la bóveda de concreto. Los muros son de mampostería, están reforzados en el exterior por contrafuertes de mampostería adosados a ambos lados del templo y en el interior por columnas también adosadas y del mismo material. El templo cuenta con un entrepiso para el coro, en el cual se tiene una losa de concreto.

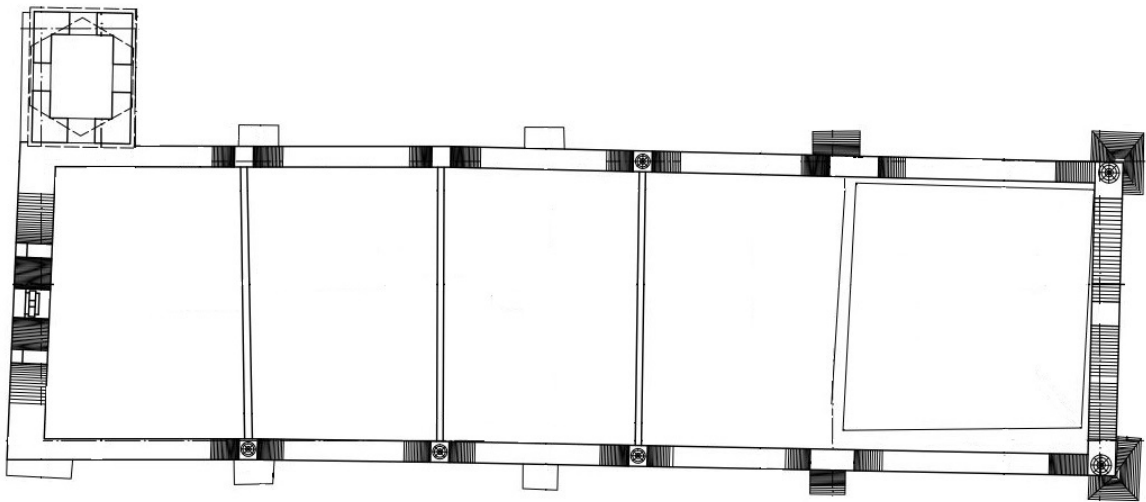


Figura 16: Vista en planta del templo de Santa María Nativitas [Gutiérrez, 2011]

2.4. Santiago Apóstol de Ocuituco, Estado de Morelos

El templo conventual Santiago Apóstol de Ocuituco está localizado en el centro del pueblo de Ocuituco, el cual se encuentra en el Estado de Morelos. El conjunto conventual de Ocuituco fue de las primeras construcciones de los agustinos en este estado. Rubial [1981] estima que los edificios que conforman el conjunto conventual de Ocuituco fueron concluidos en el año 1560. En la figura 17 se puede ver su vista aérea y en la figura 18 la vista de su fachada principal.

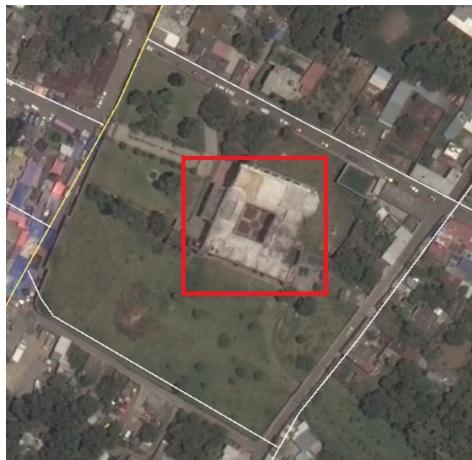


Figura 17: Vista aérea del templo conventual de Ocuituco



Figura 18: Vista de la fachada principal del templo de Ocuituco

Actualmente el templo de Ocuituco cuenta con una sola nave que está dividida en siete crujías, ver figura 19. En la primera crujía del templo se encuentra un entrepiso, donde queda alojado el coro, éste está construido con un piso y traveses de madera. Entre cada crujía hay un arco de mampostería, que es soportado por pilastras de cada lado del mismo material. El coro y el presbiterio están cubiertos por una bóveda de cañón corrido de mampostería y la nave (que abarca de la segunda a la penúltima crujía) está cubierta por una bóveda de mampostería con lunetos. En el exterior del templo se encuentran cinco contrafuertes adosados a un solo lado del templo que son de mampostería y que en la parte superior tienen una ligera inclinación. La fachada es sencilla, con poca ornamentación, lo que resulta inusual en las construcciones llevadas a cabo por los agustinos [Saldaña, 2014].



Figura 19: Vista en planta del templo de Ocuituco [Saldaña, 2014]

2.5. San Juan Bautista de Tetela del Volcán, Estado de Morelos

El templo conventual San Juan Bautista de Tetela del Volcán está ubicado en el centro del pueblo que lleva el mismo nombre, Tetela del Volcán, en el Estado de Morelos. Este templo fue el cuarto establecimiento dominico en este estado y su construcción abarca desde el 1559 al 1578 [Casares, 1995]. En la figura 20 se muestra su vista aérea y en la figura 21 su fachada principal.

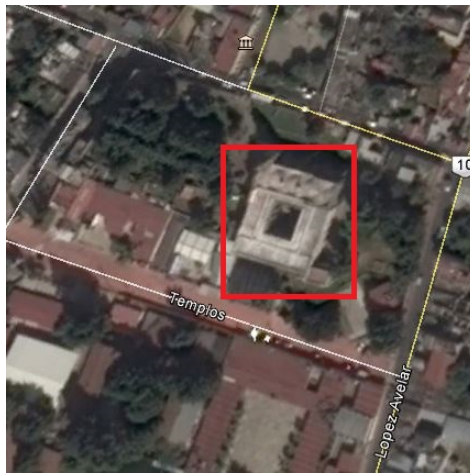


Figura 20: Vista aérea del templo de Tetela



Figura 21: Vista de la fachada principal de Tetela

El templo de Tetela cuenta con una sola nave, como se aprecia en la figura 22. Esta iglesia cuenta con un coro que tiene un piso de madera y está soportado por pilastras de mampostería con sección circular. La nave está cubierta por una bóveda de mampostería con lunetos y reforzada internamente por arcos del mismo material. El presbiterio es cuadrangular, tiene una mayor elevación y en su entrada está resaltado por medio de un arco triunfal. La fachada es simple y austera como marcan los cánones dominicos, la torre que forma parte de ésta parece estar unida al muro del templo. En el exterior, únicamente el muro norte está reforzado por cuatro contrafuertes de mampostería tipo Botarel [Zapata, 2014]

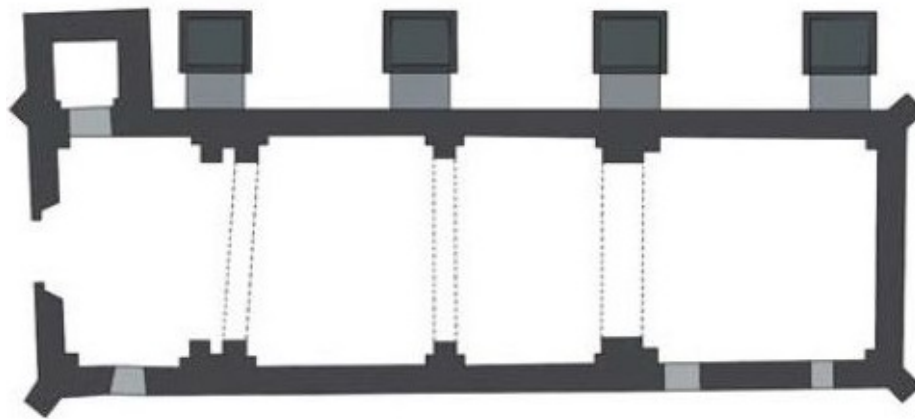


Figura 22: Vista en planta del templo de Tetela [Zapata, 2014]

Capítulo 3

Descripción de los métodos y modelos de análisis

3.1. Método de los macroelementos

Meza [2013] señala que una de las complicaciones que existen al estudiar el comportamiento estructural de templos coloniales mexicanos, es evaluar su estado global después de haber sido deteriorados por sismos, ya que por las grandes dimensiones de los templos, es difícil asociar este tipo de daños con cada uno de sus elementos estructurales. Como una solución a esta complicación, existe el método de los macroelementos, en el cual se analiza una estructura dividiéndola en varias partes, lo que permite entender mejor su comportamiento global ante acciones sísmicas. Además, este método permite obtener modelos numéricos de estructuras más pequeños, con lo cual se reduce significativamente la cantidad de recursos computacionales y los tiempos necesarios para realizar distintos análisis estructurales.

El método de los macroelementos surge de una investigación realizada por Doglioni et al. [1994], en la cual a través de fotografías, se registraron los daños en 350 iglesias, ocasionados por los sismos en la región italiana de Friuli en mayo y septiembre de 1976. Doglioni et al. observaron que debido a las características geométricas de las iglesias, se presentan secciones con diferente rigidez. Por tanto, cuando ocurren daños significativos por sismos, estas secciones o macroelementos se desligan del resto de la estructura y su comportamiento estructural se vuelve independiente.

Con base en la investigación de Doglioni et al. [1994], Meza [2013] desarrolló una metodología para analizar por partes los templos coloniales típicos mexicanos, por medio de modelos numéricos de macroelementos. Meza [2013] realizó comparaciones entre las formas modales de un modelo numérico completo, de un templo colonial mexicano y las formas modales de marcoelementos del mismo templo. Los resultados de esta investigación mostraron que una forma correcta de segmentar las iglesias coloniales mexicanas, para estudiar su comportamiento estructural ante acciones sísmicas, es dividiéndolas en los macroelementos mostrados en la figura 23.

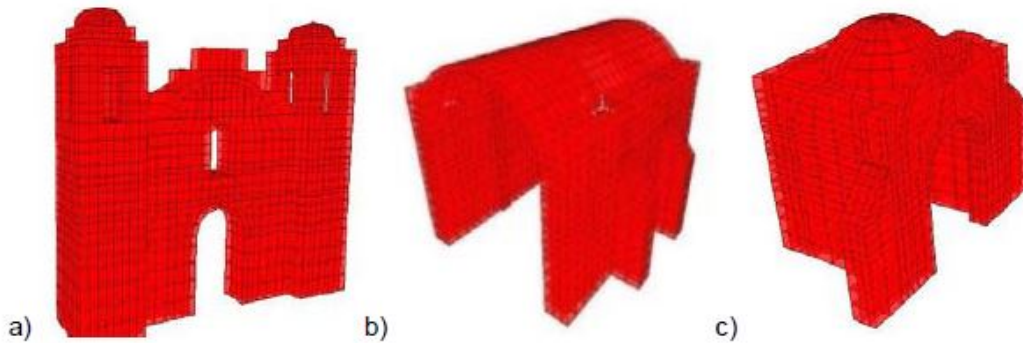


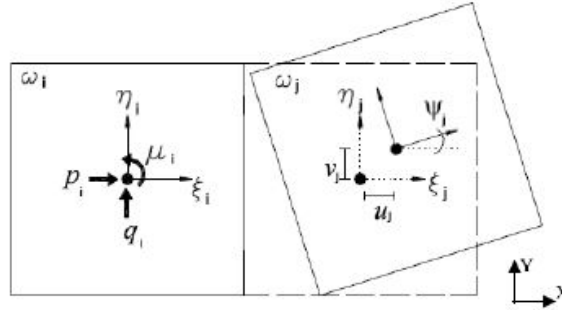
Figura 23: Macroelementos típicos de iglesias coloniales mexicanas: a) Fachada, b) Nave, c) Ábside [Meza, 2013]

3.2. Método de los elementos rígidos

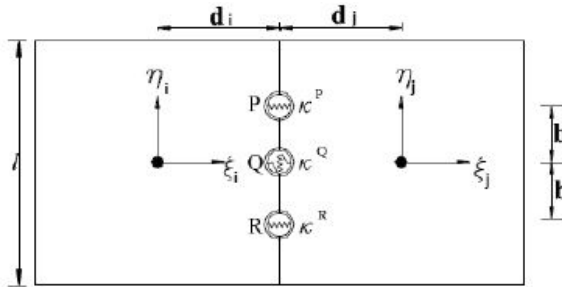
Para estudiar el comportamiento estructural de las secciones de nave de los templos coloniales, se empleó el programa de análisis estructural **RIGID**, el cual se basa en el método simplificado de los elementos rígidos y permite realizar análisis dinámicos no lineales de estructuras de mampostería.

El **método de los elementos rígidos** se aplica a estructuras de mampostería que resisten fuerzas en su plano. Por medio de un conjunto de elementos cuadriláteros, que están conectados entre sí mediante resortes, se estudia las interacciones de éstos ante cargas estáticas y/o dinámicas. Por cada elemento se tiene tres resortes inelásticos, dos axiales para tomar en cuenta un par de fuerzas y uno de cortante, ver figura 24b. En la figura 24a se observan los desplazamientos que admiten los elementos rígidos, éstos son dos de traslación (u y v) y uno de rotación (ψ) [Casolo y Peña, 2005].

El comportamiento deformable de la mampostería se concentra en los puntos de conexión; sin embargo, los elementos no se deforman, son rígidos. Los puntos de conexión representan las características mecánicas del material, además, permiten la separación, el deslizamiento y la sobreposición de elementos, lo que representa numéricamente la tensión, cortante y compresión en esos puntos. Durante el análisis no cambian las conectividades iniciales [Casolo y Peña, 2010].



(a) Fuerzas y desplazamientos



(b) Interconexión entre elementos

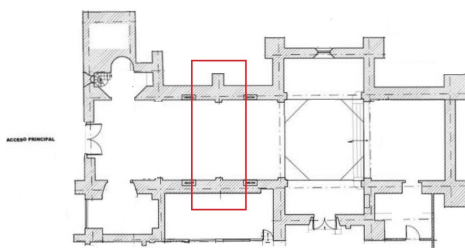
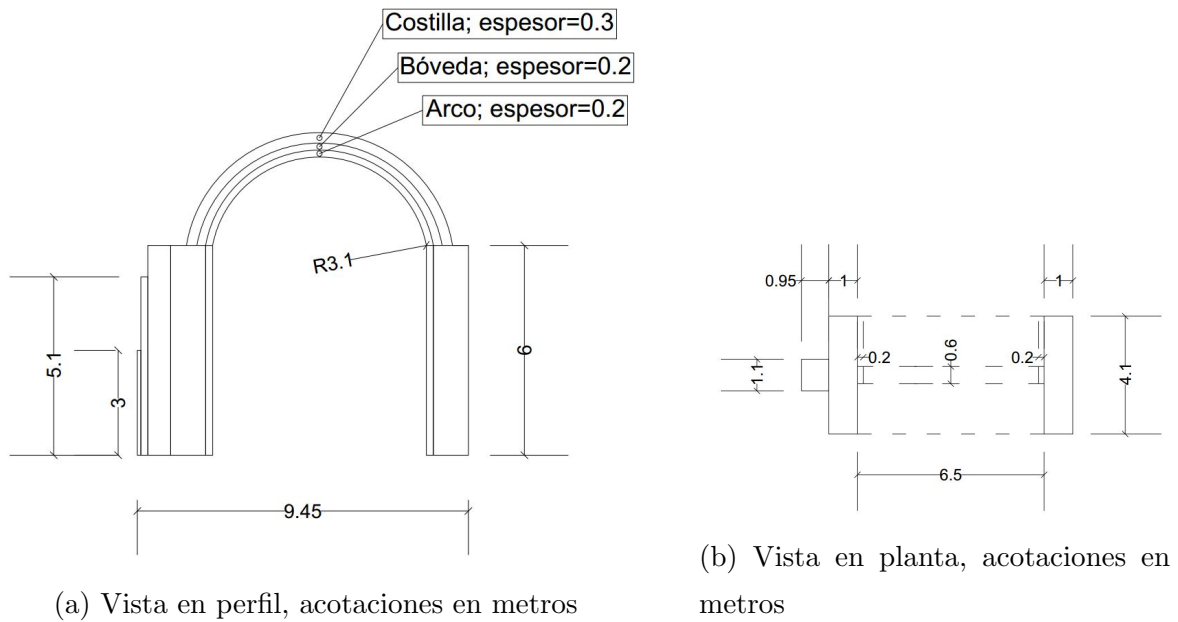
Figura 24: Estructura de los nodos [Casolo y Peña, 2010]

Para realizar los análisis paramétricos de esta investigación, resulta conveniente utilizar el programa computacional **RIGID**, pues la filosofía de los elementos rígidos permite realizar modelos numéricos con un menor número de elementos y por ende tener menos grados de libertad. Por lo anterior, los análisis se realizan más rápido que empleando otros programas computacionales, como los que están basados en el método de elementos finitos.

3.3. Geometría de las secciones de nave

Basándose en el método de los macroelementos, se escogieron secciones representativas de las naves de los templos de estudio, en las que se incluyeron todos los elementos que influyen en su comportamiento estructural, como los son contrafuertes, arcos y columnas.

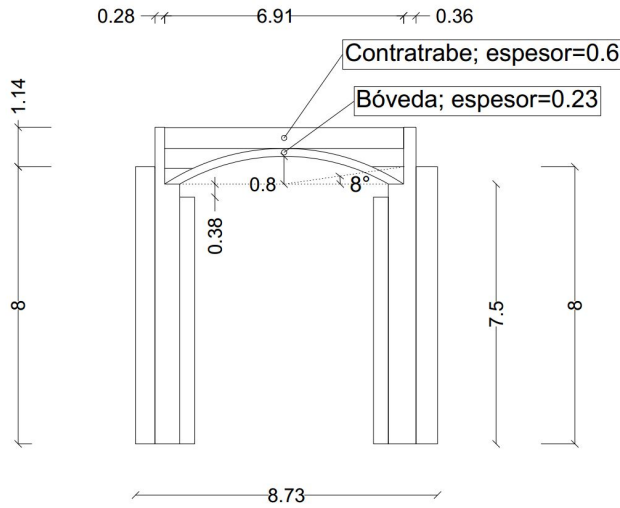
La sección de nave del templo de San Bartolomé consiste en un tramo de bóveda que es soportado por muros que tienen la misma altura y espesor en ambos lados. Ésta sección de nave incluye un arco, una costilla que sujeta a la bóveda, columnas que soportan al arco y un contrafuerte de sección variable adosado a uno de los muros, ver figura 25.



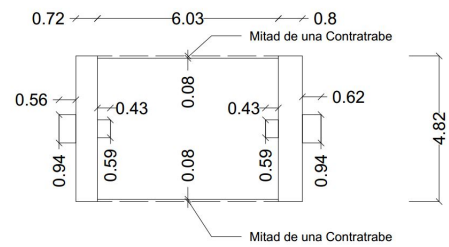
(c) Sección de nave, tomado de [Robles, 2012]

Figura 25: Geometría de la sección de nave del templo de San Bartolomé

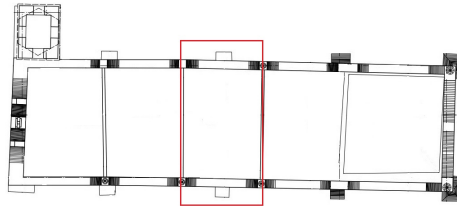
En el templo de Nativitas se escogió una sección de nave que incluye una de las contratraves, un tramo de bóveda con relleno en su extradós que es soportada por muros reforzados con contrafuertes y columnas en ambos lados. Además, se considera un pretil en ambos muros, que es más alto que la cubierta, ver figura 26.



(a) Vista en perfil, acotaciones en metros



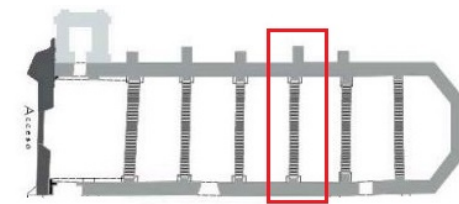
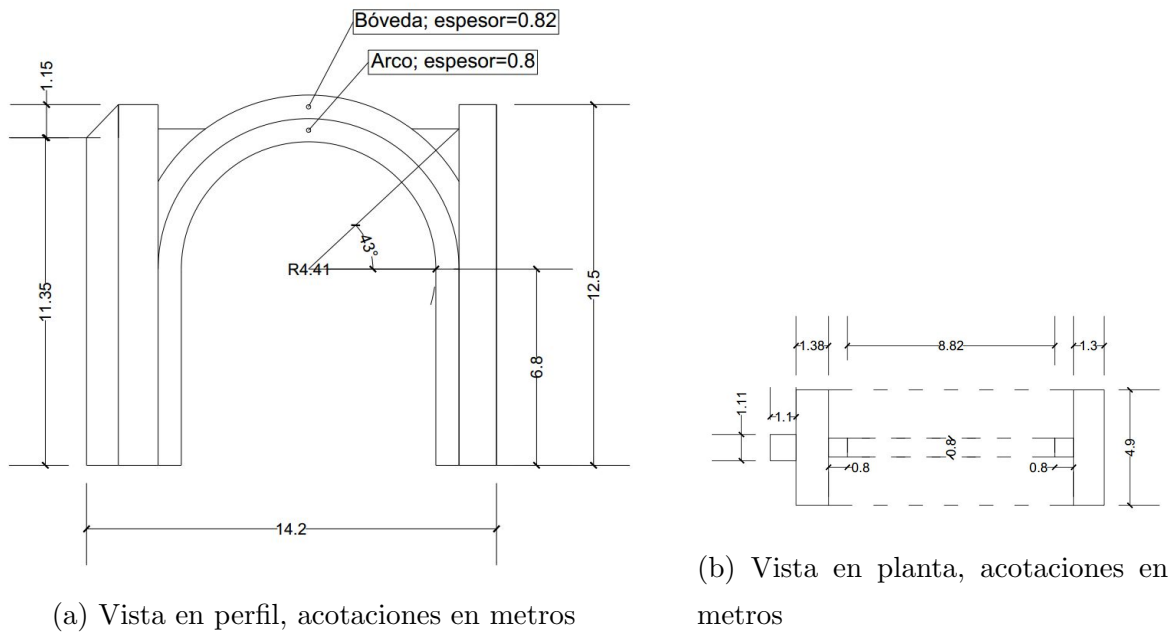
(b) Vista en planta, acotaciones en metros



(c) Tramo seleccionado de la nave del templo, tomado de [Gutiérrez, 2011]

Figura 26: Geometría de la sección de nave del templo de Nativitas

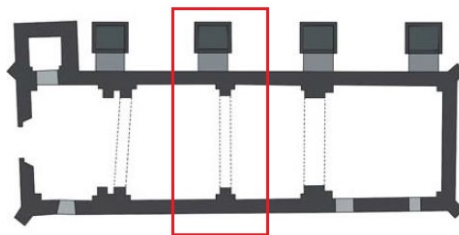
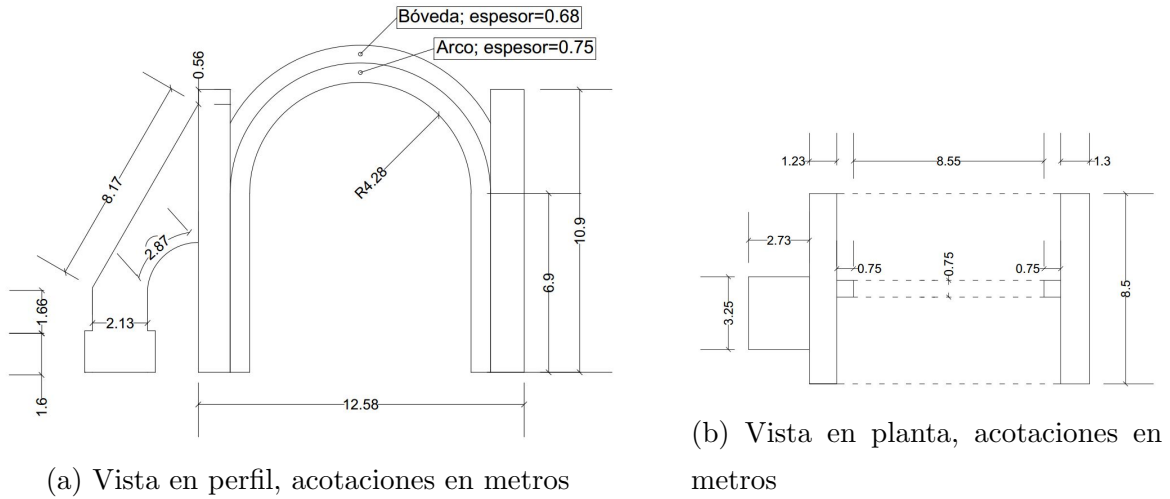
La sección de nave seleccionada del templo de Ocuituco consiste en un tramo de bóveda con relleno en su extradós, muros que tienen la misma altura y diferente espesor y solamente uno de éstos está reforzado con un contrafuerte. Adicionalmente, esta sección de nave incluye un arco de medio punto que es sostenido por columnas que tienen las mismas dimensiones de ambos lados. En la figura 27 se muestra la geometría de la sección de nave de Ocuituco.



(c) Tramo seleccionado de la nave del templo, tomado de [Saldaña, 2014]

Figura 27: Geometría de la sección de nave del templo de Ocuituco

La sección de nave del templo de Tetela consiste en un tramo de bóveda, un arco de medio punto que es soportado por columnas de mismas dimensiones. Los muros tienen la misma altura, pero diferente espesor, adosado a uno de éstos se encuentra un contrafuerte de tipo Botarel, ver figura 28.



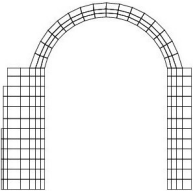
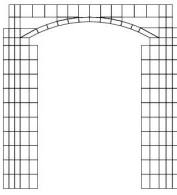
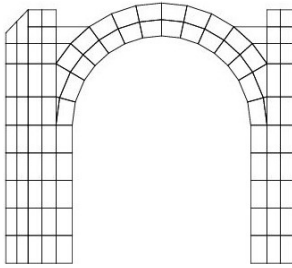
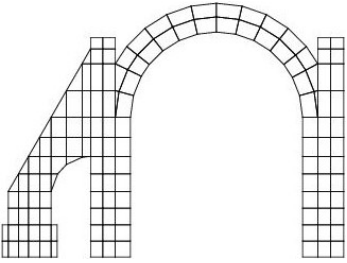
(c) Tramo seleccionado de la nave del templo, tomado de [Zapata, 2014]

Figura 28: Geometría de la sección de nave del templo de Tetela

3.4. Modelos de análisis

Después de haber definido las secciones de nave de los templos coloniales de estudio, se elaboraron cuatro modelos numéricos en el programa **RIGID**, uno por cada iglesia. En la tabla 1 se muestran los modelos a una escala relativa, el número total de nodos, elementos y grados de libertad que componen a cada uno de los modelos.

Tabla 1: Modelos numéricos

San Bartolomé	Nativitas	Ocuituco	Tetela
			
Nodos: 252	Nodos: 208	Nodos: 133	Nodos: 184
Elementos: 172	Elementos: 152	Elementos: 100	Elementos: 138
Grados de libertad: 516	Grados de libertad: 456	Grados de libertad: 300	Grados de libertad: 414
Nota: la escala de los modelos es relativa			

De acuerdo con García [2007], la mampostería encontrada en la mayoría de los elementos estructurales de las iglesias coloniales mexicanas, se puede considerar como una mampostería compuesta principalmente por mortero de cal, tezontle y en menor proporción piedra de mayor densidad. Por tanto, se eligió este tipo de mampostería para la mayoría de los elementos estructurales de las secciones de nave, exceptuando las bóvedas de San Bartolomé y Nativitas, que como se señaló anteriormente son de concreto. El relleno de las cubiertas se consideró como un material compuesto principalmente de suelo fino, con poco contenido de gravas.

Cabe señalar que se escogió un módulo de elasticidad de la mampostería del templo de San Bartolomé, para reproducir lo más cercano a la realidad el comportamiento mecánico de la mampostería de este tipo de estructuras. Dicho parámetro fue obtenido de las pruebas de vibración ambiental, realizadas por Robles [2012]. En la tabla 2 se muestran las características mecánicas de los materiales que fueron usados para todos los modelos.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de los materiales

Parámetro	Mampostería	Concreto	Relleno
Densidad de masa [kg/m ³]	1600.00	2400.00	1300.00
Módulo de elasticidad [MPa]	351.69	20734.36	8.50
Relación de Poisson [1]	0.20	0.30	0.33
Resistencia a compresión [MPa]	1.47	24.53	14.72
Resistencia a tensión [MPa]	0.07	2.33	1.47
Módulo de cortante [MPa]	146.54	7974.75	3.20
Cohesión [MPa]	0.18	6.38	1.47
Ángulo de fricción interna [grados]	25.00	35.00	25.00

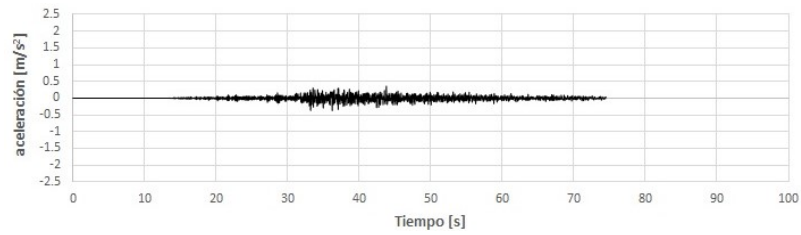
3.5. Registros sísmicos utilizados

De acuerdo con Peña [2010], el comportamiento sísmico de una estructura varía dependiendo las características de los sismos, como son el contenido de frecuencias, duración de la señal, valor máximo de aceleración, entre otras. Por consiguiente, resulta necesario realizar análisis paramétricos con las naves seleccionadas, donde el parámetro a variar son los sismos.

Se escogieron cinco registros sísmicos reales para realizar los análisis paramétricos, las características de éstos se encuentran en la figura 29. Se incluyeron los sismos ocurridos en Oaxaca y Puebla en junio y septiembre de 1999, pues las características dinámicas de éstos generaron daños significativos en varios edificios de mampostería. Para estos dos sismos se escogieron registros sísmicos cercanos y lejanos al epicentro. También se escogió un sismo de 2013 suscitado en Guerrero y registrado en la estación de la Facultad de Estudios Superiores Acatlán, en el municipio de Naucalpan, Estado de México.

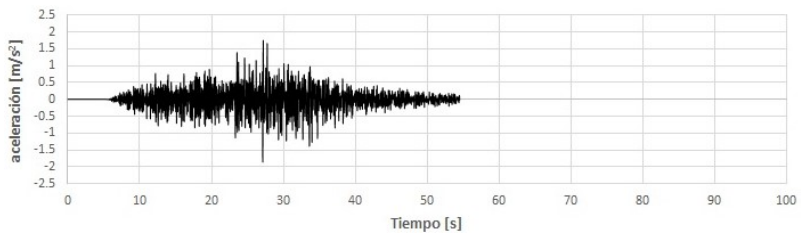
Acelerograma 1: registrado en Oaxaca con epicentro en Puebla

Fecha: 15-06-99 Duración: 75 [s] Magnitud: 6.5 Aceleración máxima: 0.38 [m/s²]



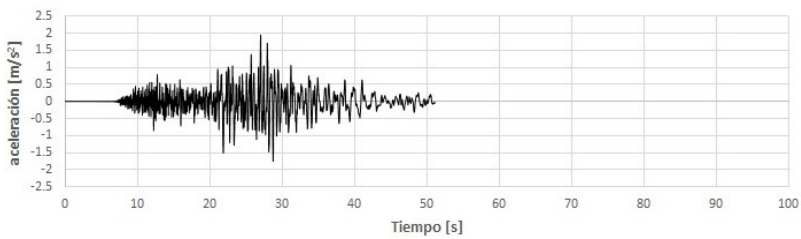
Acelerograma 2: registrado en Oaxaca con epicentro en Oaxaca

Fecha: 30-09-99 Duración: 55 [s] Magnitud: 7.5 Aceleración máxima: 1.86 [m/s²]



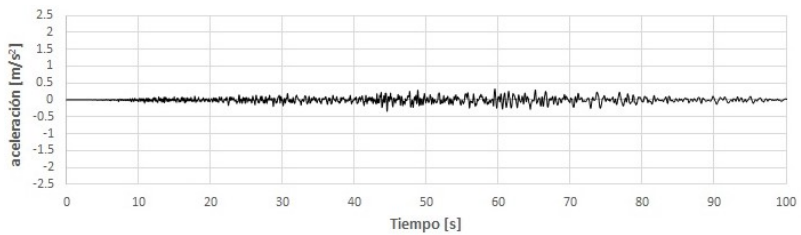
Acelerograma 3: registrado en Ciudad Serdán con epicentro en Puebla

Fecha: 15-06-99 Duración: 52 [s] Magnitud: 6.5 Aceleración máxima: 1.95 [m/s²]



Acelerograma 4: registrado en Ciudad Serdán con epicentro en Oaxaca

Fecha: 30-09-99 Duración: 100 [s] Magnitud: 7.5 Aceleración máxima: 0.34 [m/s²]



Acelerograma 5: registrado en Naucalpan con epicentro en Guerrero

Fecha: 16-06-13 Duración: 74 [s] Magnitud: 5.8 Aceleración máxima: 0.10 [m/s²]

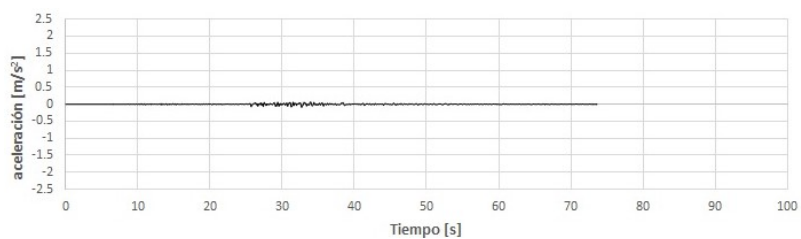


Figura 29: Características de los registros sísmicos utilizados

Capítulo 4

Resultados

Al inicio de este capítulo se presenta la validación de resultados, la cual consiste en dos comprobaciones para detectar posibles errores en la elaboración de los modelos numéricos y una comparación entre el método de los elementos rígidos y el de elementos finitos, para corroborar que la metodología empleada es válida. Posteriormente se incluyen los resultados de los análisis modales de todas las naves de estudio. Al final se muestran los resultados obtenidos de los análisis dinámicos no lineales para cada una de las naves.

Para evaluar el comportamiento sísmico de las naves, se consideraron varios parámetros con los cuales se determinaron las condiciones más desfavorables durante los análisis. Estos parámetros son: desplazamientos, cortante basal y la energía histerética. De acuerdo con Meza [2013] la energía histerética es un buen indicador para cuantificar las incursiones al rango no lineal de una estructura, es decir, cuando ésta se empieza a deformar y a sufrir daños permanentes. Con la energía histerética se puede cuantificar la energía sísmica que disipa una estructura en forma de daños. Por otra parte, se obtuvieron los diagramas de esfuerzos, deformada dinámica y los mapas de daños para poder determinar cuales son las zonas más vulnerables y evaluar si se presentan mecanismos de colapso en las naves.

4.1. Validación de resultados

4.1.1. Bajada de cargas

Resulta sencillo hacer una bajada de cargas y comparar estos resultados con el peso total registrado en el programa de análisis estructural Rigid, para así corroborar que los modelos numéricos no presenten errores en el mallado. En la tabla 3 se muestran estas comparaciones. Todos los modelos presentaron errores menores al 1 %, por tanto, se consideran despreciables. Estos errores se deben a que la geometría cuadrilátera de los elementos rígidos no toma en cuenta la geometría exacta de varios elementos estructurales de las naves, en especial los que son abovedados.

Tabla 3: Comparación del peso propio

Modelo	Bajada de cargas [kN]	Peso registrado en Rigid [kN]	Error [%]
San Bartolomé	1131	1130	0.0 %
Nativitas	1303	1308	0.4 %
Ocuituco	4107	4120	0.3 %
Tetela del Volcán	6139	6150	0.2 %

4.1.2. Factor de seguridad por peso propio

Se calculó el factor de seguridad por peso propio para cada una de las naves de estudio, el cual es el cociente entre la resistencia máxima a compresión de la mampostería y el esfuerzo de compresión promedio en la base. Este último se obtiene dividiendo el peso total de la sección de nave, entre su área de desplante.

Los factores de seguridad mostrados en la tabla 4 tienen un rango de 5.7 a 13.6. De acuerdo con García y Meli [2009] los esfuerzos verticales promedios en la base de las iglesias coloniales mexicanas suelen ser pequeños en comparación con los resistencia máxima a compresión de la mampostería. Cabe recordar que estas estructuras fueron diseñadas por gravedad, por lo que difícilmente ocurren fallas por compresión.

Las iglesias del Estado de Morelos tienen factores de seguridad más pequeños que las del Estado de México. Esto se debe a que las primeras son más altas, tienen bóvedas y arcos de mampostería de grandes espesores, por consiguiente, son más pesadas y se generan mayores esfuerzos de compresión en la base de sus muros, columnas y contrafuertes.

Tabla 4: Factor de seguridad por peso propio

Modelo	Esfuerzo de compresión promedio en la base [MPa]	Resistencia de la mampostería a compresión [MPa]	Factor de seguridad por peso propio
San Bartolomé	0.12	1.5	12.6
Nativitas	0.11	1.5	13.6
Ocuituco	0.26	1.5	5.7
Tetela del Volcán	0.19	1.5	7.7

4.1.3. Comparación de resultados con el método de elementos finitos

Con el fin de validar la metodología empleada, se realizaron algunas comparaciones con el método de elementos finitos. Para ello se elaboró el mismo modelo de la nave de San Bartolomé con el programa de análisis estructural SAP 2000, ver figura 30. Con los dos modelos numéricos de San Bartolomé se realizaron análisis por peso propio y modales. Se compararon los desplazamientos y las primeras seis formas modales obtenidas de estos análisis. Cabe señalar que con ambas metodologías únicamente se estudió el comportamiento estructural en el plano.

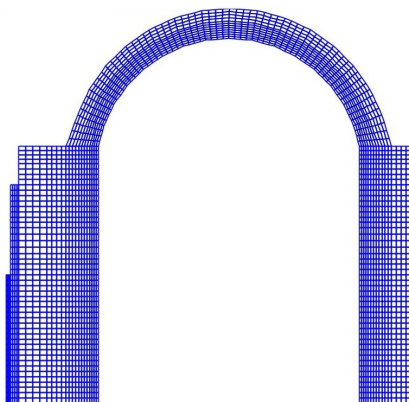


Figura 30: Modelo de elementos finitos de la sección de nave de San Bartolomé

En la figura 31 se muestran los puntos en donde se obtuvieron los desplazamientos en la nave de San Bartolomé. En las tablas 5 y 6 se encuentran los desplazamientos horizontales y verticales, respectivamente. El error mostrado en estas tablas considera como referencia los resultados obtenidos con el método de elementos finitos. En el caso de los desplazamientos horizontales hay errores de poco más del 50% y para los verticales de menos del 20%. A pesar de que los errores en los desplazamientos horizontales son grandes, la variación de éstos presenta un rango de 0.3 a 1.6 mm. Tomando en cuenta que el método de elementos rígidos es un método simplificado y que las dimensiones de los elementos estructurales de las naves son muy grandes, en comparación con los desplazamientos resultantes, se considera que los errores obtenidos son aceptables, con ambos métodos se obtienen desplazamientos muy similares.

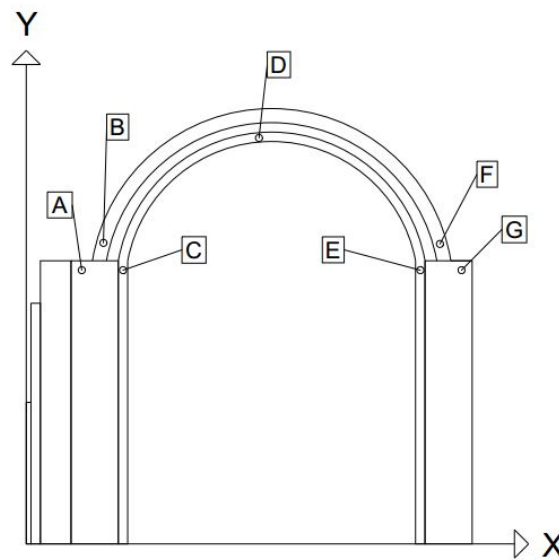


Figura 31: Puntos donde se obtuvieron los desplazamientos por peso propio en los dos modelos de San Bartolomé

Tabla 5: Comparación de desplazamientos horizontales con el M.E.F. y el M.E.R.

Punto	Método de los elementos finitos	Método de los elementos rígidos	Error [%]
	S_X [mm]	S_X [mm]	
A	-0.7	-0.3	57
B	-0.6	-0.3	50
C	-0.6	-0.3	50
D	2.2	1.4	36
E	5.0	3.4	32
F	4.9	3.3	33
G	5.1	3.3	35

Abreviatura: S_X : desplazamientos horizontales

Tabla 6: Comparación de desplazamientos verticales con el M.E.F. y el M.E.R.

Punto	Método de los elementos finitos	Método de los elementos rígidos	Error [%]
	S_Y [mm]	S_Y [mm]	
A	-1.1	-1.0	9
B	-1.1	-1.3	-18
C	-1.3	-1.4	-8
D	-4.3	-3.6	16
E	-1.1	-1.3	-18
F	-1.1	-1.3	-18
G	-1.4	-1.3	7

Abreviatura: S_Y : desplazamientos verticales

Los análisis modales realizados con ambas metodologías mostraron resultados muy similares. En la figura 7 se muestran las primeras seis formas modales, en ella se puede apreciar que los modos de vibrar obtenidos con ambas metodologías son los mismos. Por ejemplo, en el primer modo con los dos modelos de San Bartolomé, se observa como los muros vibran lateralmente. En la tabla 8 se muestra la comparación de los periodos obtenidos. En esta comparación también se tomó como referencia los resultados del método de elementos finitos. El rango de los errores es de 0% a 23%, que se considera aceptable ya que las formas modales son las mismas y los períodos varían por algunas centésimas de segundo.

Tabla 7: Comparación de los resultados de los análisis modales realizados con el M.E.F. y el M.E.R.

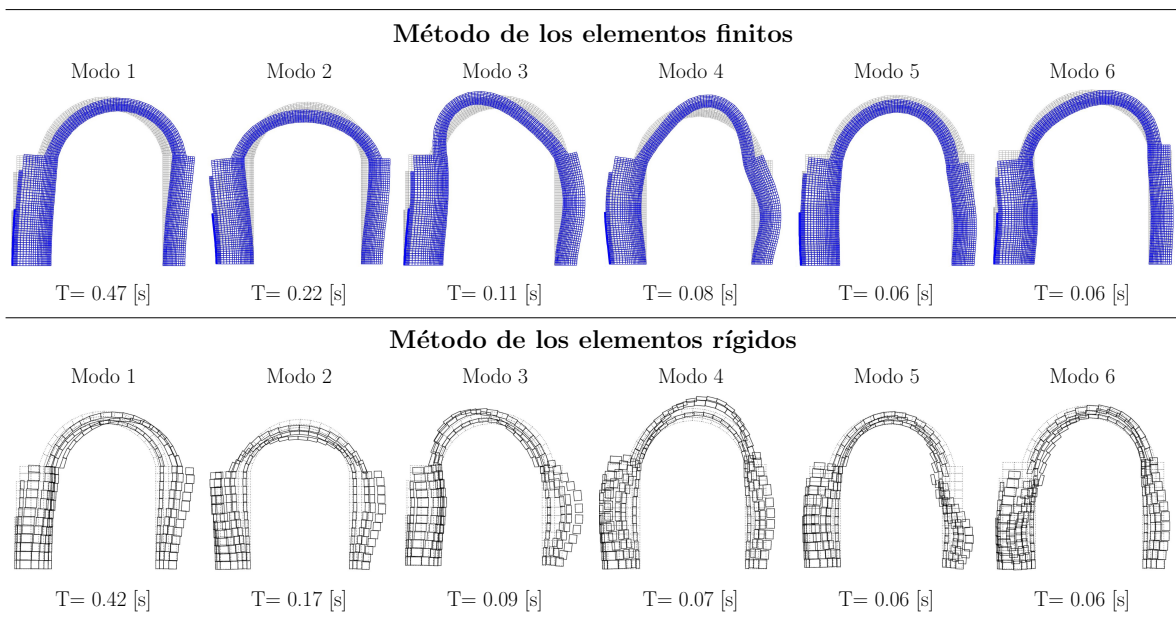


Tabla 8: Comparación de periodos con el M.E.F. y el M.E.R.

Modo	Método de los elementos finitos	Método de los elementos rígidos	Error [%]
	Periodo [s]	Periodo [s]	
1	0.47	0.42	11 %
2	0.22	0.17	23 %
3	0.11	0.09	18 %
4	0.08	0.07	13 %
5	0.06	0.06	0 %
6	0.06	0.06	0 %

4.2. Análisis modales

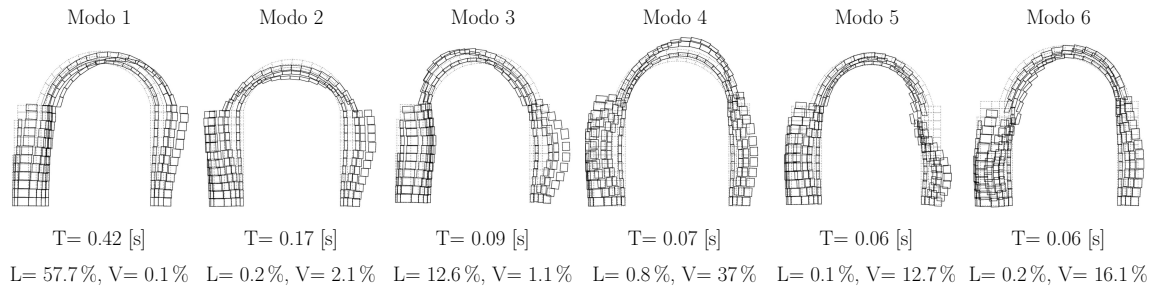
Para obtener el 90 % de participación de masa en la dirección horizontal y vertical, fue necesario calcular por lo menos las primeras 100 formas modales de cada una de las naves. Sin embargo, las primeras seis formas modales son las más representativas, ya que con éstas se alcanza a obtener aproximadamente el 70 % de participación de masa en ambas direcciones, ver figura 32.

El primer modo lateral se presenta en todas las naves en la primer forma modal, en la cual los muros vibran fuera de su plano. El segundo modo lateral para San Bartolomé, Nativitas y Ocuituco aparece hasta la tercera forma modal y para Tetela, en la segunda forma modal. En éstas se aprecia como los muros vibran también lateralmente, pero en sentido opuesto.

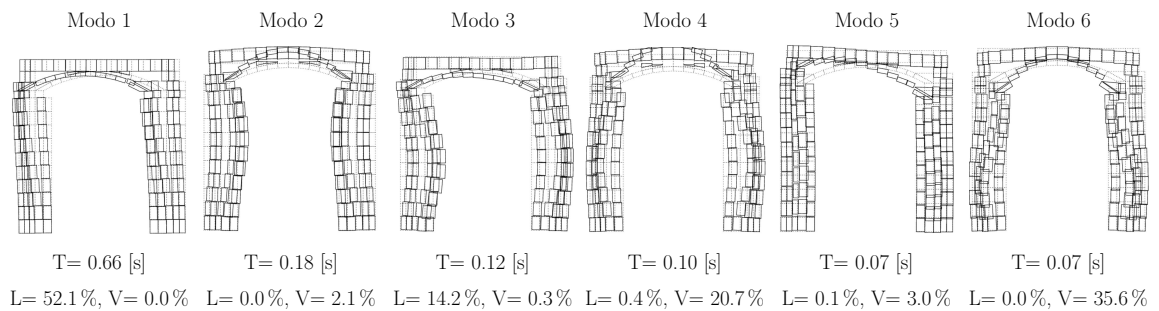
El primer modo vertical coincide con la segunda forma modal para San Bartolomé, Nativitas y Ocuituco y para Tetela coincide con la cuarta forma modal. Este modo vertical refleja la vibración ascendente y descendente de la cubierta. Para todos los modelos, las últimas formas modales mostradas corresponden con modos verticales, en donde los muros vibran verticalmente.

De los resultados de las formas modales se deduce que todos los modelos son muy flexibles en la dirección lateral y muy rígidos en la dirección vertical, lo que se atribuye a las características estructurales de los muros. Adicionalmente, con estos resultados se observó que los modelos del Estado de Morelos son significativamente más flexibles que los del Estado de México.

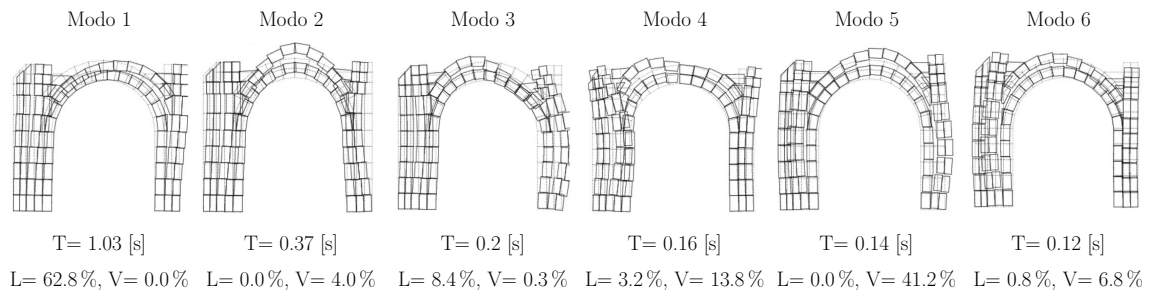
San Bartolomé



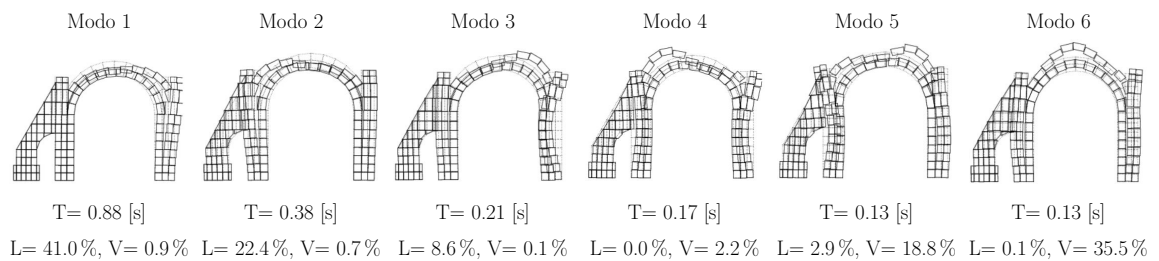
Nativitas



Ocuituco



Tetela



Abreviaturas: T: Periodo, L: masa modal en dirección lateral y V: masa modal en dirección vertical

Figura 32: Formas modales de todos los modelos numéricos

4.3. Análisis dinámicos no lineales con San Bartolomé

4.3.1. Desplazamientos

En la figura 33 se muestran los puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de todos los análisis realizados con el modelo de San Bartolomé, así como la convención utilizada de ejes coordenados. La historia de desplazamientos horizontales en los muros (puntos MI y MD) muestra que ambos se desplazan de manera similar, pero el muro que cuenta con un contrafuerte adosado presenta menores desplazamientos que el opuesto, ver figuras 34 y 35. La clave del arco (punto C) exhibe una tendencia a descender al final de la aplicación de los sismos, lo que se atribuye a la flexión fuera del plano de los muros y a una reconfiguración del arco para permanecer en equilibrio, ver figura 36. Esto se constata en la tabla 9, en donde los instantes cuando se presenta el mayor desplazamiento horizontal del muro sin contrafuerte, en la misma dirección de su respectivo empuje de cubierta, y el mayor descenso de la clave del arco, son coincidentes.

De los resultados anteriores se constata que los sismos con mayores aceleraciones, sismos 2 y 3, ocasionaron los mayores desplazamientos. Además, únicamente con estos sismos se apreciaron desplazamientos residuales; aunque, éstos son menores a 1 mm y se puede considerar que la estructura regresa a su posición inicial de equilibrio.

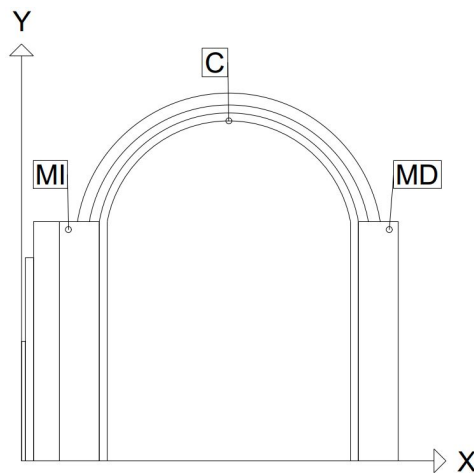


Figura 33: Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con San Bartolomé

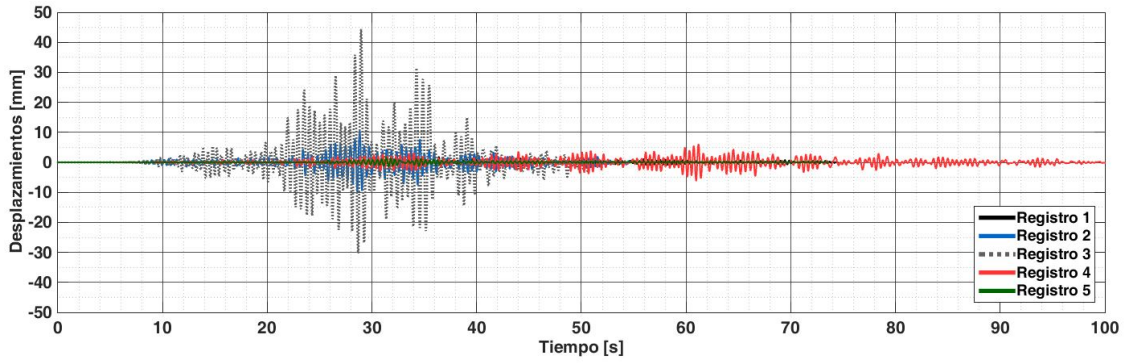


Figura 34: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con San Bartolomé

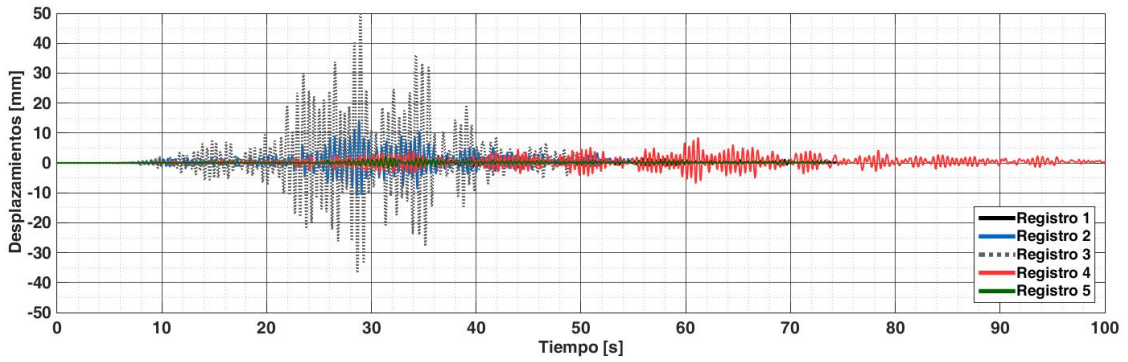


Figura 35: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con San Bartolomé

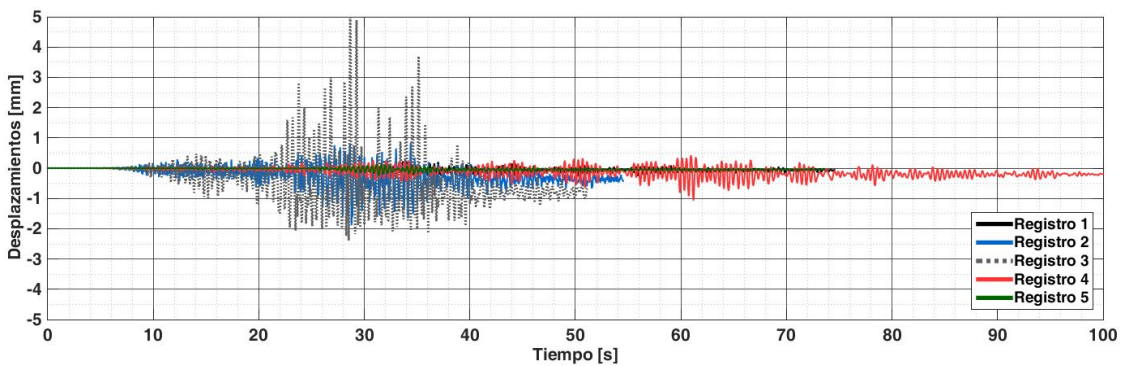


Figura 36: Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con San Bartolomé

Tabla 9: Desplazamientos máximos en los análisis con San Bartolomé

Registro sísmico	Punto MI		Punto MD		Punto C	
	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_Y máximo [mm]	tiempo [s]
1	-1.6	34.0	2.5	34.2	-0.4	34.2
2	-10.1	28.6	14.4	28.8	-1.9	28.8
3	-30.4	28.7	50.3	29.0	-2.4	28.5
4	-6.2	61.0	8.4	61.2	-1.1	61.2
5	-1.4	31.6	2.1	31.4	-0.2	31.4

Abreviaturas: S_X : desplazamientos horizontales y S_Y : desplazamientos verticales

4.3.2. Cortante basal

En la figura 37 se exhibe la variación del cortante basal de la nave de San Bartolomé. Los sismos 2 y 3 presentaron las mayores solicitaciones a esta estructura, seguidas del sismo 4. Por el contrario, los registros 1 y 5 tienen coeficientes sísmicos muy pequeños, en comparación con los de los otros tres. En la tabla 10, se muestra los instantes donde ocurren los cortantes basales máximos, su respectivo instante y coeficiente sísmico.

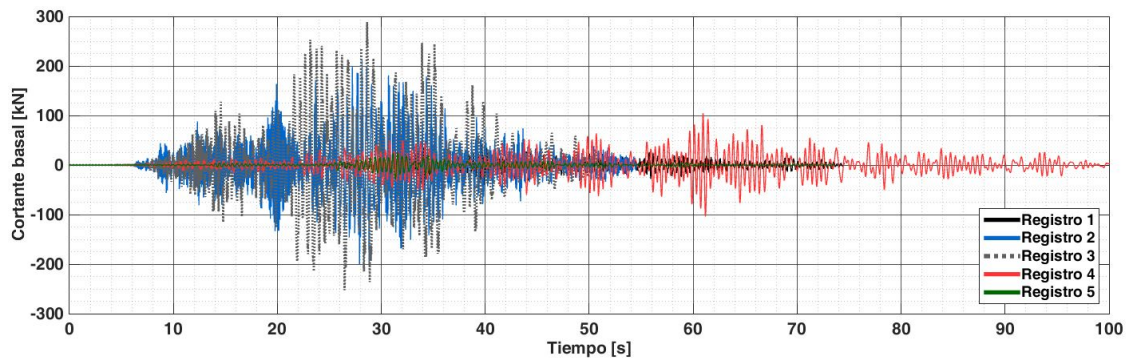


Figura 37: Variación del cortante basal de San Bartolomé, a lo largo de todos los análisis

Tabla 10: Cortantes basales máximos en los análisis con San Bartolomé

Registro sísmico	Cortante basal máximo [kN]	Coefficiente sísmico	Tiempo [s]
1	42.3	0.04	39.7
2	212.7	0.19	28.1
3	288.6	0.26	28.6
4	104.3	0.09	61.0
5	28.4	0.03	31.4

4.3.3. Energía histerética

En la figura 38 se muestra la energía sísmica que disipa la nave de San Bartolomé en forma de daños. Para los análisis con los registros sísmicos 2 y 3, en el lapso de los 20 a los 30 segundos, se acumula la mayor parte de los daños. Este intervalo corresponde a una parte de la fase intensa de estos dos sismos y es también donde se presentan los mayores desplazamientos y las mayores fuerzas cortantes en la base de la estructura. Obsérvese que después de los 30 segundos ya no se acumulan más daños. Por su parte, con los registros sísmicos 1, 4 y 5, la energía histerética permaneció prácticamente paralela al eje de las abscisas y no alcanzó valores considerables, por lo que los daños deben ser muy pequeños.

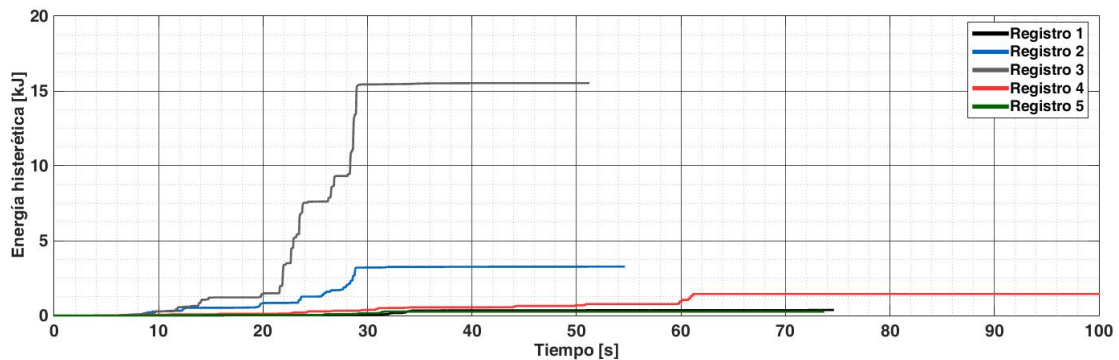


Figura 38: Variación de la energía histerética con San Bartolomé, a lo largo de todos los análisis

4.3.4. Diagramas de esfuerzos y daños

Con base en los resultados de los parámetros que se mostraron anteriormente y tomando en cuenta los mecanismos de colapso descritos al final del primer capítulo, se consideró que el instante más crítico para la nave es cuando se presenta el mayor desplazamiento horizontal del muro más débil, es decir el que no cuenta con un contrafuerte. Por tanto, los diagramas de esfuerzos, así como su deformada dinámica correspondiente, fueron obtenidos en este instante crítico. Adicionalmente se muestra el mapa de daños a tensión que se generaron al final de cada análisis. En la figura 39 se muestran estos resultados. Los esfuerzos de tensión quedan representados por el color rojo y lo de compresión por el color azul. En los mapas de daños el color blanco representa material sano y el color verde va variando en intensidad, lo que representa mayores degradaciones del material.

La flexión de los muros de San Bartolomé, debida a las fuerzas sísmicas, induce concentraciones de esfuerzos de tensión en la base de las columnas y del contrafuerte, en los arranques de los elementos estructurales abovedados, así como en algunas zonas de los muros. Los sismos 1, 4 y 5 exhiben pocos daños, únicamente se formaron pequeñas grietas en los arranques de la costilla y en la base de una de las columnas. Por su parte, los sismos 2 y 3 presentaron daños significativos en forma de grietas, en especial en los arranques de la cubierta, en la parte inferior del contrafuerte y de las columnas. Sin embargo, la estructura resistió estos sismos, ya que los muros regresaron prácticamente a su posición inicial, lo que indica que las grietas debieron haberse cerrado. El registro sísmico 3 fue el único que generó un mecanismo de colapso, éste se presenta en el arco, ya que se forman dos articulaciones en sus columnas y otras dos en sus arranques.

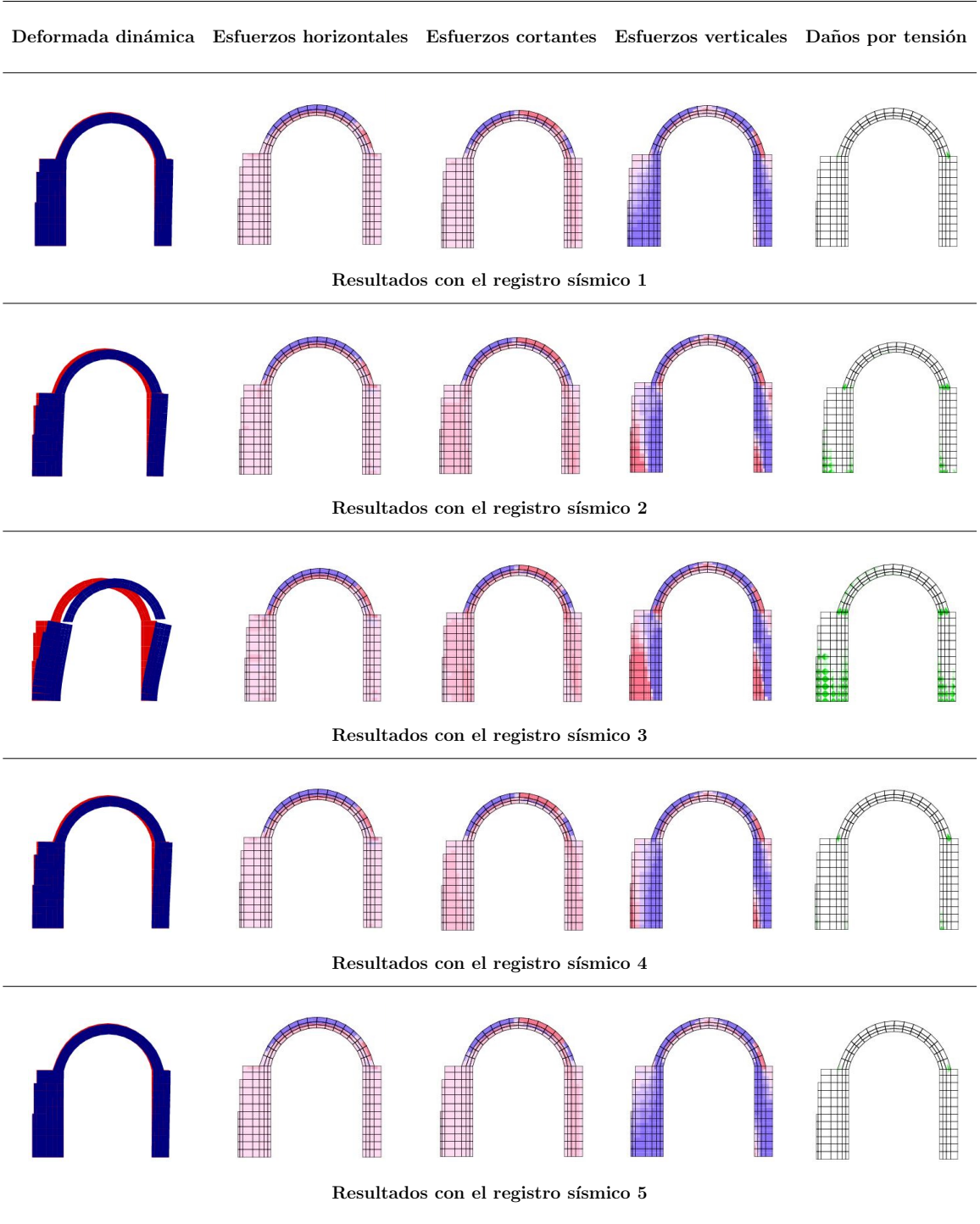


Figura 39: Instantes más críticos durante los análisis con San Bartolomé y mapa de daños por tensión

4.4. Análisis dinámicos no lineales con Nativitas

4.4.1. Desplazamientos

Los desplazamientos de Nativitas fueron obtenidos en los puntos mostrados en la figura 40. Los muros (puntos MI y MD) se desplazan horizontalmente de manera simétrica, esto se debe a que ambos están reforzados por contrafuertes adosados, ver figuras 41 y 42. La clave de la bóveda (punto C) se desplaza primordialmente hacia abajo durante los análisis, lo que se atribuye a la contratrabe que impide que la clave suba, ver figura 43.

Los registros sísmicos 2 y 3 fueron los que causaron los mayores desplazamientos. La clave de la bóveda quedó desplazada verticalmente poco más de 1 mm al final de la aplicación de estos sismos. Sin embargo, los muros regresan prácticamente a su posición inicial, por lo que no se presenta inestabilidad en la nave. En la tabla 11 se muestran los desplazamientos máximos durante los análisis realizados.

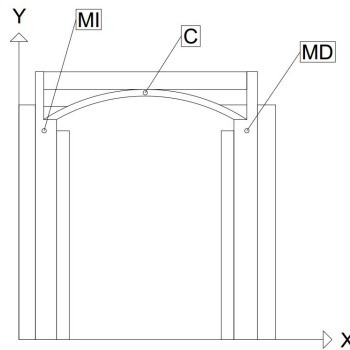


Figura 40: Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con Nativitas

Tabla 11: Desplazamientos máximos en los análisis con Nativitas

Registro sísmico	Punto MI		Punto MD		Punto C	
	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_Y máximo [mm]	tiempo [s]
1	-2.5	37.0	2.0	54.9	-0.4	37.0
2	-18.1	30.9	17.4	30.6	-3.3	35.3
3	-37.6	23.4	36.6	22.1	-2.5	28.7
4	-15.0	62.4	16.1	62.8	-1.2	62.4
5	-3.8	33.2	3.8	33.6	-0.3	33.3

Abreviaturas: S_X : desplazamientos horizontales y S_Y : desplazamientos verticales

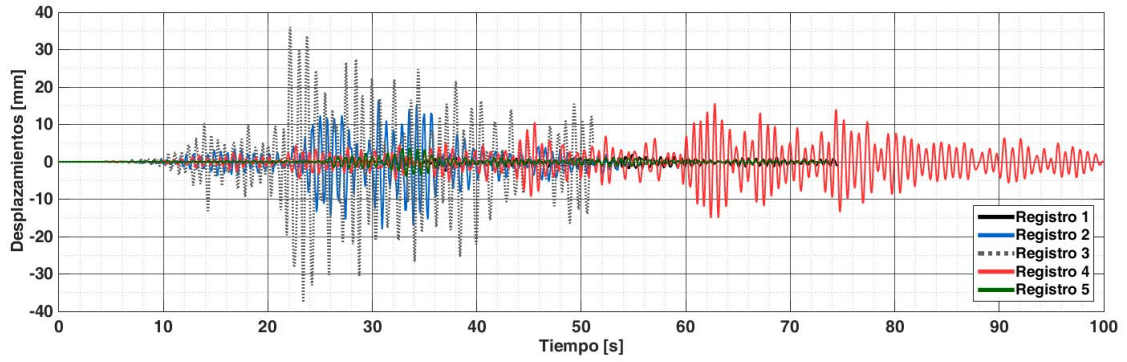


Figura 41: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con Nativitas

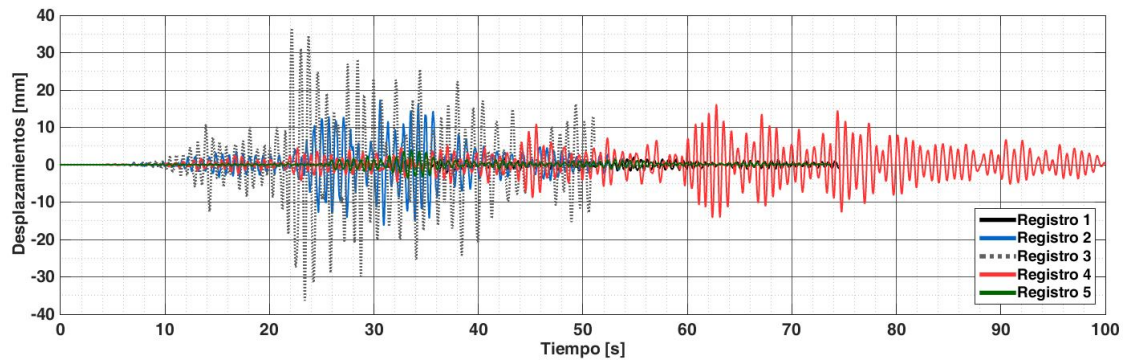


Figura 42: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con Nativitas

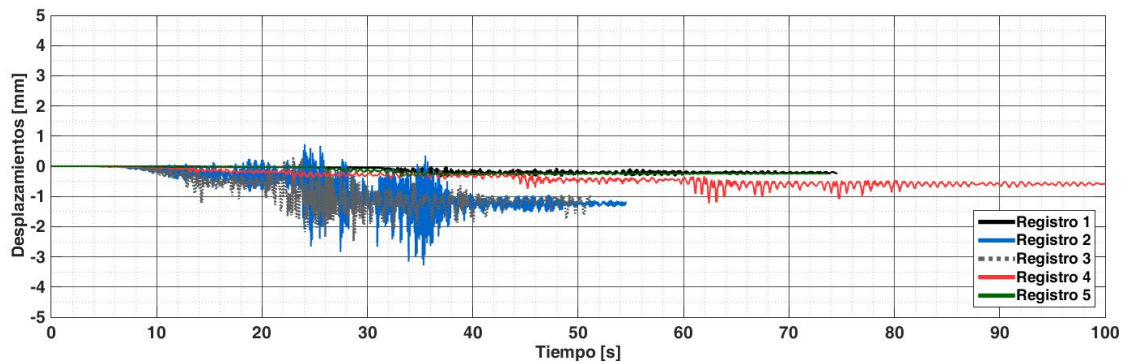


Figura 43: Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con Nativitas

4.4.2. Cortante basal

Los resultados de los análisis con Nativitas mostraron que el registro sísmico 2, fue el que mayores solicitaciones le produjo a la nave, seguido del registro 3 y 4. Esto se muestra en la figura 44, en donde también se puede ver que los otro dos registros fueron lo que menores solicitaciones produjeron. En la tabla 12 se presentan los cortantes basales máximos, su respectivo coeficiente sísmico y el instante cuando éstos ocurren.

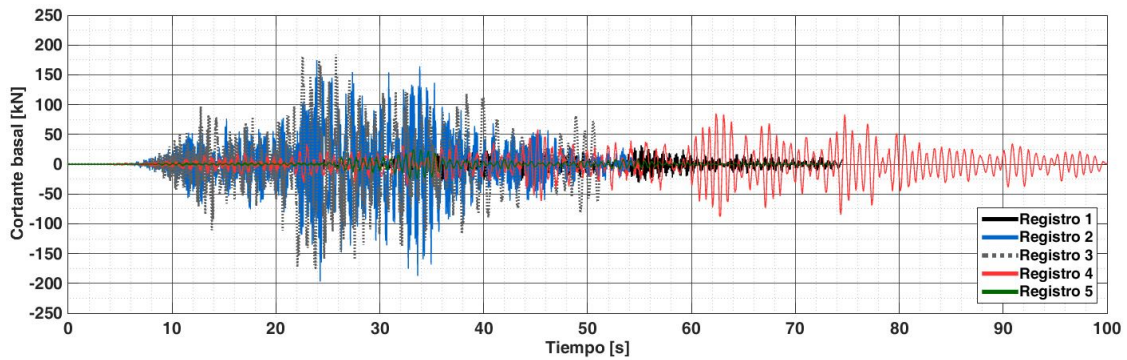


Figura 44: Variación del cortante basal de Nativitas, a lo largo de todos los análisis

Tabla 12: Cortantes basales máximos en los análisis con Nativitas

Registro sísmico	Cortante basal máximo [kN]	Coefficiente sísmico	Tiempo [s]
1	44.1	0.03	37.4
2	196.9	0.15	24.3
3	183.8	0.14	25.8
4	87.9	0.07	62.8
5	24.5	0.02	33.2

4.4.3. Energía histerética

En la figura 45 se aprecia que la energía histerética para los registros 1, 4 y 5 fue muy pequeña en comparación con la de los registros 2 y 3. Después de la fase intensa de los sismos 2 y 3, la nave de Nativitas siguió disipando energía sísmica en forma de daños y aún al final de éstos, se aprecia como hay una tendencia de la nave a seguirse dañando.

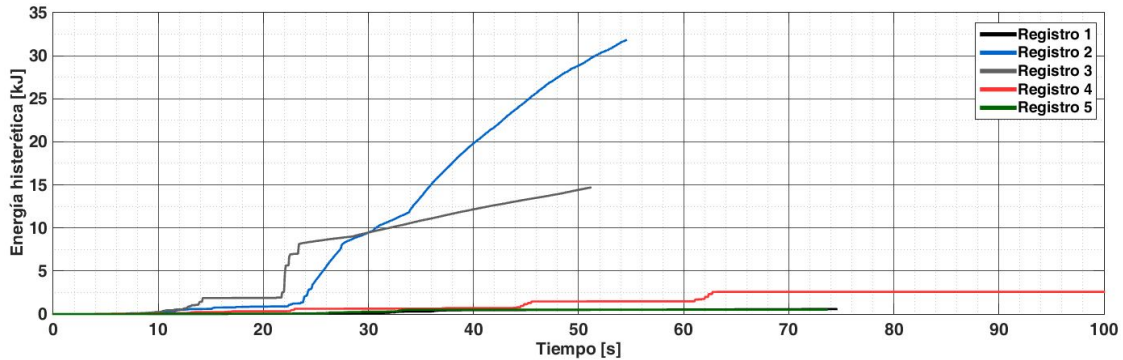


Figura 45: Variación de la energía histerética con Nativitas, a lo largo de todos los análisis

4.4.4. Diagramas de esfuerzos y daños

En la nave de Nativitas se observó que la flexión de los muros, provocada por las acciones sísmicas, indujo concentraciones de esfuerzos de tensión en la base de las columnas y de los contrafuertes, en los arranques de la bóveda, en varias partes de la contratrabe, así como en el pretil que sostiene a ésta. Al tener una nave con una geometría casi simétrica, se obtuvieron mapas de daños a tensión que exhiben también cierta simetría. Es importante destacar que aun para sismos con pequeñas aceleraciones de suelo, se presentaron grietas en los arranques de la bóveda, así como en la junta entre el pretil y la contratrabe. Los sismos 2 y 3 ocasionaron también daños en estas zonas, además de las grietas que alcanzaron casi la mitad de la altura de las columnas y de los contrafuertes. Al final de estos dos sismos la mayoría de las grietas debieron haberse cerrado, ya que los desplazamientos residuales en los muros son menores a 1 mm y por tanto, se consideran despreciables. Con ninguno de los registros sísmicos se presentaron mecanismos de colapso.

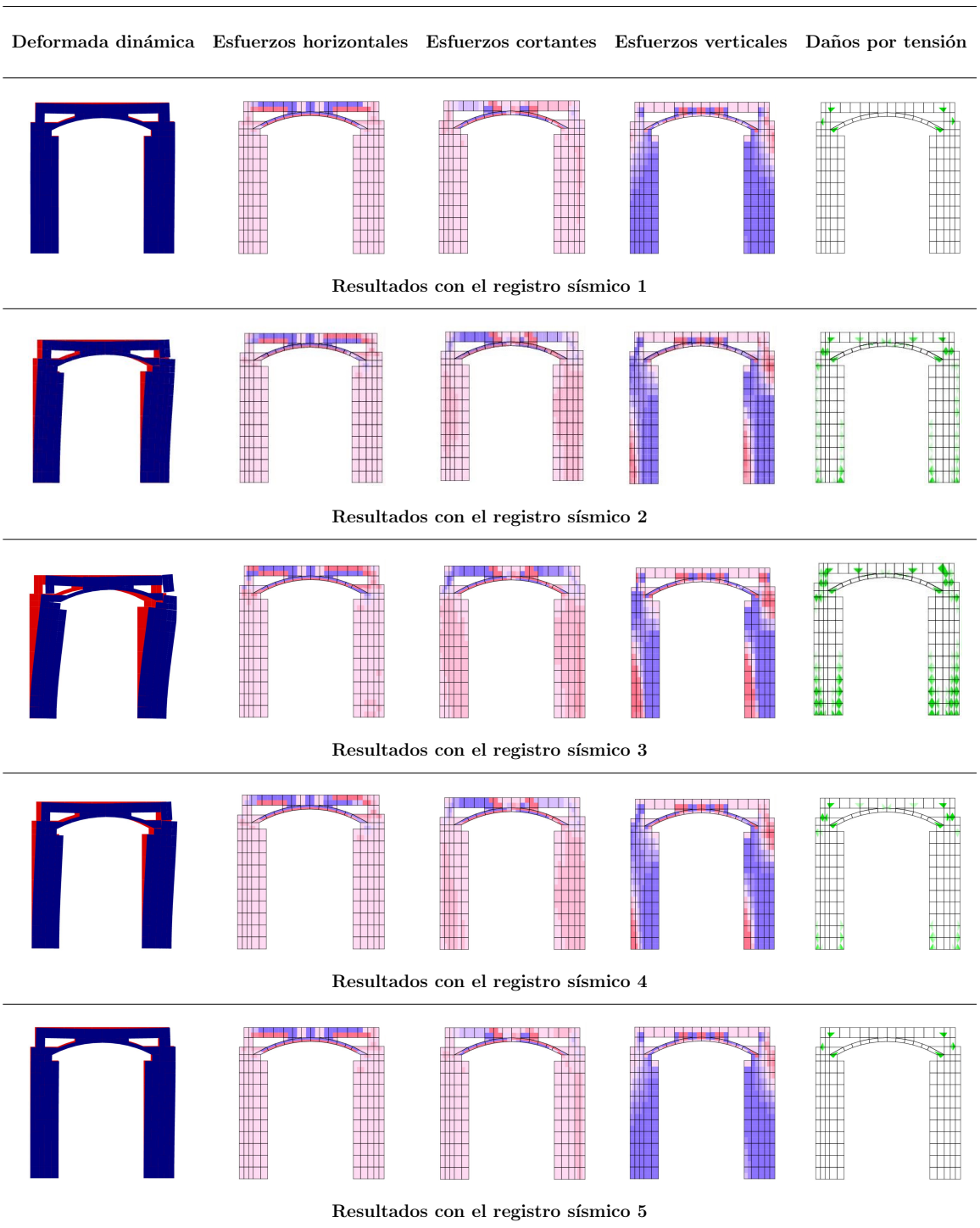


Figura 46: Instantes más críticos durante los análisis con Nativitas y mapa de daños por tensión

4.5. Análisis dinámicos no lineales con Ocuituco

4.5.1. Desplazamientos

Los desplazamientos a lo largo de los análisis con Ocuituco se calcularon en los puntos que se muestran en la figura 47. En las figuras 48 y 49 se encuentra la variación de los desplazamientos horizontales en los muros (puntos MI y MD), en éstas se observa como el muro que no está reforzado por un contrafuerte fue el que mayores desplazamientos tuvo y que al final de la mayoría de los análisis los muros regresaron a su posición inicial. La clave tendió a descender al final de la mayoría de los análisis, especialmente con el registro sísmico 3, con el que se alcanzaron desplazamientos residuales de aproximadamente 10 mm, ver figura 50. En la tabla 13 se encuentran los desplazamientos máximos para cada análisis de Ocuituco, así como el instante cuando éstos ocurren.

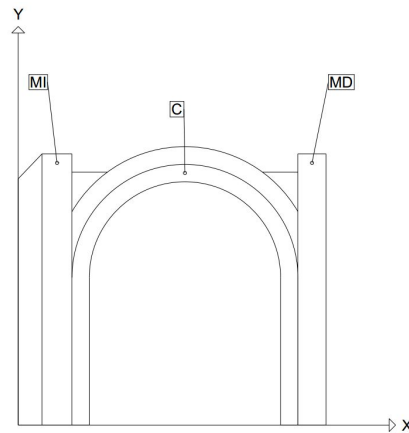


Figura 47: Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con Ocuituco

Tabla 13: Desplazamientos máximos en los análisis con Ocuituco

Registro sísmico	Punto MI		Punto MD		Punto C	
	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_Y máximo [mm]	tiempo [s]
1	-5.1	32.3	6.0	32.4	-1.3	43.9
2	-22.3	32.5	28.1	32.0	-7.3	33.1
3	-86.4	43.0	119.2	41.0	-29.3	43.7
4	-25.4	78.2	33.3	78.8	-6.4	77.7
5	-3.6	33.4	4.4	39.0	-0.6	39.0

Abreviaturas: S_X : desplazamientos horizontales y S_Y : desplazamientos verticales

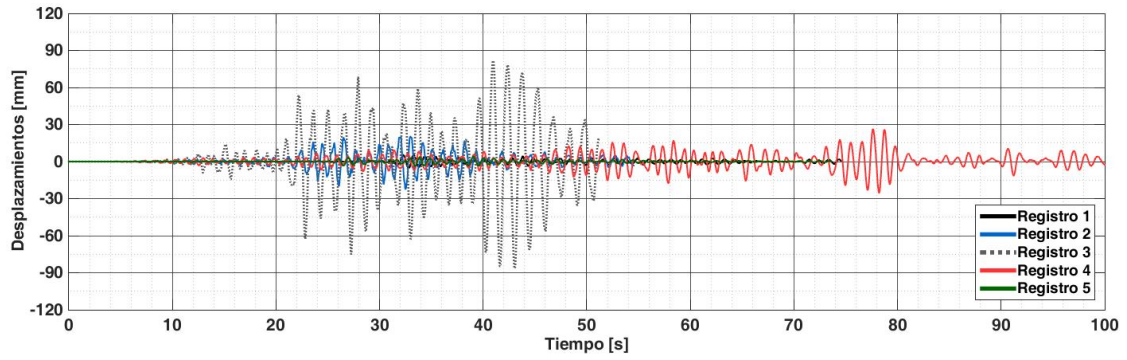


Figura 48: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con Ocuituco

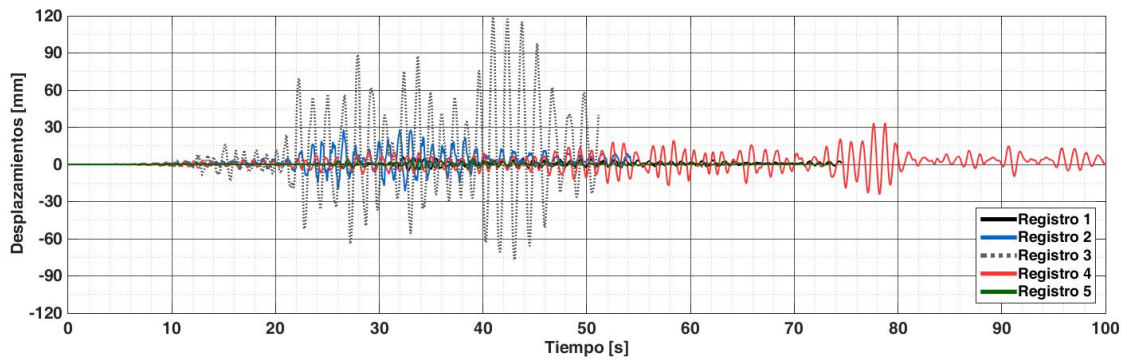


Figura 49: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con Ocuituco

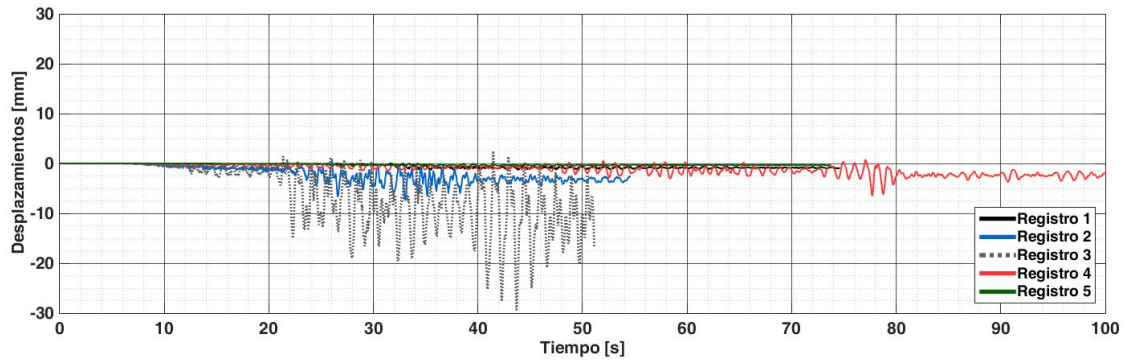


Figura 50: Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con Ocuituco

4.5.2. Cortante basal

En la figura 51 y en la tabla 14 se muestran los resultados del cortante basal correspondiente a los análisis realizados con Ocuituco. Los registros sísmicos 2, 3 y 4 fueron los que mayores solicitaciones le demandaron a la estructura. Por el contrario, los registros sísmico 1 y 5 generaron pocas solicitaciones a la nave, sus coeficientes sísmicos son 0.03 y 0.01, respectivamente.

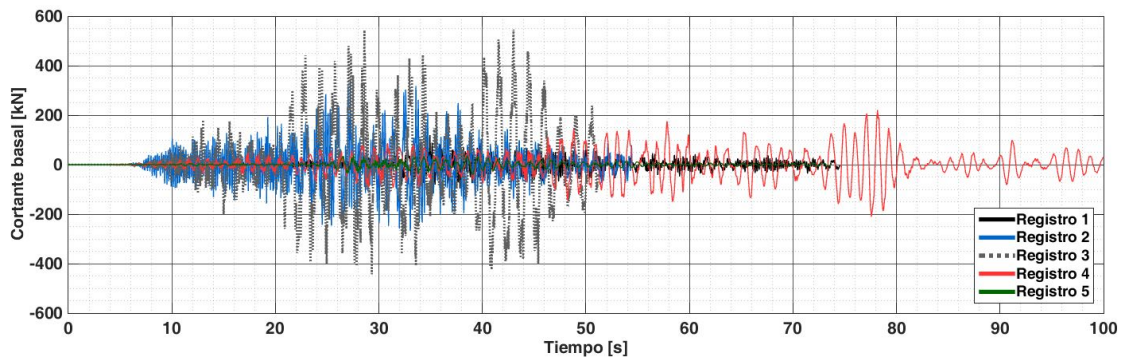


Figura 51: Variación del cortante basal de Ocuituco, a lo largo de todos los análisis

Tabla 14: Cortantes basales máximos en los análisis con Ocuituco

Registro sísmico	Cortante basal máximo [kN]	Coficiente sísmico	Tiempo [s]
1	119.6	0.03	34.9
2	344.6	0.08	27.5
3	545.8	0.13	43.0
4	220.7	0.05	78.2
5	38.5	0.01	39.1

4.5.3. Energía histerética

La nave de Ocuituco disipó una gran cantidad de energía sísmica en forma de daños con los sismos 2 y 3, como se distingue en la figura 52. En cambio para los demás sismos, la energía histerética fue menor. En el caso del sismo 2, durante el inicio de su fase intensa se acumulan daños y después de los 30 s, que es cuando ocurren los desplazamientos máximos en los muros y en la clave, los daños ya no aumentan. Con el sismo 3 es muy similar, después de que ocurren los desplazamientos máximos, la energía histerética permanece constante, por lo que la nave ya no sufre más daños.

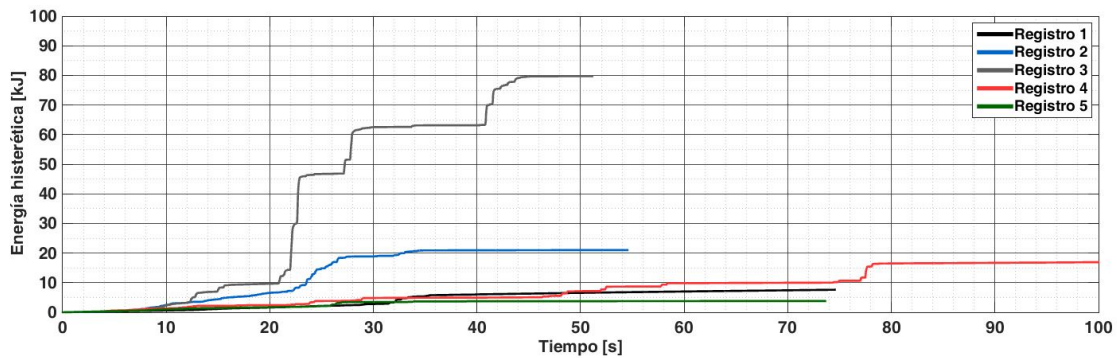


Figura 52: Variación de la energía histerética con Ocuituco, a lo largo de todos los análisis

4.5.4. Diagramas de esfuerzos y daños

Se presentan los diagramas de esfuerzos en los instantes cuando el muro sin contrafuerte presenta la mayor flexión y los mapas de daños a tensión al final de cada análisis, ver figura 53. En los diagramas de esfuerzos se aprecia que la flexión del muro sin contrafuerte, producida por las acciones sísmicas, indujo concentraciones de esfuerzos en varias partes de la nave que a su vez generaron daños en forma de grietas. En el caso de los sismos de pequeñas aceleraciones del terreno se presentaron daños en forma de grietas en la clave y en la base de una de las columnas; sin embargo, los desplazamientos residuales son muy cercanos a cero, por lo que estas grietas se cierran y no generan inestabilidad en la nave. Los sismos 2 y 3 agravaron las grietas ya mencionadas y generaron la aparición de otras, como son en los riñones del arco y de la bóveda, la parte inferior de los muros, el contrafuerte y las columnas. Con el sismo 3 se presenta un mecanismo de colapso en el arco de la nave, ya que se forman dos articulaciones en la base de las columnas y dos más en los riñones del arco.

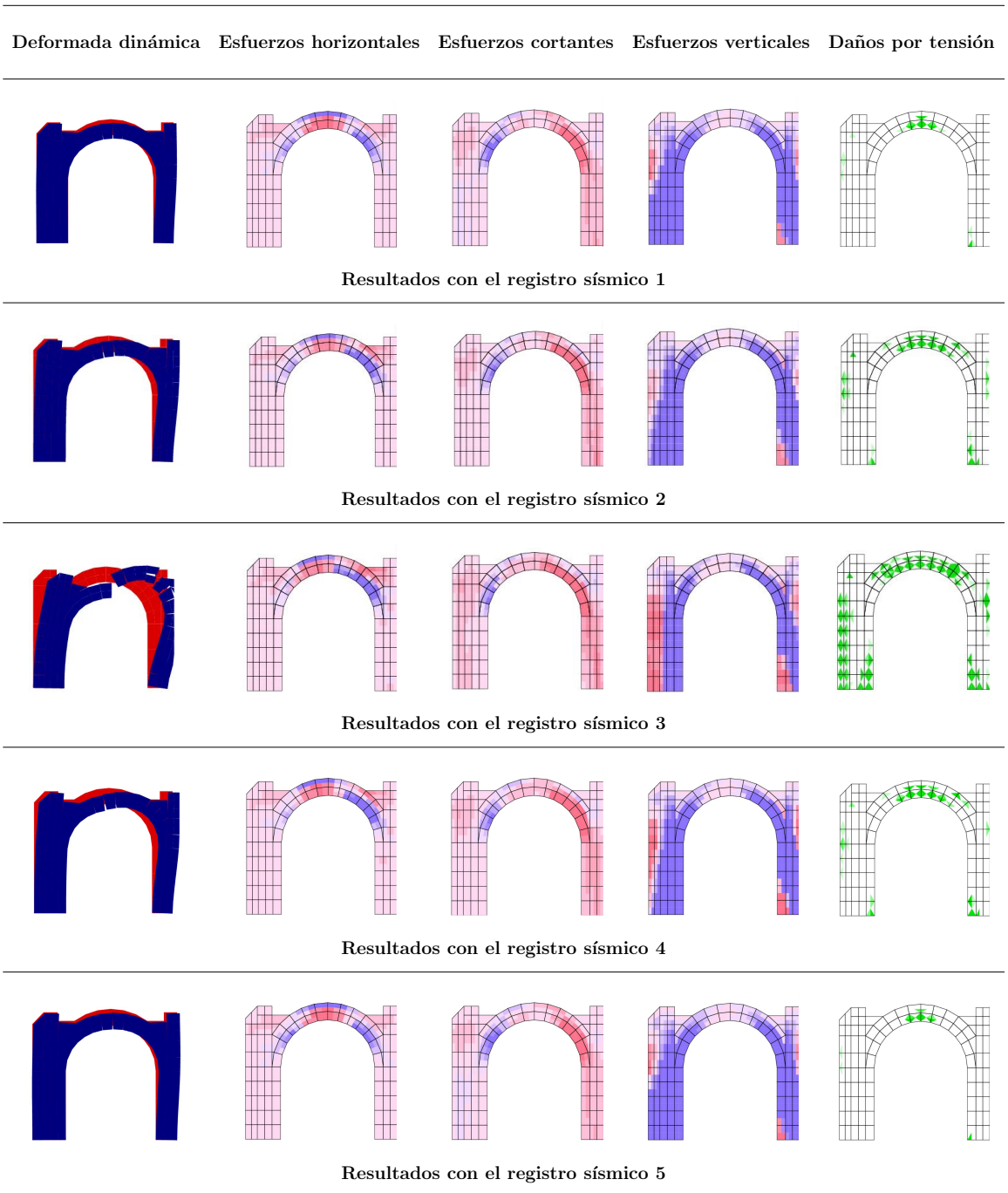


Figura 53: Instantes más críticos durante los análisis con Ocuituco y mapa de daños por tensión

4.6. Análisis dinámicos no lineales con Tetela

4.6.1. Desplazamientos

En la figura 54 se muestran los puntos donde fueron calculados los desplazamientos a lo largo de los análisis con el modelo de Tetela. El muro que no está reforzado por un contrafuerte (punto MD) presenta grandes desplazamientos horizontales y el contrario (punto MI) tiende a moverse en menor proporción, ver figuras 55, 56. La clave del arco (punto C) tiende a descender a lo largo de todos los análisis, ya que el arco se tiene que adaptar al movimiento de flexión de las columnas, para permanecer en equilibrio. En la tabla 15 se resumen los desplazamientos máximos y el instante cuando ocurren.

Para los registros sísmicos 2, 3 y 4 se notaron algunos desplazamientos residuales en los puntos evaluados. Con el registro 3, estos desplazamientos residuales son muy grandes, especialmente en el punto MD, donde se aprecian desplazamientos residuales de más de 200 mm, lo que podría conducir a daños severos en toda la nave.

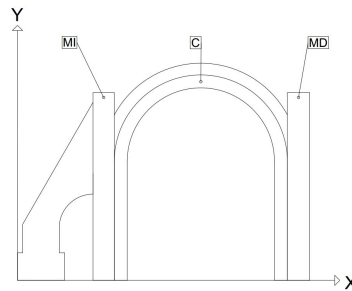


Figura 54: Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con Tetela

Tabla 15: Desplazamientos máximos en los análisis con Tetela

Registro sísmico	Punto MI		Punto MD		Punto C	
	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_X máximo [mm]	tiempo [s]	S_Y máximo [mm]	tiempo [s]
1	-3.2	38.8	10.7	42.6	-5.8	39.2
2	-10.8	29.0	55.6	33.0	-27.9	33.0
3	-22.7	27.1	293.1	39.8	-134.4	39.8
4	-5.3	59.7	47.3	78.6	-22.8	79.6
5	-1.5	36.7	8.1	39.0	-4.4	34.2

Abreviaturas: S_X : desplazamientos horizontales y S_Y : desplazamientos verticales

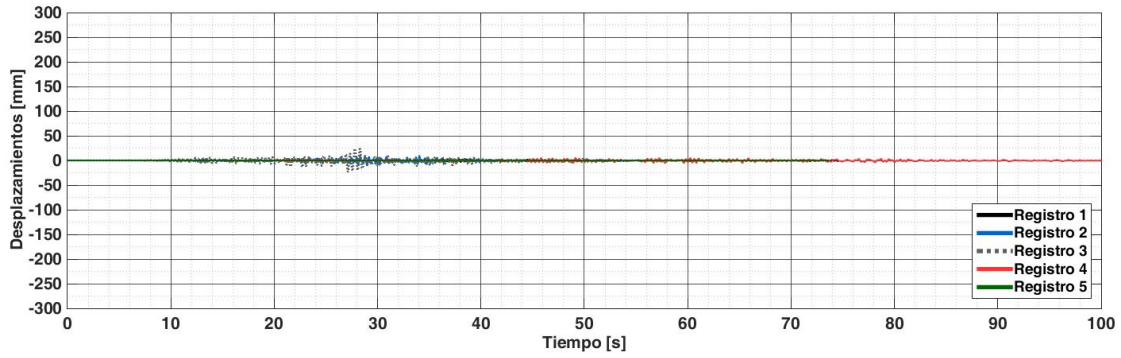


Figura 55: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con Tetela

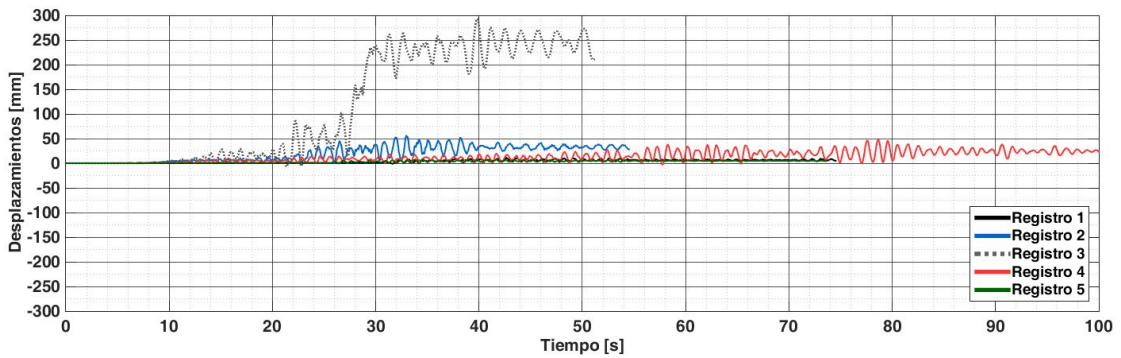


Figura 56: Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con Tetela

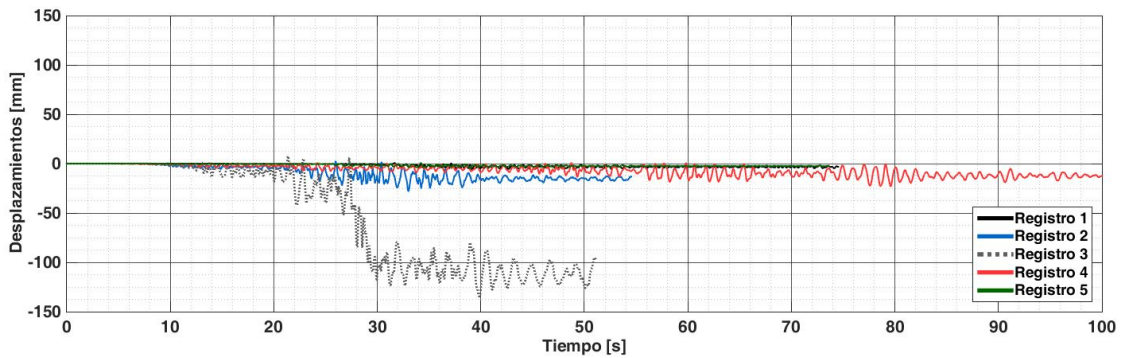


Figura 57: Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con Tetela

4.6.2. Cortante basal

Los registros sísmicos que mayores solicitaciones de cortante basal le generaron a la nave de Tetela son los registros 2, 3 y 4, ver figura 58. La tabla 16 muestra los valores de los cortantes basales máximos, así como su respectivo coeficiente y el instante cuando éstos ocurren.

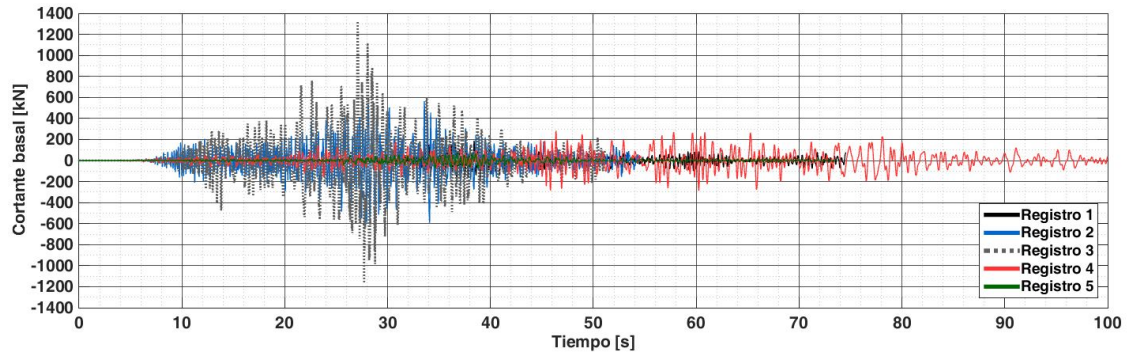


Figura 58: Variación del cortante basal de Tetela, a lo largo de todos los análisis

Tabla 16: Cortantes basales máximos en los análisis con Tetela

Registro sísmico	Cortante basal máximo [kN]	Coficiente sísmico	Tiempo [s]
1	208.4	0.03	36.7
2	600.5	0.10	28.0
3	1166.5	0.22	27.1
4	285.4	0.05	60.2
5	70.5	0.01	34.6

4.6.3. Energía histerética

La nave de Tetela mostró que los registros sísmicos 2 y 3 fueron los que más la dañaron, mientras que los otros tres registros producen daños comparativamente pequeños. Al inicio de la fase intensa de los sismos 2 y 3, la nave se empieza a dañar y justo cuando ocurre el máximo desplazamiento horizontal del muro sin contrafuerte, la pendiente de la línea que representa la variación de la energía histerética, disminuye. Sin embargo, aun al final de estos dos sismos, se muestra una tendencia de la nave de seguirse dañando.

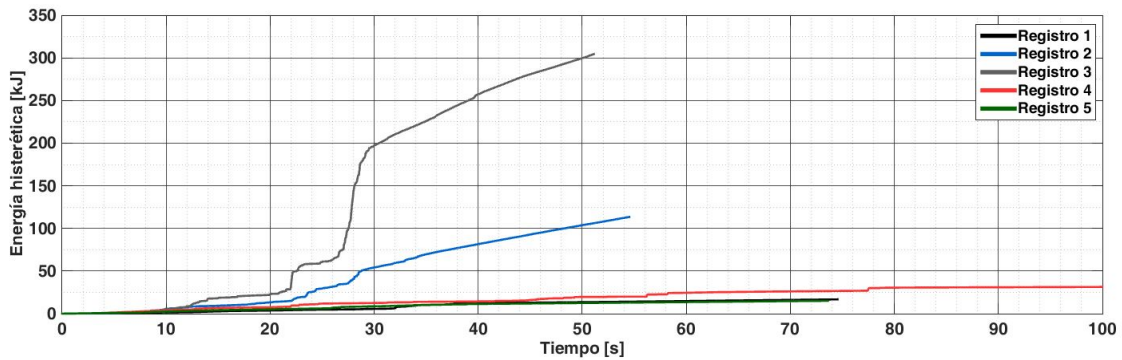


Figura 59: Variación de la energía histerética con Tetela, a lo largo de todos los análisis

4.6.4. Diagramas de esfuerzos y daños

En la figura 60 se muestran los diagramas de esfuerzos y los mapas de daños a tensión para cada uno de los análisis realizados con el modelo de Tetela. Los sismos 1, 4 y 5, que tienen aceleraciones de suelo pequeñas, generaron grietas en la clave del arco, en la base de una de las columnas que sostiene a éste y en los riñones de la bóveda; aunque cabe recordar que los desplazamientos residuales con estos sismos son prácticamente despreciables, por lo que estas grietas se cierran. Por su parte, los sismos 2 y 3 generaron daños graves. Con el sismo 3, el muro que no tiene contrafuerte queda desplazado horizontalmente más de 200 mm, lo que genera la aparición de grietas en todo lo ancho de la bóveda y el arco, además de las grietas en la base de las columnas y del mismo muro. Con este sismo ocurre un mecanismo de colapso en el arco, ya que se forman más de 4 articulaciones, al menos tres en el arco y una en la base de una de las columnas.

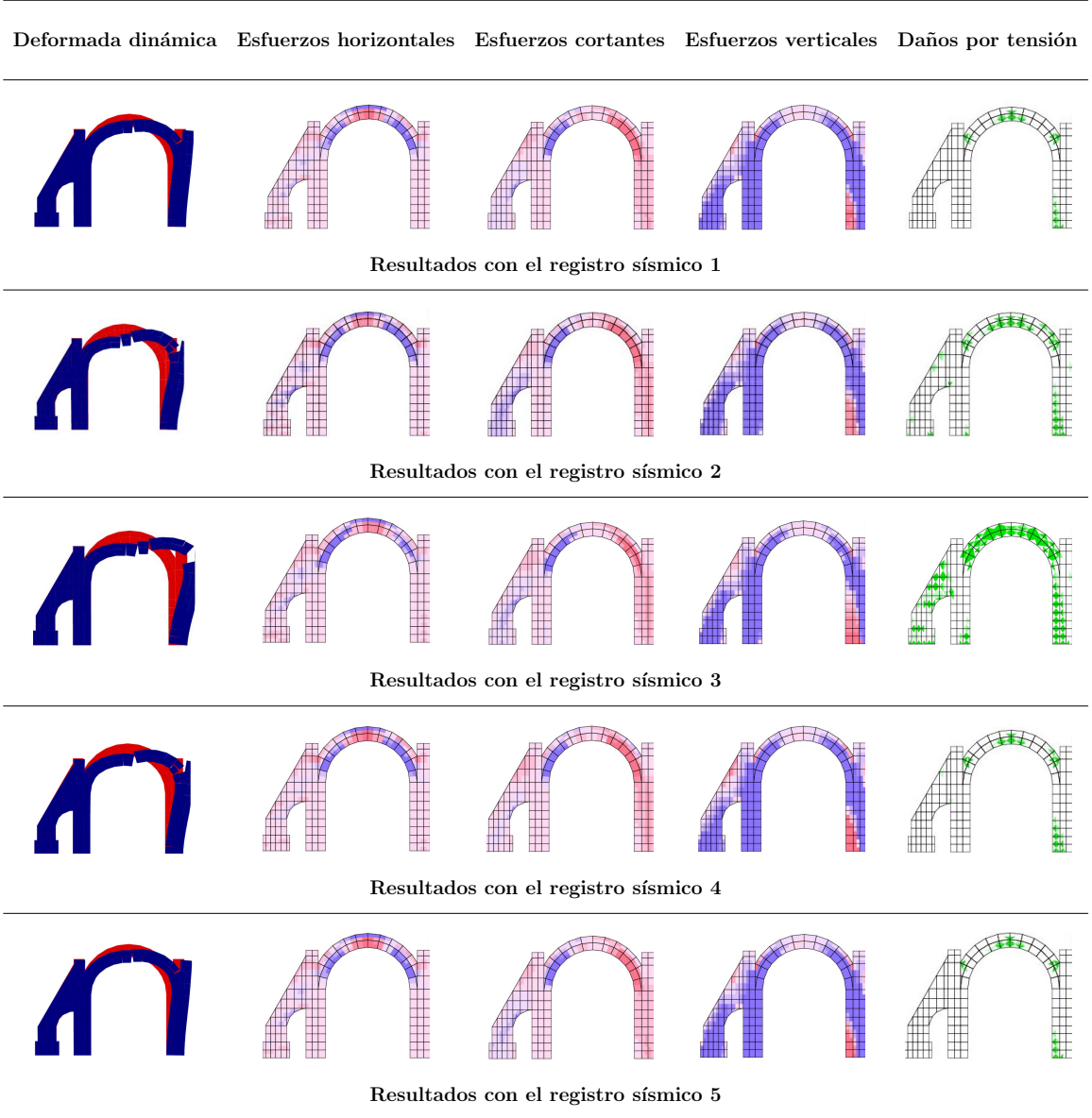


Figura 60: Instantes más críticos durante los análisis con Tetela y mapa de daños por tensión.

4.7. Comparaciones entre el comportamiento sísmico de las dos tipologías de estudio

Tomando en cuenta los resultados de los análisis dinámicos no lineales, resultó interesante evaluar la influencia que tiene la geometría y las características estructurales de las dos tipologías de los templos de estudio, en su comportamiento sísmico. Cabe recordar que las naves de los templos del Estado de México son menos altas y tienen claros más pequeños que las de los templos del Estado de Morelos, además, las cubiertas originales de los templos del Estado de México fueron sustituidas por bóvedas de concreto. Para realizar estas comparaciones únicamente se tomaron en cuenta los registros sísmicos 2 y 3, ya que éstos son los que ocasionaron los mayores daños en las naves. Los parámetros a evaluar para comparar el comportamiento sísmico de las dos tipologías son los desplazamientos residuales, la variación de la energía histerética, los mapas de daños y las formas modales al final de los análisis.

4.7.1. Desplazamientos residuales

Los desplazamientos residuales fueron obtenidos en los mismos puntos de las figuras 33, 40, 47 y 54, que corresponden a los extremos superiores de los muros y a la clave de las cubiertas de las naves. En las tablas 17 y 17 se resumen los desplazamientos al final de los análisis con los registros sísmicos 2 y 3.

Los templos del Estado de México tienen desplazamientos residuales con ambos registros sísmicos muy cercanos a cero, por lo que se puede afirmar que las naves regresan prácticamente a su posición inicial de reposo y las grietas que se generaron durante los sismos, se cierran. En el caso de las naves del Estado de Morelos, sucedió lo opuesto, ya que tienen desplazamientos residuales significativos, en especial la clave de los arcos y el muro que no está reforzado por un contrafuerte. Por tanto, al final de estos análisis, se presentan daños importantes que son permanentes.

Tabla 17: Desplazamientos residuales ocasionados por el registro sísmico 2

Modelo	Punto MI	Punto MD	Punto C
	S_X residual [mm]	S_X residual [mm]	S_Y residual [mm]
San Bartolomé	-0.1	0.7	-0.4
Nativitas	-0.5	0.3	-1.2
Ocuituco	0.6	3.8	-3.2
Tetela	-0.6	33.0	-15.4

Abreviaturas: S_X : desplazamientos horizontales y S_Y : desplazamientos verticales

Tabla 18: Desplazamientos residuales ocasionados por el registro sísmico 3

Modelo	Punto MI	Punto MD	Punto C
	S_X residual [mm]	S_X residual [mm]	S_Y residual [mm]
San Bartolomé	-0.7	0.8	-0.8
Nativitas	-0.3	0.4	-1.2
Ocuituco	0.5	14.7	-11.6
Tetela	-1.0	245.9	-112.2

Abreviaturas: S_X : desplazamientos horizontales y S_Y : desplazamientos verticales

4.7.2. Energía histerética

Las gráficas de la variación de la energía histerética a lo largo de los análisis con los registros sísmicos 2 y 3 se presenta en las figuras 61 y 62, respectivamente. La nave que más energía sísmica disipó en forma de daños fue la de Tetela, en esta además, se aprecia que al final de la aplicación de los sismos, se siguen acumulando daños. Comparativamente, las naves de los templos del Estado de México acumularon menos energía histerética que las de los templos del Estado de Morelos. Con el registro sísmico 3, San Bartolomé y Nativas acumularon aproximadamente el 5% de la energía histerética que acumuló Ocuituco y casi el 19% de la de Tetela.

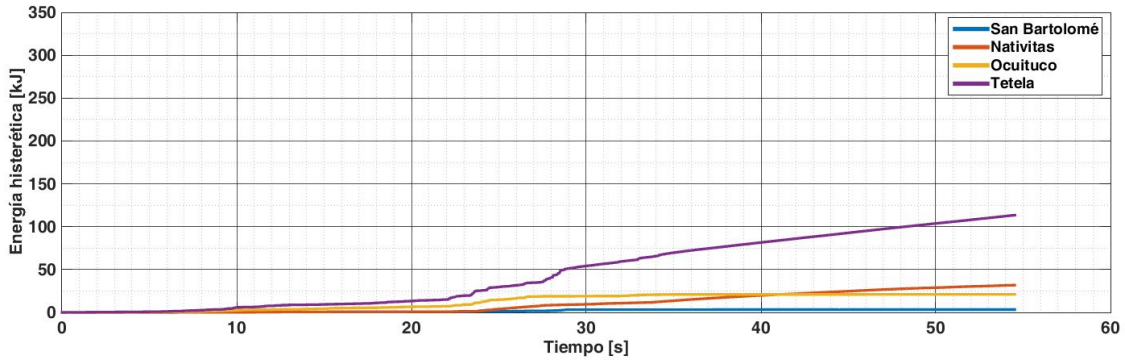


Figura 61: Variación de la energía histerética para todos los modelos, con el registro sísmico 2

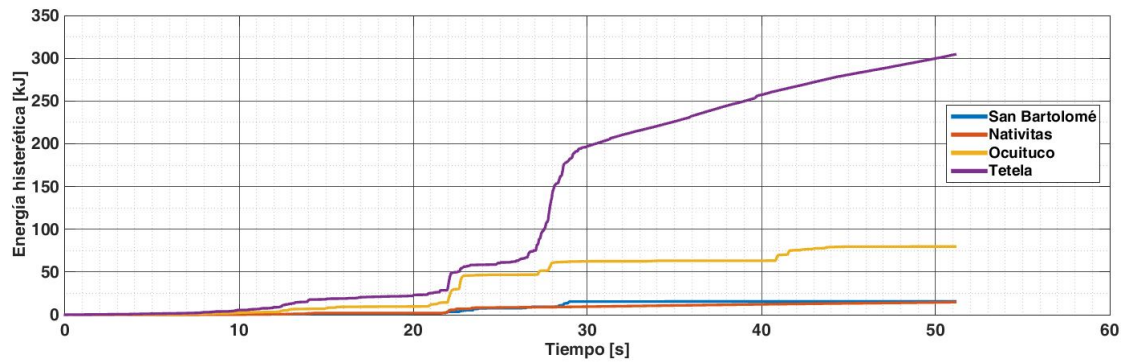


Figura 62: Variación de la energía histerética para todos los modelos, con el registro sísmico 3

4.7.3. Mapas de daños

Los daños que ocasionó el registro sísmico 2 en las naves se muestran en la figura 63. En ésta se aprecia que para San Bartolomé y Nativitas hay ciertas similitudes en cuanto a los daños ocurridos, ya que ambas presentan grietas en los arranques de sus cubiertas, en la base de sus columnas y de sus contrafuertes. Además, no presentan daños a cortante, ni a compresión. Los daños en las naves de Ocuituco y Tetela también muestran ciertas similitudes, pues aparecen grietas en la clave de sus arcos, en los riñones de su bóveda, en la base de sus columnas derechas, así como en algunas partes de sus contrafuertes. En estas dos naves ocurren daños por cortante a la altura del riñón de la bóveda, que se atribuyen a la gran flexión que se desarrolla en los muros que no está reforzado por un contrafuerte. Para ninguna nave ocurrieron mecanismos de colapso con el registro sísmico 2.

Los mapas de daños, ocasionados por el registro sísmico 3, se muestran en la figura 64. En las naves de San Bartolomé y Nativitas, el registro sísmico 3 provocó que las grietas de los arranques de las cubiertas y de la base de las columnas se agravaran. En los contrafuertes de estas naves aparecen nuevas grietas que se prolongan casi hasta la mitad de su altura. Para San Bartolomé además aparecen grietas por cortante en el riñón de su bóveda. Este registro sísmico produjo daños severos en Ocuituco y Tetela, especialmente en sus arcos en donde se desarrollan mecanismos de colapso, debidos a la formación de articulaciones en la base de las dos columnas, así como en la clave y los riñones del arco. La nave de Ocuituco presenta un grieta por cortante en el riñón derecho de su bóveda y la de Tetela en ambos riñones.

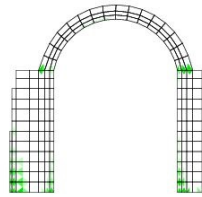
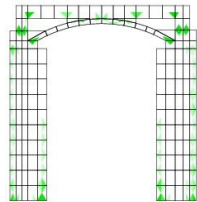
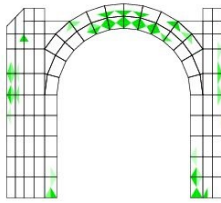
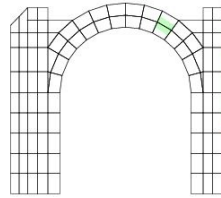
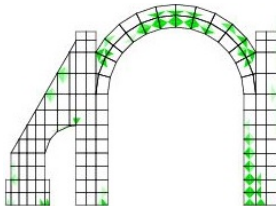
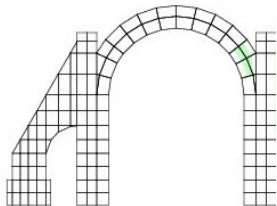
Modelo	Daños de tensión	Daños de cortante	Daños de compresión
San Bartolomé		Sin daños	Sin daños
Nativitas		Sin daños	Sin daños
Ocuituco			Sin daños
Tetela			Sin daños

Figura 63: Mapas de los daños ocasionados por el registro sísmico 2

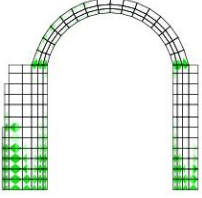
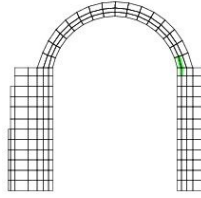
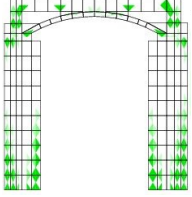
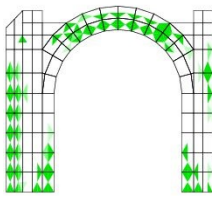
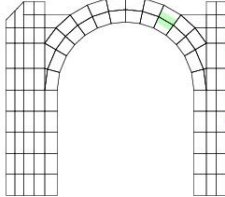
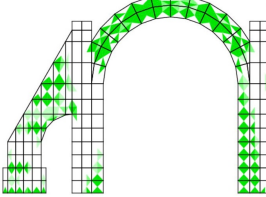
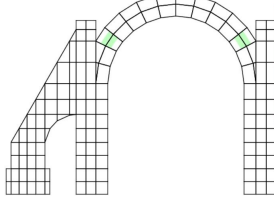
Modelo	Daños de tensión	Daños de cortante	Daños de compresión
San Bartolomé			Sin daños
Nativitas		Sin daños	Sin daños
Ocuituco			Sin daños
Tetela			Sin daños

Figura 64: Mapas de los daños ocasionados por el registro sísmico 3

4.7.4. Formas modales al final de los análisis

Otra forma de evaluar los daños es a través de las formas modales al final de la aplicación de los sismos. De esta forma se puede determinar que tanta rigidez perdió la estructura y si las formas modales se alteran. En las figuras 65, 66, 67 y 68 se muestra la comparación de los resultados de los análisis modales antes y después de la aplicación de los registros sísmicos 2 y 3. Los alargamientos en los periodos con las naves de los templos del Estado de México son menores de 20 % y las de los templos del Estado de Morelos alcanzan valores de hasta 200 %. Estas últimas naves sufrieron daños importantes y se volvieron más flexibles, lo que podría afectar su comportamiento sísmico de manera negativa ante eventos sísmicos futuros.

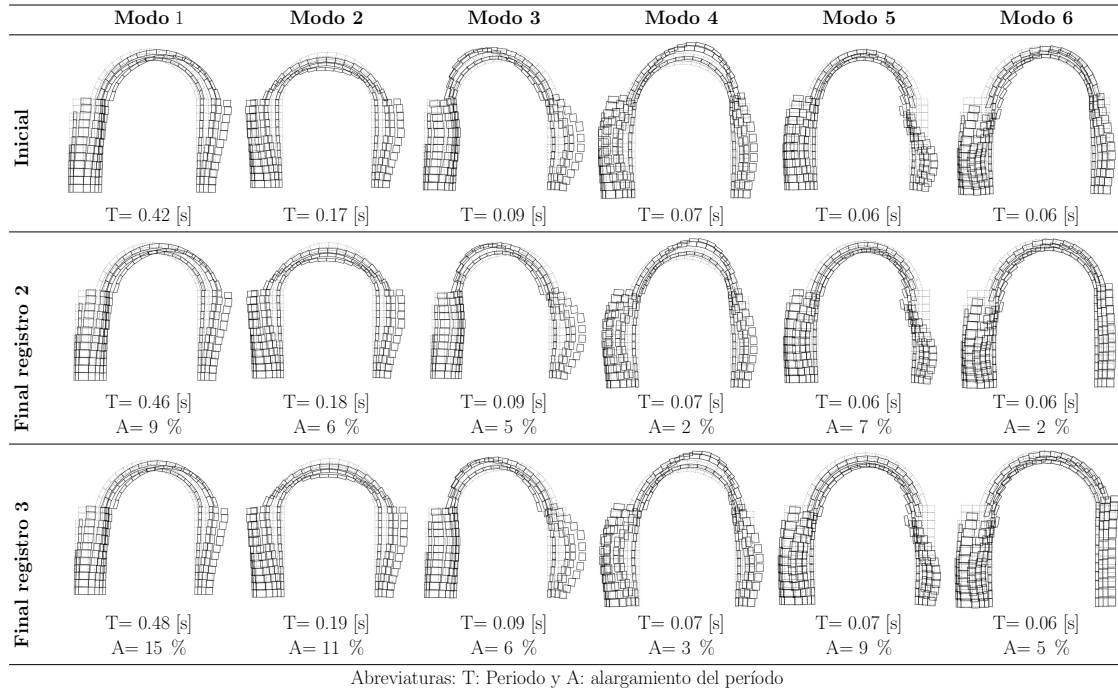


Figura 65: Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de San Bartolomé

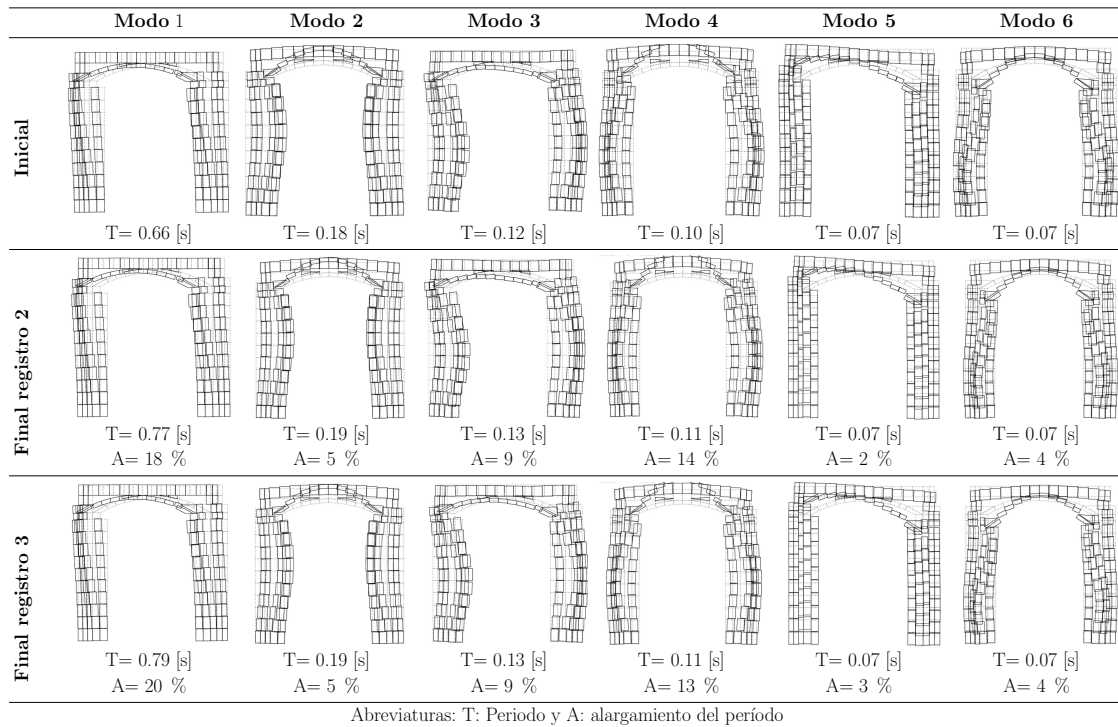


Figura 66: Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de Nativitas

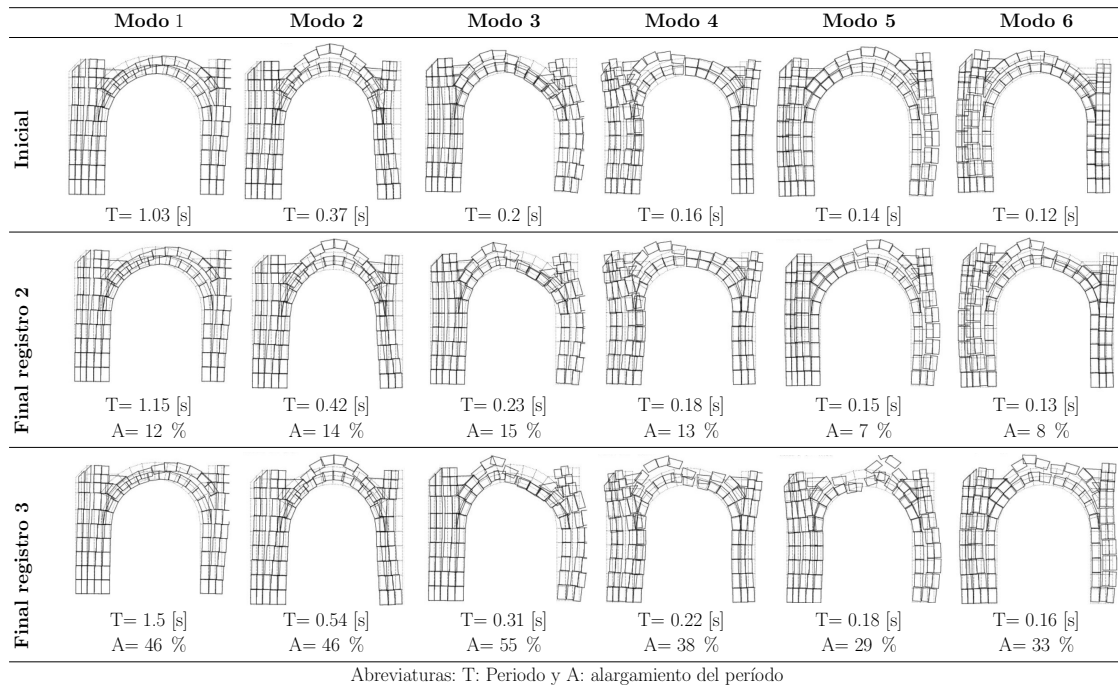


Figura 67: Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de Ocutuco

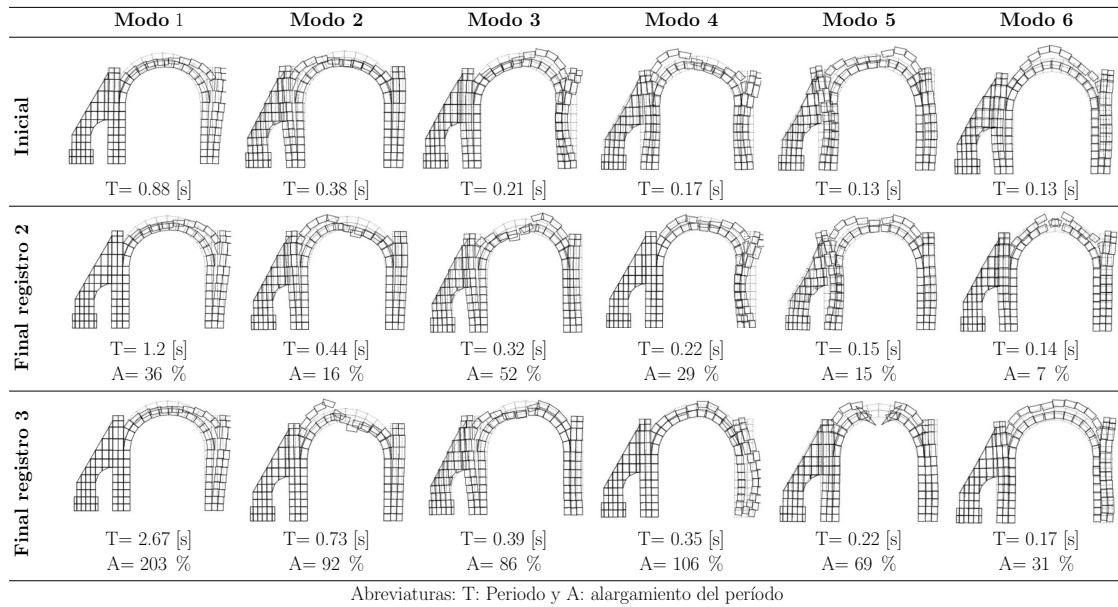


Figura 68: Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de Tetela

4.8. Comparación entre los mecanismos de colapso obtenidos y los teóricos

Solamente el registro sísmico 3 ocasionó mecanismos de colapso en los arcos de las naves de San Bartolomé, Ocuituco y Tetela. Estos mecanismos de colapso difieren de los descritos al final del primer capítulo de esta tesis. Cabe recordar que en San Bartolomé se formaron dos articulaciones en los arranques de su arco y dos más en la base de sus columnas. En el caso de Ocuituco y de Tetela se formaron articulaciones en la base de sus columnas y en la clave y los riñones de sus arcos. En ninguno de los análisis se observó que en las bóvedas y muros se formaron el número de articulaciones requeridas para generarse un mecanismo de colapso como los que describen Meli [2011] y Huerta [2004]. Esto se debe principalmente a que las naves de los templos de estudio no son simétricas y cuentan con elementos estructurales adicionales como lo son los arcos y las columnas, que modifican el comportamiento sísmico observado por estos autores, en naves completamente simétricas y sin contrafuertes ni arcos.

Conclusiones

Con base en la interpretación de los resultados de los análisis estructurales y las comparaciones realizadas, se establece lo siguiente:

Las naves de los templos coloniales mexicanos mostraron tener poca rigidez lateral y ante las acciones sísmicas impuestas, se presentaron importantes desplazamientos horizontales en los extremos superiores de los muros, lo que obligó a la clave de la bóveda descender para adaptarse a la abertura de los muros. La flexión de los muros y la reconfiguración de la bóveda, indujo esfuerzos de tensión en varias zonas de la nave. Por la poca resistencia de la mampostería a este tipo de esfuerzos, se agrietaron las bases de los muros y los contrafuertes. En los arcos y bóvedas estos agrietamientos ocurrieron en la clave, los riñones y los arranques. En la mayoría de los análisis se observó que las naves regresaron a su posición inicial de reposo, por lo que la mayoría de las grietas se cerraron. Estas grietas permitieron que se disipara una buena parte de la energía sísmica.

Los muros, contrafuertes y bóvedas fueron los elementos que presentaron los menores daños, aun para sismos con grandes aceleraciones del terreno se presentaron grietas moderadas a tensión, las cuales no mostraron poner en riesgo la estabilidad de las naves. De manera contrastante, los arcos y las columnas, aun para sismos con pequeñas aceleraciones del terreno, exhibieron daños a tensión considerables y para los de grandes aceleraciones del terreno, se formaron mecanismos de colapso. Por ende, se puede afirmar que los arcos y las columnas son los elementos estructurales más susceptibles a dañarse por acciones sísmicas.

Las naves de los templos del Estado de México, mostraron un mejor desempeño sísmico, ya que presentaron menores daños que las naves de los templos del Estado de Morelos. Esto pone en evidencia la experiencia acumulada de los antiguos constructores. Ellos identificaron que en zonas con actividad sísmica frecuente, debían construir templos menos altos y con claros más pequeños, que en zonas con actividad sísmica moderada.

Los mecanismos de colapso obtenidos difirieron de los descritos por Meli [2011] y Huerta [2004], esto se atribuye principalmente a la geometría no simétrica y a las características estructurales de las naves de estudio, ya que éstas cuentan con columnas, arcos y contrafuertes. Es de llamar la atención que en la nave de Nativitas no se presentó ningún mecanismo de colapso, esto podría estar asociado a que sus dos muros están reforzados por contrafuertes.

De manera personal, me gustaría recomendar para futuras investigaciones un estudio enfocado en la influencia de los contrafuertes en el comportamiento sísmico de las naves de los templos coloniales mexicanos. Sería interesante realizar análisis paramétricos en donde las variables sean la geometría y el número de contrafuertes en una misma nave. Adicionalmente, valdría la pena estudiar las repercusiones de la sustitución de las bóvedas de mampostería originales con bóvedas de concreto armado, como las de los templos de San Bartolomé y Nativitas.

Referencias

- Almanza, R. E. (2009). *Edificios religiosos de los siglos XVII y XVIII*. Universidad Autónoma Nacional de México y Octavio Colemnares editores.
- Casares, H. (1995). La predicación dominica en el Siglo XVI: el caso de sus monasterios en el Estado de Morelos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Casolo, S. y Peña, F. (2005). Modelo de elementos rígidos para el análisis estructural de estructuras de mampostería. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería*, 21:193–211.
- Casolo, S. y Peña, F. (2010). *Programa de elementos rígidos para el análisis dinámico no-lineal de estructuras de mampostería, manual del usuario*. Insituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Cruz, C. E. (2014). Caracterización dinámica de fachadas de iglesias coloniales. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM.
- Dogliani, F., Moretti, A., y Petrini, V. (1994). *Le chiese e il terremoto: dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*. Lint Editoriale.
- Espinosa, G. (1998). *Arquitectura de la conversión y evangelización en la Nueva España durante el siglo XVI*. Universidad de Almería, España.
- García, N. (2007). *Funcionamiento y seguridad estructural de los templos conventuales del siglo XVI en México*. Tesis de Doctorado, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- García, N. y Meli, R. (2009). On structural bases for building the mexican convent churches from the sixteenth century. *International Journal of Architectural Heritage*, 3:25–54.

- 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.
- Heyman, J. (1995). *The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Huerta, S. (2004). *Arcos, bóveda y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan Herrera, Madrid.
- 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.
- Kubler, G. (1983). *Arquitectura Mexicana del siglo XVI*. Fondo de Cultura Económica, México.
- López, R. y Córdoba, L. (2011). *Parroquia de San Bartolomé: El Corazón de Naucalpan*. Arquidiócesis, Estado de México.
- Meli, R. (1998). *Ingeniería estructural de edificios históricos*. Fundación ICA, México, D.F.
- Meli, R. (2011). *Conventos mexicanos del siglo XVI. Construcción, Ingeniería Estructural y Conservación*. Ed. Porrúa, México.
- Meza, J. M. (2013). *Metodología con base en macromodelos para la evaluación de resistencia y mecanismos de colapso de iglesias antiguas de mampostería*. Tesis de Doctorado, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Peña, F. (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 83:43–63.
- Peña, F. y Meza, J. M. (2010). Seismic assessment of bell towers of mexican colonial churches. *Advanced Materials Research*, 133 y 134:585–590.
- Robles, M. L. (2012). Análisis estructural de la parroquia de San Bartolomé Apóstol. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Acatlán, UNAM.
- Rubial, A. (1981). Santiago de Ocuituco: La organización económica de un convento rural agustino a mediados del siglo XVI. *Instituto de Investigaciones Históricas, UNAM*, 7:17–28.

Saldaña, C. A. (2014). Templo conventual de Santiago Apóstol en Ocuituco Morelos. Historia, arquitectura y estructura. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Zapata, F. (2014). Análisis de la edificación del templo conventual de San Juan Bautista en Tetela del Volcán, Morelos. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Índice de figuras

1.	Planta típica de templos de una nave [Meli, 2011]	7
2.	Planta típica de templos en cruz latina [Meza, 2013]	7
3.	Tipos de bóvedas de templos mexicanos: a) Cañón corrido, b) Cañón con arcos y pilastras, c) Con lunetos, d) De nervaduras, [Meli, 2011]	9
4.	Contrafuertes comúnmente utilizados en templos coloniales mexicanos .	10
5.	Agrietamientos típicos en arcos de medio punto: a) separación de los apoyos del arco y b) acercamiento de los apoyos del arco, [Heyman, 1995]	11
6.	Configuraciones típicas de articulaciones y de mecanismos de colapso en arcos [Meli, 1998]	11
7.	Mecanismo de colapso de la bóveda de un templo, por desplomo de sus muros: a) inclinaciones de 1° provocan un aumento del claro en proporción $L/30$, b) inclinaciones de 3.5° provocan un aumento del claro en proporción $L/10$, [Huerta, 2004]	12
8.	Esquema de la acción sísmica lateral en naves de templos [Meli, 2011] .	13
9.	Mecanismo de colapso de la bóveda de un templo, por desplazamiento lateral de los muros [Meli, 2011]	13
10.	Localización de los templos seleccionados	15
11.	Vista aérea del templo de San Bartolomé	16
12.	Vista de la fachada principal del templo de San Bartolomé [Robles, 2012]	16
13.	Vista en planta del templo de San Bartolomé [Robles, 2012]	17
14.	Vista aérea del templo de Nativitas	18
15.	Vista de la fachada principal del templo de Nativitas [Cruz, 2014] . . .	18
16.	Vista en planta del templo de Santa María Nativitas [Gutiérrez, 2011] .	19
17.	Vista aérea del templo conventual de Ocuituco	20
18.	Vista de la fachada principal del templo de Ocuituco	20
19.	Vista en planta del templo de Ocuituco [Saldaña, 2014]	21

20.	Vista área del templo de Tetela	22
21.	Vista de la fachada principal de Tetela	22
22.	Vista en planta del templo de Tetela [Zapata, 2014]	23
23.	Macroelementos típicos de iglesias coloniales mexicanas: a) Fachada, b) Nave, c) Ábside [Meza, 2013]	25
24.	Estructura de los nodos [Casolo y Peña, 2010]	26
25.	Geometría de la sección de nave del templo de San Bartolomé	27
26.	Geometría de la sección de nave del templo de Nativitas	28
27.	Geometría de la sección de nave del templo de Ocuituco	29
28.	Geometría de la sección de nave del templo de Tetela	30
29.	Características de los registros sísmicos utilizados	33
30.	Modelo de elementos finitos de la sección de nave de San Bartolomé	36
31.	Puntos donde se obtuvieron los desplazamientos por peso propio en los dos modelos de San Bartolomé	37
32.	Formas modales de todos los modelos numéricos	41
33.	Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con San Bartolomé	42
34.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con San Bartolomé	43
35.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con San Bartolomé	43
36.	Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con San Bartolomé	43
37.	Variación del cortante basal de San Bartolomé, a lo largo de todos los análisis	44
38.	Variación de la energía histerética con San Bartolomé, a lo largo de todos los análisis	45
39.	Instantes más críticos durante los análisis con San Bartolomé y mapa de daños por tensión	47
40.	Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con Nativitas	48
41.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con Nativitas	49

42.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con Nativitas	49
43.	Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con Nativitas	49
44.	Variación del cortante basal de Nativitas, a lo largo de todos los análisis	50
45.	Variación de la energía histerética con Nativitas, a lo largo de todos los análisis	51
46.	Instantes más críticos durante los análisis con Nativitas y mapa de daños por tensión	52
47.	Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con Ocuituco	53
48.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con Ocuituco	54
49.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con Ocuituco	54
50.	Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con Ocuituco	54
51.	Variación del cortante basal de Ocuituco, a lo largo de todos los análisis	55
52.	Variación de la energía histerética con Ocuituco, a lo largo de todos los análisis	56
53.	Instantes más críticos durante los análisis con Ocuituco y mapa de daños por tensión	57
54.	Puntos donde se calcularon los desplazamientos a lo largo de los análisis con Tetela	58
55.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MI, a lo largo de los análisis con Tetela	59
56.	Variación de los desplazamientos horizontales en el punto MD, a lo largo de los análisis con Tetela	59
57.	Variación de los desplazamientos verticales en el punto C, a lo largo de los análisis con Tetela	59
58.	Variación del cortante basal de Tetela, a lo largo de todos los análisis .	60
59.	Variación de la energía histerética con Tetela, a lo largo de todos los análisis	61
60.	Instantes más críticos durante los análisis con Tetela y mapa de daños por tensión.	62

61.	Variación de la energía histerética para todos los modelos, con el registro sísmico 2	65
62.	Variación de la energía histerética para todos los modelos, con el registro sísmico 3	65
63.	Mapas de los daños ocasionados por el registro sísmico 2	66
64.	Mapas de los daños ocasionados por el registro sísmico 3	67
65.	Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de San Bartolomé	68
66.	Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de Nativitas	68
67.	Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de Ocuituco	69
68.	Comparación de las formas modales iniciales y al final de los registros sísmicos 2 y 3, para el modelo de Tetela	69

Índice de tablas

1.	Modelos numéricos	31
2.	Propiedades mecánicas de los materiales	32
3.	Comparación del peso propio	35
4.	Factor de seguridad por peso propio	36
5.	Comparación de desplazamientos horizontales con el M.E.F. y el M.E.R.	38
6.	Comparación de desplazamientos verticales con el M.E.F. y el M.E.R.	38
7.	Comparación de los resultados de los análisis modales realizados con el M.E.F. y el M.E.R.	39
8.	Comparación de periodos con el M.E.F. y el M.E.R.	39
9.	Desplazamientos máximos en los análisis con San Bartolomé	44
10.	Cortantes basales máximos en los análisis con San Bartolomé	45
11.	Desplazamientos máximos en los análisis con Nativitas	48
12.	Cortantes basales máximos en los análisis con Nativitas	50
13.	Desplazamientos máximos en los análisis con Ocuituco	53
14.	Cortantes basales máximos en los análisis con Ocuituco	55
15.	Desplazamientos máximos en los análisis con Tetela	58
16.	Cortantes basales máximos en los análisis con Tetela	60
17.	Desplazamientos residuales ocasionados por el registro sísmico 2	64
18.	Desplazamientos residuales ocasionados por el registro sísmico 3	64