

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

**“ EFECTO DEL AGRIETAMIENTO EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE
UN TEMPLO COLONIAL TÍPICO ”**

TESIS QUE PRESENTA:
HUGO CASTELLANOS ROSADO

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)

TESIS DIRIGIDA POR:
DR. ROBERTO MELI PIRALLA

CODIRECTOR DE TESIS:
DR. FERNANDO PEÑA MONDRAGÓN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Al Señor por su Gloria

A la memoria de mi abuela Josefina y de mi primo Carlos

A todas esas maravillosas mujeres que el Señor ha puesto en mi camino y al abuelo Juan

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: HUGO CASTELLANOS

ROSADO

FECHA: 21/MAYO/2004

FIRMA: 

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
Objetivo y alcance	4
I ASPECTOS GENERALES DEL ANÁLISIS DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS	
1.1 Antecedentes	5
1.2 Necesidad de analizar construcciones históricas	7
1.3 Comportamiento sísmico de edificios históricos	8
1.4 Herramientas de análisis	9
1.5 Fundamentos teóricos	10
II ANÁLISIS DEL MODELO DE UN TEMPLO TÍPICO	
2.1 Descripción del templo típico	13
2.2 Descripción del modelo	16
2.3 Propiedades de los materiales	19
2.4 Agrietamiento estudiado	20
2.5 Acelerogramas utilizados en el análisis	22
III ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1 Propiedades dinámicas	25
3.1.1 Modelo sano	26
3.1.2 Modelo agrietado	29
3.1.3 Comparación entre modelos	32
3.2 Respuesta estructural de los modelos ante un registro típico	35
3.2.1 Modelo sano	38
3.2.2 Modelo agrietado	47
3.2.3 Comparación entre modelos	53
3.3 Comportamiento general	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
AGRADECIMIENTOS	77
REFERENCIAS	78

INTRODUCCIÓN

En las estructuras de mampostería histórica generalmente se presentan agrietamientos, debidos principalmente a la baja resistencia a tensión de este material; así pues, la mayoría de estas edificaciones tienen algunos daños causados por los sismos que los han afectado a través de los años.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, existe un grupo de trabajo que se dedica a la evaluación de la seguridad estructural de construcciones históricas. Una de las líneas de investigación dentro de este grupo de trabajo es la de evaluar la vulnerabilidad sísmica de templos típicos de la época virreinal, principalmente los localizados en Oaxaca, Puebla y la Ciudad de México (Meli et al, comunicación personal; Rivera, 2000). Como parte de estas investigaciones, se están realizando estudios encaminados a desarrollar metodologías que evalúen la manera en que afecta el agrietamiento inicial al comportamiento estructural (Meli, 1998).

Los resultados que se obtengan de estos estudios ayudarán a encontrar las opciones de rehabilitación y conservación de estas estructuras y con ello se podrá garantizar su estabilidad y preservación.

En este trabajo, se estudiará el comportamiento estructural de un templo típico del sureste de México, cuando se tiene un modelo elástico y cuando se incluyen agrietamientos iniciales en la estructura.

Generalmente, cuando se llevan a cabo análisis de construcciones históricas para determinar su nivel de integridad estructural y sus opciones de rehabilitación, no se incluyen los agrietamientos iniciales que presentan las estructuras. Así pues, surge la necesidad de saber si estos agrietamientos iniciales modifican de manera importante el

comportamiento estructural y, en consecuencia, determinar si es necesario incluirlos en los estudios para este tipo de edificaciones. Por lo tanto, el objetivo y los alcances de esta tesis son:

OBJETIVO

En este trabajo se estudiará cómo se modifican las propiedades dinámicas y cómo varía la respuesta sísmica de un templo típico, debido al efecto del agrietamiento ante la acción de fuerzas sísmicas.

ALCANCE

El estudio se limitará a un modelo representativo de algunas iglesias construidas en el sureste mexicano durante el siglo XVIII, con características arquitectónicas, de espacio y dimensiones comunes. Todas estas iglesias fueron edificadas de mampostería de piedra y ladrillo con una calidad en los materiales parecida.

Se elegirá, entre los diferentes modos de falla que presentan las estructuras de este tipo, el mecanismo más recurrente de acuerdo con los datos estadísticos de daños, recopilados después de los sismos de 1999 en Oaxaca y Puebla (Celestino, comunicación personal).

Posteriormente, se introducirán discontinuidades en la estructura, de acuerdo al modo de falla previamente elegido, con la finalidad de simular el agrietamiento que se presenta en el templo.

Finalmente, se usará el programa "SAP Non Linear" para analizar el modelo sano y el modelo con grietas iniciales, utilizando un amortiguamiento del 5%. Se someterán los modelos a dos movimientos registrados en sismos recientes y que son del tipo que más afecta a las edificaciones en cuestión (Acapulco 1989 y Huatulco 1999).

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DEL ANÁLISIS DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

1.1 ANTECEDENTES

A través de la historia, la humanidad ha construido una gran diversidad de obras civiles para satisfacer sus necesidades de vivienda, educación, transporte, diversión y religión. De algunas de ellas sólo queda evidencia gracias a los relatos existentes. (El Coloso de Rodas, los Jardines Colgantes de Babilonia, la Biblioteca de Alejandría, etc.); otras todavía se conservan (Megalitos de Stonehenge, Pirámides de Egipto, Centros Ceremoniales Mayas, Coliseos, Puentes Romanos, Catedrales, etc.).

México cuenta con una cantidad importante de construcciones históricas. Se tienen grandes edificios hechos antes de la llegada de los españoles a América (Pirámides de Tlaxcala, Monte Alban, Palenque, etc.); durante la época de la colonia (Siglos XVI al XVIII) se construyeron grandes edificaciones (vecindades, casas, escuelas, teatros, iglesias, conventos, etc.). Desafortunadamente, es en este periodo cuando también se destruyó la mayoría de las edificaciones del México prehispánico.

Estas construcciones hoy en día maravillan por su belleza arquitectónica, magnitud de sus elementos, funcionalidad y sobre todo por la dificultad del proceso de construcción en su tiempo, producto del tipo de material utilizado y la poca tecnología disponible. Generalmente, estos inmuebles fueron hechos de mampostería, elaborada de piedras y/o ladrillos unidos a través de un cementante (principalmente mortero de cal).

Por su alto valor artístico y cultural, estas construcciones reciben el nombre de **Monumentos Históricos** y muchos de ellos han sido declarados patrimonio de la humanidad por la ONU, mediante la UNESCO.

Conservar estos monumentos históricos es responsabilidad de las generaciones actuales, con el propósito de que éstos sean apreciados por las generaciones futuras, como testimonio de la riqueza cultural de sus antepasados. Actualmente, algunos de estos edificios presentan un estado de daño importante, debido al deterioro propio de los materiales a través del tiempo; así como también, a los efectos de los fenómenos naturales (sismos, huracanes, etc.) que han soportado a lo largo de su vida. Otras causas de daños en los monumentos son los accidentes (incendios, explosiones, etc.), excesos de cargas (cambio de uso), asentamientos diferenciales y alteraciones de su estructura. Estas situaciones generan concentraciones de esfuerzos en algunos elementos, ocasionándoles degradación de rigidez y, en consecuencia, debilitando la estructura.

La conservación de estas estructuras no es una tarea sencilla, puesto que existen necesidades a veces contrastantes, que corresponde a las diferentes áreas que se involucran en un proceso de este tipo (ingenieros, historiadores, arquitectos, restauradores, etc.); pero indudablemente todas estas disciplinas son necesarias y complementarias, si se pretende hallar soluciones integrales, que garanticen la estabilidad del inmueble, afectando lo menos posible su geometría y materiales constitutivos. Otro factor importante que dificulta la actividad de conservación es el costo que ésta representa, ya que la mayoría de los inmuebles no han tenido un mantenimiento periódico y adecuado, lo que conlleva a rehabilitaciones complejas, obviamente más costosas.

Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, el proceso de análisis de estas edificaciones se dificulta, puesto que generalmente se tiene poco conocimiento del comportamiento de los monumentos debido a la complejidad geométrica, a los tipos e interacción de elementos estructurales y a lo heterogéneo de los materiales con que fueron construidos.

Hasta hace pocos años, los análisis de estructuras de mampostería se llevaban a cabo con hipótesis simples y procedimientos matemáticos y gráficos sencillos, por lo que los resultados obtenidos eran poco precisos y limitados a algunas condiciones de carga más elementales. Hoy en día, con el avance en la capacidad de procesamiento de las computadoras, se dispone de herramientas que permiten conocer con mayor rapidez y detalle la forma en la que se comporta un monumento, así como los elementos que lo componen. Se consigue esto, cuando se elabora un modelo adecuado de la estructura, que refleje con una buena aproximación lo que ocurre dentro de la misma (pesos, interacciones, esfuerzos, etc.). Para obtener una modelación exitosa de una construcción histórica, se deben tomar en cuenta todos los parámetros que influyen en la respuesta,

tales como calidad del material, juntas, intervenciones a lo largo de su vida, etc., ya que al no tomar en cuenta estas variables se obtienen resultados que no coinciden con el comportamiento que desarrolla la estructura.

1.2 NECESIDAD DE ANALIZAR CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS

Una estructura histórica puede ser estudiada de manera analítica (Lemos, 1998; Meli y Sánchez, 1993; Peña, 1995; Rodríguez, 1997; Rivera, 1997), o bien de manera experimental, ya sea en un laboratorio o in-situ (Pegon et al, 1998). Los modelos a escala hechos en laboratorios, son caros y sólo se pueden hacer estudios específicos, puesto que al momento de hacer las pruebas, generalmente se destruyen los especímenes. Por otro lado, si se pretende hacer pruebas directamente sobre estructuras existentes, se debe evitar causarles daños; por tal motivo, solo se puede estudiar el comportamiento para niveles bajos de carga y los efectos de las cargas con magnitudes importantes sólo se pueden estudiar después de fenómenos físicos extraordinarios (p. ej. sismos). De tal manera que se necesitan periodos largos de tiempo para obtener información útil. Bajo este contexto, los estudios analíticos ofrecen mayores ventajas, debido a su bajo costo, y además permiten hacer estudios completos y detallados, puesto que se pueden analizar muchos de los posibles escenarios de fuerzas y propiedades mecánicas que se presentarán en la estructura, obteniendo resultados bastante aproximados. Lo ideal sería hacer estudios analíticos y experimentales, con el fin de entender perfectamente como se comporta una estructura de este tipo.

Hoy en día, casi todas las estructuras que se pretenden construir son analizadas previamente, para conocer su respuesta ante las posibles sollicitaciones a las que estarán sometidas durante su vida útil y en consecuencia garantizar un desempeño adecuado. De igual forma, en las estructuras históricas es recomendable hacer estudios para conocer el comportamiento que éstas desarrollaron ante las sollicitaciones que han experimentado a través de su existencia; es decir, es recomendable determinar cuantitativamente los factores (esfuerzos, deformaciones, etc.), que originaron los daños existentes. De esta manera, se puede conocer el nivel de integridad que tiene la estructura y en consecuencia, se pueden determinar las medidas que permitan solucionar dichos daños (rehabilitación). Es posible determinar de manera cualitativa el origen de los daños, pero al tener solamente parámetros cualitativos, las alternativas de rehabilitación son inciertas, puesto que, se necesitan conocer las causas y los valores de los esfuerzos que originaron

los daños en la estructura, con el fin de dimensionar adecuadamente los refuerzos requeridos que garanticen cuando menos la restitución de sus propiedades originales (rigidez, resistencia, modulo de elasticidad, etc.). Para ello se requiere de análisis refinados y representativos de las estructuras en cuestión.

1.3 COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

Los edificios históricos de mampostería fueron estructurados como sistemas de gravedad, en los cuales la acción interna y las acciones externas se transmiten por esfuerzos de compresión hacia la base del edificio

El principal problema al que se enfrentan estas estructuras es la aparición de esfuerzos de tensión y de cortante, ya que estas resistencias son bajas, en comparación con la resistencia a compresión. Cuando actúan en la estructura fuerzas sísmicas es inevitable que aparezcan esfuerzos de tensión y cortante en algunas zonas de los elementos estructurales y no estructurales, lo cual produce grietas en la mampostería. Lo anterior propicia cambios en las propiedades dinámicas de la estructura, al hacerse ésta más flexible, afectando así la respuesta sísmica.

Las grietas que se forman, ayudan a disipar la energía introducida a la estructura por el sismo, pero conforme éstas crecen y se propagan, causan problemas de estabilidad en los elementos que conforman al edificio, pudiendo llevarlos al colapso.

En los templos, los diferentes elementos que los componen (fachadas, ábside, naves, torres, etc.), tienen patrones típicos en su forma de trabajar, cuando son sometidos a fuerzas laterales severas. Por ejemplo, ante acciones sísmicas importantes, la fachada se mueve de manera diferente que la nave principal (movimientos en su plano y fuera de éste), y tiende a separarse, generando grietas verticales importantes en la zona de unión de estos dos elementos. Otro mecanismo es el que se forma en la bóveda cuando los muros en la nave se mueven en sentidos diferentes uno con respecto al otro (cierre ó apertura); tal movimiento conlleva agrietamientos en la clave y los riñones de la bóveda. En los muros, generalmente se observan daños relacionados con el agrietamiento de las zonas de vanos (puertas, ventanas, nichos, etc.), ya que éstas producen zonas débiles. Las torres amplifican las aceleraciones introducidas, debido a su altura, y sufren de problemas de volteo y de cortante en las zonas donde disminuye considerablemente el espesor de sus muros (campanarios). El ábside, al ser por lo general más rígido que los demás elementos, sufre menos daños, siendo el mecanismo que lo afecta el de apertura

de sus muros, generando agrietamientos en la cúpula central, en el arco triunfal y en sus propios muros. Así, podemos decir que cada uno de los diferentes componentes del templo tiene sus propios mecanismos de colapso (Doglioni et al, 1994). El mecanismo más recurrente observado en este tipo de edificaciones, es el que involucra la apertura de la bóveda; el cual es producto de la forma en que trabaja la estructura (Celestino, comunicación personal). Algunos modos de vibrar provocan que los muros de la nave se muevan fuera de sincronía, propiciando que el claro de la bóveda experimente cambios.

Algunos investigadores (Doglioni et al, 1994; Lagomarsino, 1998), sugieren que se identifiquen los diferentes elementos arquitectónicos que tienen un comportamiento sísmico propio e independiente (fachadas, naves, ábsides, torres, etc.), a los cuales se les da el nombre de macro-elementos. De este modo se puede analizar de manera aislada cada uno de los diferentes elementos, siempre y cuando se tomen en cuenta las condiciones de frontera que garanticen que el comportamiento del elemento es el mismo que cuando trabaja con toda la estructura de manera integral. El objetivo de estas simplificaciones, es hacer análisis en los diferentes elementos que conforman una estructura en forma independiente, sin tener que llevar a cabo el análisis de toda la estructura. Sin embargo, para conocer la respuesta de la estructura en conjunto es necesario hacer un modelo completo.

1.4 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

Debido a la complejidad geométrica y a la propia naturaleza del comportamiento interno de los elementos de mampostería que conforman los edificios históricos, su análisis es complicado y laborioso. A través del tiempo se han utilizado diferentes herramientas de análisis con la finalidad de comprender el comportamiento estructural de las construcciones de mampostería; se pueden mencionar como ejemplos:

- ❖ El *método estático gráfico*, utilizado para determinar la línea de presiones (López, 1990).
- ❖ Los *procedimientos numéricos* de análisis (soluciones aproximadas), tales como el método de elementos finitos, métodos de elementos discretos, método de los elementos rígidos, etc., ocupados para solucionar problemas con cualquier tipo de geometría (Lemos, 1998).

En la actualidad, la técnica de los elementos finitos es ampliamente utilizada, ya que permite discretizar geometrías complejas y obtener resultados muy detallados para cualquier condición de carga, sea estática o dinámica.

El método de los elementos finitos consiste en dividir la estructura en partes elementales de menor dimensión (elementos finitos), para las cuales se conoce la solución en los nodos. Se plantean las ecuaciones de compatibilidad de esfuerzos y deformaciones, y se resuelve el sistema de ecuaciones resultante y, con ello, se encuentra la solución en términos de esfuerzos de la estructura en cada uno de los nodos. El número de elementos finitos varía en función de la complejidad de la geometría, de las cargas y además del grado de precisión que se requiera en los resultados. Existen varios tipos de elementos finitos (barra, sólido y placa); en cada caso el elemento a utilizar depende de la geometría de la estructura.

1.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los materiales y métodos constructivos utilizados a través del tiempo para edificar estructuras, han evolucionado debido a la necesidad de utilizar materiales con propiedades mecánicas que permitan elaborar estructuras más funcionales, económicas y seguras; las técnicas constructivas evolucionaron en función de los materiales empleados.

El comportamiento de los materiales usados hoy en día, ha sido ampliamente estudiado. Por otro lado, el comportamiento de los materiales ocupados en la antigüedad es menos conocido, y depende de la calidad de las materias primas, de la forma de construcción (aparejo), del nivel de conservación, etc.

Las estructuras antiguas de mampostería fueron concebidas y diseñadas como sistemas de gravedad, donde los elementos estructurales transmiten sus cargas hacia el suelo mediante esfuerzos de compresión. En estas estructuras, la línea de presiones debe actuar a través del tercio medio de cada sección para garantizar que los elementos estructurales trabajen sólo a compresión (Heyman, 1968). Generalmente esto se cumple ante cargas gravitacionales (peso propio), pero cuando se tienen que resistir cargas accidentales severas (sismo, viento, etc.), se presentan movimientos laterales en la estructura que generan que la línea de presiones se salga del tercio medio, produciendo tensiones en algunas zonas y en consecuencia daños en estas zonas.

El comportamiento de la mampostería no es lineal; sin embargo, se puede hacer la hipótesis de que el material sea elástico lineal, debido a que típicamente en los elementos

de mampostería actúan esfuerzos máximos del orden de un décimo de la resistencia a compresión (σ_c), puesto que se tienen elementos de secciones robustas. Por esto los esfuerzos a compresión se encuentran en la zona donde la idealización lineal no difiere de manera importante de los valores reales (Figura 1.1). La resistencia a tensión es baja, en comparación con la resistencia a compresión. Una vez que los esfuerzos de tensión actuantes superan a la resistencia, ésta se vuelve nula (Figura 1.1).

Los análisis elásticos son los más sencillos de llevarse a cabo; por tal motivo, es común que se plantean las hipótesis necesarias que permitan considerar un comportamiento lineal para analizar las estructuras con este criterio; sin embargo, se deben tomar precauciones para evitar en la mayor de las medidas, que los resultados muestren un comportamiento diferente al que se presenta en la estructura (representatividad de las propiedades de los materiales).

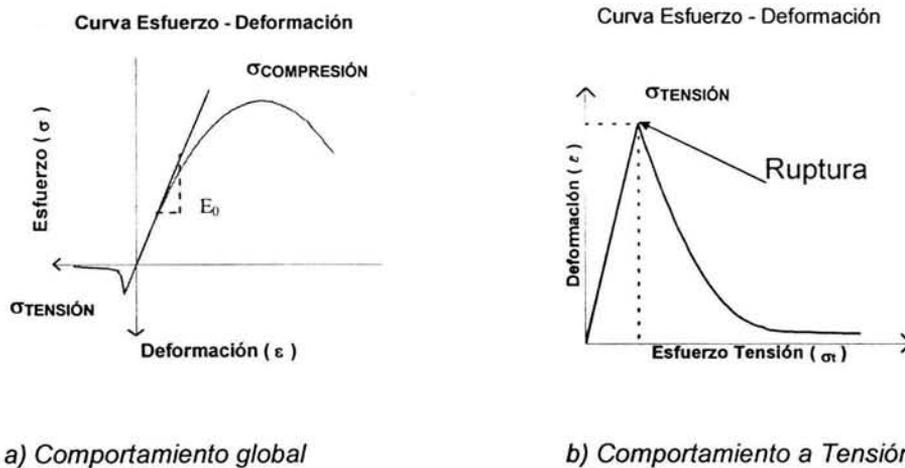


Figura 1.1 Diagrama Esfuerzo-Deformación axial de una mampostería típica (sin escala)

En este trabajo se realizó el modelo de un templo típico de la zona de Oaxaca; por lo tanto, se consideraron las propiedades mecánicas representativas de los materiales que se utilizaron en este tipo de construcciones. Por otra parte, se hace la hipótesis de que los materiales son homogéneos e isotrópicos.

Cuando en la mampostería se presentan esfuerzos de tensión y cortante que llevan a que se generen grietas, se produce una no-linealidad, porque la grieta causa una separación del material, de tal manera que no se transmiten fuerzas de tensión, ni esfuerzos cortantes; sin embargo, cuando la grieta se cierra, permite la transmisión de

fuerzas de compresión y de esfuerzos cortantes. Para el análisis de la estructura agrietada, es necesario modelar estas discontinuidades.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DEL MODELO DE UN TEMPLO TÍPICO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMPLO TÍPICO

Los monumentos sobre los cuales se basó el modelo, corresponden a templos construidos principalmente por la orden religiosa de los Dominicos a principios del siglo XVIII, en la región sur del país (Oaxaca y Guerrero). La importancia artística de estos templos no radica solamente en su arquitectura, sino también en sus contenidos, tales como: retablos, murales, imágenes (de madera y cerámica), tallados en relieve, etc. El estilo arquitectónico que predomina en estos templos es el barroco tardío, caracterizado por la visión de que lo más importante son los objetos por sí mismos y no lo que representan. Las formas eran sobrias y sencillas, mientras que la decoración interior y exterior, y los objetos de culto, eran ricos y muy elaborados (Baxter, 1934).

Típicamente, estos templos tienen una planta rectangular de una sola nave (16 x 28 metros) y su altura, hasta la cúpula de los campanarios, es mediana (14 metros aproximadamente) en comparación con los construidos en otras partes del sureste mexicano (Puebla). En las figuras 2.1 y 2.2 se muestran las dimensiones comunes de estos templos.

Estos monumentos fueron orientados con base al ordenamiento litúrgico y al simbolismo religioso católico de esa época (Rivera 1997); así, generalmente la dirección longitudinal está orientada de este a oeste, y la transversal de norte a sur. Comúnmente, la parte principal del templo (altar), se ubica al este, mientras que la puerta principal se halla en el oeste.

Los templos están formados por el ábside, la nave central, la fachada y las torres de campanario; la puerta principal de acceso se ubica en la fachada principal (Figura 2.1b). Los muros, la fachada y las torres de campanario, son de mampostería de piedra; mientras que las cubiertas son comúnmente de mampostería de ladrillo; en ambas se empleó mortero de cal y arena.

En el ábside se encuentran el retablo y el altar principal; en sus muros no existen vanos (ventanas o puertas), y su altura es aproximadamente igual a la de la nave (9 – 10 metros). La cubierta del ábside es con base en una cúpula semiesférica, sin tambor y sin linternilla. En la fachada posterior se observan contrafuertes, colocados para resistir el empuje ocasionado por la cúpula. En la parte de unión entre el ábside y la nave se encuentra el arco triunfal (Figura 2.1c), con contrafuertes laterales.

La nave central es el espacio disponible para los feligreses. Sus muros contienen pequeñas ventanas, ubicadas simétricamente en la parte superior de los mismos, colocadas por debajo del arranque de la bóveda. Generalmente, en uno de los muros se encuentra una pequeña puerta, cuyo objetivo es proporcionar una salida al patio lateral y al área de servicios. En los muros de la nave central se tienen contrafuertes simétricos, para soportar las fuerzas de coceo que genera la bóveda. Al interior de la nave, y en concordancia con los contrafuertes, se encuentran columnas adosadas en los muros para soportar las cargas que produce la bóveda. La cubierta es con base en una bóveda de cañón corrida, con arcos de poco espesor que transmiten sus cargas a las columnas adosadas. En la parte de unión entre la nave y la fachada se encuentra el coro; la altura de éste depende de la puerta principal, ya que se ubica justo en la parte superior de ésta. El coro está soportado por los muros de la nave y por el muro de la fachada, y su escalinata de acceso se ubica dentro de una torre.

En la fachada, el muro es de espesor constante en toda su elevación (1.20.m - 1.50 m), y alcanza la altura de la nave principal. En esta zona se halla la puerta principal, y en la parte superior de ésta se encuentra una pequeña ventana, cuya finalidad es proporcionar luz a la zona del coro. La fachada cuenta con un remate (imafronte), el cual se eleva por encima de la bóveda, alcanzando alturas menores a dos metros; es de menor espesor que la fachada y su finalidad es la de proporcionar armonía y estética.

Se presentan dos torres, por lo general de la misma altura que la nave, y a partir de este punto se desplantan los campanarios. Estos no alcanzan grandes alturas, en comparación con la de la nave, debido a la experiencia de que las fuerzas sísmicas causan daños severos a las torres de gran altitud. Generalmente, en el interior de la torre norte se

encuentran las escaleras que conducen al coro y a los campanarios. Existen aberturas muy pequeñas, a distintas alturas sobre las torres, para iluminar el interior. Los campanarios se forman de cuatros columnas en las esquinas, rematadas por una pequeña cúpula semicircular.

En la figura 2.1, se observa la distribución de la planta arquitectónica (a), la fachada principal, (b) y un corte transversal en la zona del arco triunfal (c); y en la figura 2.2 se muestra la fachada lateral norte. Las figuras 2.3 y 2.4 muestran templos con características similares a las antes mencionadas.

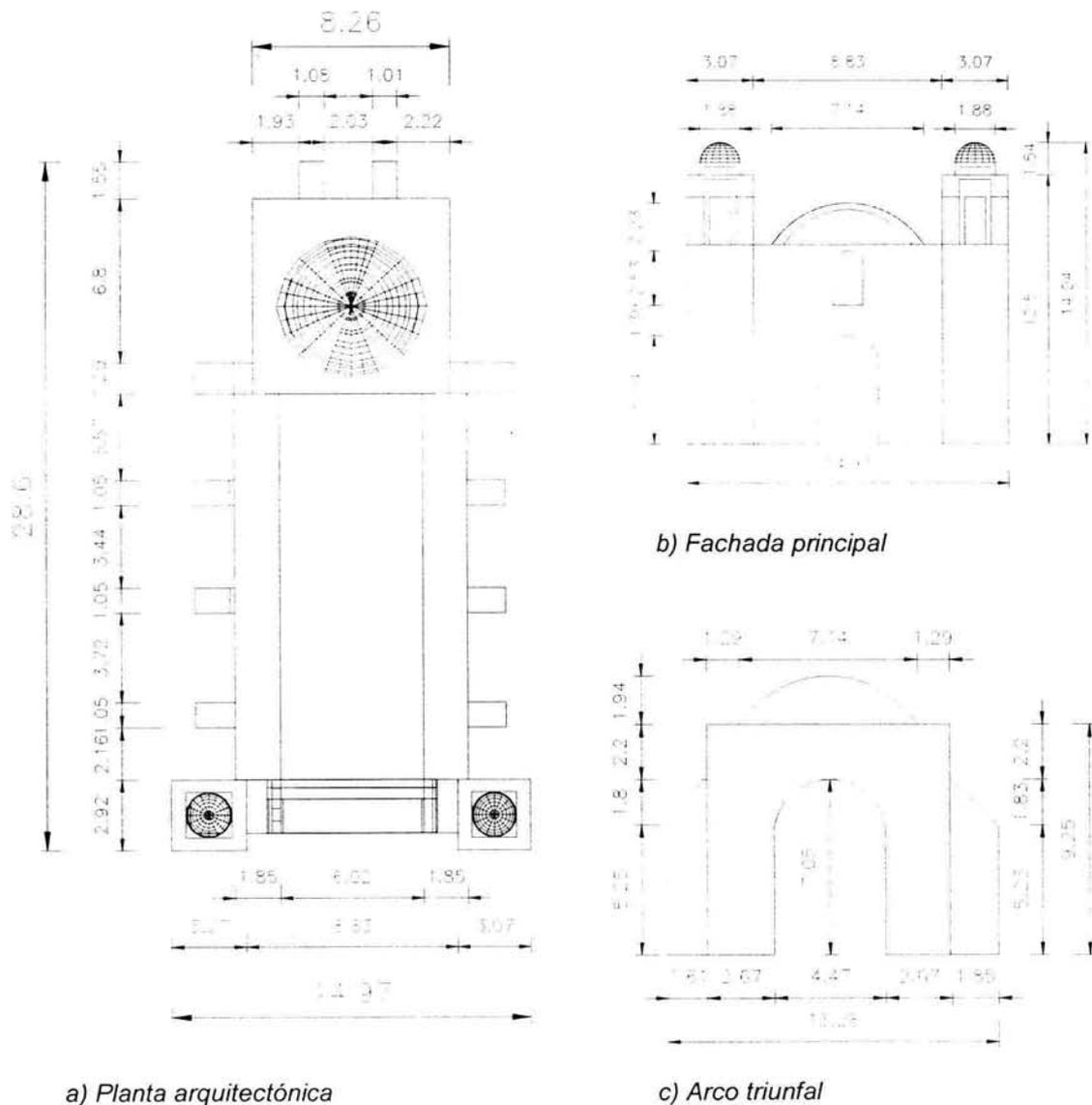


Figura 2.1 Esquemas de la planta arquitectónica, fachada y corte del arco triunfal de un templo Típico. Acotaciones en metros

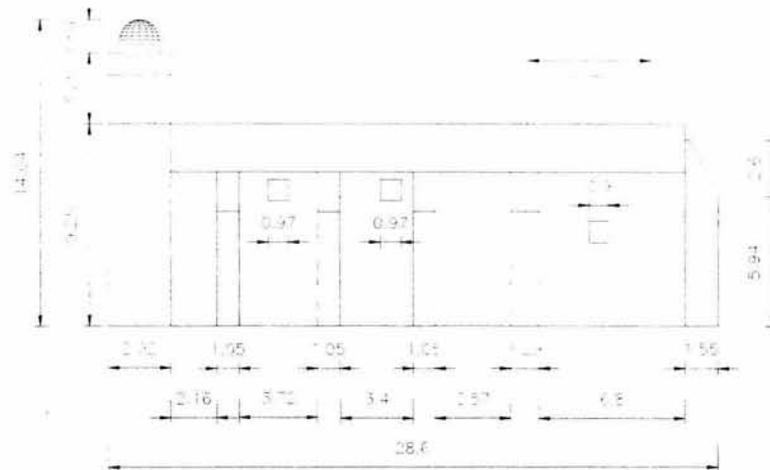


Figura 2.2 Fachada Lateral norte de un templo típico. (Acotaciones en metros).



Figura 2.3 Fachada principal Parroquia de San Jerónimo, Ciudad Ixtepec, Oaxaca.

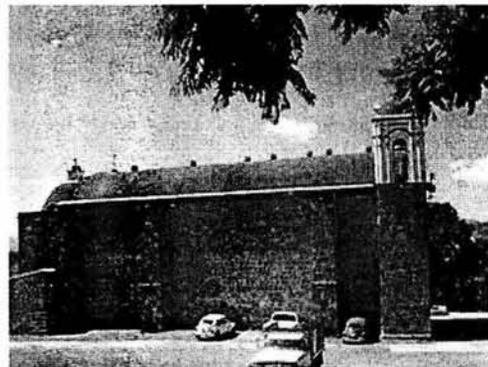
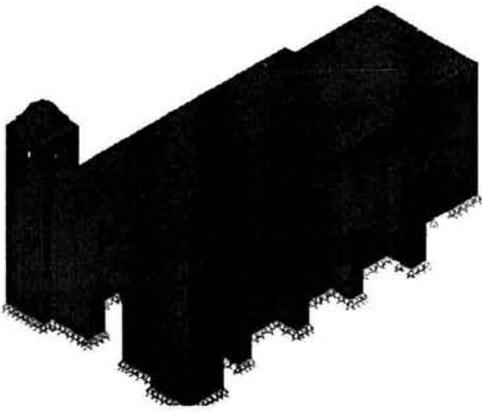


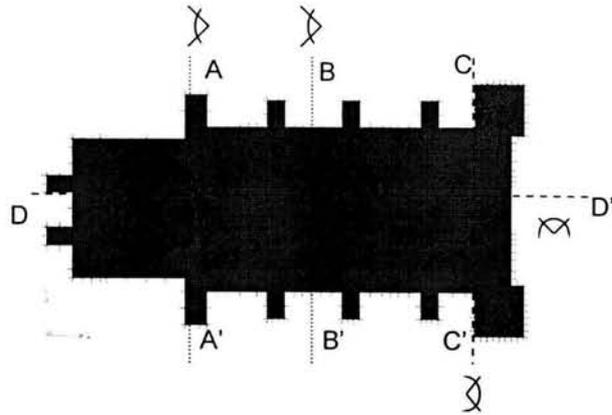
Figura 2.4 Vista Lateral del templo de Santiago Suchilquitongo, Etlá; Oaxaca

2.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

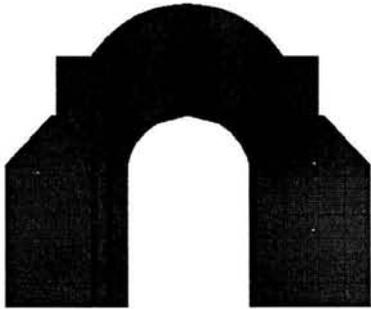
Se realizó un modelo de elementos finitos del templo tipo. Se utilizaron elementos sólidos rectangulares de ocho nodos para modelar toda la estructura. Se tiene un total de 15,846 nodos y 10,242 sólidos. En la figura 2.5 se muestra el modelo del templo.



a) Vista tridimensional del modelo



b) Vista en planta del modelo



c) Corte A-A'. Arco Triunfal



d) Corte B-B'. Nave central



e) Corte C-C'. Fachada principal



d) Corte D-D'. Vista longitudinal

Figura 2.5. Modelo de elementos finitos del templo típico

Como el propósito de este estudio es evaluar la variación en la respuesta sísmica de una estructura sana con relación a otra agrietada, se elaboraron dos modelos. El primero representa a la estructura sin agrietamiento, y a partir de este momento será

llamado modelo sano. El segundo modelo representa a la estructura con agrietamientos en la bóveda, el cual será llamado modelo agrietado. Se estudió este tipo de daño, ya que corresponde al más común, observado estadísticamente en este tipo de estructuras; el modo de daño se describirá en el siguiente subcapítulo (Celestino, comunicación personal).

Físicamente, cuando la grieta se abre, el material se separa dejando de transmitir fuerzas y esfuerzos, produciendo una discontinuidad; pero, cuando ésta se cierra, se transmiten fuerzas de compresión y esfuerzos cortantes (mediante fricción). Para poder modelar este fenómeno se utilizaron resortes inelásticos que cumplen con la característica de transmitir fuerzas de compresión y esfuerzos cortantes cuando existen deformaciones negativas (cierre), teniendo un comportamiento elástico lineal; mientras que cuando se presentan deformaciones positivas (abertura) no se transmiten esfuerzos cortantes ni fuerzas de tensión. En la figura 2.6 se muestran los diagramas esfuerzo-deformación y esfuerzo cortante-esfuerzo axial de estos elementos, conocidos con el nombre de "gap".

La formulación matemática de un elemento gap (Wilson, 2000) es:

$$\text{Esfuerzos Gap} \begin{cases} \varepsilon \geq 0 & \sigma = 0 \quad (\text{Tensión}) \\ \varepsilon < 0 & \sigma = \varepsilon E \quad (\text{Compresión}) \end{cases}$$

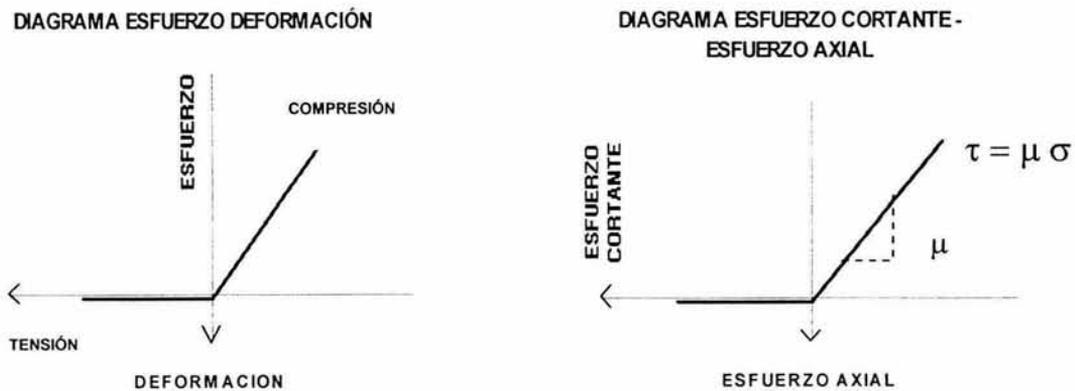


Figura 2.6 Diagrama esfuerzo - deformación (a) y diagrama esfuerzo cortante - esfuerzo axial (b) típicos de un elemento gap (sin escala).

La resistencia a tensión de estos elementos es nula (Figura 2.6); por tal, son adecuados para representar a la mampostería agrietada, ya que la resistencia a tensión de la mampostería una vez que aparecen grietas es nula (Figura 1.1). En la figura 2.7 se muestra al modelo agrietado y un corte transversal de la bóveda en donde se aprecian las grietas. El número de sólidos en este modelo es de 10,242 (igual que el modelo sano); y el de nodos es de 15948 (102 nodos más que el modelo sano).

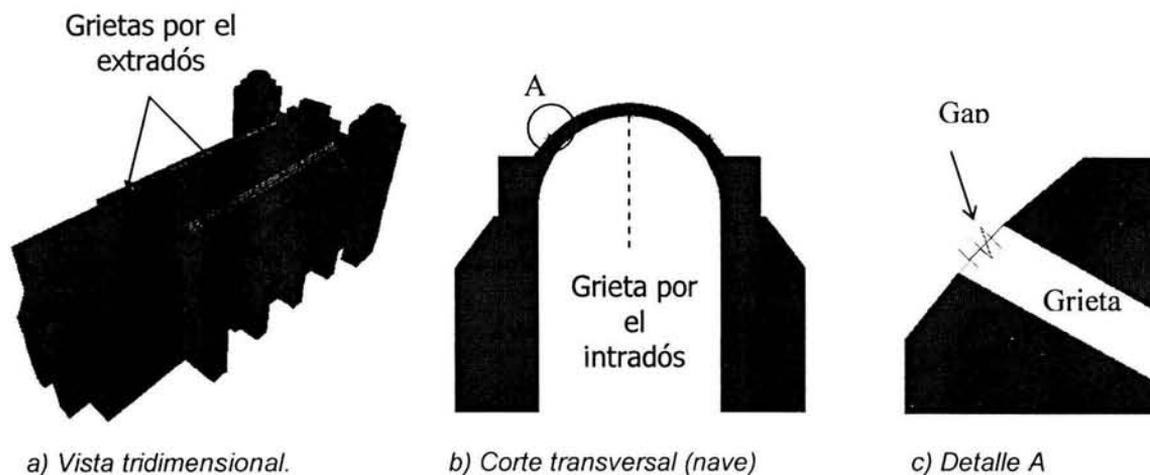


Figura 2.7 Modelo con grietas en la bóveda y elemento gap

2.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Las propiedades mecánicas de la mampostería histórica no dependen únicamente de las propiedades de los materiales constitutivos (bloques y morteros), sino que además dependen de la forma de aparejo, del grado de conservación, del tiempo transcurrido desde que fue construida (flujo plástico), etc. (Binda,1996). Es por esto, que las propiedades mecánicas obtenidas varían de un monumento a otro, incluso se encuentran diferencias en una misma edificación. En consecuencia, la forma de obtener satisfactoriamente las propiedades mecánicas de la mampostería es a través de pruebas del material, sea "in situ" o en laboratorio (Meli et al. 1991).

Si bien es cierto todo lo anterior, existen estilos de mampostería típicos bien definidos que tienen propiedades similares; de manera que se ha recurrido a estudios en los que se toman en cuenta todos los factores que determinan las propiedades y se estandarizan de acuerdo a su estilo.

En la tabla 2.1 se muestran los valores de las propiedades mecánicas de la mampostería utilizadas en este trabajo, las cuales fueron tomadas de Rodríguez (1997).

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de los materiales

MATERIAL	Módulo de Elasticidad (t/m ²)	Coefficiente de Poisson	Peso Volumétrico (t/m ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)
Mampostería de piedra	200000	0.2	1.6	30	0.6
Mampostería de tabique rojo	52500	0.2	1.6	15	0.3

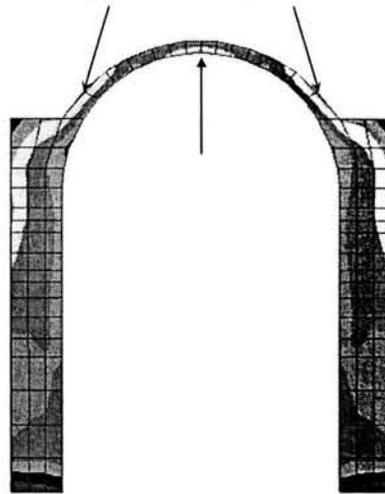
2.4 AGRIETAMIENTO ESTUDIADO

De observaciones realizadas en este tipo de templos después de un evento sísmico, se ha encontrado que con sismos de moderada intensidad el elemento estructural que presenta un mayor daño es la bóveda de la nave principal. Asimismo, con sismos de alta intensidad se ha observado que este elemento puede llegar al colapso (Celestino, comunicación personal).

Este tipo de agrietamiento se produce en bóvedas y arcos, principalmente porque las fuerzas de coceo por carga gravitacional propician desplazamientos hacia afuera de los soportes (muros y columnas adosadas); y adicionalmente, las fuerzas sísmicas producen que estos desplazamientos se incrementen.

Por tal razón, se eligió estudiar el agrietamiento que se presenta sobre la bóveda, cuando existen cambios en el claro de sus apoyos. El agrietamiento causado por la abertura del claro tiene la particularidad de propagarse rápidamente en el sentido longitudinal, formándose una grieta central en la clave y dos grietas laterales en los riñones. La ubicación sobre la bóveda de estas grietas, ya ha sido ampliamente estudiada (Heyman, 1968) y se ha comprobado que se localizan en la parte central inferior de la clave y en la parte exterior de los riñones, a 30° aproximadamente con respecto a la horizontal desde el arranque de la bóveda. Lo anterior coincide con los daños observados en este tipo de estructuras; motivo por el cual, se eligió este tipo de agrietamiento. En la figura 2.8c se muestran los esfuerzos de tensión máximos bajo una aceleración vertical, los cuales coinciden con los esfuerzos de tensión ante carga gravitacional (Figura 2.8a, b). Se empleó la aceleración vertical, porque es la causante de la configuración deformada del modo de apertura de bóveda. En la figura 2.9 se muestran las zonas de la bóveda en donde se colocaron las grietas.

Zonas en la bóveda donde los esfuerzos a tensión superan la resistencia del material



a) Esfuerzos de tensión actuantes bajo carga gravitacional



b) Detalle de los esfuerzos de tensión sobre la bóveda bajo carga gravitacional



c) Esfuerzos de tensión bajo aceleración vertical (deformada correspondiente al modo de apertura del claro de la bóveda)

Figura 2.8 Esfuerzos principales máximos de tensión (t/m^2) sobre la bóveda debidos a la carga gravitacional y a una aceleración vertical.

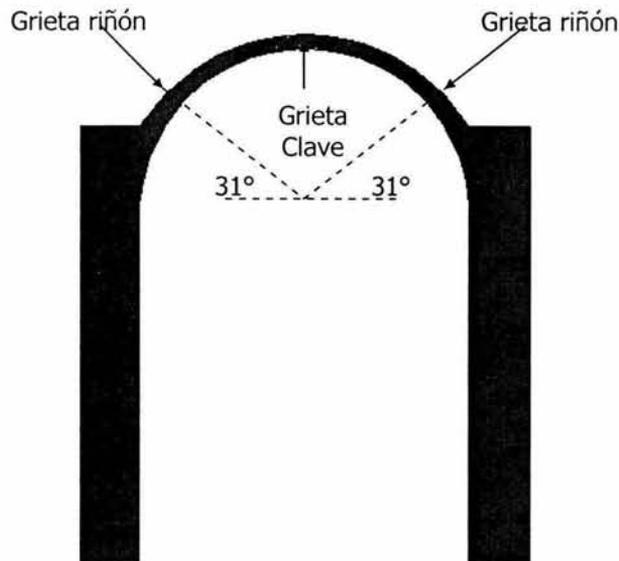
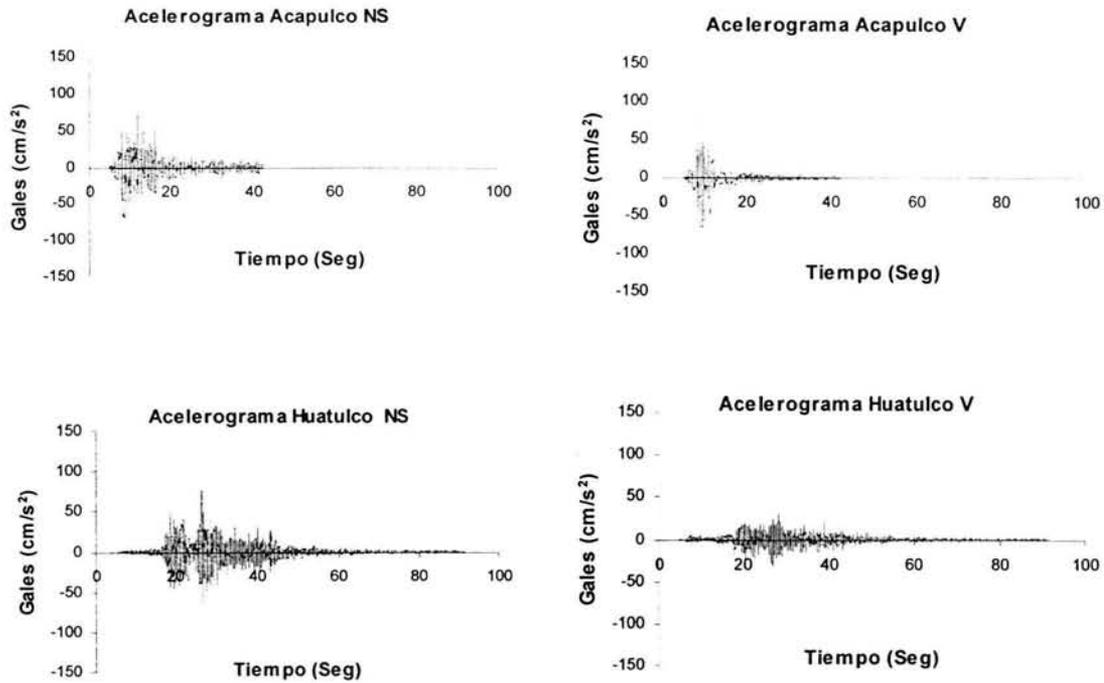


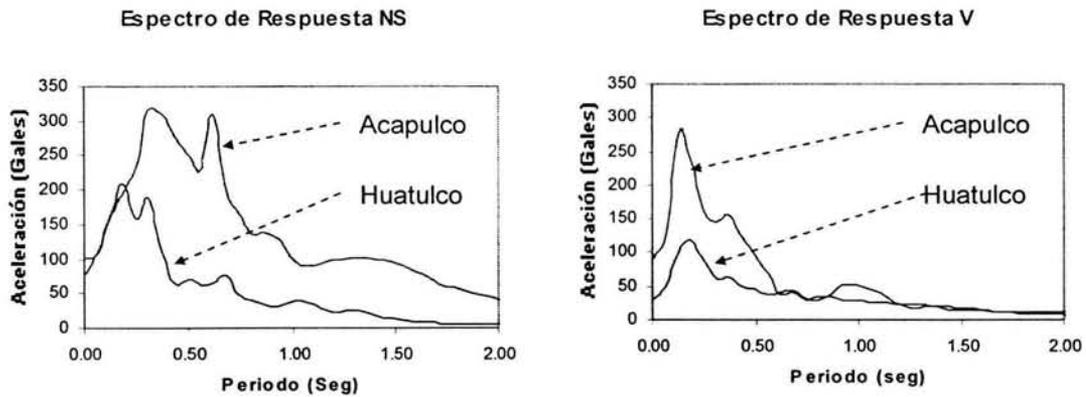
Figura 2.9 Localización sobre la bóveda de las grietas

2.5 ACELEROGRAMAS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS

Se eligieron dos historias de aceleraciones correspondientes a sismos de subducción ocurridos en las costas de Guerrero y Oaxaca. Se ocuparon estos registros porque ocasionaron daños importantes en los monumentos de este tipo. Los daños producidos por el sismo de Huatulco a estas estructuras fueron severos (Celestino, comunicación personal), debido a que el epicentro del sismo se situó cerca de una región con una densidad elevada de templos. Mientras que los daños generados por el sismo de Acapulco fueron catalogados como menores, al situarse el epicentro en un lugar con pocos templos cercanos; sin embargo, se utilizó este registro porque sus aceleraciones verticales son importantes con relación a las horizontales, y resulta interesante conocer el efecto que esta condición produce sobre el comportamiento de estas estructuras. Así pues, se incluyeron en los análisis las aceleraciones verticales, puesto que por la cercanía a los epicentros éstas son relevantes y su efecto es importante para el modo de falla en estudio. La figura 2.10a muestra la componente N-S y vertical de los registros sísmicos utilizados, y en la figura 2.10b se observan los espectros de respuesta de los registros. En la tabla 2.2 se indican algunos datos de los registros sísmicos empleados.



a) Registros de aceleraciones horizontales y verticales.



b) Espectros de respuesta de las aceleraciones

Figura 2.10 Historia de aceleraciones y espectros de respuesta

Los periodos principales de los modos de vibrar de estructuras de este tipo varían entre 0.1 y 0.4 segundos (Meli 1998). En los espectros de respuesta (Figura 9.b), los picos indican los periodos dominantes del movimiento del terreno, y cuando éstos coinciden con los de la estructura generalmente ocurren daños debido al fenómeno de resonancia. Se aprecia que el espectro del registro de Acapulco mantiene ordenadas elevadas hasta periodos del orden de 0.6 segundos, lo anterior implica que puede

ocasionar efectos importantes en los templos más altos y esbeltos. Por el contrario, el registro de Huatulco solo tiene ordenadas elevadas importantes hasta periodos cercanos a 0.3 segundos.

Tabla 2.2 Datos de los registros empleados

NOMBRE DEL REGISTRO	ACAPULCO	HUATULCO
ACELERACIÓN MÁXIMA (GALES)	102 (N-S) 91.9 (V)	77.6 (N-S) 32.0 (V)
FECHA DEL SISMO	25-Abr-89	30-Sep-99
HORA EPICENTRO (GMT)	14:29:00.4	16:31:14.8
MAGNITUD (Ms)	Ms=6.90	Ms=7.5
COORDENADAS DEL EPICENTRO	16.603 LAT. N 99.400 LONG. W	15.95 LAT. N 97.03 LONG. W
PROFUNDIDAD FOCAL (km)	19	16

Se observa en la tabla 2.2, que el sismo de Acapulco es de mayor magnitud; sin embargo, los daños ocasionados a los edificios de mampostería dependen de la distancia al epicentro, del contenido de frecuencias, del tipo de suelo donde se desplante, de su propia resistencia, etc., y no solamente de la magnitud del evento sísmico.

En las estructuras de mampostería el amortiguamiento depende, entre otros factores, del nivel de agrietamiento. Se han hallado valores experimentales de amortiguamiento entre 5 y 10 % en templos agrietados de mampostería sometidos a movimientos moderados, encontrándose que a mayor densidad de grietas mayor valor del amortiguamiento (Rivera, 2000). En este caso se utilizó un amortiguamiento del 5% para los dos modelos, puesto que la densidad de grietas impuestas en la estructura es baja. El propósito de dejar el amortiguamiento constante es de evaluar el efecto en la respuesta sísmica que producen las grietas por sí solas.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 PROPIEDADES DINÁMICAS

Se encontraron los periodos y las formas modales correspondientes al modelo sano y al agrietado. Los periodos representan el nivel de flexibilidad (o rigidez), y las formas modales indican el tipo de movimiento en la estructura, en función de su distribución de masas y rigideces; cada forma modal está asociada a un periodo. Al estudiar estas propiedades se comprende mejor el comportamiento dinámico de una estructura, puesto que se determina la aproximación existente entre los periodos dominantes de un sismo y los periodos principales de una estructura. Así es posible inferir el nivel de daños que puede sufrir la estructura bajo esta excitación; ya que, si se observan coincidencias entre los periodos, es muy probable que los movimientos sobre la estructura se amplifiquen por el efecto de resonancia; esperando mayores daños. Por otro lado, al conocer las formas modales se identifican los movimientos que generan los mecanismos de daños relevantes en los diferentes elementos que componen a la estructura y se pueden deducir las medidas que está puede requerir para disminuir su vulnerabilidad.

Los templos históricos generalmente son estructuras con distribuciones de masas y rigideces complejas, teniendo la mayoría de sus elementos un peso considerable. Lo anterior conlleva a que no basta con identificar los primeros modos de la estructura (como suele suceder en estructuras reticulares regulares donde el primer modo es el determinante en las respuestas); sino que, en este tipo de estructuras, es indispensable estudiar un número mayor de modos con el fin de hallar las respuestas totales. Tal es el

caso de los análisis hechos en este trabajo en los modelos sano y agrietado, donde en el primer modo de vibrar participa alrededor de un 50% de la masa en la dirección transversal. Para conocer la respuesta total en esta dirección se requieren incluir muchos más modos, hasta que la masa actuante sea cercana al 100% de la masa total. Conseguir esto, frecuentemente demanda de mucho tiempo de cálculo; por tal motivo, se considera aceptable que se determine un porcentaje de masa actuante para el cual los resultados ya no sufran variaciones importantes. En este trabajo se consideró que cuando actúa más del 90% de la masa en la dirección de análisis, los resultados son suficientemente representativos. Así pues, se realizaron análisis dinámicos modales con vectores de Ritz, en los cuales se alcanzó cuando menos dicho porcentaje. Con estos vectores solamente se incluyen los modos que tiene relevancia en la dirección de análisis; además, esta forma de proceder es la recomendada en los análisis sujetos a historias de aceleraciones (Wilson, 2000).

3.1.1 MODELO SANO

En la tabla 3.1, se presentan las cinco primeras formas modales obtenidas mediante un análisis modal con vectores característicos. El primer periodo tiene un valor de 0.152 segundos y corresponde a un movimiento lateral de toda la estructura; los desplazamientos mayores se presentan en la parte central de la nave. Para la segunda forma modal ocurren movimientos diagonales desfasados en las torres, acompañados de movimientos laterales del arco triunfal; los movimientos producidos en la fachada por las vibraciones en las torres y los del arco se dan en sentido contrario; los desplazamientos más grandes se dan en las torres; su periodo es de 0.121 segundos. El tercer modo indica un movimiento sincronizado de las torres en la dirección longitudinal, un movimiento vertical de la bóveda de tal forma que se presenta abertura y cierre de los muros de la nave central; y además, movimientos de flexión fuera del plano en el arco triunfal y la fachada principal; tiene un periodo de 0.116 segundos. La cuarta forma de vibrar indica movimientos de flexión en el arco triunfal y la fachada principal, fuera del plano, unidos a movimientos diagonales de las torres y verticales de la bóveda; la torre norte experimenta mayores desplazamientos que la sur, su periodo es 0.112 segundos. En el modo cinco se presentan movimientos de flexión en el arco triunfal, diagonales en las torres y además existen pequeñas torsiones en la fachada; los desplazamientos mayores se dan en la torre sur en comparación con la norte; el periodo de este modo es 0.111 segundos. De

estas cinco primeras formas modales, la tercera es la que contribuye de manera importante en la formación del mecanismo de bóveda en estudio, ya que propicia que haya cierre y apertura de los muros en la nave central.

Tabla 3.1 Periodos y modos de vibrar del modelo sano

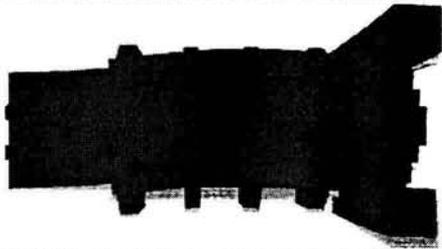
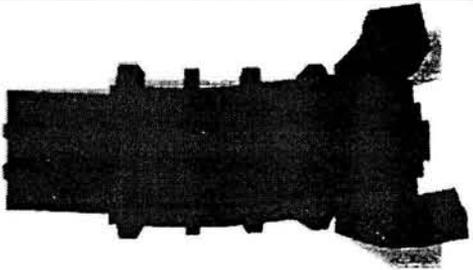
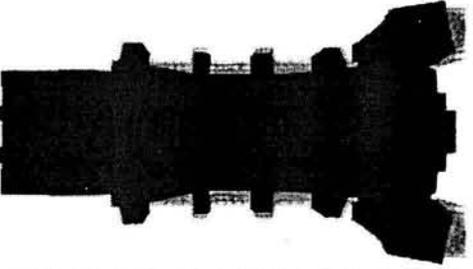
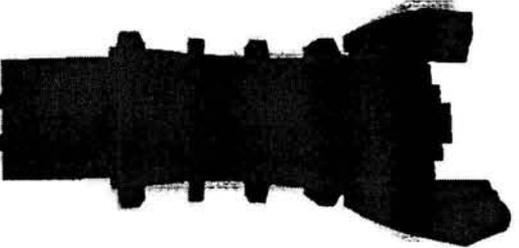
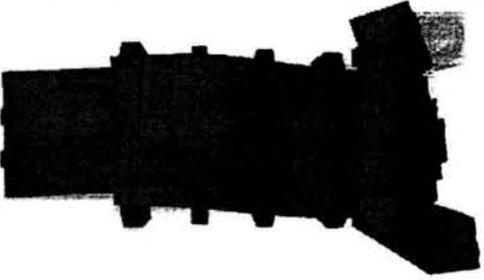
MODO No.	PERIODO (Seg)	DESCRIPCIÓN FORMA MODAL	ESQUEMA FORMA MODAL
1	0.152	Movimiento lateral (Dirección Y). Se observa un movimiento mayor en el centro de la nave, debido a que esta zona es más flexible.	
2	0.121	Movimiento desfasado diagonal de torres y lateral del arco triunfal. Los movimientos mayores se presenta en las torres.	
3	0.116	Movimiento de torres en la dirección longitudinal y de bóveda en dirección vertical. Se genera cierre y apertura de muros en la nave central.	
4	0.112	Movimientos de flexión en el arco triunfal, movimiento de la fachada fuera de su eje, movimiento vertical de la bóveda y movimientos diagonales en las torres. El movimiento mayor se observa en la torre norte.	

Tabla 3.1 (Continuación)

MODO No.	PERIODO (Seg)	DESCRIPCIÓN FORMA MODAL	ESQUEMA FORMA MODAL
5	0.111	Movimientos de flexión en el arco triunfal, movimientos diagonales en las torres y pequeñas torsiones en la fachada. El movimiento mayor se observa en la torre sur.	

La tabla 3.2 muestra las primeras cinco deformadas modales de la parte central de la nave en el plano Y-Z; con el fin de evaluar si el movimiento contribuye en la formación del mecanismo de bóveda en estudio. Resulta evidente, que el tercer modo colabora de manera directa en la generación de dicho mecanismo.

Tabla 3.2 Movimiento en el centro de la nave correspondiente a los cinco primeros modos

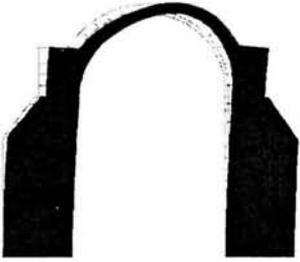
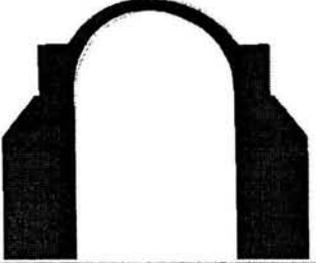
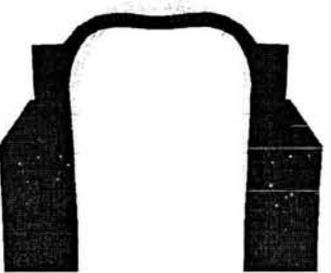
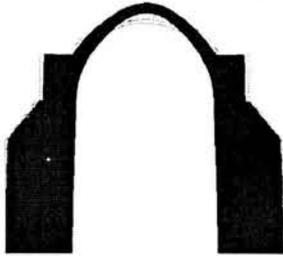
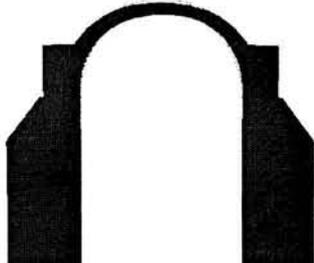
MODO No.	MOVIMIENTO GLOBAL	MOVIMIENTO EN LA NAVE	ESQUEMA DE LA NAVE
1	Movimiento lateral (Dirección Y).	Los muros y la bóveda se mueven hacia el mismo lado, por tal, no hay incremento del claro.	
2	Movimiento diagonal de torres y lateral del arco triunfal.	Pequeños movimientos en la bóveda, los cuales no son importantes en el mecanismo de estudio.	
3	Movimiento de torres en dirección X y de bóveda en dirección Z.	Desplazamientos de los muros en direcciones opuestas, producto del movimiento vertical de la bóveda, de tal forma que se generan cambios en el claro, conlleva a que se forme el mecanismo.	

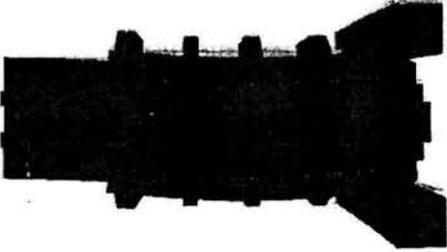
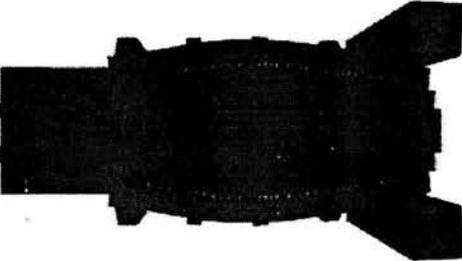
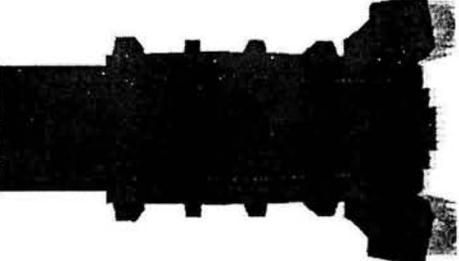
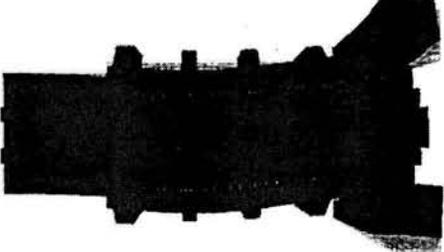
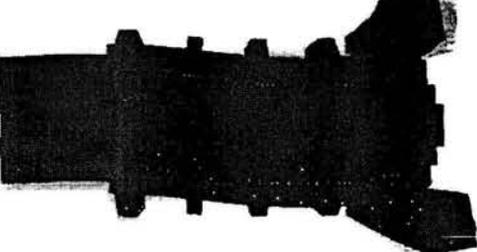
Tabla 3.2 (Continuación)

MODO No.	MOVIMIENTO GLOBAL	MOVIMIENTO EN LA NAVE	ESQUEMA DE LA NAVE
4	Movimientos de flexión en el arco triunfal, con movimientos diagonales en las torres y de la fachada fuera de sus eje.	Desplazamientos ligeros desfasados de los muros, tiene una participación pequeña en la generación del mecanismo.	
5	Movimientos de flexión del arco triunfal, movimientos diagonales en las torres y torsión en la fachada.	Vibraciones muy pequeñas en los muros que no contribuyen en el mecanismo.	

3.1.2 MODELO AGRIETADO

La tabla 3.3 contiene las cinco primeras formas modales, obtenidas mediante un análisis similar al del modelo sano. El primer modo indica un movimiento transversal de toda la estructura siendo su periodo de 0.154 segundos. Para la forma modal dos existen movimientos de flexión en el arco triunfal y en la fachada; además, las torres se mueven en la dirección longitudinal y la bóveda en la dirección vertical, el valor del periodo es 0.131 segundos. En la tercera forma modal, se presentan movimientos diagonales desfasados en las torres, así como también, desplazamientos del arco triunfal en la dirección longitudinal; tiene un periodo de 0.122 segundos. La forma modal cuatro representa movimientos laterales en el arco triunfal y la fachada acompañados de movimientos diagonales de las torres con diferente intensidad (mayores en la torre norte); corresponde al periodo de 0.113 segundos. El modo cinco presenta movimientos laterales del arco triunfal, torsiones en la fachada y movimientos diagonales de las torres; siendo mayores los de la torre sur; su periodo es de 0.112 segundos.

Tabla 3.3 Periodos y modos de vibrar del modelo agrietado

MODO No.	PERIODO (Seg)	DESCRIPCIÓN FORMA MODAL	ESQUEMA FORMA MODAL
1	0.154	Movimiento lateral (Dirección Y). Se observa un movimiento mayor en el centro de la nave.	
2	0.131	Movimientos de flexión en las torres y el arco triunfal, además de movimientos de la bóveda en dirección vertical y de las torres en dirección longitudinal. Se genera cierre y apertura de muros en la nave central.	
3	0.122	Movimientos diagonales desfasados en las torres y longitudinales del arco triunfal. Los movimientos mayores se presenta en las torres.	
4	0.113	Movimientos laterals en el arco triunfal y la fachada, así como movimientos diagonales en las torres. El movimiento mayor se observa en la torre norte.	
5	0.112	Movimientos laterales del arco triunfal, acompañados de movimientos diagonales en las torres y pequeñas torsiones en la fachada. El movimiento mayor se presenta en la torre sur.	

De estas formas modales, la segunda es la que contribuye de manera importante en el mecanismo de bóveda. En la tabla 3.4, se observan las formas en las que afecta cada modo (cinco primeros) al mecanismo en estudio.

Tabla 3.4 Movimiento en el centro de la nave correspondiente a los cinco primeros modos

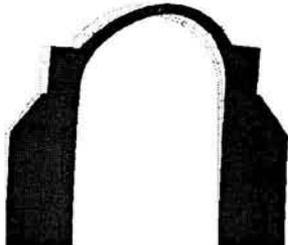
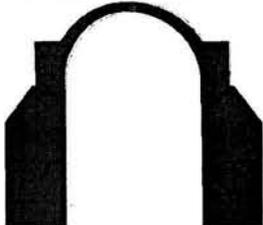
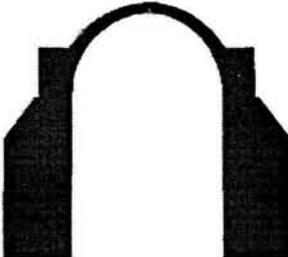
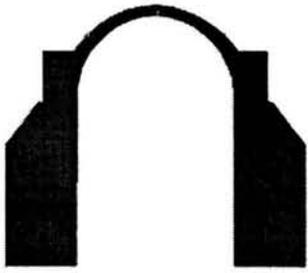
MODO No.	MOVIMIENTO GLOBAL	MOVIMIENTO EN LA NAVE	ESQUEMA DE LA NAVE
1	Movimiento lateral (Dirección Y).	Los muros y la bóveda se mueven hacia el mismo lado, por tal, no hay incremento del claro.	
2	Movimientos de flexión en las torres y el arco triunfal; movimientos verticales de la bóveda y movimiento longitudinal de las torres.	Desplazamientos de los muros en direcciones opuestas, producto del movimiento vertical de la bóveda, de tal forma que se generan cambios en el claro.	
3	Movimientos diagonales desfasados en las torres y longitudinales del arco triunfal.	Pequeños movimientos en la bóveda, los cuales no son importantes para el mecanismo en estudio.	
4	Movimientos laterales en el arco triunfal y la fachada, y movimientos diagonales en las torres. El movimiento mayor se observa en la torre norte.	Pequeñas vibraciones de la bóveda en la dirección vertical, unido a ligeros desplazamientos de los muros en sentido contrario.	

Tabla 3.4 (Continuación)

MODO No.	MOVIMIENTO GLOBAL	MOVIMIENTO EN LA NAVE	ESQUEMA DE LA NAVE
5	Movimientos laterales del arco triunfal, movimientos diagonales en las torres y pequeñas torsiones en la fachada. El movimiento mayor se presenta en la torre sur.	Ligeras vibraciones en los muros que no contribuyen en la formación del mecanismo.	

3.1.3 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

Se observa que el modelo agrietado es sólo ligeramente más flexible que el modelo sano. El periodo del primer modo de vibrar del modelo agrietado es 1.31% mayor que el del sano. La segunda forma modal para el modelo agrietado, es similar a la tercera del modelo sano, y su periodo es 12.93% más grande. El tercer modo de vibrar del modelo agrietado, es parecido al segundo modo de vibrar del modelo sano, siendo 0.82% más rígido el modelo sano que el agrietado. La cuarta y quinta forma de vibrar del modelo sano son 0.89% y 0.90% respectivamente más rígidos que el modelo agrietado. La forma del movimiento modal uno y cinco son similares entre los dos modelos. Para los modos dos, tres y cuatro se presentan variaciones en el movimiento de algunas partes de la estructura como ya se ha comentado anteriormente.

Regularmente, las formas modales que involucran movimientos importantes de la bóveda, son más flexibles en el modelo agrietado; así pues, los movimientos relacionados con la bóveda son un número de forma modal inferior en el modelo agrietado en comparación con el modelo sano; por ejemplo, la forma modal donde se activa el movimiento de bóveda, es la segunda forma modal en el modelo agrietado y corresponde a la tercera forma en el modelo sano; lo anterior, también ocurre en otros casos. En la tabla 3.5 se muestran algunas formas modales que varían entre los modelos.

Tabla 3.5 Modos distintos entre el modelo sano y el agrietado

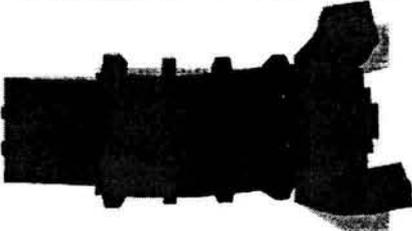
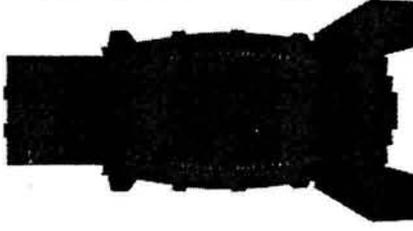
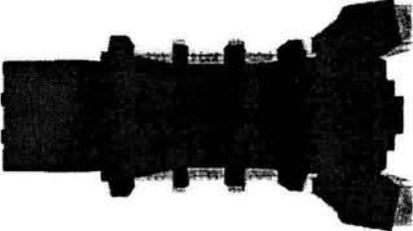
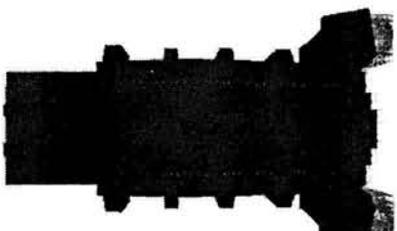
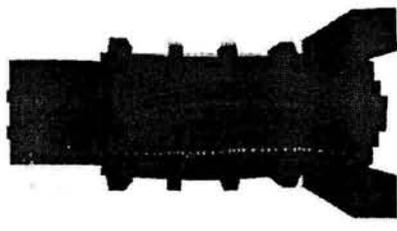
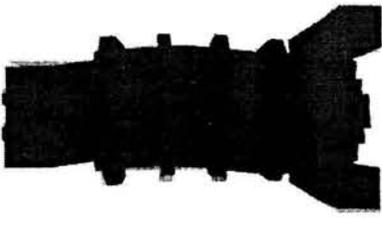
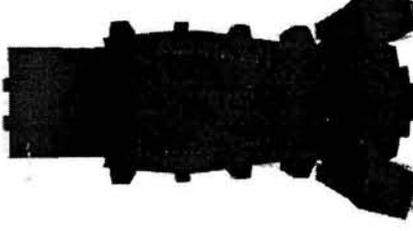
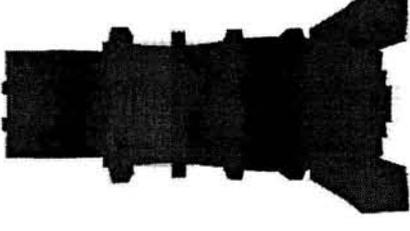
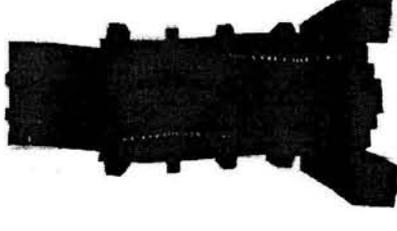
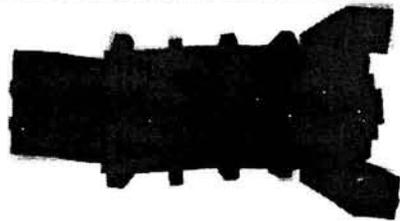
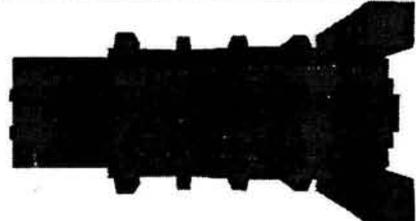
MODO	MODELO SANO	MODELO AGRIETADO
	REPRESENTACIÓN GRÁFICA	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
2	 <p>Movimiento transversal T = 0.121</p>	 <p>Movimiento de bóveda en Z T = 0.131</p>
3	 <p>Movimiento de bóveda en Z T = 0.116</p>	 <p>Movimiento transversal T = 0.122</p>
8	 <p>Torsión en muros y fachada T = 0.078</p>	 <p>Movimiento en la bóveda T = 0.080</p>
9	 <p>Movimiento en bóveda T = 0.074</p>	 <p>Torsión en muros y fachada T = 0.079</p>
12	 <p>Torsión T = 0.067</p>	 <p>Torsión y bóveda T = 0.068</p>

Tabla 3.5 (Continuación)

MODO	MODELO SANO	MODELO AGRIETADO
	REPRESENTACIÓN GRÁFICA	REPRESENTACIÓN GRÁFICA
13	 <p>Torsion y bóveda T = 0.064</p>	 <p>Torsión T = 0.067</p>

La figura 3.1 muestra los espectros de respuesta horizontal y vertical de los registros sísmicos empleados en los análisis, en los cuales se localizaron los periodos correspondientes a los movimientos transversales (modo uno en ambos modelos) y verticales de la bóveda (modo tres, para el modelo sano y dos para el agrietado). Para el modo relacionado con el movimiento transversal existe una variación pequeña entre el periodo del modelo sano y del agrietado; esta flexibilización causa pocos efectos en la respuesta estructural, ya que, se aprecia claramente que aunque el periodo del modelo agrietado se acerca más a un pico del espectro de respuesta, la cercanía entre uno y otro hace que no sea una situación crítica. Sin embargo, en la forma modal donde se experimenta abertura y cierre de los muros de la nave, existe una variación más significativa entre los periodos de los modelos; por tal motivo, se presentarán diferencias importantes en la respuesta al flexibilizarse la estructura, siendo esto evidente en la figura 3.1, donde el periodo del modelo agrietado se aproxima más a un pico del espectro de respuesta, presentándose la situación más crítica con el espectro de Acapulco en la dirección vertical.

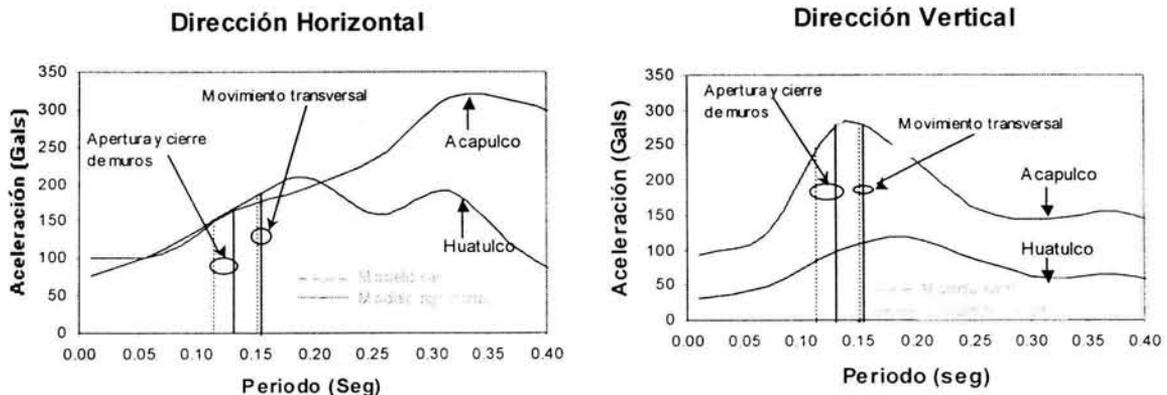


Figura 3.1 Localización de los periodos de los modelos sano y agrietado sobre los espectros de respuesta horizontal y vertical de los registros.

De acuerdo con la información proporcionada por los periodos y las formas de vibrar de los dos modelos, se aprecia que las respuestas se modifican cuando existen movimientos que producen que el claro de la nave cambie; es decir, movimientos que conducen a la formación del mecanismo de bóveda en estudio. Lo anterior, es consecuencia de la flexibilización que experimenta dicho elemento al introducirle las discontinuidades (agrietamiento). En general los cambios que se observan consisten en diferencias en la forma del movimiento de algunos elementos de la estructura y alargamiento de los periodos.

3.2 RESPUESTA ESTRUCTURAL DE LOS MODELOS ANTE UN REGISTRO TÍPICO

Si bien es cierto que cuando se hacen análisis con elementos finitos es posible medir distintos parámetros, tales como: fuerzas, desplazamientos, aceleraciones, esfuerzos, deformaciones, en este estudio se optó por trabajar con los resultados de aceleraciones y desplazamientos, puesto que se utilizará la teoría de señales en la interpretación de las repuestas de los modelos. Esta teoría ha sido utilizada ampliamente en problemas de esta índole (Rivera, 2000). Se estudiaron 12 puntos sobre la cubierta (Figura 3.2). Los tres primeros se ubican en el ábside: el punto uno se halla en la parte central del muro de la fachada posterior a una altura de 9.25 metros, el dos se encuentra en el centro de la cúpula alcanzando la altura de 11.48 metros, y el tres se localiza sobre el arranque de la cúpula a 9.25 metros de altura. Los puntos del cuatro al nueve se hallan sobre la nave central, el cuatro se localiza en el arranque de la bóveda (altura 9.25 m) sobre el muro sur, mientras que el cinco se ubica exactamente sobre la parte central de la bóveda (altura 11.20 m) y el seis se encuentra a la misma distancia y altura que el cuatro pero sobre el muro norte; ambos se ubican en la zona de la nave que colinda con el ábside (cerca del arco triunfal). El punto siete se localiza sobre el muro sur a la misma altura que el cuatro, el ocho se ubica en la parte central de la bóveda y el nueve se halla sobre el muro norte similar al seis; e stos puntos se localizan en la parte central de la bóveda. El punto 10 se halla en el centro del imafrente sobre la fachada principal (altura 12.40 m). El 11 se localiza en la parte central de la cúpula del campanario a una altura de 14 m y el 12 se encuentra al inicio del arranque del campanario (altura 9.25 m) en la esquina sur-oeste. Finalmente, los puntos A, B y C, se localizan sobre el muro norte; el primero de éstos, se encuentra en el arranque de la bóveda en la parte media del primer contrafuerte cercano al arco triunfal, el segundo se halla a la mitad de la distancia

existente entre el punto A y siete y el tercero se ubica a la mitad del claro formado por el contrafuertes central y el cercano a la fachada.

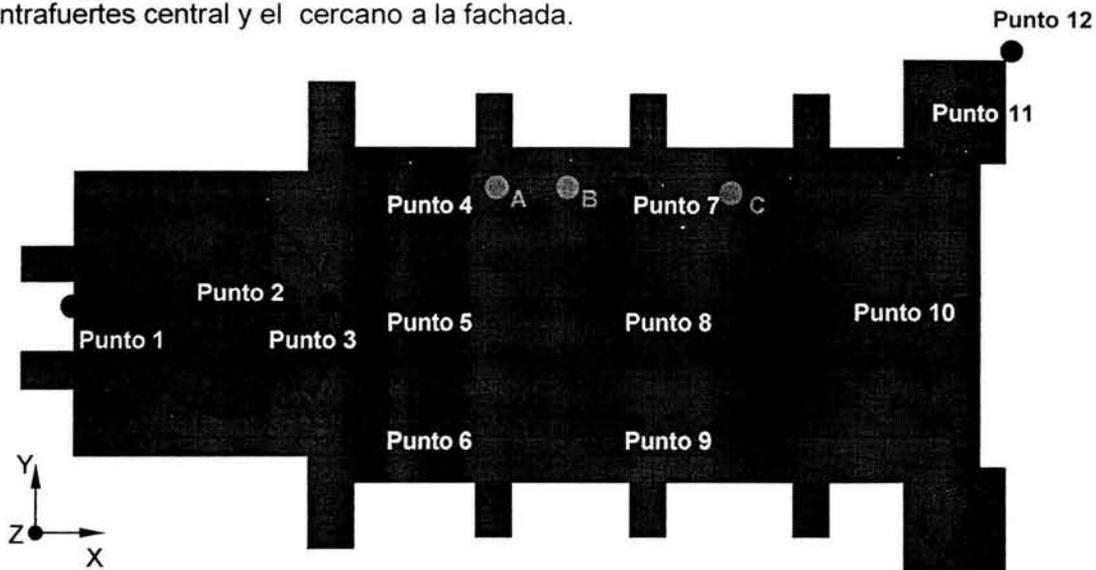


Figura 3.2 Localización de los puntos de estudio sobre la cubierta del templo

Por otra parte, es conocido que la respuesta dinámica de una estructura ubicada en zonas cercanas a epicentros sísmicos, es influenciada de manera importante por el componente vertical del sismo; por tal, es necesario incluir este componente en los análisis. En este trabajo se hicieron análisis del modelo sano con el componente transversal únicamente y análisis que incluían los componentes transversal y vertical del registro sísmico de Huatulco, con el propósito de evaluar el efecto del movimiento en las respuestas. Se obtuvieron los cocientes espectrales de las aceleraciones resultantes entre los puntos nueve y siete, los cuales se obtienen al dividir los espectros de Fourier de las aceleraciones que se presentan en cada punto. En este caso se relacionan los picos de estos cocientes con las frecuencias de las formas modales para determinar cuales influyen en el movimiento de la estructura. En la figura 3.3 se muestran los cocientes espectrales para las direcciones de estudio, entre dichos puntos, empleando y no, el componente vertical. Se observa, que cuando no se utiliza este componente, los movimientos de los muros en la dirección transversal están en sincronía, ya que el cociente espectral es aproximadamente igual a uno. Mientras que cuando se emplea el componente vertical, se presenta una forma modal para la cual los movimientos en los muros son distintos, siendo el cociente espectral diferente de uno en esta frecuencia (17.2 Hz) correspondiente al modo número 17, donde se presentan movimientos diagonales desfasados en las torres y flexiones sobre el arco triunfal que provocan que los muros de

la nave se deformen con doble curvatura. Algo similar, ocurre en la dirección vertical, ya que cuando no se utiliza el componente vertical, los movimientos que se presentan en los muros son parecidos, siendo el cociente espectral casi igual a uno; pero, cuando se emplea el componente vertical en los análisis, los movimientos de los muros son diferentes en las formas modales uno (6.16 Hz), cinco (9.87 Hz) y ocho (13.1 Hz); éstas están relacionados con movimientos transversales de toda la estructura para el modo uno, con movimientos diagonales de las torres, flexión en el arco triunfal y torsión en la fachada en el modo cinco; y con movimientos de flexión en la fachada y en el arco triunfal en el modo ocho. De acuerdo a lo anterior, en ambas direcciones el movimiento entre los muros se presenta fuera de sincronía; lo cual produce que la apertura del claro de la bóveda cuando se utiliza el componente vertical del sismo sea mayor; siendo este incremento de alrededor del 100% (Figura 3.4). Así pues, se ratifica la necesidad de incluir éste componente en los análisis, ya que el mecanismo en estudio es sensible a la magnitud del incremento del claro de la bóveda. Luego entonces, todos los resultados que se utilizarán en los análisis incluyen los dos componentes.

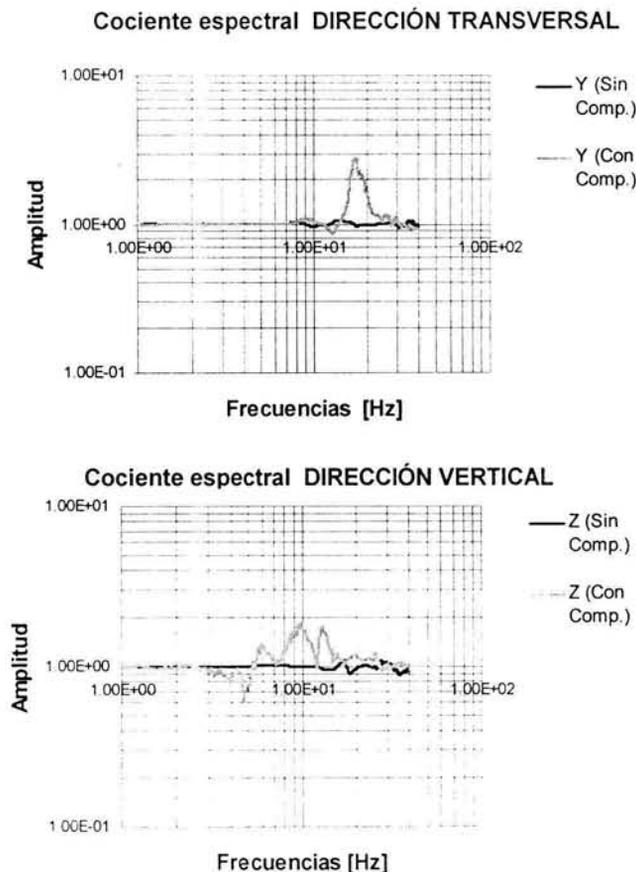


Figura 3.3 Cociente espectral entre el punto nueve y siete cuando se incluye o no la componente vertical del sismo

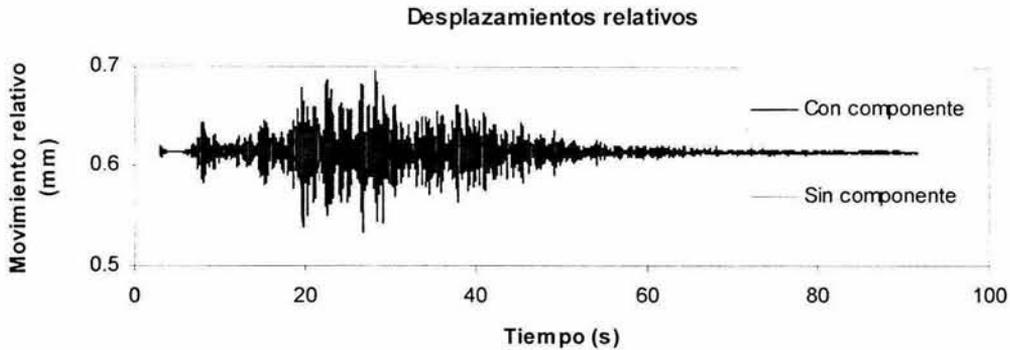


Figura 3.4 Historia de los desplazamientos relativos entre los muros cuando se incluye o no la componente vertical del sismo

3.2.1 MODELO SANO

Se obtuvieron los cocientes espectrales entre la aceleración de cada uno de los puntos y la aceleración en la base de la estructura correspondiente al sismo de Huatulco, en las direcciones lateral y vertical. Por sencillez, se presentan los resultados agrupados en tres zonas.

ÁBSIDE

PUNTO 1. En la figura 3.5 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto localizado sobre la parte superior de la fachada posterior y las aceleraciones de la base, en las dos direcciones de estudio. Se aprecian tres picos importantes en la dirección transversal, los cuales corresponden a los modos uno (6.55 Hz), seis (11.1 Hz) y diez (13.93 Hz). Las formas modales uno, seis y diez le provocan al muro (sobre el cual se halla el punto) desplazamientos en la dirección transversal. En la dirección vertical existe solamente un pico relevante; esto indica que solamente este modo contribuye para que los movimientos del punto y la base sean distintos; siendo éste el modo 50 (28.8 Hz), el cual induce movimientos de flexión y verticales en la parte del muro donde se localiza el punto. Es preciso recordar que para valores de frecuencias elevadas los resultados pierden precisión debido al paso de tiempo empleado en los registros.

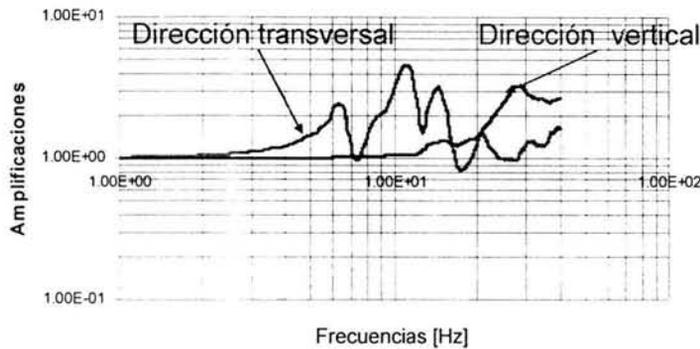


Figura 3.5 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto uno y las del suelo

PUNTO 2. La figura 3.6 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones del centro de la cúpula y las del suelo. Se observa que existen tres modos que amplifican los movimientos en la dirección lateral, los cuales son el uno (6.55 Hz), el seis (11.1 Hz) y el 40 (25.4 Hz). La forma modal uno y seis provocan sobre la cúpula y los muros laterales del ábside movimientos transversales y la 40 propicia movimiento laterales de los muros del ábside y torsionales en la cúpula, presentándose así desplazamientos de ésta en la dirección transversal. En la dirección vertical únicamente una frecuencia (31.1 Hz) propicia las variaciones, relacionada con el modo 50, el cual genera sobre la cúpula movimientos laterales y verticales (torsiones en la cúpula).

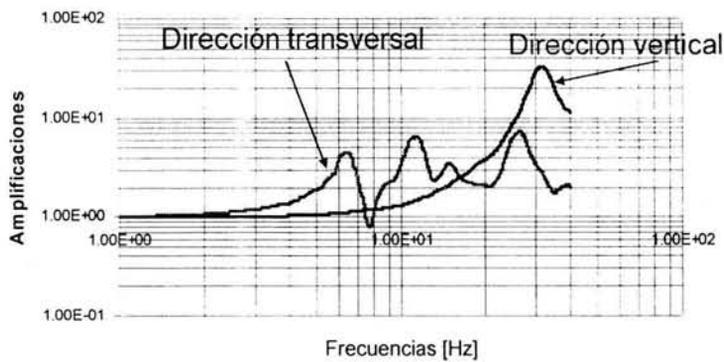


Figura 3.6 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto dos y las del suelo

PUNTO 3. En la figura 3.7 se observan los cocientes espectrales entre las aceleraciones de este punto y las del suelo. Se aprecia que en la dirección transversal existen amplificaciones importantes solamente en dos frecuencias la del modo uno (6.59 Hz) y la del seis (11.1 Hz), los cuales provocan movimientos laterales en todo el ábside (muros y cúpula). En la dirección vertical se presenta un pico principal en el modo 46

(28.1 Hz), el cual provoca movimientos verticales del punto, debidos a la vibración de la cúpula en esta dirección.

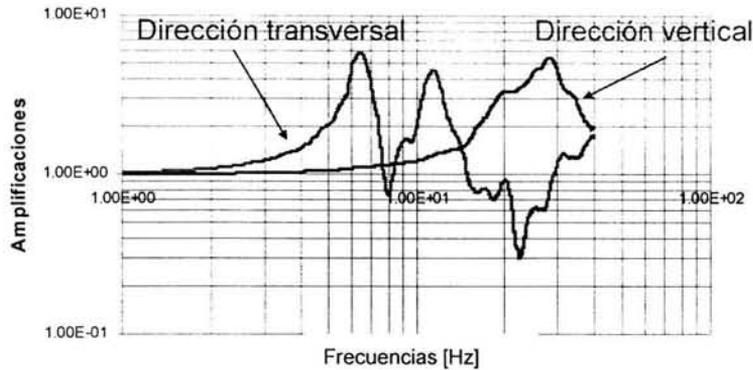


Figura 3.7 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto tres y las del suelo

NAVE CENTRAL

PUNTO 4. En la figura 3.8 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del muro sur de la nave (cerca del ábside) y la base. En la dirección transversal se presentan cuatro picos importantes, para los cuales los movimientos son distintos. Estos pertenecen al modo uno (6.59 Hz), al modo seis (11.1 Hz), al modo 33 (23.3 Hz) y al modo 43 (26.4 Hz). El modo uno y seis producen movimientos laterales de toda esta parte de la nave; el 33 conlleva a aperturas y cierre de los muros debido a vibraciones en la bóveda en la dirección vertical y en el 43 se aprecian movimientos en fase de los muros hacia la dirección transversal provocados por vibraciones en la dirección vertical de la cúpula y la bóveda. En la dirección vertical, se presentan dos picos importantes relacionados con los modos 33 (23.3 Hz) y 45 (27.7 Hz), estos ocasionan movimientos en la dirección vertical del punto, y son consecuencia de la vibración de la bóveda y la cúpula en esta dirección.

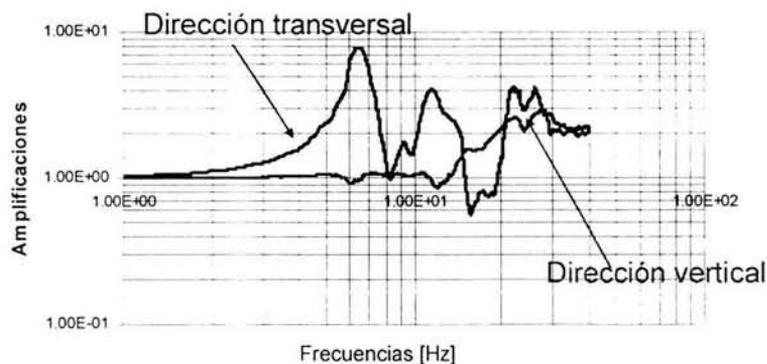


Figura 3.8 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto cuatro y las del suelo

PUNTO 5. La figura 3.9 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones del centro de la bóveda (sobre el arco triunfal) y las de la base. En la dirección transversal los movimientos se amplifican principalmente en los modos uno (6.59 Hz) y diez (14.1 Hz); la forma modal uno provoca movimiento transversal de toda la nave, mientras que la diez provoca movimientos en fase de los muros hacia la dirección lateral debidos a torsiones en la bóveda. En la dirección vertical se presentan tres picos importantes en los modos 21 (18.7 Hz), 35 (24.0 Hz) y 48 (28.9 Hz). Estos modos inducen movimientos verticales sobre los muros, como consecuencia de torsiones en la bóveda para el 21 y 48, y de vibraciones de la misma en la dirección vertical para el 35.

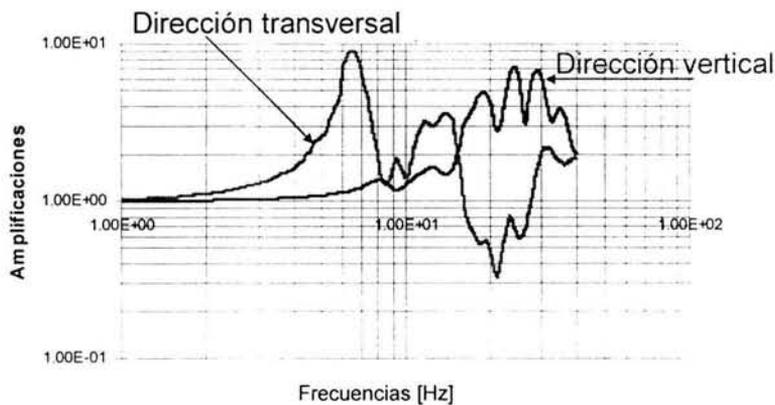


Figura 3.9. Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto cinco y las del suelo

PUNTO 6. En la figura 3.10 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto sobre el muro norte y las del suelo. En la dirección transversal los modos que producen diferencias entre los movimientos son el uno (6.59 Hz), el seis (11.1 Hz), el 33 (23.3 Hz) y el 43 (26.4 Hz). El modo uno y seis producen movimientos laterales de toda esta parte de la nave; el 33 conlleva a aperturas y cierre de los muros debido a vibraciones en la bóveda en la dirección vertical y en el 43 se aprecian movimientos en fase de los muros hacia la dirección transversal provocados por vibraciones en la dirección vertical de la cúpula y la bóveda. Para la dirección vertical, los modos que generan las diferencias de movimiento, son el ocho (12.8 Hz), el 33 (23.3 Hz) y el 45 (27.7 Hz). Estos ocasionan movimientos en la dirección vertical del punto, causados por vibraciones de la bóveda en la dirección vertical para el modo ocho, por torsiones en la bóveda para el modo 33 y por torsiones en la bóveda y cúpula para el 45.

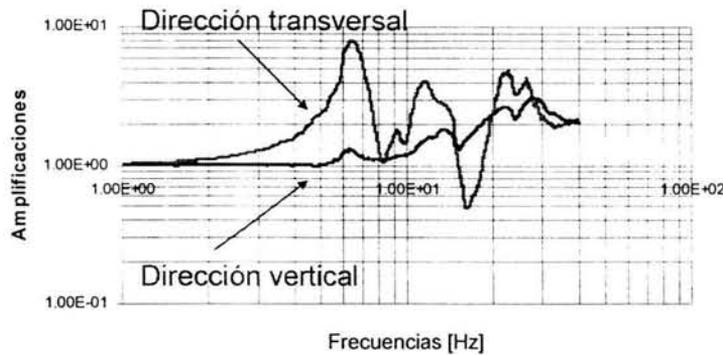


Figura 3.10 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto seis y las del suelo

PUNTO 7. La figura 3.11 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto sobre el muro sur (en la parte central de la nave) y las del suelo. Se observa en la dirección transversal que se presentan dos amplificaciones importantes correspondientes a los modos uno (6.59 Hz) y 33 (23.2 Hz), el modo uno produce movimientos laterales de toda la nave, mientras que el 33 ocasiona cambios del claro de la nave debidos a vibraciones torsionales de la bóveda. Por otra parte, en la dirección vertical se presentan tres picos importantes para los modos uno (6.62 Hz), seis (10.7 Hz) y 30 (22.7 Hz). La forma modal uno y seis ocasionan, sobre esta parte del la nave, desplazamientos laterales de todo el conjunto, que conllevan a movimientos verticales de los muros, mientras que en la 30 los movimientos en la dirección vertical son producidos por torsiones en la bóveda que generan apertura y cierre de los muros de la nave.

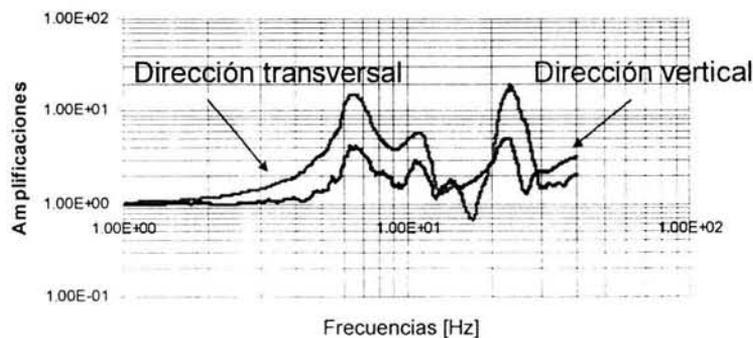


Figura 3.11 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto siete y las del suelo.

PUNTO 8. En la figura 3.12 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto ubicado en el centro de la nave y el suelo. En la dirección transversal los picos importantes se ubican en los modos uno (6.70 Hz) y seis (10.9 Hz), los cuales ocasionan movimientos laterales de toda la nave. La dirección vertical presenta tres amplificaciones de importancia, correspondientes a los modos dos (8.39 Hz), 12 (15.3 Hz) y 36 (24.4 Hz). En el modo dos se presentan movimientos laterales de toda la nave unidos a torsiones en los muros, lo que ocasiona que se presente vibraciones en la dirección vertical. El 12 produce vibraciones verticales debidos a movimientos de torsión en la bóveda y los muros que generan cambios en el claro de la nave. En el 36 se provocan desplazamientos verticales debidos a torsiones sobre la bóveda.

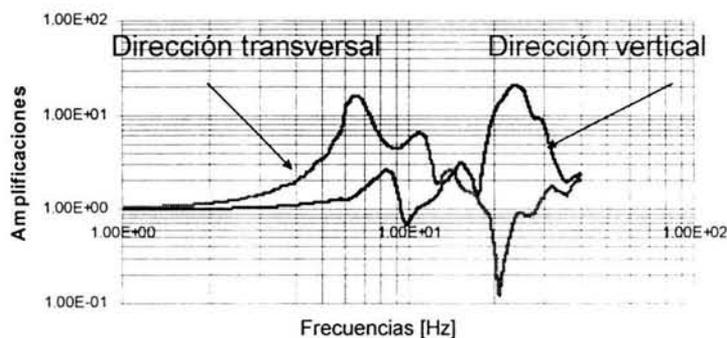


Figura 3.12 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto ocho y las del suelo

PUNTO 9. En la figura 3.13 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto ubicado en la parte central del muro norte y las de la base. Para los movimientos en la dirección transversal se presentan las variaciones más importantes para los modos uno (6.59 Hz) y 33 (23.2 Hz). El modo uno produce movimientos laterales de toda la nave, mientras que el 33 ocasiona cambios del claro de la nave debidos a vibraciones torsionales de la bóvedas. Por otro lado, en la dirección vertical se presentan diferencias en los modos uno (6.62 Hz), seis (10.7 Hz) y 30 (22.7 Hz). La forma modal uno y seis ocasionan desplazamientos laterales de toda la nave, que conllevan a movimientos verticales de los muros, mientras que la 33 contiene movimientos verticales debidos a torsiones en la bóveda que generan apertura y cierre de los muros de la nave.

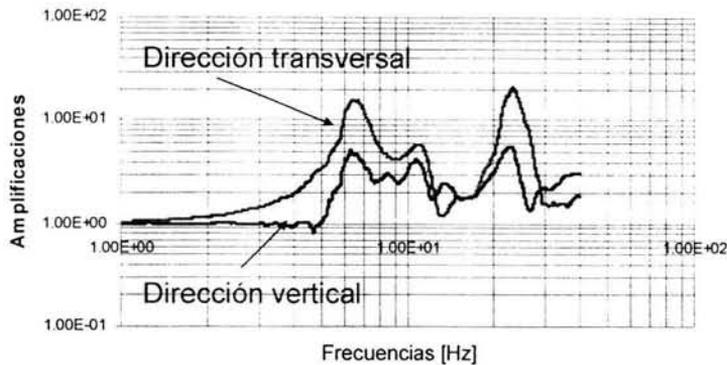


Figura 3.13 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto nueve y las del suelo

FACHADA, TORRES Y CAMPANARIOS

PUNTO 10. La figura 3.14 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto sobre la fachada principal (imafrente) y las del suelo. En la dirección transversal, se presenta el pico más importante en la forma modal número uno (6.41 Hz), la cual induce movimientos laterales de la fachada. Para la dirección vertical, la amplificación más importante corresponde al modo 36 (24.4 Hz) en donde se aprecian vibraciones verticales producidas por movimientos de torsión en la fachada y las torres.

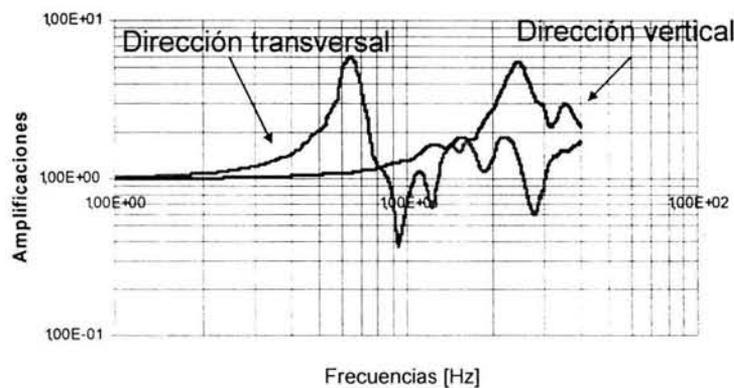


Figura 3.14 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto diez y las del suelo

PUNTO 11. En la figura 3.15 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones de la parte central de la cúpula del campanario y las del suelo. Existen dos picos importantes en la dirección lateral, correspondientes a los modos uno (6.44 Hz) y diez (14.1 Hz), el modo uno provoca movimientos laterales de toda la fachada y las torres mientras que el diez produce movimientos verticales debidos a torsiones en las torres y los campanarios. En la dirección vertical se presentan amplificaciones importantes en los

modos uno (6.35 Hz), nueve (13.5 Hz) y 37 (24.6 Hz). Se presentan movimiento verticales en el punto, debido a que en el modo uno existen movimientos laterales de toda la fachada y las torres, a que en el nueve hay movimientos diagonales del campanario (sin las torres), y a que en el 37 se tiene movimientos verticales de la fachada con torsiones sobre los campanarios.

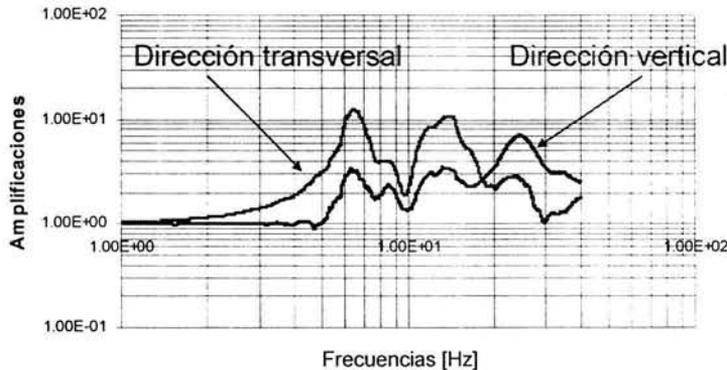


Figura 3.15 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto once y las del suelo

PUNTO 12. La figura 3.16 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones en una esquina del campanario sur y del suelo. Se observa que en la dirección transversal se presentan tres amplificaciones importantes correspondientes al modo uno (6.51 Hz), al siete (11.6 Hz) y al 42 (26.2 Hz). El modo uno propicia movimientos laterales del conjunto formado por la fachada y las torres; el siete provoca movimientos laterales desfasados de las torres y el 42 produce movimientos de flexión y torsión en las torres y el campanario. Para la dirección vertical se presentan picos importantes en la forma modal uno (6.28 Hz), 11 (14.0 Hz) y 39 (25.3 Hz). En el modo uno se observan movimientos laterales de las torres que generan desplazamiento en la dirección vertical. El modo 11 presenta también vibraciones verticales ocasionadas por movimientos diagonales de los campanarios. En el modo 39 se tienen desplazamientos verticales debidos a movimientos de flexión en las torres y los campanarios, unidos a movimientos de la fachada en la dirección vertical.

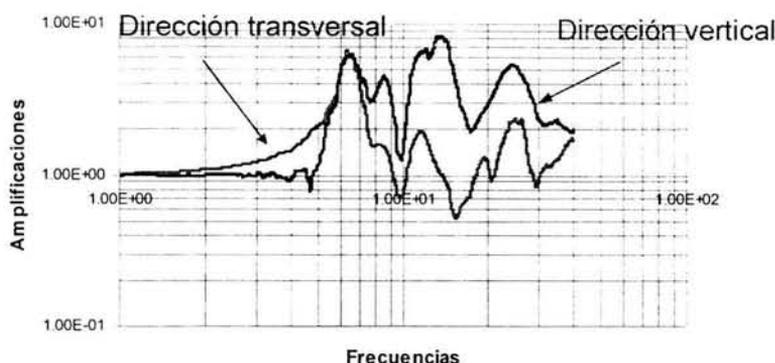


Figura 3.16 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto doce y las del suelo

GENERALIDADES

El modo uno tiene un factor de participación modal del 51%; y es determinante en las respuestas en la dirección lateral al producir movimientos de toda la estructura en esta dirección, así pues este modo influye en todos los puntos. Para la dirección vertical, este modo contribuye únicamente en las repuestas de los puntos ubicados en la parte central de la nave y del campanario, debido a que en estas zonas los desplazamientos laterales son grandes, por lo tanto, ocasionan movimientos de los puntos en las dos direcciones (lateral y vertical).

Por otra parte, en el ábside, para la dirección transversal, además del modo uno, la forma modal seis participa en todos los puntos, lo que indica que para esta zona el tipo de vibración que produce este modo (lateral) propicia amplificaciones del movimiento. Para esta misma zona en la dirección vertical, el modo 50, referido a vibraciones verticales de los muros y de la cúpula, es el que provoca las diferencias entre los movimientos en los puntos de la cúpula cercanos a la fachada posterior, pero a medida que se acerca al arco triunfal resulta ser más relevante el modo 46.

En la nave central se aprecia que los mismos modos activan las diferencias en los movimientos de los muros, tanto para la dirección lateral como vertical; mientras que en la parte central de la bóveda se presentan variaciones en algunos de los modos en relación con los de los extremos. En la nave, también el modo uno participa en todos los puntos; además, el modo seis es importante en la dirección transversal para los puntos que se ubican en el extremos de los muros (sobre el arco triunfal). Para los ubicados en la parte central de los muros (centro de la nave), es más relevante el modo 33. Sin embargo, esta situación se invierte en la dirección vertical, puesto que el modo seis es importante en la parte central de los muros; mientras que, el 33 es el de trascendencia para los puntos

localizados sobre los extremos de los muros. En el punto ubicado en el centro del claro de la bóveda, también resulta ser importante el modo seis para la dirección transversal.

En la fachada, las torres y los campanarios, además de actuar el modo uno, actúan otros modos que propician vibraciones locales de estos elementos; por tal, los modos que aquí influyen, no tienen relación con los que afectan otras zonas.

3.2.2 MODELO AGRIETADO

De igual manera que en el modelo sano, se estudiaron los cocientes espectrales entre las aceleraciones resultantes de la excitación del sismo de Huatulco para algunos puntos y las introducidas en la base por el mismo evento sísmico. Los resultados se presentan también agrupados en tres zonas.

ÁBSIDE

PUNTO 1. En la figura 3.17 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto sobre la fachada posterior (ábside) y las de la base. Se aprecia que para la dirección transversal existen picos importantes en los modos uno (6.16 Hz), cinco (9.90 Hz) y 36 (31.88 Hz); para estos modos se presentan desplazamientos laterales del muro donde se localiza el punto. En la dirección vertical se presenta un solo pico importante correspondiente al modo 35 (30.6 Hz); el cual induce desplazamientos verticales en el muro posterior del ábside.

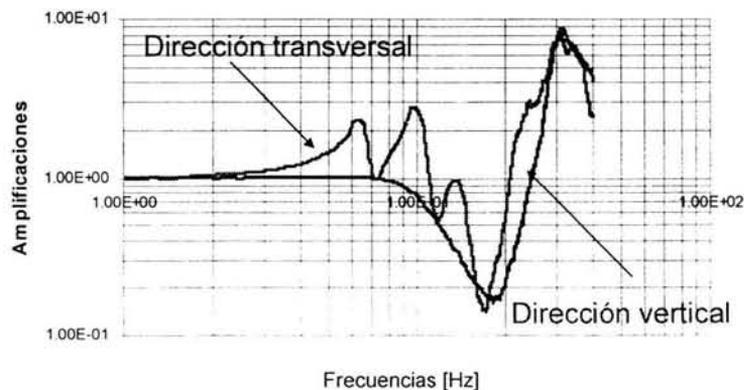


Figura 3.17 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto uno y las del suelo

NAVE CENTRAL

PUNTO 4. La figura 3.18 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones del muro sur de la nave (cerca del arco triunfal) con relación a la base. En la dirección transversal existen tres amplificaciones de importancia correspondientes a los modos uno (6.59 Hz), cinco (10.4 Hz) y 37 (32.3 Hz). El modo uno y cinco provocan movimientos laterales de todo la nave, mientras que el 37 produce desplazamientos fuera de fase de los muros debidos a vibraciones de la bóveda en la dirección vertical, que conllevan a tener cambios en el claro de la bóveda. En la dirección vertical se presenta solamente una amplificación de consideración en el modo 36 (31.2 Hz), el cual propicia desplazamiento verticales generados por torsiones en la bóveda.

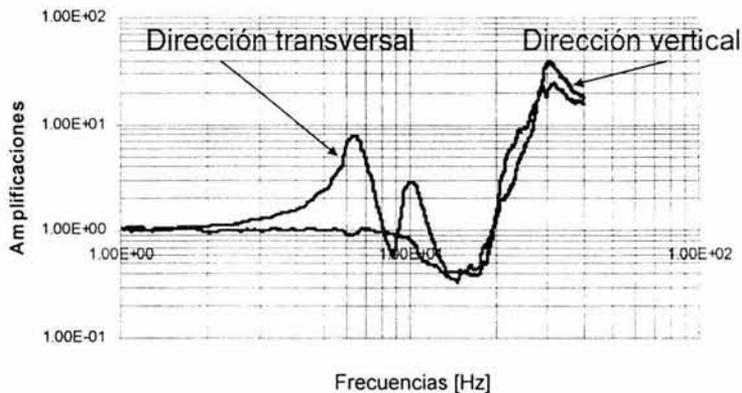


Figura 3.18 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto cuatro y las del suelo

PUNTO 5. En la figura 3.19 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones en la parte central de la bóveda (cerca del arco triunfal) y las del suelo. En la dirección transversal se presentan dos picos importantes en los modos uno (6.44 Hz) y 31 (26.9 Hz). En la forma modal uno se presentan movimientos laterales de toda la nave, mientras que en la 31 existen cambios en el claro de la nave producto de torsiones de la bóveda. Para la dirección vertical se encuentra solamente una amplificación importante en el modo 35 (30.7 Hz), el cual provoca desplazamientos verticales del punto, al presentarse vibraciones de la bóveda en esta misma dirección.

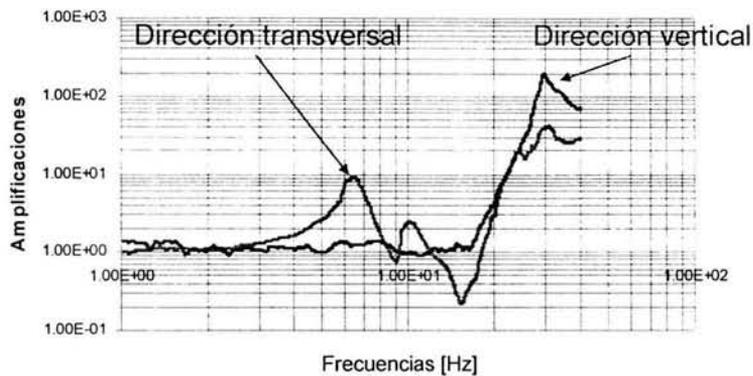


Figura 3.19 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto cinco y las del suelo

PUNTO 6. La figura 3.20 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones en el muro norte de la nave (cerca del arco triunfal) y las de la base. En la dirección transversal se presentan tres picos de importancia correspondientes a las formas modales uno (6.59 Hz), cinco (10.3 Hz) y 37 (32.3 Hz). El modo uno y cinco provocan movimientos laterales de todo la nave, mientras que el 37 produce desplazamientos desfasados de los muros debidos a vibraciones de la bóveda en la dirección vertical, generándose cambios en el claro de la bóveda. En la dirección vertical se presenta una sola amplificación importante en el modo 36 (30.6 Hz), el cual produce movimientos verticales en el muro originado por torsiones en la bóveda.

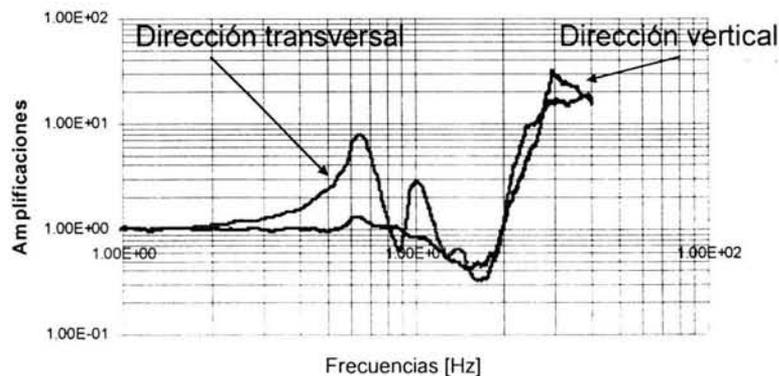


Figura 3.20 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto seis y las del suelo

PUNTO 7. En la figura 3.21 se muestran los cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto sobre el muro sur (parte central de la nave) y las de la base. En la dirección transversal hay dos picos importantes en los modos uno (6.62 Hz) y 37 (33.0

Hz). El modo uno induce movimientos laterales de toda la nave y el 37 provoca cambios en el claro de la nave generados por torsiones en la bóveda. Para la dirección vertical se presentan dos amplificaciones importantes correspondientes también a los modos uno (6.70 Hz) y 37 (32.1 Hz). La forma modal uno conlleva a movimientos verticales del punto al desplazarse toda la nave en la dirección lateral, mientras que la 37 ocasiona vibraciones en la dirección vertical debidas a torsiones de la bóveda.

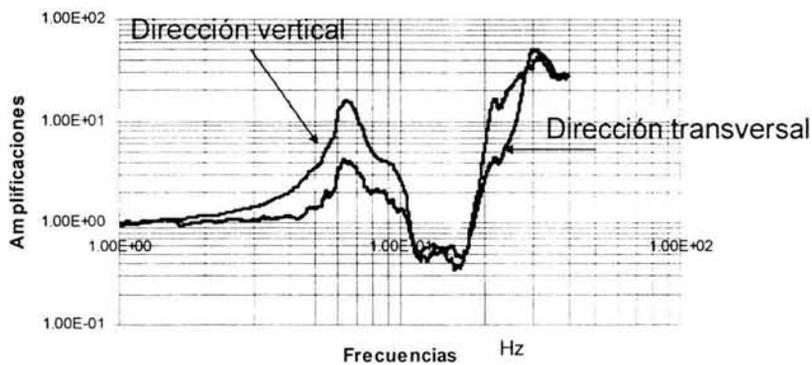


Figura 3.21 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto siete y las del suelo

PUNTO 8. La figura 3.22 muestra los cocientes espectrales entre las aceleraciones de la parte central de la bóveda y las del suelo. En la dirección transversal se presentan amplificaciones importantes correspondientes a los modos uno (6.65 Hz) y 37 (33.0 Hz). El modo uno provoca desplazamientos laterales de toda la nave, mientras que le 37 provoca cambios en el claro de la nave debidos a movimientos torsionales de la bóveda. Para la dirección vertical se presenta un pico importante en el modo 37 (32.5 Hz); el cual produce vibraciones de torsión en la bóveda propiciando movimientos verticales en el punto.

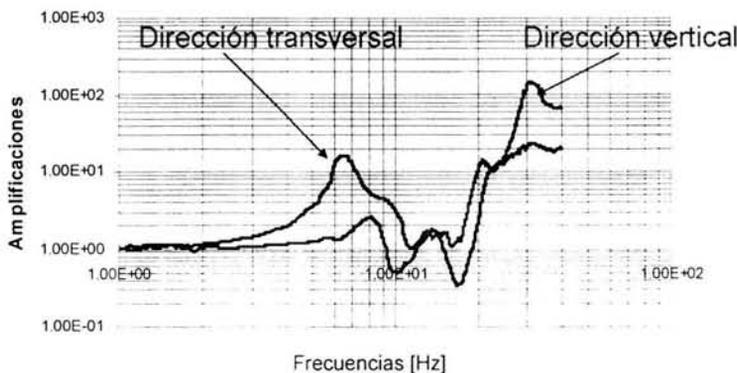


Figura 3.22 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto ocho y las del suelo

PUNTO 9. En la figura 3.23 se presentan los cocientes espectrales entre las aceleraciones del muro sur (parte central de la nave) y las de la base. En la dirección transversal se observan dos picos de importancia correspondientes a las formas modales uno (6.72 Hz) y 37 (32.5 Hz). El modo uno produce movimientos laterales de toda la nave y el 37 provoca cambios en el claro de la nave ocasionados por efectos de torsión en la bóveda. Para la dirección vertical se presenta amplificaciones importantes en los mismos modos que en la dirección lateral.

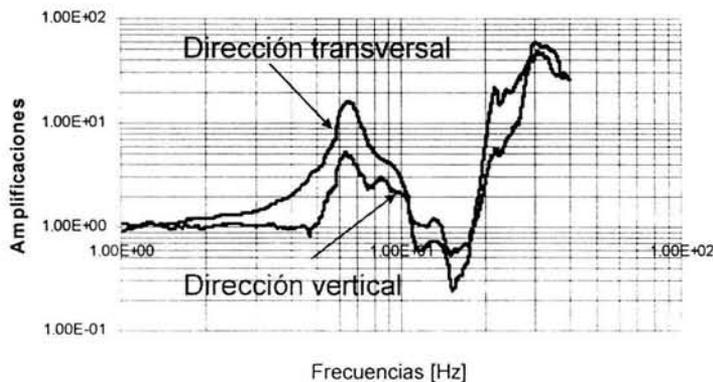


Figura 3.23 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto nueve y las del suelo

TORRES Y CAMPANARIOS

PUNTO 11. En la figura 3.24 se muestran los cocientes espectrales de las aceleraciones en el punto sobre la parte central de la cúpula del campanario y las del suelo. Se observa en la dirección transversal que se presentan tres picos importantes, referidas a los modos uno (6.72 Hz), cinco (10.6 Hz) y 37 (32.9 Hz). El modo uno y cinco producen desplazamientos laterales en las torres y los campanarios, mientras que el 37 induce movimientos torsionales de dichos elementos. En la dirección vertical se observan dos amplificaciones importantes en los modos uno (6.48 Hz) y 37 (32.5 Hz). El modo uno produce movimientos verticales al desplazarse lateralmente las torres y los campanarios, y el 37 ocasiona vibraciones verticales al existir torsiones en dichos elementos.

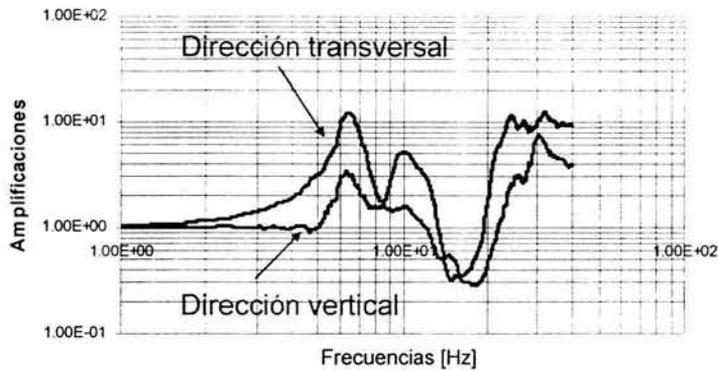


Figura 3.24 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto once y las del suelo

PUNTO 12. En la figura 3.25 se muestran los cocientes espectrales de las aceleraciones entre la parte del arranque del campanario y el suelo. Las amplificaciones de importancia en las dos direcciones corresponden a los mismos modos del punto anterior.

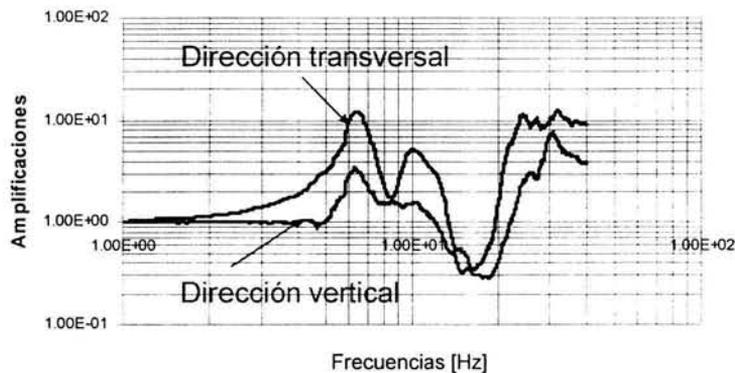


Figura 3.25 Cocientes espectrales entre las aceleraciones del punto doce y las del suelo

GENERALIDADES

En este modelo, el modo uno también participa en todos los puntos para la dirección horizontal. Para la dirección vertical, este modo contribuye únicamente en las repuestas de los puntos ubicados en la parte central de la nave, en las torres y en el campanario. Por otra parte, en el ábside, para la dirección transversal, además del modo uno, actúa la forma modal cinco en todos los puntos.

Para la parte de la nave, se aprecia que son los mismos modos los que activan las diferencias en los movimientos de los muros, tanto para la dirección lateral como vertical; mientras que en la parte central de la bóveda se presentan variaciones en algunos de los modos en relación con los de los extremos. En la nave, también el modo uno participa en todos los puntos para la dirección transversal. Unido a éste actúa el modo cinco para esta misma dirección en los puntos ubicados en los extremos de los muros (sobre el arco triunfal); no así, para los ubicados en la parte central de los muros (centro de la nave), donde es más relevante el modo 37. En la fachada principal, las torres y los campanarios, además de actuar el modo uno, actúan el modo cinco y el 37 en la dirección transversal, mientras que en la dirección vertical actúan el uno y el 37

3.2.3 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

El modo uno actúa, para la dirección transversal, en todos los puntos de los dos modelos. El número de modos que se activan en el modelo agrietado son menores que en el modelo sano. En el modelo agrietado se presentan para todos los puntos, principalmente los modos uno, cinco y 37.

La función de transferencia del modelo sano en la dirección vertical sólo presenta un pico, mientras que la del modelo agrietado presenta varios picos, los cuales coinciden con los de la función de transferencia horizontal. Lo anterior ocurre como consecuencia de las discontinuidades en la bóveda que propician que los movimientos de los modos sean diferentes entre los dos modelos.

3.3 COMPORTAMIENTO GENERAL

Para entender mejor el comportamiento global del templo, se analizaron los desplazamientos máximos de cada punto; además, se estudió la forma en que se comporta cada uno de los elementos que conforman a la estructura.

DESPLAZAMIENTOS

La tabla 3.6 muestra los desplazamientos máximos relativos obtenidos en cada punto para el modelo sano y el agrietado, debidos a los dos registros empleados en los análisis.

MODELO SANO

En el ábside los desplazamientos laterales son mayores que los verticales para el sismo de Acapulco, siendo los segundos muy pequeños. Para el caso de Huatulco sucede algo similar, con la diferencia de que en la parte central de la cúpula los desplazamientos verticales son mayores. En la nave, los desplazamientos laterales son mayores que los verticales, observándose los máximos en el centro de la nave. En la fachada principal y en las torres; igualmente los desplazamientos verticales son menores que los laterales, pero en los campanarios resultan ser menores los desplazamientos laterales. Los desplazamientos son sumamente pequeños debido a la alta rigidez de la estructura.

MODELO AGRIETADO

En el ábside las respuestas laterales son más grandes que las verticales para el sismo de Acapulco, siendo éstos últimos muy pequeños. Con el sismo de Huatulco sucede algo parecido, con la variante de que en la parte central de la cúpula los desplazamientos verticales son mayores. Para la nave, los desplazamientos laterales son mayores que los verticales, observándose los máximos en el centro de ésta. En la fachada y en las torres, los desplazamientos verticales son menores que los laterales, pero en los campanarios son mayores.

Tabla 3.6 Desplazamientos máximos relativos del modelo sano y agrietado

Localización	Punto No.	HUATULCO DESPLAZAMIENTO (mm)				ACAPULCO DESPLAZAMIENTO (mm)			
		Transversal		Vertical		Transversal		Vertical	
		Sano	Agrietado	Sano	Agrietado	Sano	Agrietado	Sano	Agrietado
Ábside	1	-0.34	-0.35	-0.34	-0.34	0.38	0.37	-0.04	-0.04
	2	0.65	0.72	-0.81	-0.81	0.73	0.70	-0.09	-0.09
	3	0.83	0.89	-0.60	-0.60	0.86	0.83	-0.06	-0.06
Nave	4	1.17	1.22	-0.46	-0.46	1.16	1.17	-0.06	-0.06
	5	1.34	1.40	-0.95	-0.93	1.36	1.34	-0.10	-0.12
	6	1.14	1.24	-0.47	-0.48	1.19	1.16	-0.05	-0.05
	7	2.61	2.55	-0.72	-0.74	2.17	2.48	0.32	0.37
	8	2.39	2.42	-1.85	-1.82	2.35	2.48	-0.38	-0.37
	9	-2.43	-2.50	-0.75	-0.77	2.36	2.38	-0.37	-0.38
Fachada, torres y campanarios	10	0.84	0.83	-0.66	-0.66	0.85	0.86	-0.07	-0.07
	11	1.81	1.90	-0.89	-0.88	1.87	1.85	-0.23	-0.24
	12	0.93	0.97	-1.09	-1.05	0.96	0.93	-0.46	-0.49

En general, los desplazamientos del modelo agrietado son ligeramente mayores que del modelo sano, lo que nos indica que, aunque se presentan algunas variaciones importantes en las formas de los movimientos de los modos, las respuestas globales experimentan solamente cambios pequeños, para registros con estas características. El porcentaje de variación entre las respuestas del modelo sano y del agrietado, para el caso de Huatulco, se encuentra entre el 1 y 4%, mientras que para el registro de Acapulco las diferencias se hayan entre el 1 y 8%, salvo algunos puntos ubicados sobre la bóveda, donde se alcanzan diferencias de alrededor del 15%.

COMPORTAMIENTO GLOBAL DE LA ESTRUCTURA

MUROS Y CONTRAFUERTES

Se observa que los contrafuertes trabajan conjuntamente con los muros, puesto que los movimientos que se producen sobre la parte del muro entre dos contrafuertes no se amplifican de manera significativa, lo que quiere decir que el muro y los contrafuertes actúan como un solo elemento, en el cual no se presentan flexiones importantes del muro en el claro entre dos contrafuertes. La figura 3.26 muestra las funciones de transferencia entre las aceleraciones en los puntos A, B y siete, ubicados sobre el muro sur de la nave y las inducidas en la base por el sismo de Huatulco. En éstas se aprecia que el movimiento en los puntos tiende a ser parecido, teniendo ligeras variaciones en la amplitud, siendo mayores las del punto ubicado en el centro de la nave (Punto siete).

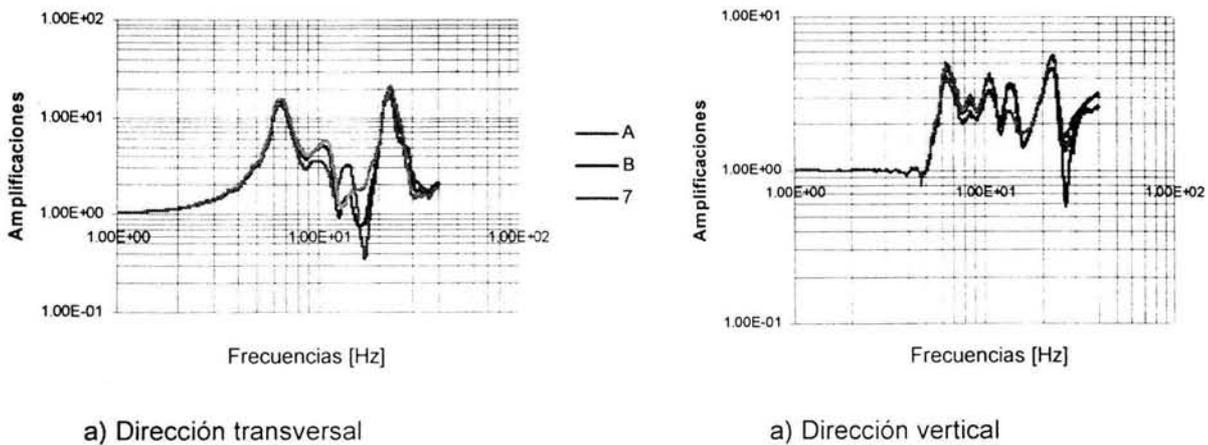


Figura 3.26 Funciones de transferencia entre las aceleraciones de los puntos A, B y siete y las del suelo.

TORRES Y CAMPANARIOS

Los desplazamientos y aceleraciones del campanario son mayores que los de las torres, puesto que la rigidez de estas últimas es mayor. Las aceleraciones inducidas en la base se amplifican conforme se elevan las torres y los campanarios (Figura 3.28). Así pues; en el modelo sano, la aceleración máxima absoluta transversal producida en la base de una torre por el sismo de Huatulco es de 78 gals; mientras que en la parte superior de la misma (punto 12), es de 158 gals (incremento aproximado del 100%). En la parte central de la cúpula del campanario (punto 11), se presentan aceleraciones de alrededor de 318 gals (amplificación del 100% con relación al punto 12 y del 308% con respecto a la base). En el modelo agrietado sucede algo similar, presentándose para el punto 11 una aceleración máxima absoluta transversal de 169 gals y para el punto 12 una de 316 gals.

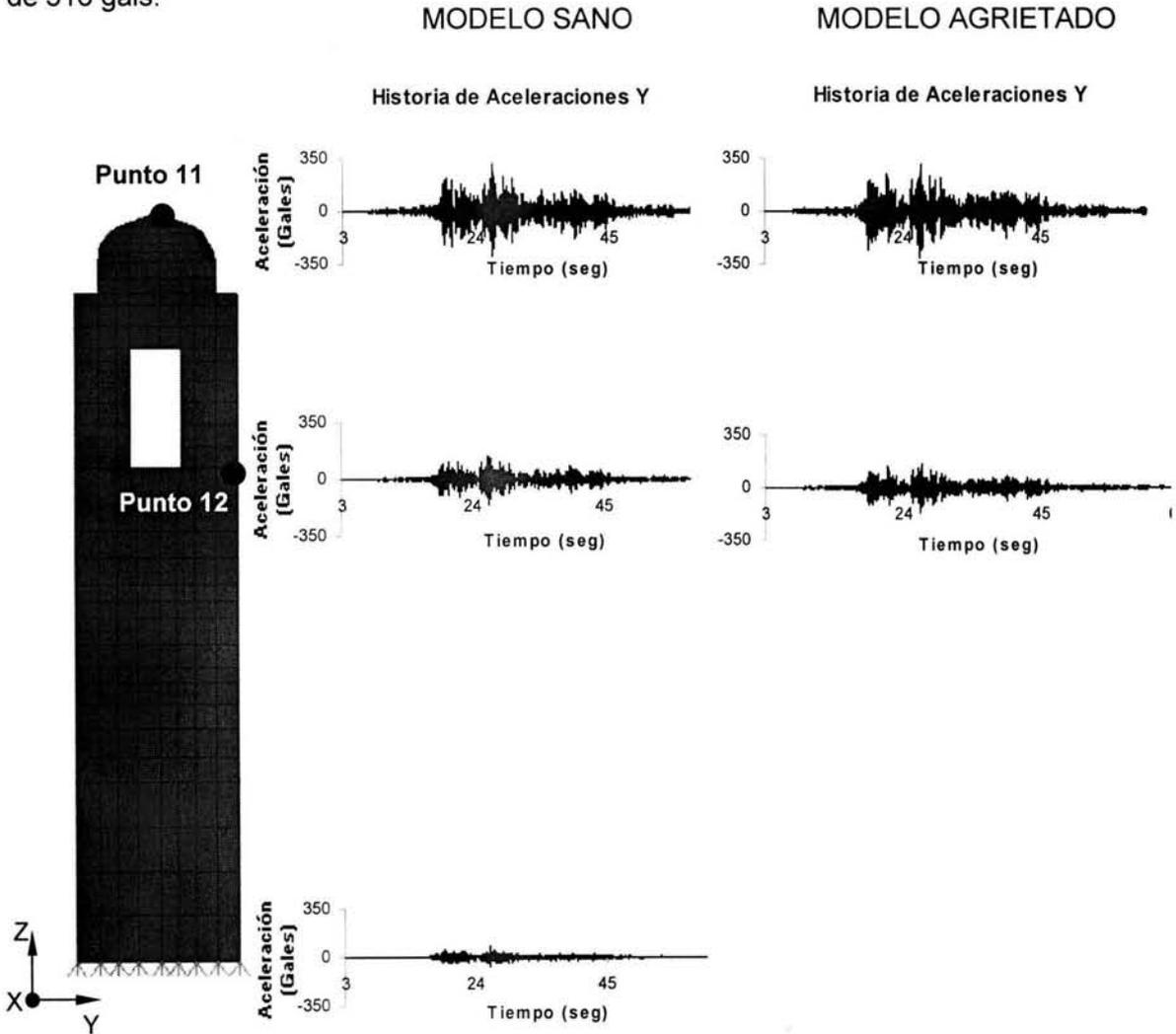


Figura 3.28 Aceleraciones en las torres y los campanarios de los modelos sano y agrietado

Los desplazamientos laterales de la base, del punto 11 y del 12, experimentan variaciones del mismo orden que las observadas en las aceleraciones. Las diferencias entre los desplazamientos del modelo sano en comparación con el agrietado son pequeñas (alrededor del 5%), puesto que el agrietamiento en la bóveda no produce modificaciones importantes en las propiedades de esta zona.

NAVE CENTRAL

Para describir el comportamiento de la nave central se hará únicamente referencia al extremo oriente de ésta (parte que conecta con el arco triunfal) y a la parte central de la misma.

Para el extremo oriente de la nave se observa que el desplazamiento de la clave de la bóveda, en la dirección transversal, es de 1.34 mm, el cual es mayor que los desplazamientos que presentan en los muros (1.17 mm en el muro sur y 1.14 mm en el muro norte) para el sismo de Huatulco en el modelo sano. Algo similar ocurre con el modelo agrietado, donde el desplazamiento de la clave es de 1.40 mm, mientras que el de los extremos es de 1.22 mm (muro sur) y de 1.24 mm (muro norte). El comportamiento para el sismo de Acapulco es similar, siendo los desplazamientos de la clave mayores que el de los extremos. En la dirección vertical tanto del modelo sano como del agrietado, para el sismo de Huatulco, se presentan patrones de variaciones parecidos a los observados en la dirección transversal. Así pues, en el modelo sano la clave de la bóveda tiene un desplazamiento de 0.95 mm, y en los extremos de 0.46 mm (muro sur) y de 0.47 mm (muro norte). En el modelo agrietado, el desplazamiento de la clave es de 0.93 mm mientras que el de los extremos es de 0.46 mm (muro sur) y 0.48 mm (muro norte). Para el caso de Acapulco, los desplazamientos también siguen el mismo comportamiento. De acuerdo a lo anterior, en este extremo de la nave las diferencias entre los desplazamientos (transversales y verticales) del modelo sano y del agrietado son pequeñas; luego entonces, el agrietamiento de la bóveda no provoca efectos de importancia en esta zona.

Continuando con los desplazamientos, pero ahora para la parte central de la nave; se aprecia con el sismo de Huatulco una situación contraria a la ocurrida en el extremo de la nave. Es decir, el desplazamiento de la clave (2.39 mm) es menor que el de los extremos (2.61 mm para el muro sur y 2.43 mm para el muro norte), tanto para el modelo sano como para el agrietado (2.42 mm para la clave, 2.55 mm y 2.50 mm para los muros sur y norte respectivamente). Sin embargo, para el sismo de Acapulco en el modelo sano,

el desplazamiento de la clave (2.35 mm) es mayor que en el muro sur (2.17 mm), pero menor que en el muro norte (2.36 mm); mientras que en el modelo agrietado, el desplazamiento en la clave (2.48 mm) es igual al del muro sur y ambos son mayores que el del muro norte (2.38 mm). En la dirección vertical, para el modelo sano y el agrietado con el sismo de Huatulco, el desplazamiento de la clave de la bóveda es mayor que el de los extremos; para el sismo de Acapulco, en el modelo sano se tiene el mismo comportamiento, pero para el modelo agrietado este es diferente, presentándose desplazamientos en la clave iguales a los del muro sur y menores al del muro norte. En esta zona, la diferencia que se presenta entre los desplazamientos del modelo sano y el agrietado es mayor, con relación a otras zonas, pero aún así son de poca importancia.

Con base en la información proporcionada por los desplazamientos se observa que el patrón de desplazamientos está en función del contenido de frecuencias del sismo. Por otra parte, las aceleraciones transversales registradas en el modelo sano sobre los puntos localizados en el extremo de la nave, experimentan amplificaciones con respecto a la base, entre el 143 y 177% para el sismo de Huatulco (Figura 3.29, Tabla 3.7). En las aceleraciones de la dirección vertical, se presentan pequeñas amplificaciones (entre 4 y 19 %) con relación a las de la base en la dirección antes mencionada (Figura 3.30, Tabla 3.7). Para el modelo agrietado, las aceleraciones transversales son entre un 188 y 223% más grandes que las del suelo (Tabla 3.7) y las aceleraciones verticales también son mayores con relación al terreno; siendo estas amplificaciones entre el 17 al 267%). Este comportamiento es similar en el sismo de Acapulco; así pues, para esta parte de la nave las diferencias existentes entre las aceleraciones laterales del modelo sano y del agrietado, son considerables, pero no se producen cambios importantes en las respuestas globales.

En la parte central de la nave del modelo sano, las aceleraciones transversales experimentan amplificaciones, con respecto a la base, entre el 384 y 415% para el sismo de Huatulco (Figura 3.31, Tabla 3.7). Para las aceleraciones en la dirección vertical, se presentan también amplificaciones pero menores (entre 45 y 140%) con relación a las de la base (Figura 3.32, Tabla 3.7). En el modelo agrietado, las aceleraciones transversales son del mismo orden que para el modelo sano; sin embargo, las aceleraciones verticales son mayores que en el modelo sano (Tabla 3.7). Estas amplificaciones respecto al terreno son entre 134 al 208%. Para esta zona, las aceleraciones transversales entre el modelo sano y el agrietado no experimentan modificaciones importantes, mientras que las variaciones verticales, son mayores, pero no producen efectos de consideración.

Tabla 3.7. Aceleraciones máximas absolutas de la nave para el sismo de Huatulco

Localización	Punto No.	ACELERACIONES (GALS)			
		HUATULCO			
		MODELO SANO		MODELO AGRIETADO	
		Y	Z	Y	Z
Base		78	32	78	32
Arco triunfal	4	190.00	33.00	225.00	40.00
	5	216.00	37.00	252.00	118.00
	6	192.00	38.00	220.00	38.00
Nave central	7	381.00	60.00	375.00	75.00
	8	402.00	47.00	394.00	98.00
	9	378.00	77.00	387.00	94.00

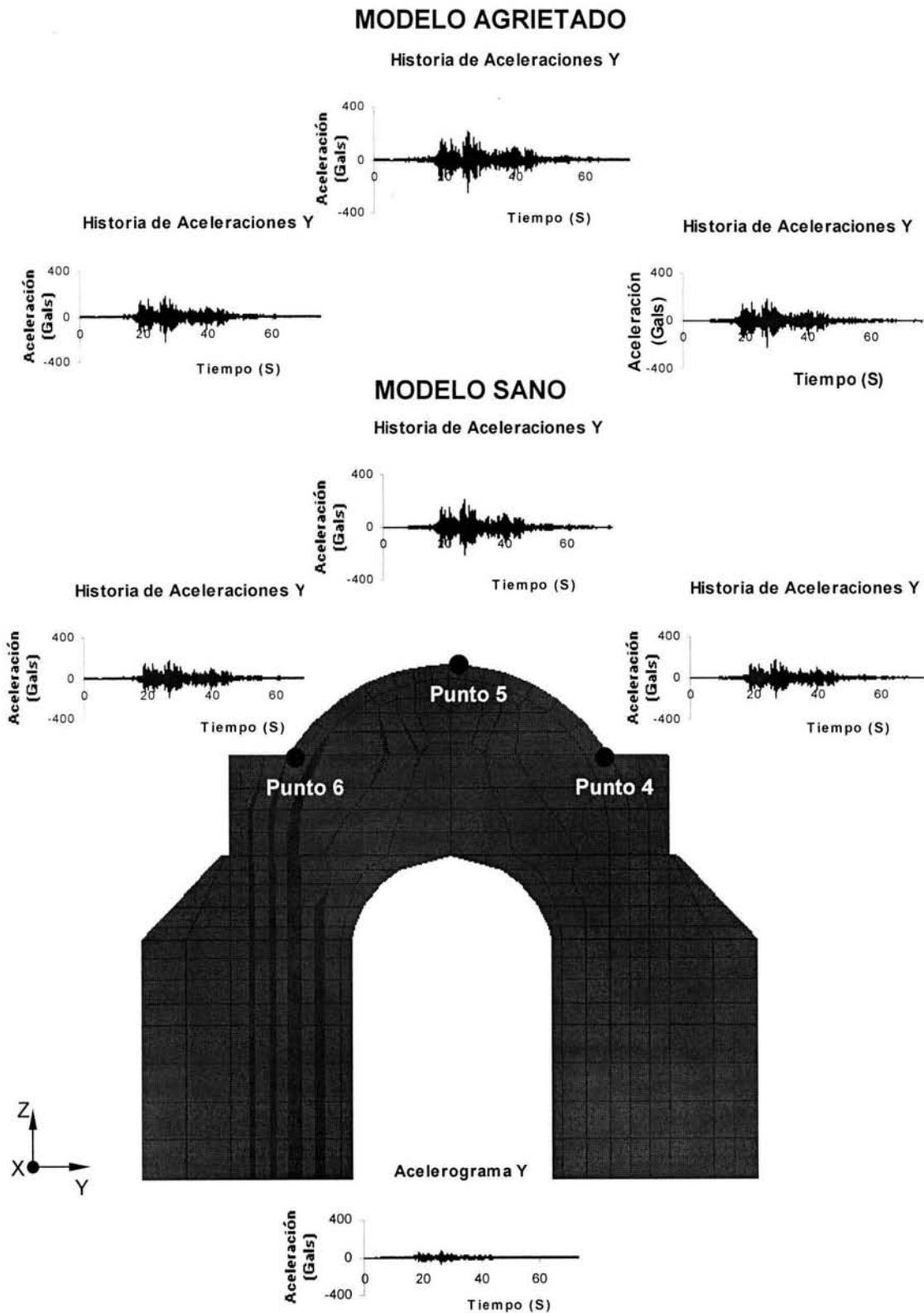


Figura 3.29 Aceleraciones laterales del arco triunfal para los modelos sano y agrietado

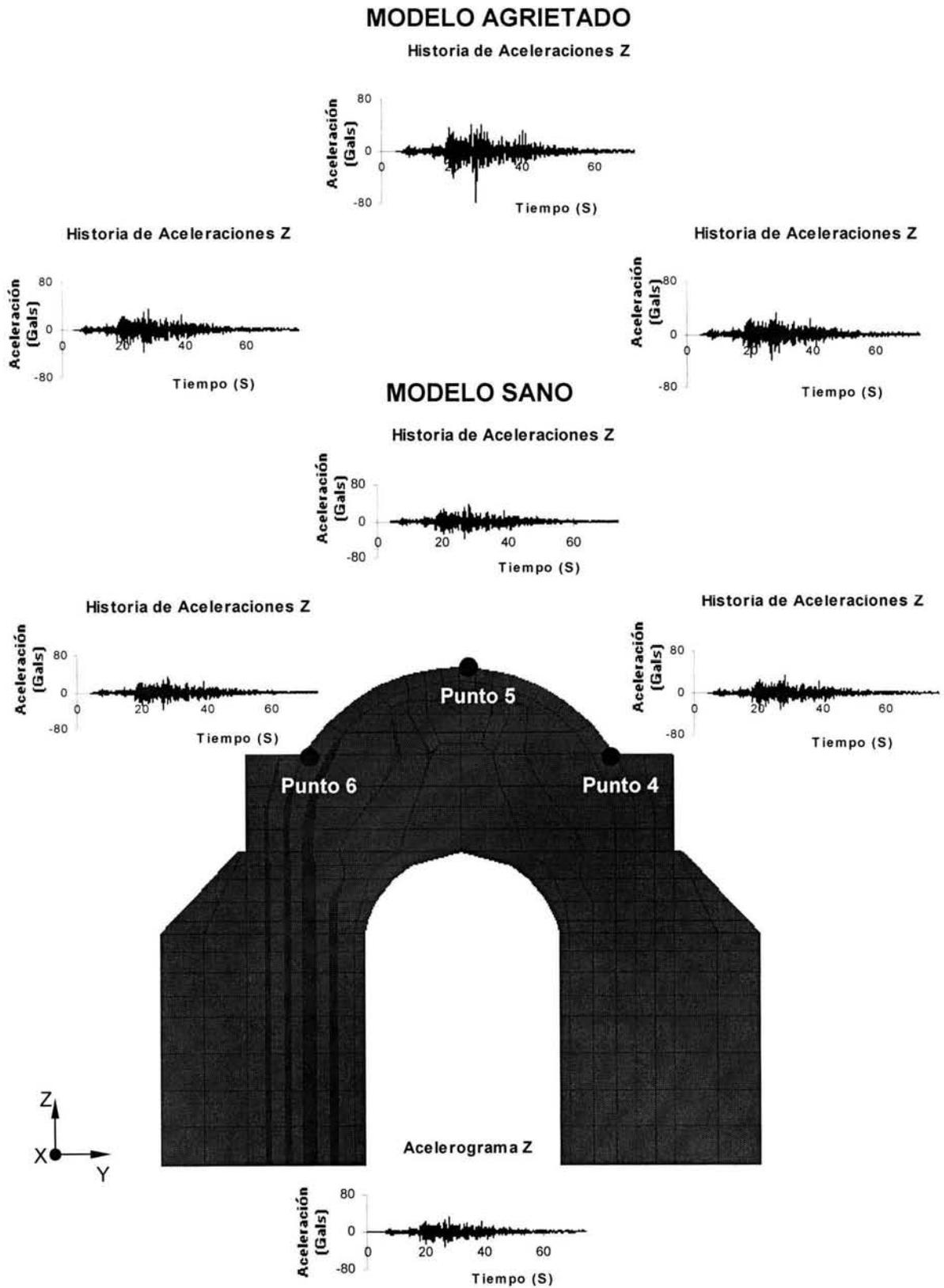
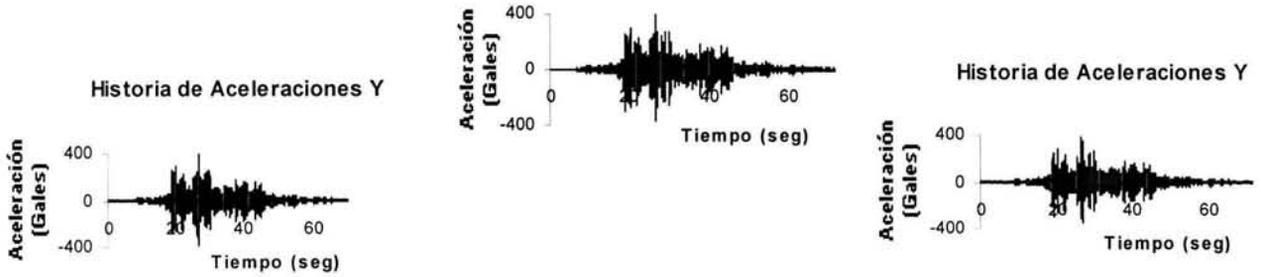


Figura 3.30 Aceleraciones verticales del arco triunfal para los modelos sano y agrietado

MODELO AGRIETADO

Historia de Aceleraciones Y



MODELO SANO

Historia de Aceleraciones Y

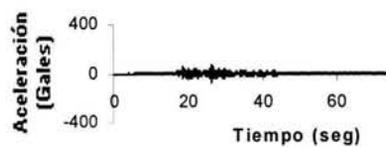
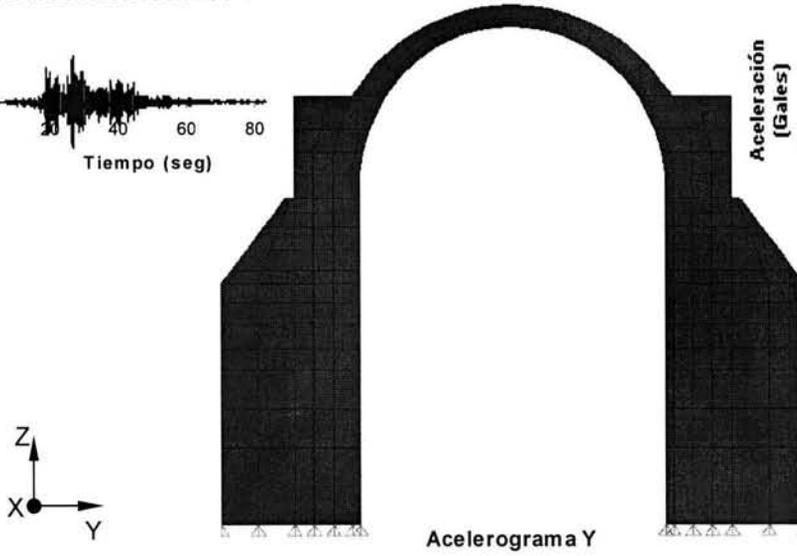
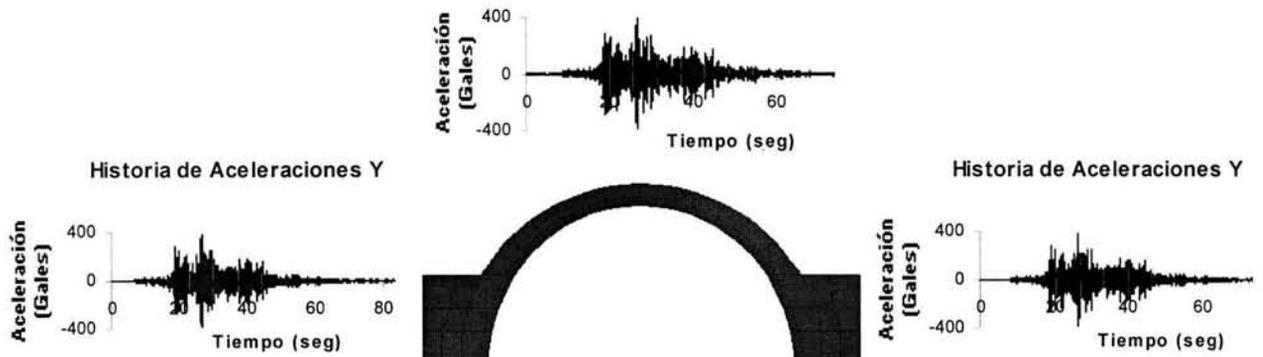
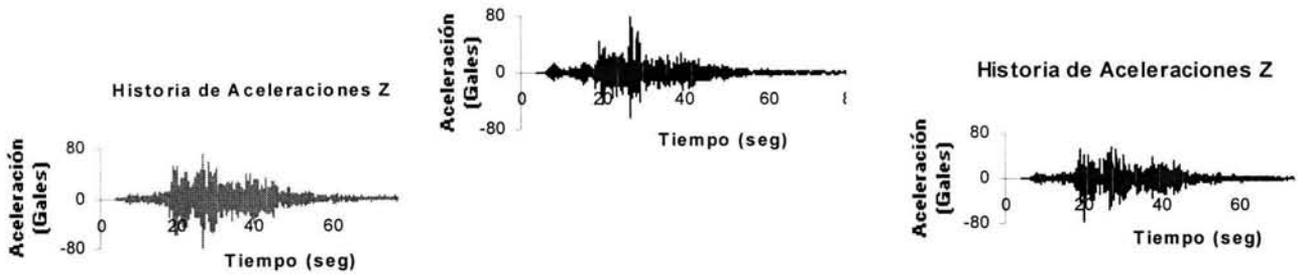


Figura 3.31 Aceleraciones laterales de la nave en la parte central para los modelos sano y agrietado.

MODELO AGRIETADO

Historia de Aceleraciones Z



MODELO SANO

Historia de Aceleraciones Z

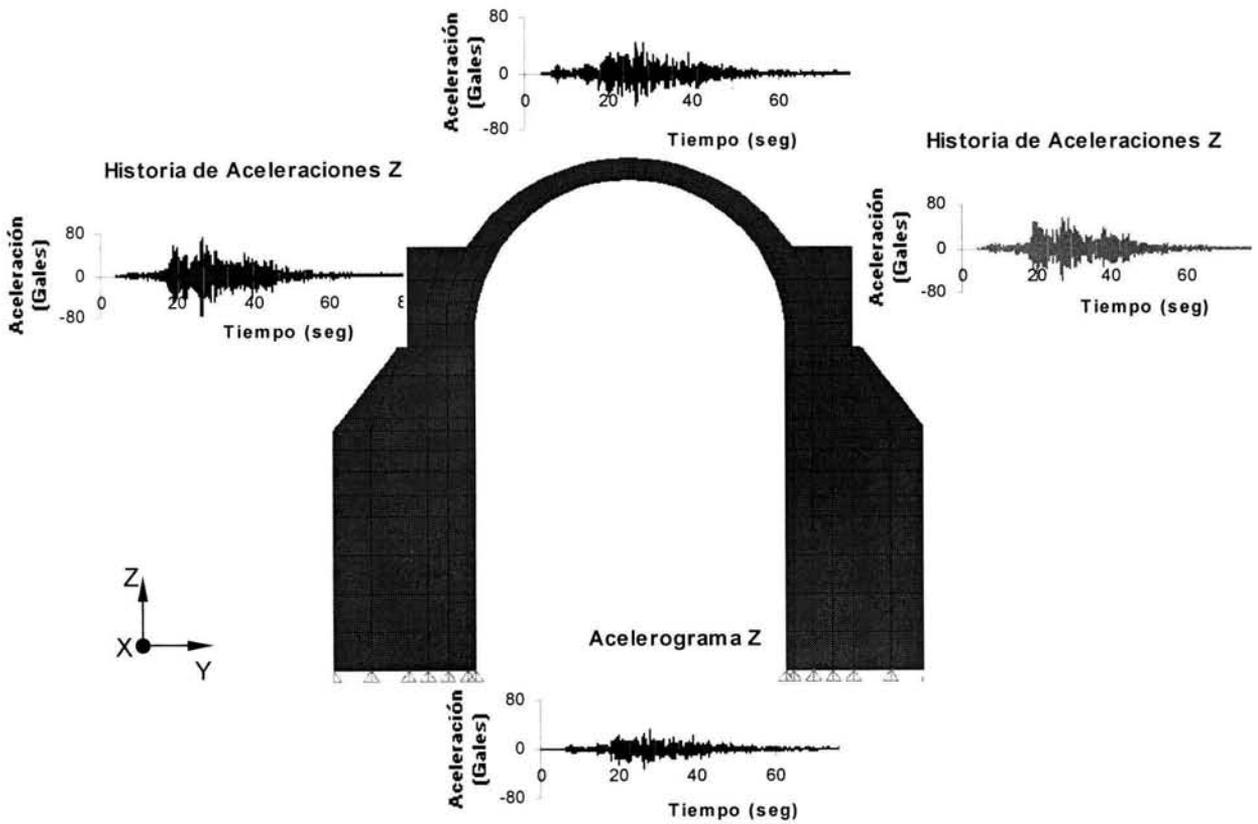


Figura 3.32 Aceleraciones verticales de la nave en la parte central para los modelos sano y agrietado.

ÁBSIDE

En el ábside, se aprecia que el desplazamiento transversal del punto localizado en la base de la cúpula (cerca del arco triunfal), es de 0.83 mm; el cual es mayor que los desplazamientos que se presentan en el centro de la cúpula (0.65 mm) y en el muro transversal de este elemento (0.34 mm) para el sismo de Huatulco en el modelo sano. Algo similar ocurre con el modelo agrietado, donde el desplazamiento de la base de la cúpula es de 0.89 mm, mientras que el de centro de la misma es de 0.72 y el del muro transversal es de 0.35mm. Para el sismo de Acapulco se presenta la misma situación, siendo los desplazamientos ligeramente mayores (entre el 2.7 y el 10%).

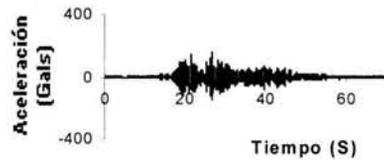
Las aceleraciones transversales de los puntos localizados sobre el ábside en el modelo sano, experimentan amplificaciones con respecto a la base, entre el 35 y 94% para el sismo de Huatulco (Figura 3.33, Tabla 3.8). En las aceleraciones de la dirección vertical, se presentan pequeñas amplificaciones (entre 1.75 y 12 %) con relación a las de la base en la dirección antes mencionada (Figura 3.34, Tabla 3.8). En el modelo agrietado, las aceleraciones transversales son entre un 40 y 120% mayores que las del suelo y las verticales también son mayores con relación al terreno; entre el 2.3 y el 20% (Tabla 3.8). En esta parte de la estructura las diferencias entre las respuestas del modelo sano y el agrietado son pequeñas en los puntos cercanos al muro transversal del ábside (fachada posterior), no así para los ubicados en la bóveda y los cercanos al arco triunfal, lo que indica que el agrietamiento de la bóveda ejerce una pequeña influencia en estas últimas zonas; sin embargo, los resultados no ocasionan diferencias importantes.

Tabla 3.8 Aceleraciones máximas absolutas del ábside para el sismo de Huatulco

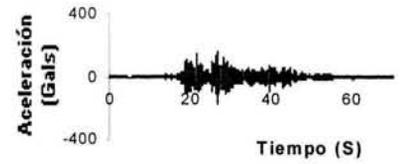
Localización	Punto No.	ACELERACIONES (GALS)			
		HUATULCO			
		MODELO SANO		MODELO AGRIETADO	
		Y	Z	Y	Z
Base		78	32	78	32
Ábside	1	107.00	33.00	109.00	33.00
	2	135.00	36.00	157.00	39.00
	3	151.00	35.00	172.00	35.00

MODELO AGRIETADO

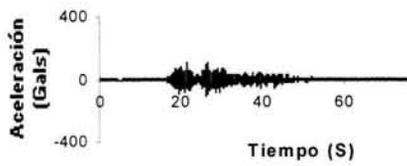
Historia de Aceleraciones Y



Historia de Aceleraciones Y

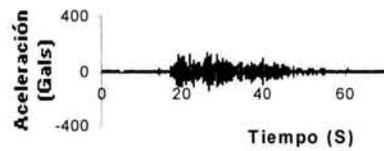


Historia de Aceleraciones Y

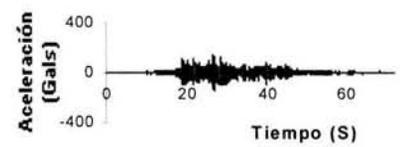


MODELO SANO

Historia de Aceleraciones Y



Historia de Aceleraciones Y



Historia de Aceleraciones Y

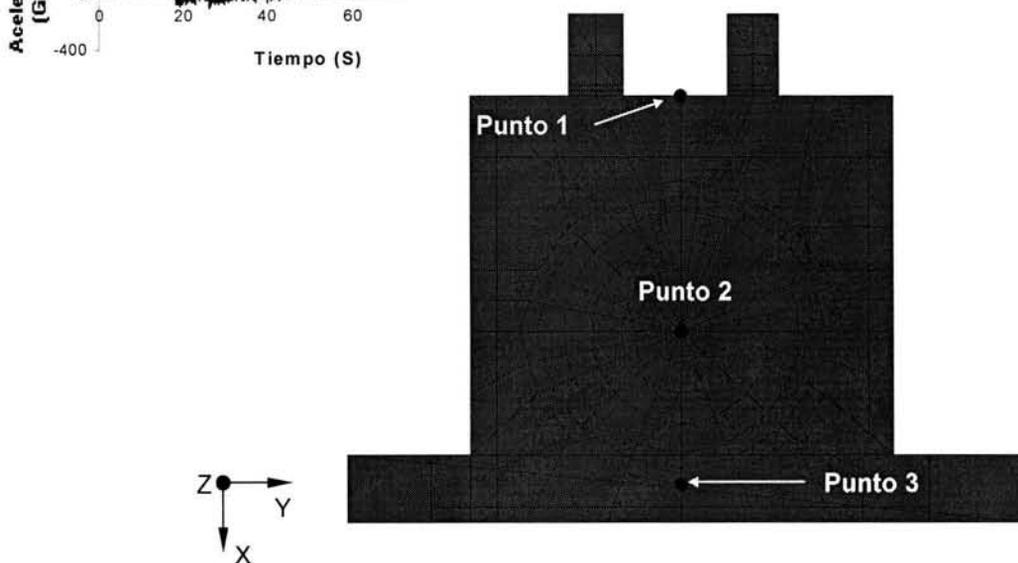
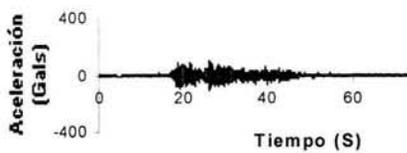
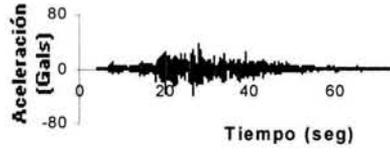


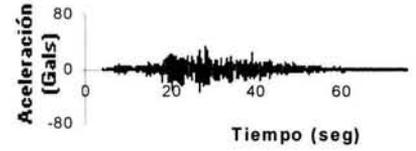
Figura 3.33 Aceleraciones laterales del ábside para los modelos sano y agrietado.

MODELO AGRIETADO

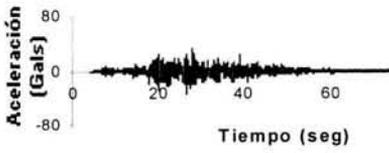
Historia de Aceleraciones Z



Historia de Aceleraciones Z

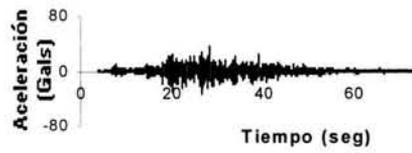


Historia de Aceleraciones Z

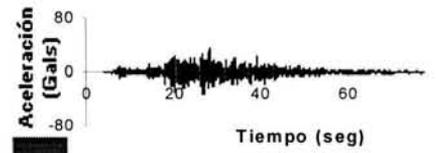


MODELO SANO

Historia de Aceleraciones Z



Historia de Aceleraciones Z



Historia de Aceleraciones Z

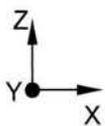
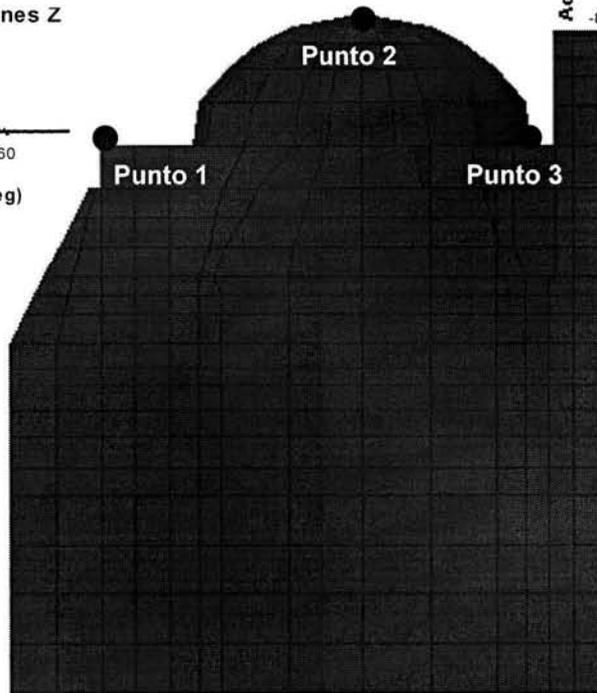
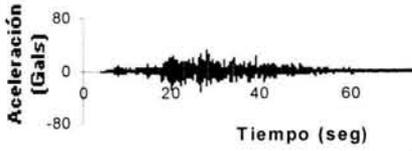


Figura 3.34 Aceleraciones verticales del ábside para los modelos sano y agrietado

Las Figuras 3.35 a 3.38 muestran las distribuciones de esfuerzos axiales (transversales y verticales) para ambos modelos en la parte central de la nave. La distribución global de esfuerzos es similar en ambos modelos; sin embargo, ésta cambia en algunas zonas, debido a la introducción de las grietas en la bóveda.

En el modelo sano, se aprecia que la bóveda se deforma lateralmente por la aceleración transversal, produciendo compresiones en el arranque de la bóveda (por el intradós), mientras que cerca de la clave (también por el intradós) se presentan tensiones, debido a que la bóveda se flexiona (Figura 3.35). En el modelo agrietado se aprecia una redistribución de las tensiones en las zonas aledañas a las grietas y de compresiones en la parte del arranque de la bóveda (Figura 3.36); puesto que en el modelo sano, las tensiones mayores actúan en los puntos donde se colocaron las grietas y las compresiones se distribuyen a través de toda la sección transversal del arranque de la bóveda; mientras que para el modelo agrietado, las tensiones mayores se desplazan a las zonas colindantes con las grietas y las compresiones se transmiten únicamente por las partes cercanas a los intradós del arranque de la bóveda.

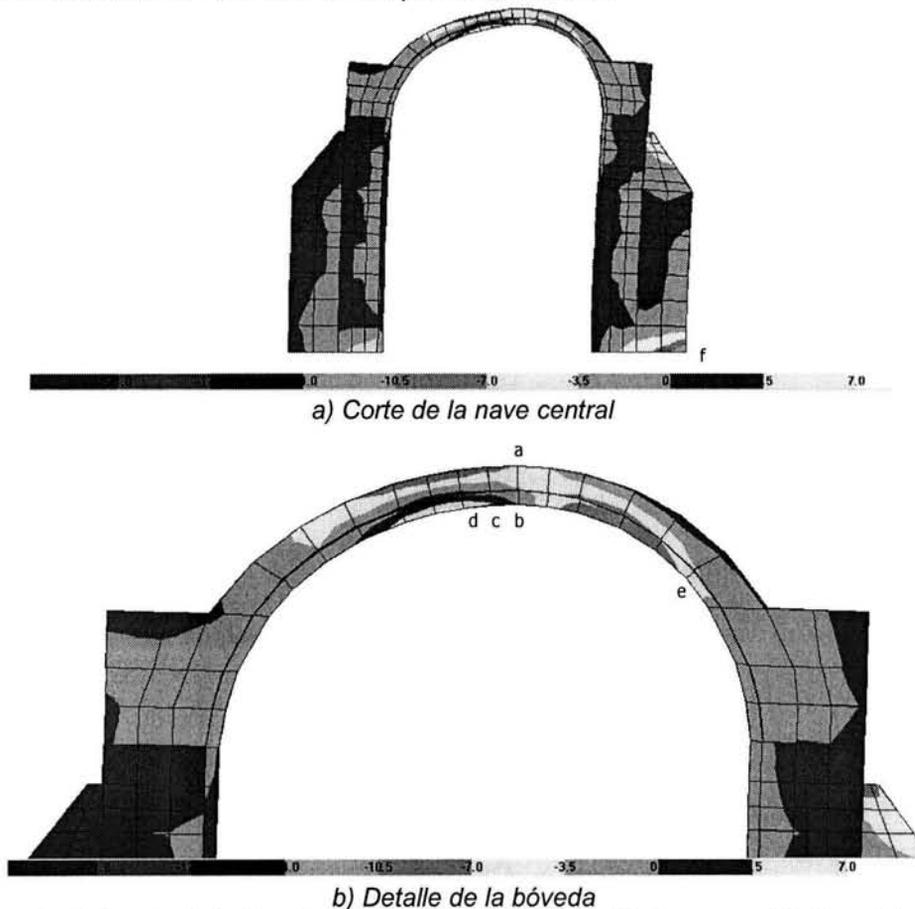


Figura 3.35 Distribución de esfuerzos axiales en la dirección transversal del modelo sano (tn/m^2) para el sismo de Huatulco

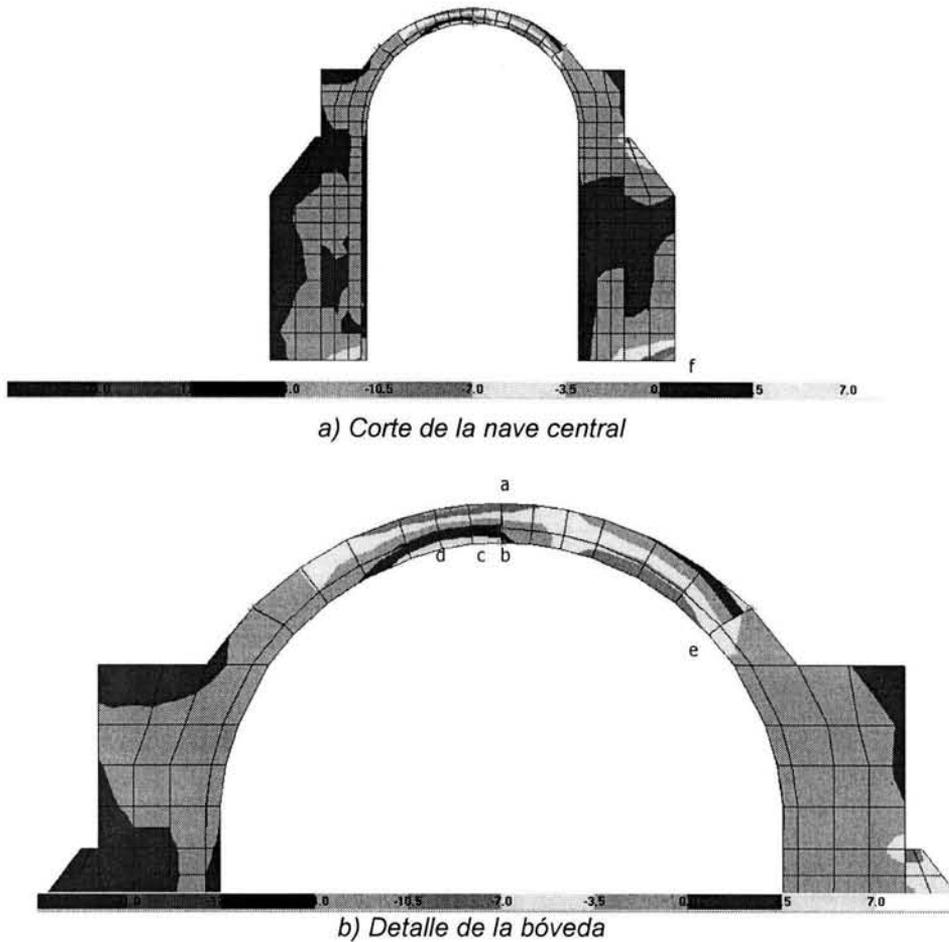
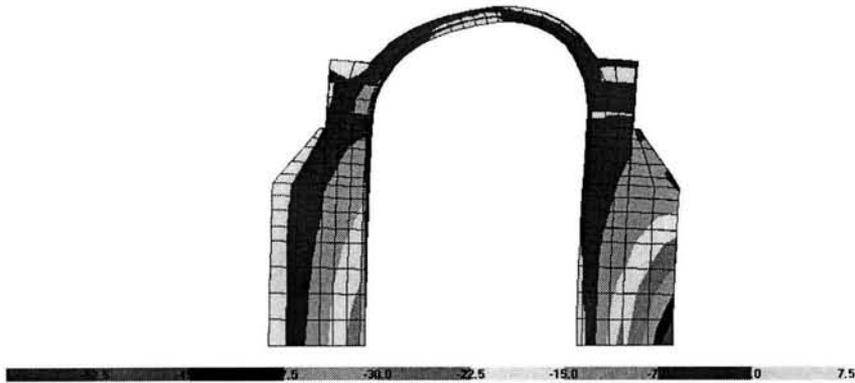
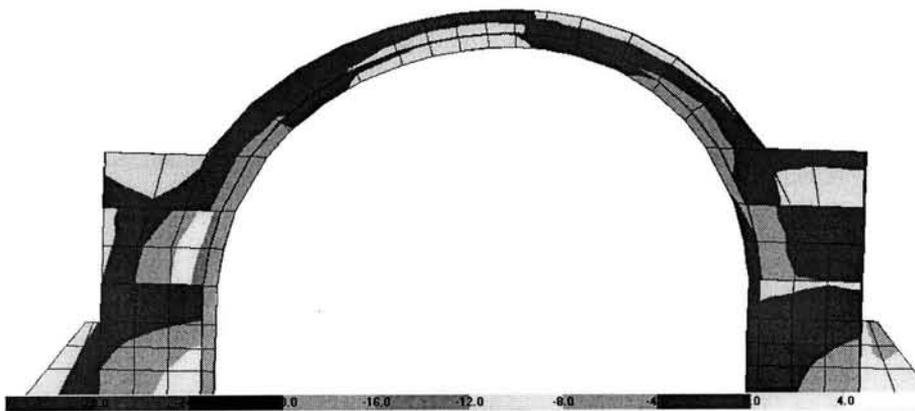


Figura 3.36 Distribución de esfuerzos axiales en la dirección transversal del modelo agrietado (tn/m^2) para el sismo de Hualulco

En las Figuras 3.37 y 3.38 se muestran los esfuerzos axiales en la dirección vertical para ambos modelos. Los detalles de la bóveda (Figuras 3.37b y 3.38b) muestran una redistribución de esfuerzos de flexión sobre el muro, debido al agrietamiento impuesto. La deformada del modelo sano indica que la parte superior de los muros (por arriba de donde terminan los contrafuertes) junto con la bóveda se flexionan lateralmente; mucho más que la parte inferior de los muros de la nave (de la altura del contrafuerte a la base). Esto conlleva a tener concentraciones de esfuerzos axiales en la parte superior de los muros debido a la flexión. Sin embargo, para el modelo agrietado se presenta una distribución uniforme de los esfuerzos axiales debidos a la flexión, puesto que las grietas hacen que la parte central de la bóveda trabaje de forma independiente al muro; provocando concentraciones de esfuerzos en la cara interna de un muro y en el contrafuerte para el otro.

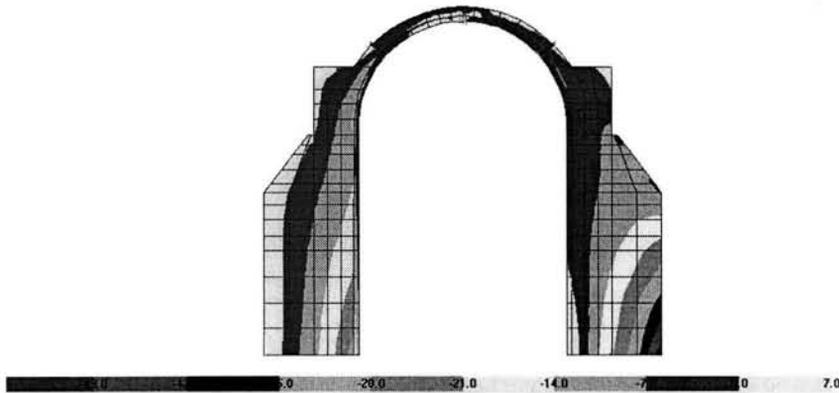


a) Corte de la nave central

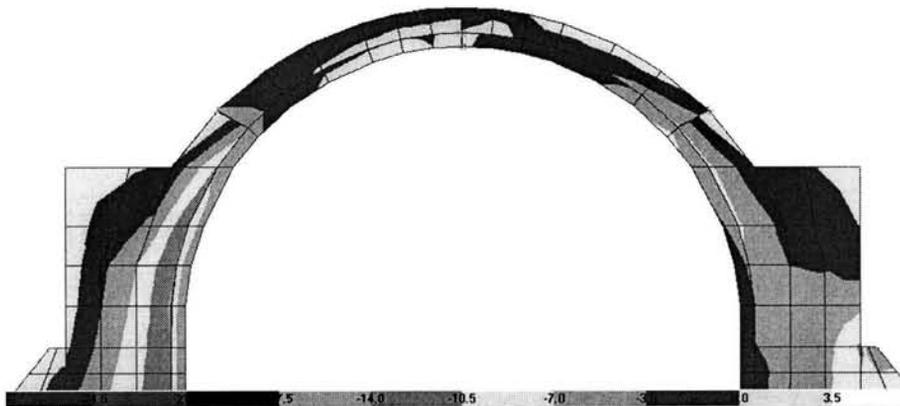


b) Detalle de la bóveda

Figura 3.37 Distribución de esfuerzos axiales en la dirección vertical del modelo sano (tn/m^2) para el sismo de Huatulco



a) Corte de la nave central



b) Detalle de la bóveda

Figura 3.38 Distribución de esfuerzos axiales en la dirección vertical del modelo agrietado (tn/m^2) para el sismo de Huatulco

La Figura 3.39 muestra las distribuciones de esfuerzos cortantes (plano YZ) de la parte central de la nave para ambos modelos. La distribución global de esfuerzos entre los modelos cambia ligeramente debido a las grietas. Los esfuerzos cortantes se concentran en el contrafuerte, mostrando que este elemento cumple su función al absorber los empujes laterales.

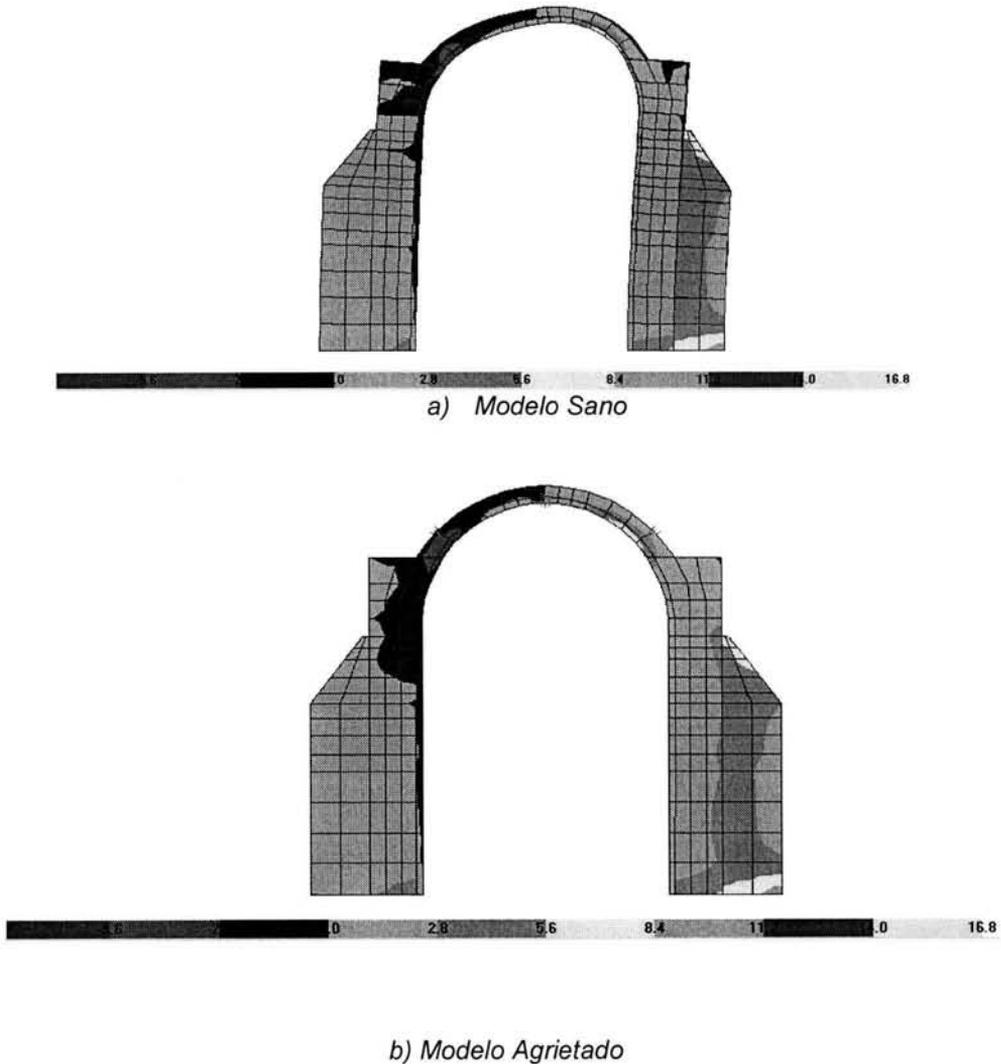


Figura 3.39 Distribución de esfuerzos cortantes (tn/m^2) para el sismo de Huatulco

En la tabla 3.9 se presentan los valores de los esfuerzos axiales para la dirección transversal y vertical, así como los esfuerzos cortantes del plano YZ. En general, se observan algunas diferencias entre la distribución de esfuerzos del modelo sano con relación al agrietado; en las zonas cercanas a la grietas se aprecia un aumento en la magnitud las compresiones, resultado de la variación del eje neutro al liberar las partes con tensión, además se observa una redistribución de tensiones, al presentarse las mayores en los en puntos vecinos a la grieta. A medida que se aleja de grieta, los esfuerzos entre los dos modelos tienden a ser parecidos. El nivel de agrietamiento inicial introducido a la estructura hace que se presenten redistribución de esfuerzos que, en algunos casos, llegan a superar la resistencia del material; con lo que se llega a generar un estado de agrietamiento progresivo.

Tabla 3.9 Esfuerzos axiales y cortantes en los dos modelos para el sismo de Huatulco

Punto	ESFUERZOS								
	S11 (transversal)		Diferencia	S22 (vertical)		Diferencia	S23 (cortante)		Diferencia
	Sano Kg/cm ²	Agrietado Kg/cm ²	[%]	Sano Kg/cm ²	Agrietado Kg/cm ²	[%]	Sano Kg/cm ²	Agrietado Kg/cm ²	[%]
a	-1.1450	-1.2600	10%	-0.1550	0.0790	-49%	-0.2280	-0.3430	-50%
b	0.6320	0.4380	-44%	0.0990	0.1060	7%	-0.2200	0.0038	5667%
c	0.5480	0.3780	-45%	0.1020	0.0036	-2770%	0.3700	0.2980	-24%
d	0.8790	0.9970	12%	-0.0630	-0.0640	2%	-0.1600	-0.1670	4%
e	-0.7730	-0.7920	2%	-0.3970	-0.3660	-8%	0.7250	0.7220	0%
f	-1.3450	-1.3240	-2%	-5.3810	-5.2940	-2%	1.0740	1.0520	2%

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El comportamiento global de una estructura histórica de mampostería depende de las características de cada uno de los elementos que la conforman y de la interacción que existe entre ellos. Sin embargo, resulta complejo determinarlo porque no se pueden utilizar las mismas hipótesis simplificadoras que se emplean en los análisis de estructuras modernas. Por lo tanto, para entender este comportamiento es necesario realizar un modelo analítico refinado de toda la estructura; con el fin de encontrar las respuestas ante diversas condiciones de carga. El método de los elementos finitos es una herramienta útil para realizar este tipo de estructuras.

Cabe recordar que, el objetivo de este trabajo fue estudiar el comportamiento estructural de un templo típico que presentaba un cierto tipo de agrietamiento inicial y observar como este agrietamiento modificaba las propiedades dinámicas de la estructura, en comparación con un modelo sin agrietamiento inicial; motivo por el cual se utilizó un modelo elástico lineal. Si se deseará estudiar como se dañaría la estructura ante un cierto tipo de carga, se debería realizar un análisis inelástico. Sin embargo, esto queda fuera de los alcances de este trabajo.

En estas estructuras, en los análisis dinámicos se necesitan incluir un gran número de modos para alcanzar un nivel de masa actuante en una dirección que sea representativa (90%); lo que indica que son muchos los modos que influyen en la respuesta total; es decir, no existe un solo modo determinante, como suele suceder en las estructuras reticulares modernas.

Los modos de vibrar del modelo sano tienen periodos cortos (menores o iguales a 0.152 segundos). Lo cual indica que los movimientos que se presentan en la estructura son de alta frecuencia; así pues, aunque las aceleraciones experimentan amplificaciones importantes, los desplazamientos son muy pequeños. En el modelo agrietado, los periodos de vibrar también son cortos (menores o iguales a 0.154 segundos); las respuestas siguen correspondiendo a movimientos de altas frecuencias.

Como era de esperarse, el agrietamiento de la bóveda produce una flexibilización del modelo. Sin embargo, es necesario hacer los siguientes comentarios:

- a) Los modos de vibrar que involucran el movimiento vertical de la bóveda aumentaron de periodo e incluso en algunos casos se modificó la forma modal.
- b) Los modos de vibrar que involucran un desplazamiento lateral de la bóveda prácticamente no sufrieron cambios.

- c) El nivel de agrietamiento inducido a la estructura es equivalente a tener un daño leve de la misma.
- d) El punto anterior conlleva a que el comportamiento global de la estructura se haya modificado de manera poco significativa.
- e) El agrietamiento que se impuso a la subestructura nave principal no conlleva a que se pierda continuidad con otras subestructuras (fachada, ábside, etc).
- f) Por lo dicho anteriormente, la distribución de esfuerzos experimenta pequeños cambios entre el modelo sano y el agrietado, principalmente en las vecindades de las grietas.

Las propiedades dinámicas entre los dos modelos, prácticamente no experimentaron cambios radicales; por lo tanto, este tipo de agrietamiento inicial no influye en la vulnerabilidad de la estructura.

Los desplazamientos que se presentan son pequeños; sin embargo, los esfuerzos de tensión que actúan en algunas partes de la estructura superan la resistencia del material, lo que llevaría a un estado de agrietamiento progresivo; con el cual, es de esperarse una disminución progresiva de la rigidez hasta alcanzar inestabilidades que impliquen colapsos.

Por otra parte, es importante incluir en los análisis el componente vertical del registro sísmico, cuando éste es relevante (zonas cercanas a epicentros), ya que entre otros factores la presencia de éste conlleva a mayores empujes de la bóveda sobre los muros y por tanto a una mayor abertura del claro.

Debido a los alcances de este trabajo, se considera que éste es un primer paso orientado a comprender mejor el efecto del agrietamiento inicial sobre un templo. Para obtener un estudio más completo se recomienda:

- ❖ Estudiar agrietamientos sencillos en otros elementos con el fin de evaluar como éstos afectan en el comportamiento global de la estructura.
- ❖ Combinar agrietamiento de varios elementos con la finalidad de evaluar las condiciones más desfavorables que se presentan en este tipo de estructuras, cuando se presentan otros mecanismos de daño sobre ésta.
- ❖ Utilizar otros registros sísmicos con diferentes contenidos de frecuencias, intensidades y fuentes sísmicas; pero que sigan siendo representativos de la zona donde se localizan estos templos, a fin de evaluar el efecto del registro sobre los resultados.

- ❖ Emplear sismos localizados a diferentes distancias, a fin de evaluar que tanto afecta la lejanía al epicentro.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por las facilidades y el apoyo para la culminación de esta tesis.

De manera especial, hago un reconocimiento al Dr. Roberto Meli, por la paciencia y entrega en la asesoría de este trabajo.

En forma particular, quiero agradecer al Dr. Fernando Peña, porque sin sus sabios consejos y su enorme paciencia este trabajo no habría llegado a un final satisfactorio.

Agradezco al Dr. Luis Esteva Maraboto, Dr. Arturo Tena Colunga y al M.I. Octavio García Domínguez; por sus sugerencias y comentarios acerca de esta tesis.

Finalmente, agradezco a los Maestros en Ingeniería Zuni Celestino, Guillermo Roeder y Darío Rivera, por las asesorías prestadas durante la ejecución de este trabajo.

REFERENCIAS

Baxter, S. (1934). "La arquitectura Hispano Colonial de México", Departamento del Instituto Nacional de Bellas Artes.

Binda, L. (1996). "The knowledge of materials and construction techniques: an important step for the evaluation of masonry structures". Proc. Learning from Practice II, Los Angeles, pp. 3 - 27.

Binda, L.; Mirabella, R. y Abbaneo, S. (1997). "The diagnosis research project". A Review of Architectural Design and Construction Experience after Recent Earthquakes. pp. 177 – 198.

Celestino, Z. (comunicación personal). Estudiante de doctorado, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Clayford, T. G. (1975). "Strength and Related Properties of Brick Masonry. Journal of the structural division. ASCE. Pp. 217 –232.

Dogliani, F.; Morretti, A. y Petrini, V. (1994). "Le Chiese e il terremoto". C.N.R. Edizioni LINT, Trieste, Italia.

Heyman, J. (1968). "Beauvais Cathedral", Transactions of the Newcomen Society. v. 40, (1967-1968), pp 15-35.

Hughes, M. T. y Baker, M. J. (1998). "A finite element model of arch ring behaviour". In: Computer methods in structural masonry – 4. Edited by G.N. Pande, J. Middleton, and B. Kralj. E&FN Spon.

Lagormarsino, S. (1998). "A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches". 11th European Conference on Earthquake Engineering.

Lemos, J. V. (1998). "Numerical models for seismic analysis of monuments". Workshop on seismic performance of monuments, "Monument-98". Lisboa Portugal, pp. K19 – k36.

López, F. (1990). "Estudio de la Condición Actual de la Catedral Metropolitana". Tesis Doctoral, Facultad de Arquitectura, UNAM.

Luna, J. L. (1995). "Propiedades mecánicas de la cantera utilizada en construcciones de la época colonial". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

- Martini, K. (1998). "Ancient Structures and Modern Analysis: Investigating Damage and Reconstruction at Pompeii". *Automation in Construction* 8. Pp.125 – 137.
- Meli, R. y Sánchez, R. (1991). "Propiedades mecánicas de las mamposterías utilizadas en la construcción de los monumentos históricos de la ciudad de México". *Memorias del Segundo Simposio Nacional sobre Materiales de Construcción*, Mérida.
- Meli, R. y Sánchez, R. (1993). "Rehabilitación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México. Aspectos estructurales" Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Meli, R. (1998). "Ingeniería estructural de los edificios históricos". Fundación ICA.
- Molins, C. (1996). "Characterization of the mechanical behaviour of masonry". *Structural Analysis of Historical Constructions*, CIMNE.
- Pegón, P. y Ambrosetti, C. (1998). "3D modelling of complex block arrangement for columns of monuments". *Workshop on Seismic Performance of Monuments*. 12-14. Lisboa, Portugal.
- Peña, F. (1995). "Comportamiento Estructural de la Catedral de la ciudad de México ante hundimientos diferenciales". Tesis de Licenciatura. Escuela Nacional de Estudios Profesionales – Acatlán, UNAM.
- Rivera, D. (1997). "Comportamiento de elementos estructurales de construcciones coloniales y algunas aplicaciones". Tesis de Licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales – Acatlán, UNAM.
- Rivera, D. (2000). "Análisis de la respuesta sísmica registrada en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Rodríguez, G. (1997). "Estudio sobre el comportamiento estructural del Sagrario Metropolitano", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Wilson, E. (2000). "Series of Computer Programs for finite Element Analysis of Structures". User Manual, SAP NL 2000.
- Zhugue, Y., Thambiratnam, D. y Corderoy, J. (1998). "Nonlinear dynamic analysis of unreinforced masonry". *Journal of Structural Engineering*, 124, 3, pp. 270 – 277.