



Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Civil



Tesis

“Determinación de las Propiedades Dinámicas de la iglesia
de San Mateo Ahuirán”

Para obtener el Título de
Ingeniero Civil

Presenta
Carlos Ramos Silva

Asesor de Tesis
Dr. Jorge Ignacio Cruz Díaz

Morelia, Michoacán. Noviembre de 2009

Agradezco

En Especial a mis señores Padres, Vicente Ramos y Cecilia Silva. Gracias por enseñarme tanto, por demostrarme que si se puede, por siempre interesarse en mis cosas; con el apoyo de ustedes siempre ha sido fácil todo. Este logro es de ustedes y por ustedes...

*A mi Hermano **Vicente Jr. (†)**, desde donde estés me has iluminado los pazos y se que desde allá miras orgulloso el camino que seguí...*

*A mis hermanos, **Leonel, Rigoberto e Irene**, por sus comentarios de reflexión, y apoyarme en mis decisiones.*

*A **Juanita, Melvin y Sugey**, por su cariño, amor y comprensión de mis ausencias. Los tengo siempre presente.*

*A mi asesor el **Dr. Cruz Díaz**, por su incansable y valioso colaboración, la confianza que depositaste en mí, para lograr este proyecto.*

Agradezco muy especialmente a mis Escuelas por donde transite.

Mi Escuela Primaria Rural "Benito Juárez",

La inolvidable Escuela Secundaria Técnica no 25, Antúnez, Mich.,

El histórico y Heroico, Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo,

La Facultad de Ingeniería Civil, por brindarme sus conocimientos,

Y orgullosamente la Casa de Hidalgo, a nuestra Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

A mis amigos que conocí en el trayecto de mis estudios, por su apoyo moral: Hipólito Martínez, Pablo Cano, Marcos Morales, Miguel Prado, Roberto Gonzales, Leonel Felipe, Cosme Damián, Javier Villegas, Abel Cano, Jorge Luis Chaveka, Julio Tena, Ricardo Luna, Y Joaquín Rivera.

A las autoridades Civiles, Comunales y Tradicionales de mi comunidad, (Ahuirán), por facilitarme los permisos para acceder a la iglesia.

Y por ultimo a Dios, gracias por poner en mi camino a todas las personas especiales, (Autoridades, Directivos, Profesores, Amigos, etc.), que han iluminado el camino por el cual andar y me han dado la fuerza y la Fe con lo que he sabido salir adelante...

Mil Gracias a todos...

En la segunda mitad del siglo XVIII, a las obras públicas de caminos, puentes, puertos, obras hidráulicas y sanitarias, se les comenzó a llamar de “ingeniería civil”. Fue el versátil constructor John Smeaton (1724-1792), diseñador de uno de los célebres faros de Inglaterra en 1759, el de Eddystone, en pleno Canal de la Mancha, el primero que se llamó a sí mismo “ingeniero civil”. A partir de ese momento comenzó a designarse así aquellos que construían obras que no tenían que ver con la milicia.



Determinación de las propiedades dinámicas de la iglesia de San Mateo Ahuirán

Contenido

	Pág.
Capitulo I. Introducción	1
I.1 Monumentos históricos en México	1
I.2 Objetivos y alcances	7
I.3 Organización del documento	8
Capitulo II. Estado de Arte	10
II.1 Tipología de la iglesia en México	10
II.1.1 Las Iglesias porfirianas en la ciudad de México	15
II.1.2 Tipología de la iglesia en Michoacán	16
II.1.3 Primer periodo	16
II 1.4 Segundo Periodo	18
II.2 Sismicidad de la región	19
II.2.1 México y las placas tectónicas	19
II.2.2 Zonificación sísmica	21
II.3 Daños registrados en monumentos históricos	25
II.3.1 Breve panorama mundial	25

II.3.2 Breve panorama nacional	26
II.3.3 Daños de las iglesias en la región P'urhépecha	29
II.4 Estudios de vibración ambiental	30
II.4.1 Catedral metropolitana	31
II.4.2 Edificio de jalapa (ciudad de México)	32
Capítulo III. La iglesia de San Mateo Ahuirán	35
III.1 Aspectos históricos	35
III.2 Descripción del inmueble	37
III.2.1 Ahuirán y su medio físico	37
III.2.2 Localización de la iglesia de San Mateo Ahuirán	38
III.2.3 Colindancias	38
III.3 Descripción arquitectónica	39
III.3.1 Fachada	40
III.4 Estructuración	42
III.4.1 Techado	43
III.4.2 Artesón	45
III.5 Daños y reparaciones registradas	46
III.5.1 Modificaciones que ha sufrido La iglesia de San Mateo	46
Capítulo IV. Modelo numérico de la iglesia de San Mateo Ahuirán	48
VI.1 Marco teórico	49
VI.2 Modelo numérico de la iglesia	49

Capitulo V. Pruebas de vibración ambiental	52
V.I Técnicas para el análisis espectral	53
V.I.1 Modelo espectral	53
V.I.2 Método de análisis de autocorrelación Espectral (SPAC)	54
V.I.3 Método de análisis Espectral F-K	55
V.I.4 Método espectral de Nakamura	55
V.2 Identificación dinámica del inmueble	59
V.2.1 Equipo utilizado	59
V.3 Mediciones de vibraciones ambiental	60
Capitulo VI. Procedimiento y análisis de resultado	63
VI. 1 Procesamiento de señales y análisis de resultados	64
VI.2 Comentarios finales	67
<i>Bibliografía citada</i>	70
<i>Bibliografía Consultada</i>	72
<i>Entrevistas</i>	74
<i>Glosario</i>	75



Capítulo I

*Mantener las Iglesias es importante. “Conservar y restaurar los monumentos es una disciplina que requiere la colaboración de todas las ciencias y de todas las técnicas que puedan contribuir al estudio y salvaguardar del patrimonio cultural”
(Carta de Venecia).*

Introducción

I.1 Monumentos históricos en México

Una de las manifestaciones culturales más sobresalientes de la influencia española fue la arquitectura, con el estilo colonial que se desarrolló durante la época virreinal y que prevaleció medio siglo después de la emancipación.

La arquitectura colonial es el conjunto de manifestaciones arquitectónicas que surgieron en América Latina desde el descubrimiento del continente en 1492 hasta la independencia del mismo a principios del siglo XIX. A comienzos del siglo XVI puede decirse que se terminó la conquista de América en su mayor parte. Sobre ruinas de grandes imperios precolombinos como México, se preparan los cimientos de la nueva civilización hispanoamericana. El arte en Latinoamérica va a ser fundamentalmente religioso, marcado por el poder de las principales órdenes religiosas llegadas del viejo continente.



Los sacerdotes venían dispuestos a evangelizar a los indígenas y convertirlos al cristianismo, con lo que se cumplía el fin espiritual de la colonización.

A continuación describiremos algunos de estos monumentos históricos, sus elementos arquitectónicos, la época que fueron construidos, tipología, etc.

La catedral de Mérida Yucatán, (*ver figura 1.1*) fue la primera que se concluyó a finales del siglo XVI, de origen renacentista-manierista, con una planta de tres naves longitudinales con crucero y cúpula en el crucero, ésta carece de tambor y al interior se levanta sobre pechinas, linternilla, con un ábside plano, grandes arcos, bóvedas vaídas. La planta es inscrita en un rectángulo.



Figura 1.1 Fachada de la catedral de Merida, Yucatan.

En el año de 1529 llegaron los primeros dominicos a Oaxaca a la que llamaron Nueva Antequera por su similitud con la Antequera hispana en Andalucía. Ellos fueron: Fray Gonzalo Lucero y Fray Bernardino de Minaya. El primer monasterio que construyeron fue el de San Pablo al que abandonaron a causa de unos terremotos, trasladándose a este lugar en donde les cedieron 14 solares para construir el templo que ahora es Santo Domingo de Guzmán (*Ver figura 1.2*).



Figura 1.2 Templo y convento de Santo Domingo de Guzmán, Oaxaca.

Desde 1543, la Orden Dominicana de Oaxaca tuvo su primer vicario que fue Fray Pedro del Rosario. El 4 de Septiembre de 1548 se autorizó la creación del convento por cédula real expedida en Salamanca en 1551.

En la Ciudad de Puebla, su catedral iniciada en 1575, de cinco naves, incluidas las dos capillas, tienen el mismo sistema estructural que la del Distrito Federal, la única diferencia radica en las características físicas (dimensiones), también es diferente en el ábside, que es rectangular.

La fachada principal fue realizada en cantera gris procedente del cerro de Guadalupe; en su decoración sobresalen detalles en piedra de villerías, que es una especie de cantera. El interior es de gran belleza por los objetos artísticos que conserva en sus 14 capillas laterales y en el altar mayor, también llamado Altar de los Reyes, en donde destacan esculturas y pinturas con temas religiosos, estas últimas realizadas por Pedro García Ferrer en el siglo XVII.

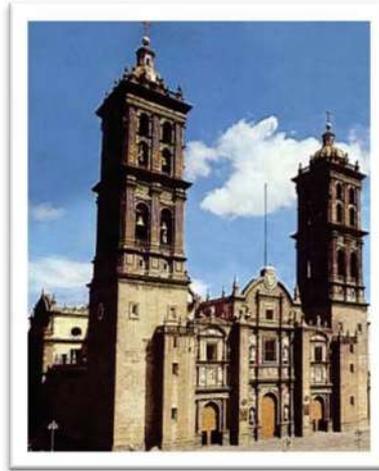


Figura 1.3 Fachada Catedral de Puebla.

En la capital de México, la construcción de la catedral no fue la excepción. Fue fundada en 1527, aunque no fue la primera, pues antes hubo otra, construida para llevar a cabo el Tercer Concilio Provisional mexicano. Sin embargo, la construcción fue derribada en 1628 porque no correspondía, según las autoridades a la magnificencia que se buscaba. La mitad del siglo XVI, proyectada por Claudio de Arciniega. Su estructura es un conjunto de cinco naves; una central de mayor altura, dos procesionales y dos en los extremos ocupados por capillas. En la fachada se distinguen tres portadas que corresponden a las naves central y procesionales, además de los cubos que soportan las torres y que son el inicio de las series de capillas.



Figura 1.4 Fachada Catedral de la Ciudad de México.



El siglo XVII será el de las iglesias conventuales y monasterios, construidos según el esquema hispánico de nave única con fachada lateral siguiendo la dirección de la calle y con un amplio atrio.

Otra catedral es la de Morelia, la cual fue construida en el siglo XVIII en la época de la Colonia Española, es de estilo barroco y esta realizado en cantera de color rosa que le dá un color peculiar y característico.

La tipología arquitectónica (planta en forma de cruz), de cinco naves, sin capillas y crucero con cúpula y capulín. Las gigantescas torres, terminadas a mediados del siglo XVIII son de estilo barroco. Para el siglo XVII, en la arquitectura religiosa mexicana el tipo más habitual de cubierta es el de bóvedas de cañón con lunetos, así como la disposición de cúpulas, con tambor, casquete semiesférico y linternilla.



Figura 1.5 Catedral de la Ciudad de Morelia Michoacán.

La actual catedral de Morelia no ha sido la única catedral que ha tenido la ciudad, ya que en 1580, cuando los poderes civiles y eclesiásticos de Michoacán fueron trasladados de Pátzcuaro a Valladolid (anterior nombre de Morelia), se inauguró una catedral, muy inferior a la actual en tamaño y valor artístico. Esa construcción se ubicaba en la esquina de las actuales calles de Corregidora y Abasolo. Sin embargo, debido al crecimiento que experimentó la ciudad a finales del siglo XVI e inicios del XVII, así como por causa de un



incendio que en 1584 afectó severamente el anterior edificio catedralicio, se hizo necesario pensar en otro templo, más grande, sólido e importante. Por ello es que a inicios del siglo XVII el cabildo catedralicio comenzó las gestiones para la construcción de la nueva catedral.

Muchos proyectos fueron propuestos, pero hasta mediados de ese siglo fue aceptado el proyecto del arquitecto italiano Vincenzo Barrocio, también conocido como Vicente Barroso de la Escayola proyecto que duró en construcción durante un largo período de casi 80 años.

Finalmente el ex convento Agustino de Tiripetío, se comenzó a edificar un nuevo edificio a partir del año 1543, la construcción estuvo a cargo del padre Diego de Chávez, pues el primer edificio lo había edificado el padre San Román. Este nuevo convento constaba solamente de dos salones con bóveda de cañón, sobre los que edificó el dormitorio, alterando la portería del primer convento para construir las escaleras de acceso a la planta alta. El convento representa una completa innovación en cuanto a la tradición constructiva de conventos se refiere, no sólo entre la orden Agustina, sino también en toda la Nueva España, pues el carecer de un patio central generaba un modelo arquitectónico completamente nuevo que no respetaba los patrones tradicionales.

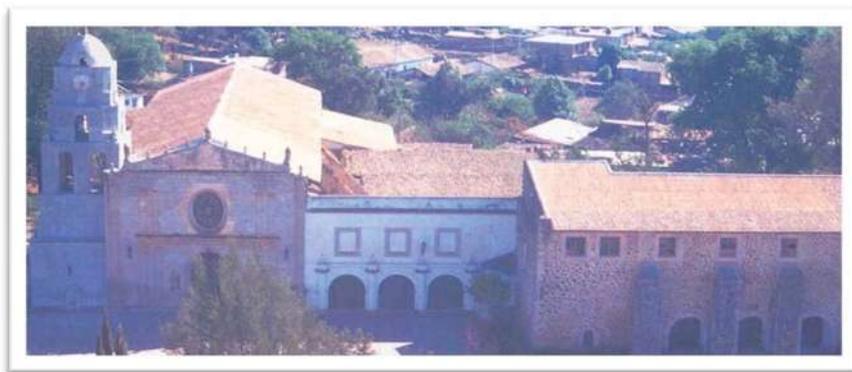


Figura 1.6 Ex convento agustino de Tiripetío, Michoacán.



En el año de 1940, el presidente Lázaro Cárdenas dispuso la restauración del edificio del ex convento y lo incorporó al patrimonio de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quién durante los siguientes años permitió el funcionamiento de las escuelas primaria y secundaria del pueblo. No sería sino hasta 1990, cuando una vez más la Universidad Michoacana restauró el edificio y lo consideró para que funcionara como un centro de cultura e investigación en el campo de las ciencias sociales.

I.2 Objetivos y alcances

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar las propiedades dinámicas de la iglesia de San Mateo Ahuirán, a base muros de mampostería de piedra, con el apoyo de estudios de vibración ambiental y de un modelo numérico con elementos finitos en tres dimensiones.

Para lograr el objetivo se plantean las siguientes actividades.

- 1) Investigación documental de antecedentes históricos: ubicación, característica tipológica, estructural, etc.
- 2) Investigación de trabajos previos realizados sobre estudios de vibración ambiental en iglesias.
- 3) Mediciones de vibración ambiental.
- 4) Proceso de las señales registradas para determinar desplazamientos, velocidades, aceleraciones, espectros de amplitudes de Fourier y funciones de transferencia a partir de las cuales se determinan las frecuencias naturales de vibración.



- 5) Creación de un modelo numérico de la estructura con el apoyo del programa SAP2000 (Wilson 2004) utilizando un modelo tridimensional.
- 6) Análisis de los resultados obtenidos del modelo numérico.

I.3 Organización del documento

Capítulo I. En este capítulo desarrollamos la introducción de esta tesis, señalando los monumentos históricos en México y de Michoacán, los objetivos de esta investigación así como sus alcances.

Capítulo II. En este capítulo se describe la tipología de la iglesia en México, de Michoacán y de la región P'urhépecha y sus daños ocasionados principalmente por sismos, estudios realizados de vibración ambiental en la iglesia Mexicana, también se describe la sismicidad de la meseta P'urhépecha.

Capítulo III. Una serie de investigaciones de los aspectos históricos de la iglesia de San Mateo Ahuirán, la descripción física del inmueble, los daños y reparaciones hechas a través del tiempo

Capítulo IV. En este capítulo se desarrolla el modelo analítico de la estructura de la iglesia en estudio, con el apoyo del programa SAP2000, con esto nos permite determinar las formas modales de la estructura, cuyas propiedades dinámicas fueron calibradas utilizando los resultados de datos experimentales.



Capítulo V. Mediciones realizadas en campo para conocer el comportamiento dinámico de la estructura y del terreno, se describe también el equipo utilizado así como el procesamiento de los resultados obtenidos.

Capítulo VI. En este capítulo se discute y se analiza los resultados obtenidos en los diferentes capítulos que forman este trabajo principalmente del capítulo IV y V, que son los más importantes que nos ocupa en esta Tesis, (Determinación de las propiedades dinámicas de la iglesia de san Mateo Ahuirán).

Capítulo VII. Este último capítulo presentan conclusiones generales de este tesis, se analizan futuras investigaciones para complementar este trabajo, así como una serie de recomendaciones particulares para el inmueble, se realizan también recomendaciones generales para la realización y aplicación de otros edificios (iglesias) de la meseta P'urhépecha.



Capítulo II

“El origen de la arquitectura Monástica del siglo XVI, es debida a la llegada Nueva España a tres ordenes religiosas (Franciscanos, Dominicos y Agustinos), cuya misión era catequizar a los indígenas a la doctrina religiosa, teniendo estas características de nave, se forman bóvedas de medio cañón, arcos, torres, frontón, que son las características de la mayoría de los edificios monásticos del siglo XVI”.

Roberto González

Estado de arte

II.1 Tipología de la iglesia en México

En nuestro país existen un gran número de sitios y monumentos históricos. En este capítulo se describe la tipología de las iglesias mexicanas, ya que por su valor arquitectónico, social y religioso es necesario conocer los elementos que lo conforman.

En México se da el origen de la arquitectura monástica en el siglo XVI, y en ella se describen dos tipos de edificaciones arquitectónicas: la Basilical, caracterizada por un eje longitudinal que se extiende desde el centro de la portada principal hasta al fondo del altar; (conocida también como Modelo Claustral) y la Centralizada, de planta Circular o Poligonal, organizada en torno a un espacio central, que suele estar cubierto con una cúpula (Modelo Parroquial). Las dos Tipologías pueden aparecer combinadas de diferentes



maneras y ambas pueden representar la figura de una cruz, que en unos casos tendrá los brazos iguales (cruz Griega) y en otros desiguales (cruz latina).

Los templos de las órdenes religiosas anteriores a 1570 son de trazas góticas. El tipo de construcción es el de iglesia fortificada de una nave, cabecera poligonal, bóvedas de crucería o de cañón en templos agustinos, y un tratamiento exterior de gran sobriedad, muros desnudos y remates almenados.

Como ejemplo citamos las siguientes Iglesias y Catedrales de primer tipo, construido por Franciscanos, Agustinos y Dominicos la iglesia de Huejotzingo o el de San Andrés de Calpan. La influencia indígena se hace notar en lo decorativo, con un tipo de talla de superficies planas a bisel que encontramos en portadas como las de Tlanalapa y Otumba.



Figura 2.1 Iglesia de San Andrés Calpán, Puebla.

La catedral de Mérida, considerada como la Primera construida en Nueva España a finales del siglo XVI, de origen Renacentista-Manierista, Consta de tres naves, una central y dos laterales. Cuenta con tres capillas y la sacristía. Originalmente contó con cinco capillas, pero fueron demolidas. Presenta dos torres de dos cuerpos que presenta un estilo Morisco. Cuenta con una cúpula adornada con arco botareles.

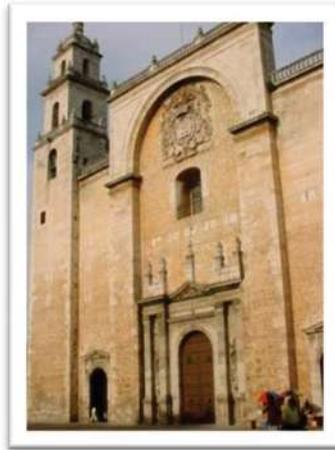


Figura 2.2 Catedral de la ciudad Mérida Yucatán.

La Catedral de Puebla, semejante a la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México, se comenzó a construir en 1575, de cinco naves, incluida las dos capillas, se diferencia con la de la ciudad de México, en las dimensiones, así como en el ábside, que es rectangular.



Figura 2.3 Catedral de la ciudad Puebla, Puebla.

En la Catedral de la ciudad de México, el estilo que predomina son el renacentista, el manierista, churrigüesco y barroco. Se comenzó a construir en 1575 y se concluyó casi dos siglos y medio después, a principios del siglo XIX, en la que se incluye fachada, torres al exterior, coro, con una planta de cinco naves, una mayor, dos procesionales para tránsito y dos que albergan a las capillas, bóvedas en las naves transversales y una bóveda de cañón con lunetos en la nave mayor y el crucero, contempla pilares y arcos.



La catedral metropolitana como casi todas las obras religiosas, representan en sí mismas la conjunción de talentos artísticos de varios siglos: arquitectura, tallado, pintura, expresados éstos en sus espacios, muros, retablos, esculturas, en los que se utilizaban los materiales más lujosos y bellos de la época.



Figura 2.4 La catedral Metropolitana de la ciudad de México.

Kubber (1992), afirma que las iglesias de una nave, independientemente de sus antecedentes aislados en España, son específicamente mexicanas. Generalmente tienen ventanas escasas en lo alto de los muros laterales, presentan influencia gótica y bóvedas de nervadura; aunque en el siglo XVI eran raras las plantas en forma de cruz latina, comenzaban a existir.

En Tepotzotlán, se encuentra uno de los templos más impresionantes del país, por su portada como por su interior que contiene magníficos retablos barrocos. La Casa de Loreto en el camarín de la Virgen bellamente ejecutado en estilo barroco con influencia mudéjar. Es del año 1733. En la sacristía hay interesantes pinturas de Miguel Cabrera. Entre los patios de los Aljibes y el de los Naranjos, la capilla doméstica posee un gran retablo barroco lleno de espejos y relicarios. Detrás de la iglesia, hay un mirador desde el que se contemplan parte del conjunto y bellos panoramas.

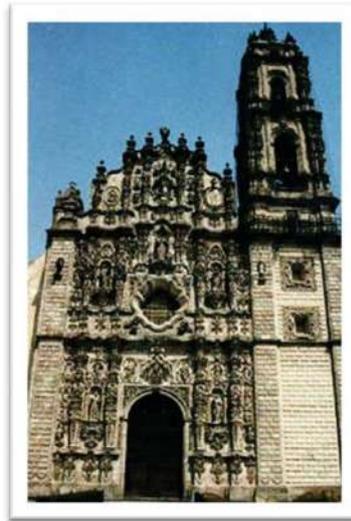


Figura 2.5 Iglesia barroca de San Francisco Javier, en Tepotzotlán, Estado de México

Entre los ejemplos de la segunda tipología (con planta en forma de cruz), podemos citar siguientes catedrales.

Catedral de Morelia, construida de cinco naves, sin capillas y crucero con cúpula y capulín. Las gigantescas torres, terminados a mediados del siglo XVIII son de estilo barroco. Para el siglo XVII, en la arquitectura religiosa mexicana el tipo más habitual de cubierta es bóvedas de cañón con lunetos, así como la disposición de cúpulas, con tambor, casquete semiesférico y linternilla.



Figura 2.6 Catedral de Morelia, Michoacán.



Bérchez (1992), explica que el siglo XVII es el siglo de las catedrales, parroquias y conventos, con un esquema de cruz latina, con una sola nave, ligeras bóvedas de cañón, vaídas o de arista, torres, frontón, cúpulas de media naranja con o sin tambor.

II.1.1 Las iglesias porfirianas de la ciudad de México

Construidas en su mayoría con un estilo ecléctico, las iglesias de principios de siglo son los mudos testigos del enorme crecimiento de nuestra ciudad.

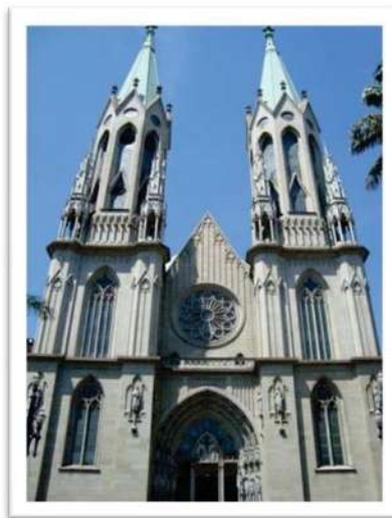


Figura 2.7 Contrucciones típicas en la época Porfiriana en México.

La arquitectura Porfiriana puso en práctica una arquitectura regresiva, es decir, trabajaron con los estilos "neos" como el neogótico, el neobizantino y el neorrománico, que en realidad eran retornos a modas antiguas, pero utilizando métodos de construcción modernos como el concreto armado y el hierro fundido, que comenzaron a ponerse en boga a partir del último cuarto del siglo pasado.

Los arquitectos del porfiriato estudiaron entonces estilos más elaborados y menos clásicos; sus primeras obras neogóticas surgieron en México en la segunda mitad del siglo XIX y muchas fueron eclécticas, es decir, formadas por elementos pertenecientes a varios estilos.



II.1.2 Tipología de la Iglesia en Michoacán

El florecimiento de las Bellas Artes hasta 1787, es caracterizada más por su arquitectura, donde hubo dos períodos fundamentales, análogos a los de toda Nueva España y reflejo a los de península: el gótico-renacentista (1550-1650) y barroco (1650-1787), límites cronológicos aproximados.

II.1.3 Primer Período

La arquitectura en el primer período es casi exclusivamente conventual y de estilo mixto, gótico-renacentista: gótico, por la planta y cubierta de las construcciones, renacentista, por su ornamentación y a veces por sus bóvedas. A este primer período corresponden: la catedral de Pátzcuaro y los antiguos conventos de franciscanos y agustinos.



Figura 2.8 Catedral de Pátzcuaro, Michoacán

La catedral de Pátzcuaro fue suntuosa y originalísimamente proyectada por Don vasco de Quiroga, con cinco enormes naves que irradiaban de otra nave, central y circular, en la que estaba el altar mayor; pero solo se concluyó (1565) una nave, que es la actual Basílica de Nuestra Señora de la Salud.



Los antiguos conventos franciscanos de Michoacán se hallan principalmente en la región P'urhépecha, se caracterizan principalmente por muros almenados, con cubiertas de madera, teja de barro, que representan en su estructura y ornamentación rasgos valiosos. Como ejemplo podemos citar el templo de San Francisco de Morelia, tiene bóvedas vaídas, renacentistas, mientras que la de Angahuan lucía un hermoso artesanado y el claustro de Tzintzuntzan ostenta vistosa lucería morisca. Célebres son las portadas platerescas de los hospitales de Acámbaro, Uruapan y la del templo de Angahuan; platerescas también y no menos hermosas, las de Tzintzuntan, Morelia y Erongaricuaró, debidas al parecer al mismo maestro de Cintzuntzan, “de relieve inconfundible dentro del renacimiento de Nueva España” que dejó una de las principales creaciones en la portada de ese lugar.



Figura 2.9 Fachada Iglesia de Angahuan, Mich., (foto tomada por Ramos Silva)

Los conventos agustinos sobresalen por su merito arquitectónico en la región lacustre de Yuriria y Cuitzéo, también tuvieron interés los de Tiripetío y Ucareo: el de Tiripetío, por la cubierta en forma de media tijera con su artesanado muy propio y admirado, finalmente fue destruida por un incendio en 1640. El de Ucareo, obra de Fray Juan de Utrera (1565), hoy en ruinas, el cual duro muy poco en su construcción, un año aproximadamente así como el templo de Salamón, construido con materiales propios de la región madera y piedra, siendo la mejor traza arquitectónica que existió en la región.



II.1.4 Segundo Período

En su segundo período (1650-1787) la arquitectura en segundo periodo es barroca, principalmente se desarrolla en Valladolid (hoy Morelia, Mich.), en el bajío y otras partes de la provincia. Los mencionaremos por lugares.

De 1660 a 1745, mediando interrupciones, se construyó la Catedral de Valladolid, el autor fue Vicente Barroso de la Escayola (Varroccio, según una de sus firmas), La traza de Barroco fue corregida en 1660 en cuanto a la altura del cimborrio y torres, que los peritos juzgaron excesiva, esto debido que es una zona sísmica, se retuvo quizás la altura que les daba la traza de barroco, lo que explicaría su desproporción con el cuerpo de la iglesia.

Las torres dieron a la Catedral de Valladolid su gran monumentalidad, siendo semejantes a la Catedral de Puebla, consideradas como las mas monumentales de América Latina construidas durante la época colonial, logran tal consideración de diferente manera: la de Puebla con dos cuerpos igualmente altos; que mantienen la anchura del cubo hasta recibir el remate; la de Valladolid con tres cuerpos bien proporcionados, altura y anchura decrecientes y con diversa planta –octogonal- los dos últimos.

La catedral dio así a Valladolid el barroco sobrio que lo caracteriza, característica propia de la arquitectura Mexicana de este periodo.



II.2 Sismicidad de la región

II.2.1 México y las placas Tectónicas.

México por su localización geográfica forma parte del llamado Cinturón de Fuego o Cinturón Circunpacífico.

La mayoría de los temblores se originan en una zona que se encuentra comprendida entre el golfo de Tehuantepec y el Estado de Jalisco, en la frontera con el Océano Pacífico. Históricamente esta zona se ha dividido en trece subzonas que se mueven independientemente entre sí y que originan los temblores que con mayor frecuencia y magnitud se presentan en México, (Nishenko y Singh, 1987).

México incluyendo su mar territorial, esta repartido entre cuatro placas. Dos grandes, la de Norteamérica, que va desde México hasta el Ártico y la del Pacífico, que además parte de México, incluye parte de los Estados Unidos y casi todo el pacífico del norte; una mediana, la placa de cocos que ocupa todo el Océano Pacífico frente a las costas de México y Centroamérica, y se extiende al sureste hasta Costa Rica; y la pequeña placa Rivera, que se encuentra en la boca del golfo de California (Nava A., 1998). En la frontera sur de Guatemala la falla Polochic Motahua pone en contacto a la placa Norteamericana con al del Caribe.

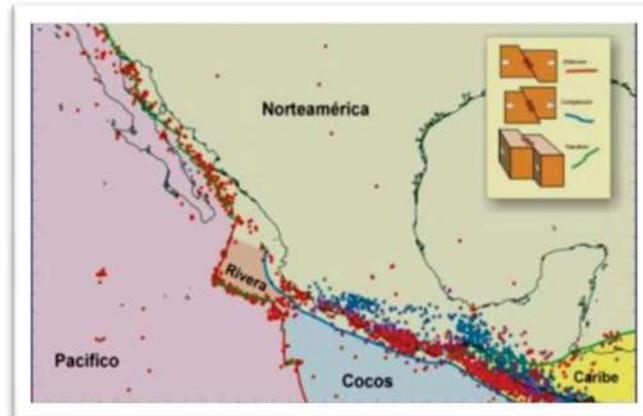


Figura 2.10 Placas tectónicas de México.

En México las dorsales activas pertenecen a la dorsal del Pacífico Oriental. Esta dorsal es una cordillera submarina enorme, formada por crestas de dispersión, que separan las placas del pacífico, las de Cocos y Nazca. Su continuación hacia el norte se dá a lo largo de una serie de puntos de dispersión, asociados con la separación de la península de Baja California del continente, a razón de 3 cm/año en promedio.

En México también se presentan las fosas o trincheras oceánicas, la trinchera Mexicana se extiende desde la boca del Golfo de California hasta el extremo sur del país, en Chiapas, a lo largo de la costa del Pacífico y se continúa por centro de Sudamérica hasta la tierra de fuego. Esta trinchera es llamada “Trinchera Mesoamericana”.

Muchos de los sismos se originan en las fronteras entre las placas tectónicas, sin embargo, algunos (un número menor) se inician en el interior del territorio mexicano. El sistema sismológico nacional, entre los años 1965 y 1995, determinó que en promedio se presentan 100 sismos al años con magnitudes mayores o iguales que 4.5, 3 sismos al año con magnitudes mayores o iguales a 6.0, 1 sismo a cada 5 años con magnitud mayor o igual que 7.5.



El mayor peligro sísmico ocurre con los sismos originados en las costas del pacífico, entre las ciudades de puerto Vallarta, Jalisco, Lázaro Cárdenas, Mich., Tapachula, Chiapas, y en el norte del país por la falla de san Andrés.

II.2.2 Zonificación Sísmica

La república mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas (A,B,C,D), esto se realizó con fines de diseño antisísmico (CFE 1993). Para realizar esta división (*figura 2.11*) se utilizaron los catálogos de sismos de la república mexicana desde inicios del siglo XIX, grandes eventos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los temblores ocurridos en el siglo XX. Estas zonas son un reflejo de que tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo esperada.

La zona A es una zona donde no se tiene registros históricos de sismos, no se han reportado eventos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad.

La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de temblores es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentes o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. Aunque la ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, pueden esperarse altas aceleraciones.



Figura 2.11 Regionalización sísmica de la República Mexicana, (CFE, 1993)

La sismicidad en Michoacán es debida principalmente a tres fuentes potenciales, como se describe a continuación.

Sismos debidos al movimiento de las placas tectónicas los cuales pueden ser de subducción o intraplaca.

Los de Subducción se producen por la subducción de la placa de cocos en la placa de Norteamérica, estos sismos ocurren a poca profundidades como ejemplo podemos mencionar los sismos de los años 1979(M7.4) y 1985 (M8.1).

Los de intraplaca, los cuales podría confundirse con los sismos que son producidos por fallas locales en el interior del continente.

Un sismo intraplaca ocurre a profundidades mayores de 40km, dentro de las placas subducidas, y se produce por el desquebrajamiento de las placas oceánicas en subducción. Ejemplo de este tipo de sismo son el sismo de 1964 bajo el Rio Balsas, el de 1970 bajo Orizaba, el de 1980 bajo Huajuapán de León y el de 1999 bajo Tehuacán.



Por otra lado, en la parte central del estado Michoacán, se han desarrollado grandes cuencas lacustres, las cuales son delimitadas en su parte sur por fallas E-W, los cuales son sísmicamente activos por ejemplo las fallas de Pajacuarán, la de Morelia-Acambay (Garduño-Monroy et. Al., 1998)

Este sistema de Fallas Locales localizadas en el interior de la placa continental, son otra fuente de sismos en el Estado, en el caso de fallas activas, estas pueden generar sismos potencialmente destructivos ya que los sismos producto de las fallas locales son de focos superficiales y esto provoca que la energía liberada producto de un evento de este tipo llegue a las ciudades casi directamente (falla de Acambay 1912).

Los ejemplos más importantes que podemos citar es el sismo de Bavispe, Sonora, en 1887, Acambay, Estado de México, en 1912 y enero de 1931 en Oaxaca. Estos sismos ocurren en el interior del continente y a profundidades mayores a 45 km. Aunque estos sismos la magnitud esperada es menor que la producida por sismos de subducción, la distancia a la que ocurren es generalmente menor por lo que pueden ser extremadamente destructivos.

Otra fuente importante de sismos en Michoacán son los asociados a la actividad volcánica en el estado, tales son los casos de los sismos que se produjeron en las erupciones de los volcanes el Jorullo (1759) y el Parícutín (el 23 de febrero de 1942). Días antes de que se presentaran las erupciones de estos volcanes hubo la existencia de los ruidos subterráneos. Los geólogos lo conocen como premonitores y evidencian una próxima erupción. En el caso del volcán Parícutín arrasó con el pueblo de Parangaricutiro, Mich., dejando enterradas las construcciones.

Como podemos observar el estado de Michoacán se encuentra afectado por diferentes fuentes sísmicas importantes, de aquí surge la necesidad de la realización de trabajos de investigación que permita entender el comportamiento de los suelos y de estructuras existentes de nuestro Estado.

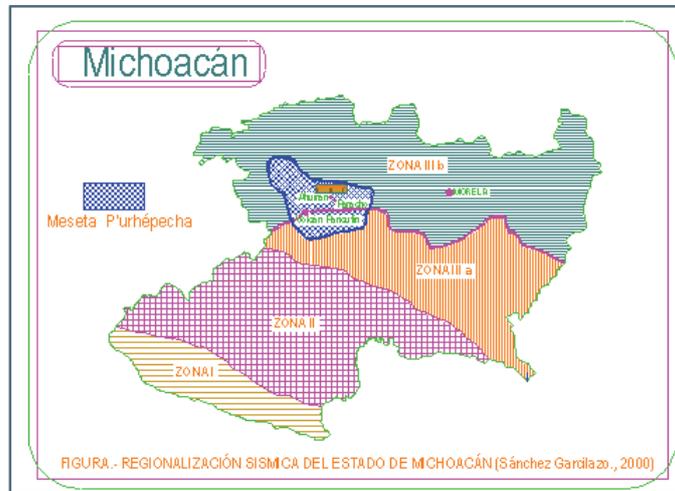


Figura 2.12 En esta imagen podemos observar la Meseta P'urhépecha en la zonas que se encuentra, propuesta por (Sánchez Garcilazo., 2000)

En lo que respecta a la Meseta P'urhépecha así como Ahuirán, Municipio de Paracho, ésta se encuentra dividida en dos zonas sísmicas, zona IIIa y Zona IIIb, como se muestra la *figura 2.12* (Sánchez Garcilazo, 2000), y en el caso de Ahuirán, este se ubica en la Zona IIIb.

La meseta P'urhépecha se localiza en el límite sur del cinturón volcánico Mexicano, en una depresión que aún fue ocupada por el vulcanismo monogenético del Corredor Tarasco, este descansando sobre rocas graníticas que afloran al sur de Uruapán. El vulcanismo de esta zona es de edad cuaternaria, destacando por su gran actividad de los cerros Metate y Jabalí (zona de Uruapán), por su actividad, presumiblemente durante el holoceno. Es importante volver a señalar que la meseta P'urhépecha, también se resintió con tremores y depósitos de ceniza durante los nacimientos de los volcanes Jorullo en 1759 y Paricutín en 1942.



II.3 Daños registrados en monumentos históricos

II.3.1 Breve Panorama mundial

Las estadísticas mundiales de los daños causados por terremotos a construcciones históricas (iglesias) son prácticamente nulas, por esto resulta difícil de contar con una clasificación detallada que incluya localización, tipología, daño sufrido a través del tiempo y los procesos de reparación y la reconstrucción llevados a cabo en estos edificios históricos.

Sin embargo, podemos citar algunas construcciones, entre las que tenemos a los jardines colgantes de Babilonia, palacio que existió hace aproximadamente 5000 años, fue destruido por el abandono del lugar, también podemos citar el Coloso de Rodas, estatua construida en el siglo V a.c., derrumbada probablemente por un terremoto. Finalmente la estatua de Zeus en Olimpia, realizada en el año de 453 a.c., y recubierta en hoja de oro, causa por lo cual fue desmantelada al ser invadida Atenas.

A continuación mencionaremos algunos casos ocurridos en los últimos tiempos y que han tenido un gran impacto en el patrimonio histórico mundial.

En 1976, la capital de Guatemala fue sacudida por un gran terremoto que destruyó la catedral y causó daños en muchas otras iglesias. En el mismo año, la región Uygide en el norte de Italia fue seriamente afectada por algunos terremotos, (Doglioni et al., 1994), igualmente ocurrió en noviembre de 1980 en el sur de Italia durante el terremoto de Irpinia. Causando más de 1000 decesos, daños a monumentos históricos de valor histórico y cultural.

Los terremotos de Umbria-Marcas (Italia) en 1997 son los que más daños han causado al patrimonio histórico construido en los últimos años. Más de 2250 iglesias se vieron afectadas en la región cercana a Assisi en el centro de Italia. Los daños fueron causados por



4 eventos principales con magnitud $M_w=6$. Dichos terremotos causaron daños a 1815 iglesias en Umbria (D' Ayala, 2000) y a 1450 en Marcas, sin un gran número de colapsos totales pero con importantes pérdidas en el patrimonio histórico debido a colapsos parciales y fisuras principalmente.

El 23 de junio de 2001 cerca de la costa de Perú, un gran evento con $M_w = 8.4$ también produjo daños importantes en edificios históricos (EERI, 2001), tal es el caso de la catedral de Arequipa (*figura 2.13*), donde la torre izquierda colapsó sobre las bóvedas del edificio. Los registros acelerométricos en esta región indicaron valores pico para el terreno (PGA) de 220 y 295 gales, para las componentes N-S y E-W respectivamente.



Figura 2.13 Catedral de Arequipa, fotografía del evento principal

II.3.2 Breve Panorama Nacional

El 15 de junio de 1999 a las 15:42 hora local (20:42 GMT), ocurrió un sismo con mecanismo de falla normal, con una magnitud $M_s = 6.7$ y $M_w = 7.0$ (SSN), y cuyo epicentro se localizó a 30 km de la ciudad de Tehuacán, Puebla. Este sismo provocó daños en algunas estructuras ubicadas en la zona epicentral. Los inmuebles con mayor nivel de daños fueron los antiguos, como construcciones coloniales, templos y monumentos históricos debido a los problemas característicos de estas construcciones. En su mayoría fueron torres y cúpulas de iglesias. Muchos ornamentos en estas construcciones se desprendieron y cayeron.



Los elementos mas vulnerables de acuerdo a las fallas estructurales que se presentaron en estas construcciones fueron arcos, bóvedas, cúpulas, campanarios y contrafuertes. En la cimentación no se presentaron daños. Entre los elementos que presentaron menores daños están los muros longitudinales, en los que observaron pequeños agrietamientos (sobre todo en discontinuidades de las puertas y ventanas).

La iglesia de San Agustín (Morelia, Mich.), una de las construcciones que resultó más dañada con el sismo del 99, sufrió colapso parcial del segundo cuerpo de la torre, lo que provocó deterioro en muros y la bóveda de la nave principal, así como el interior del coro y en bóvedas de tres capillas anexas; se desplomó parcialmente la cúpula de la torre del campanario, así como el entrepiso de los tres cuerpos; pérdida de elementos y aplanados exteriores e interior

Otra construcción dañada fue la Catedral metropolitana las afectaciones que causó el sismo del 99 a la Catedral fueron: grietas en la nave principal, bóvedas y arcos; daños en las ventanas. La cúpula principal presentó fractura en el tambor de proyección ascendente y degollamiento en figuras ornamentales; además en el Sagrario metropolitano hubo desprendimiento de aplanados y humedades.

Así mismo el sismo del 1999 afecto al templo de Nuestra Señora del Refugio, construido el siglo XVIII en la periferia de la traza inicial de la ciudad de Puebla, tuvo daños tanto en el interior del templo como en algunas zonas del exterior. Los presentaron daños consistentes en fisuras, grietas y desprendimiento de materiales con su consecuente caída. Los daños más importantes se ubicaron en cuatro zonas diferentes. Parte inferior del fuste de una columna del arco fajón norte del crucero, junto con daños importantes en el muro oriente de la antigua sacristía, en donde se señaló la falta de un contrafuerte para la simetría en cuanto a los contrafuertes del crucero, daños en la cúpula del camerín y en el arco que se formó sobre el muro retirado (*figura 2.14*).



Figura 2.14 Daños en la cúpula del camarín y en el arco que se formó sobre el muro retirado

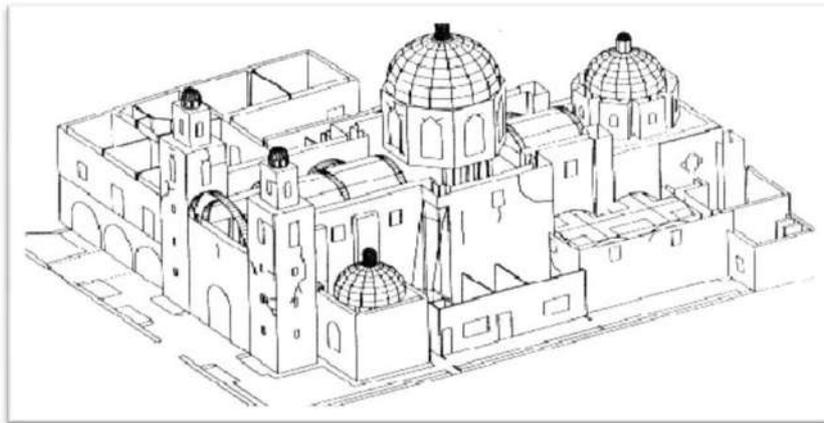


Figura 2.15 Isométrico con algunos daños observados por la parte exterior del templo.

El sismo de Tecomán, Colima del 21 de enero de 2003, afectó algunos monumentos históricos los cuales sufrieron daños menores, tales como la caída de recubrimientos de elementos no estructurales, así como fisuras en algunos de sus muros que no ponen en peligro la estabilidad de las construcciones. Caso diferente ocurrió en la Iglesia de San Pedro ubicada en el municipio de Coquimatlán, la cual sufrió daño severo en todo el cuerpo, incluso la caída de la torre sur que cayó en el patio de las instalaciones de la Presidencia Municipal. La otra torre sufrió daño en las columnas del campanario y quedó girada sobre una de sus columnas. Por lo que corresponde al cuerpo de la iglesia, prácticamente todos los muros están severamente dañados, así como todas las cúpulas; incluso una de ellas (la ubicada sobre el altar) sufrió colapso parcial.



Figura 2.16 Iglesia de San Pedro, en el municipio de Coquimatlán, Colima, México, (2003).

El templo de Sagrado Corazón en Colima, Colima, edificio con una nave en forma de cruz y muros de adobe, fue otro inmueble que presentó severos daños. Los principales daños observados se presentaron en las bóvedas, deformaciones en los muros y por lo tanto distorsiones, que modificaron su geometría y como se trata de un material frágil se provocaron fisuras.

II.3.3 Daños de las Iglesias en la Región P'urhépecha

En los siglos XVII y XIX, hubo sismos de magnitud importante que dañaron iglesias en diferentes lugares de nuestro estado, por ejemplo en Patzcuaro, durante el transcurso del siglo XVII, los temblores afectaron el edificio de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, dañándose el simborio el cual estuvo a punto de caerse, posteriormente se comenzó la reparación con la ayuda de los cuatro barrios pertenecientes de la parroquia, como eran los de san Salvador, Tzurumutaro y Cuanajo.

El sismo de 17 de Julio de 1858, en Pamatacuaro, Sicuicho, Tacascuaro, (sierra P'urhépecha), causo daños severos en las Iglesias en estos lugares, los cuales quedaron seriamente dañados.



El 19 de junio de 1858, en Morelia, Mich. Un sismo dejó en ruinas las iglesias de san Agustín y otro convento. En Zirahuén, el 19 de enero de 1859, un terremoto con duración de 8 segundos, provocó que se derrumbara la iglesia.

Un sismo intenso en la región de Zamora, el 26 de Febrero de 1980, ocasionó que se derrumbara la iglesia de Tangancicuaro.

El sismo de 12 de noviembre de 1891, parte de la meseta P'urhépecha; Uruapán, Paracho, Cheran y Purépero, causando daños considerables a algunos monumentos históricos.

Lo anterior pone en evidencia la vulnerabilidad de las iglesias y con ello la importancia de realizar estudios que nos permitan conocer el estado que guardan dichas construcciones.

II.4 Estudios de vibración ambiental

Se ha efectuado mediciones de vibración ambiental en diferentes tipos de estructuras (Nigbor et al, 1992) como monumentos históricos, puentes y edificios de oficinas. El método también ha sido usado en iglesias (Slastan y Foisner, 1995).

En los últimos años ha aumentado la cantidad de estudios de análisis dinámico de estructuras, que utilizan como fuente de excitación el ruido cultural. algunos casos relevantes se comentan a continuación.



II.4.1 Catedral Metropolitana

El conjunto de la Catedral ha salido librada exitosamente ante los fuertes sismos que han ocurrido desde su construcción; sin embargo, presenta algunas características que hacen dudar sobre su seguridad ante terremotos futuros, como los evidentes agrietamientos en la cubierta, ocurridos a raíz de los sismos de 1985. La preocupación principal es que los fuertes desplomos de las columnas de la nave principal y, sobre todo, de las cuatro columnas centrales que sostienen la gran cúpula, se pueden incrementar notablemente por los desplazamientos debidos a los sismos, poniéndose así en peligro la estabilidad del monumento.

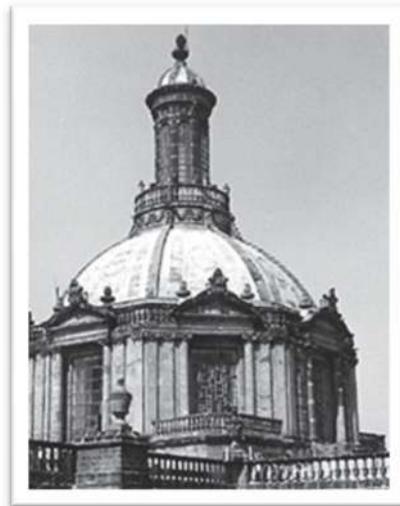


Figura 2.17 *Cúpula principal de la Catedral Metropolitana*

La evaluación de la seguridad sísmica de los edificios se basó en los resultados de la red de instrumentación sísmica, instalada para ese propósito en la Catedral, así como en los análisis y procedimientos de cálculo realizados sobre modelos calibrados a partir de los resultados instrumentales.



II.4.2 Edificio de Jalapa (ciudad de México)

En los primeros años de la década de los 90's se estudió un edificio de 14 niveles de la ciudad de México llamado Jalapa, esto con el fin de investigar la respuesta dinámica del edificio sujeta a sismos y vibración ambiental, los fenómenos de amplificación sísmica, de interacción suelo-estructura y los efectos de sitio.

Otro edificio estudiado es el Minami (1987), edificio de 12 niveles estudiado utilizando microtremores y algunos sismos, el estudio arrojó que los periodos fundamentales del edificio cambiaban con el tiempo debido al deterioro de la rigidez de los elementos no estructurales.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizó una investigación de un edificio de 14 niveles en la ciudad de México, el edificio se localiza en suelo blando. El edificio se instrumentó en noviembre de 1992 con 14 acelerómetros triaxiales digitales para obtener pruebas de vibración ambiental y el desarrollo de modelos calibrados, capaces de reproducir propiedades dinámicas y respuestas ante diversas sollicitaciones.

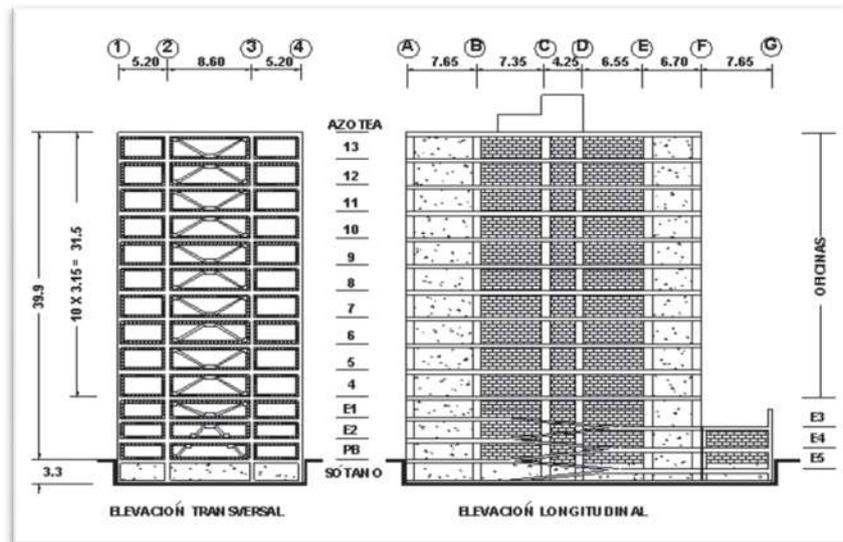


Figura 2.18 Alzado del edificio investigado por el (II UNAM)



En septiembre de 2001, un edificio departamental en Acapulco, Guerrero, se instaló una red de 24 servoacelerómetros uniaxiales de alta resolución, tal instrumentación permitió obtener un número suficiente de registros para visualizar la respuesta tridimensional del sistema suelo estructura y así estudiar tanto los aspectos estructurales y geotécnicos de dicho sistema. Además registra con suficiente resolución para su análisis, las vibraciones de sismos de pequeña a gran intensidad, así como de vibración ambiental.

En febrero de 2001 se realizaron estudios de vibración ambiental en la Basílica Catedral de Perú, con el fin de obtener un diagnóstico del comportamiento sísmico de la estructura, también se desarrollaron tres modelos numéricos (pilar, arco y domo), y el modelo global de la estructura, que está basado en el Método de los Elementos Finitos.

En Tijuana, Baja California, marzo de 2009, se estudió la vibración teórica y experimental de un edificio de nueve niveles, para la estimación teórica se utilizó el programa SAP 2000 V10, y para la estimación experimental mediciones de vibración ambiental *Figura 2.19*.

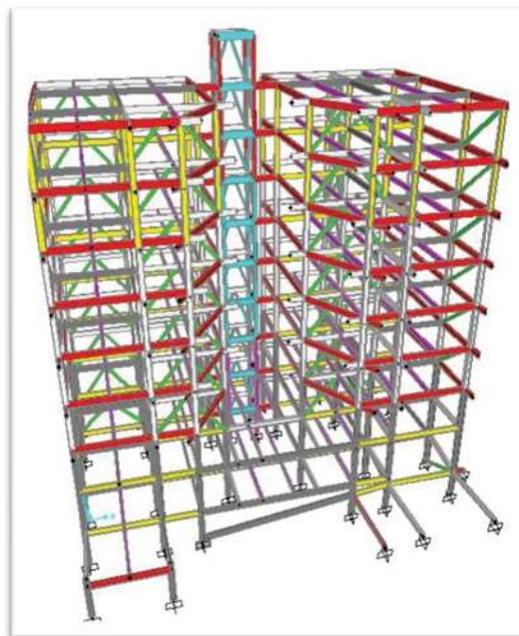


Figura 2.19 Ubicación de los sensores para los tres arreglos, para las mediciones de vibración ambiental.



En Michoacán se han realizado estudios recientes de vibración ambiental en el Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo y la catedral de la ciudad de Morelia Mich. Por parte de los propios investigadores de la Universidad Michoacana, con el objeto de conocer la respuesta dinámica del edificio sujeta a sismos.



Capítulo III

“La iglesia de San Mateo Ahuirán, data que fue construida a finales del siglo XVI por ordenes Franciscana principalmente por Fray Juan de San Miguel, ejemplifica las manifestaciones de una arquitectura regional en donde la piedra, el barro y la madera son primordiales en su construcción, de estilo gótico-renacentista”.

La iglesia de San Mateo Ahuirán

III.1 Aspectos históricos

Como ya se mencionó anteriormente en las comunidades indígenas de la meseta P’urhépecha, al llegar los españoles se comenzó con la evangelización siendo uno de los principales Tata Vasco de Quiroga, posteriormente los franciscanos y los agustinos.

Fueron dos órdenes franciscanos y agustinos, las que se repartieron la evangelización de Michoacán a mediados del siglo XVI. El arte religioso floreció con vigor y esplendor en el centro del antiguo reino de Michoacán como fruto de varios elementos que se conjugaron: el fervor de las primeras generaciones de conversos al cristianismo atraídos por el amor de los misioneros, religiosos y seculares; el espíritu comunitario de los indígenas que consideraban a la iglesia como su nuevo centro ceremonial, y la gran cantidad de



habitantes. El paso de la conquista al reordenamiento de lo conquistado estuvo marcado por la yuxtaposición del patrocinio de un santo al nombre indígena del pueblo; en el caso de Ahuirán, San Mateo Apóstol fue escogido como patrono de la comunidad.

Este fenómeno ocurre al final del siglo XVI y principios del siglo XVII, con la aparición de las "congregaciones", que obligan a los indígenas a dejar sus antiguos asentamientos y reagruparse como barrios aledaños a sus cabeceras o como nuevos poblamientos de traza castellana, en torno a una plaza y a su iglesia parroquial. De este fenómeno de enlace novohispano del santo con la comunidad proviene el arraigo de las devociones al santo patrono como protector del pueblo. A Ahuirán se le ha adosado la figura de San Mateo, y la parroquia de San Mateo Ahuirán ejemplifica las manifestaciones de una arquitectura regional en donde la piedra, el barro y la madera son primordiales en su construcción. La iglesia de San Mateo Ahuirán, al igual que las de San Pedro Zacán, San Miguel Tanaquillo y la Asunción Naranján, entre otras, comparte una tradición heredada de los españoles a través de los árabes, la de techumbres de madera o alfarjes, cuyas vigas inclinadas se conocen como alfardas. El aspecto que florece es la de una artesa invertida, lo que les valió en nombre de artesonado.

Esta técnica constructiva empleada para el techo se plasmó en el estilo mudéjar y proliferó en América Latina hasta que se sustituyó paulatinamente por bóvedas de mampostería en los edificios de mayores proporciones.



Figura 3.1 Iglesia de Ahuirán, construida finales del XVI y principios de XVII.



El empleo de los alfarjes se concentró en regiones específicas donde coincidían tres factores: serranías boscosas, de las que se obtenía la materia prima; zonas de gran actividad volcánica en las que se vió que la madera, por su flexibilidad natural, resistía mejor a los sismos y, finalmente, una vigorosa tradición artesanal del trabajo de la madera. En ese sentido, la sierra michoacana estaba a la cabeza, pues no sólo dió preferencia a este tipo de cubierta durante la Colonia, sino que hoy en día la tradición ha sufrido muchos cambios.

Por lo general, los pueblos tarascos tuvieron su modesto hospital o guatapera construido según los cánones de sus fundadores: el padre Tata Vasco de Quiroga y Fray Juan de San Miguel. Esta institución se encuentra entrañablemente unida a la existencia de la comunidad indígena tarasca. Cumplía la función de hospedería para los indios forasteros y pobres que transitaban por estas tierras. El haber logrado en el siglo XVI que en cada pueblo de Michoacán se estableciera un pequeño hospital con el mismo cuidado con que se construyera la iglesia, no se debe solamente al empeño de los misioneros o al mandato del prelado, sino al espíritu comunitario de los tarascos y a su disposición a la cristiandad, ya que los hospitales no prosperaron en los otros grupos étnicos del antiguo obispado de Michoacán.

III.2 Descripción del inmueble

III.2.1 Ahuirán y su medio físico.

Se localiza al noroeste del Estado, en las coordenadas 19°39' de latitud norte y 102°03' de longitud oeste, a una altura de 2,200 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con las comunidad de Tanaco (Municipio de Cheran), Al Noroeste con la Comunidad de Urapicho, al oeste con la Comunidad de Nurio, al sur con las comunidades de Arato y Pomacuarán, estas ultimas Municipio de Paracho, al Sureste con Paracho (cabecera Municipal) y al este con la comunidad de Aranza (Municipio de Paracho).



Figura 3.2 Mapa de la Meseta P'urhépecha en ella podemos observar la ubicación de Ahuirán, Municipio de Paracho.

II.2.2 Localización de la Iglesia de San Mateo Ahuirán.

La iglesia de Ahuirán se localiza en el centro de esta localidad, sobre la avenida 5 de mayo y la calle 24 de febrero, a un costado de la iglesia pasa la calle Mariano Matamoros. Su orientación es hacia el Oriente.

III.2.3 Colindancias.

Las Colindancias de la Iglesia son: Oriente; se encuentra la plancha o explanada de la plaza y la prolongación de la avenida 5 de Mayo (salida a Paracho); norte: se encuentra la Escuela Primaria Rural Federal “Lic. Benito Juárez”, así como la sacristía de la Iglesia; poniente: la calle Hidalgo y la casa de la familia Pérez Hernández; sur: con el jardín lateral y la calle Mariano Matamoros. Como se muestra en la siguiente figura 3.3.

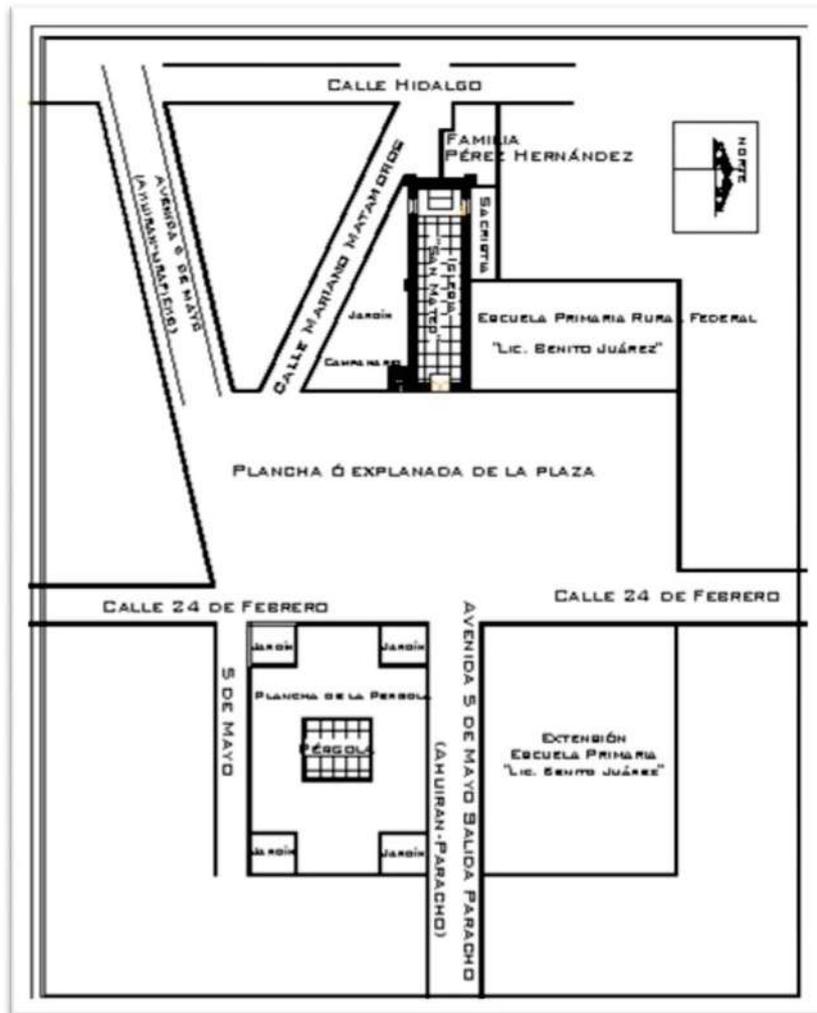


Figura 3.3 Croquis de localizaion y colindancias de la Iglesia de San Mateo Ahuirán.

III.3 Descripción arquitectónica

La iglesia de San Mateo de Ahuirán, esta formada por una planta de sección rectangular, esta planta tiene unas dimensiones de 12.0 m de ancho y 41.50 m de largo y la altura de los muros es de aproximadamente 9 m. El espesor promedio de las paredes laterales es de 1.90 m. El muro de fachada tiene un espesor de 2.0 m y una altura que varia de 9 a 12.6 m, la torre del campanario mide 3.9 m de frente por 5.0 m de longitud, sus muros tienen un espesor de 1.6 m y 10 m.



III 3.1 Fachada

Como se resaltó anteriormente a través del tiempo la iglesia ha sufrido muchas modificaciones, una parte de la fachada es de cantera estilo barroco, consta de dos columnas de sección mixta rectangular y circular, pegadas al muro de mampostería con molduras horizontales y verticales, el acceso en forma de arco acompañada con sus molduras horizontales a media altura (donde comienza el arco) y en el contorno interno del arco va acompañada de molduras. En la parte superior de la entrada tiene molduras horizontales con pequeñas columnas, finalizando con dos triángulos para dar paso la parte superior en la ventana.

En la parte inferior de la ventana existen molduras donde da comienzo a dos columnas de sección circular pegadas en el muro quedando en medios de estos la ventada hecha de herrería y cristal, la parte superior de esta ventana cierra con unas molduras.

En el extremo superior cierra con unas molduras horizontales e inclinadas 45°, y en medio existe una escultura de una imagen, en los costados concluyen dos columnas de sección rectangular triangulada ambos en la parte superior, toda esta estructura es de cantera.

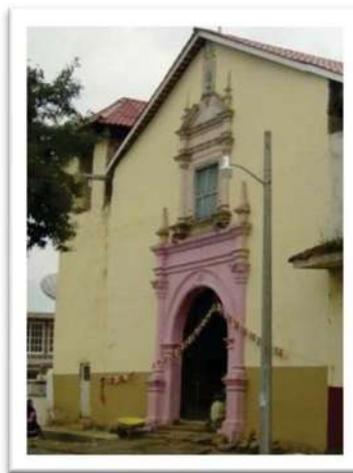


Figura 3.4 Fachada de la Iglesia.



Las paredes laterales en el área del altar cuentan con una abertura de 1.5 x 2.5m. El muro de fachada tiene dos aberturas 3.15 x 3.8 m y 1.2 x1.4 m, correspondientes al acceso y a una ventana respectivamente.

El campanario se encuentra adosado en la parte izquierdo de la iglesia, esta construido de muros de mampostería de piedra y barro, la sección arquitectónica es rectangular de 3.90m x 5.0 m, con un espesor de muros de 1.70 m aproximadamente, tiene una altura total de 11.50 m, en la parte superior tiene aberturas por los cuatro lados, los muros estas aplanados de mortero (cemento, arena y cal), repellado de color blanco. El techo esta construida por una estructura de madera a cuatro aguas, la cubierta es de lámina de acero galvanizado. La puerta de acceso se localiza por el lado de la explanada de la plaza sus dimensiones son: 0.80 m x 2.10 m.

Los escalones son de vigas de madera colocadas en forma de caracol, empotradas en los muros de mampostería.



Figura 3.5 Campanario de la iglesia



III.4 Estructuración

La iglesia está estructurada a base de muros de mampostería de piedra, los muros laterales identificados como muro norte y muro sur, cuenta con un espesor de aproximadamente 2m y una longitud de 41.5m, ábside recto, muro de fachada, con un espesor de 2 m, y una longitud de 12 m, finalmente una torre de planta cuadrada adosada a la fachada.

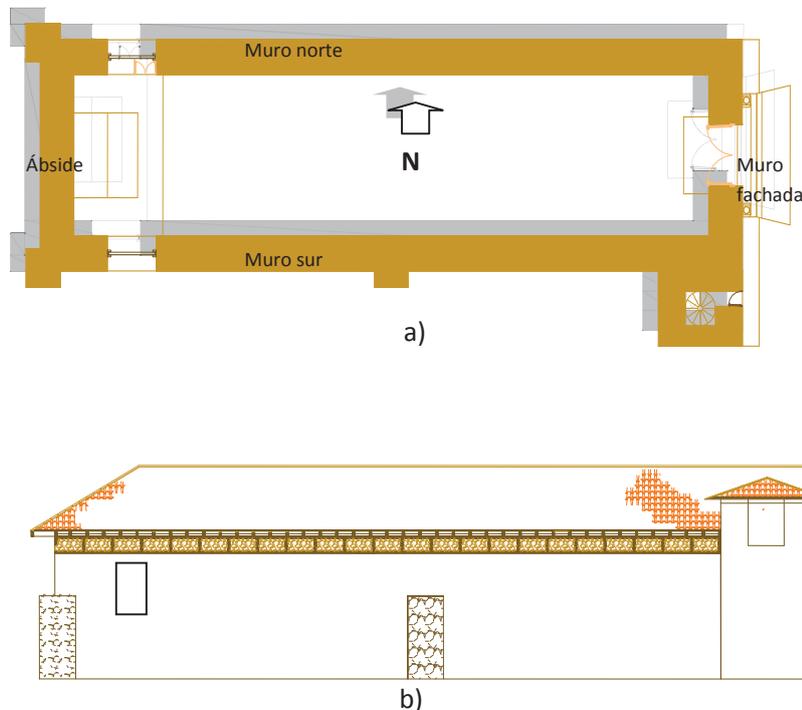


Figura 3.6 Iglesia de San Mateo Ahuirán: a) vista en planta, b) vista pared lateral, muro sur

Los muros están contruidos a base de piedra y lodo utilizando el método de mampostería irregular de piedra volcánica asentada con arcilla, cuatropeados en cada uno de sus lados, en este caso en particular la piedra se mantiene exenta de aplanado al exterior y enlucidos en su interior. La construcción de estos muros de mampostería es careada en la parte exterior de la iglesia, en la parte interior es aplanada con mortero cal-arena.



Los muros del lado sur de la iglesia cuentan con un contrafuerte y en el ábside con dos, contrafuertes uno en cada extremo contruados con el mismo material, con dimensiones de 2.0 m de lado por 0.85 de espesor y una altura de 4.5m.



Figura 3.7 Muro y arrastres de madera colocados en la parte superior.

Los muros culminan en la parte superior con arrastres de cerramiento de madera que corren a todo lo largo de los muros (*ver figura anterior*), sobre estos arrastres se apoyan por un lado, la viga transversal que une los muros laterales; y por el otro, el alero que recibe a las tijeras del sistema de techo. Los primeros elementos que se desplantan sobre estos arrastres son las vigas que componen la cubierta del plafón.

III.4.1 Techado

El techado esta formado por una sola nave de 14.50 m de ancho x 43.50 m de largo, estructurado con vigas de madera inclinadas en forma de tijeras sujetas en los extremos por arrastres y en la cumbre. Estas van separadas a cada metro y sujetas por largueros de madera, (*ver figura 3.8*).

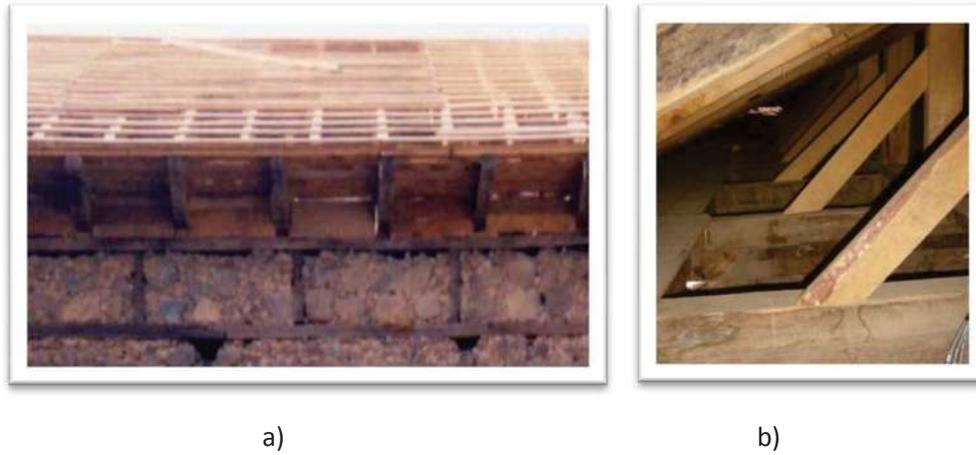


Figura 3.8 a) detalle arrastres de madera; b) detalle techumbre apoyada en los arrastres.

En la siguiente figura se muestra otros elementos que forman parte de la techumbre como con el pie derecho de sección rectangular de 8 x 12 cm, el cual descansa en el alero y estabiliza las tijeras para evitar deformaciones verticales.

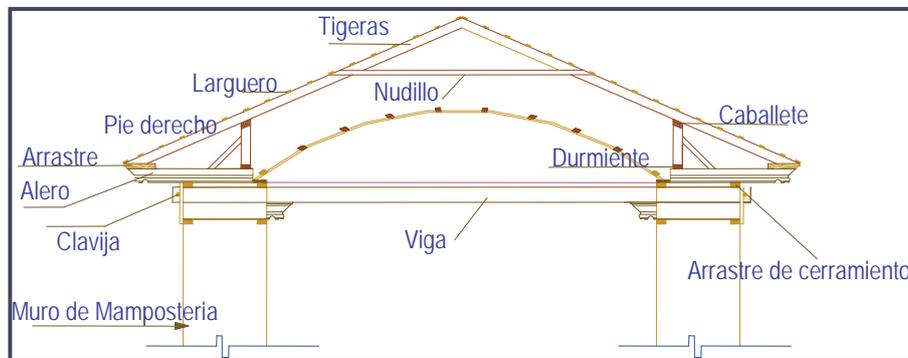


Figura 3.9 Corte de la Techumbre

Toda la estructura descansa en los Aleros, que tienen una separación aproximada de un metro, los aleros se apoyan en el muro de mampostería, estos sobresalen hacia exterior de los muros en donde se unen el techado y el muro de mampostería, dándole un acabado propio en este tipo de estructuras.



Figura 3.10 Detalle de los aleros y arrastres

III.4.2 Artesón.

Elemento estructural que se encuentra en la parte inferior del techo de forma ovalada. Se denomina artesón y esta formada a base de tablonces de madera que data del siglo XVI, el artesón se apoya directamente en los muros de mampostería. La estructura articulada por vigas (nudillo) que se ensamblan para dar la forma que tiene, este ensamble se realiza a uno y dos metros intercalados, como se muestra en la *figura 3.11*.

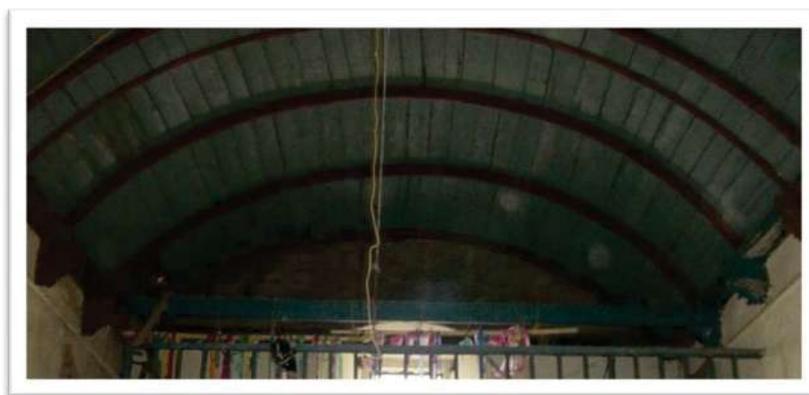


Figura 3.11 Detalle del artesón.



III.5 Daños y reparaciones registradas

III.5.1 Modificaciones que ha sufrido la iglesia de San Mateo.

Esta iglesia ha sufrido muchas modificaciones a través del tiempo, principalmente a mediados del siglo XX como se menciona cronológicamente.

En 1950 se tuvo la necesidad de abrir dos ventanas laterales en los muros sur y norte, cerca del ábside, este con el fin de contar con iluminación natural. Las aberturas tienen dimensiones de 2m x 2m, a una altura de 5 metros del terreno natural. Las boquillas de las ventanas se construyeron con tabique de barro rojo recocido y mortero.

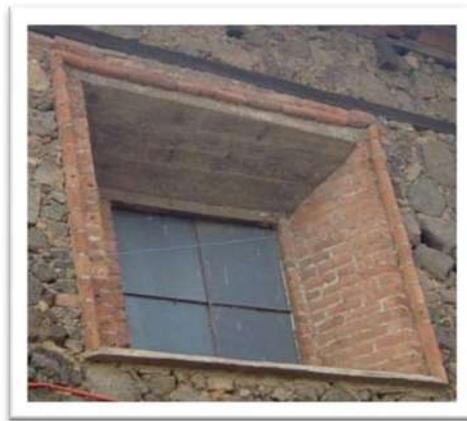


Figura 3.12 En 1950 existió la necesidad para abrir esta abertura (ventana), no se utilizó materiales propios alterando la arquitectura vernacula.

A mediados del siglo XX, (1955-1960) también se realizaron algunos cambios no estructurales, se cambió el piso de madera “entarimado”, por pisos de mortero, cemento blanco, con acabados lisos.



Figura 3.13 Fachada en remodelación.

En 1990 se reemplazó la teja asbesto-cemento, por teja de barro, pero se deterioró rápidamente afectando la estructura de madera principalmente, (ver figura 3.14). Posteriormente se cambió la estructura de madera y el artesón se rehabilitó respetando los procesos y especificaciones originales, mas tarde se reemplazó la teja de barro por lámina galvanizada.



Figura 3.14 a) se observa deterioro en la techumbre; b) detalles de la techumbre y de la boquilla de la ventana

A finales del 2007 y principios de 2008, se restituyó la estructura de madera dañada por una estructura nueva, utilizando madera estufada de la región. Se decidió colocar lámina galvanizada en el sistema de techo.



Capítulo IV

“El método de elementos finitos (MEF), consiste en la descomposición de un elemento físico continuo (estructura) en un número discreto de partes o elementos que se hallan conectados entre sí por un número discreto de puntos denominados nodos. Los movimientos de estos nodos constituyen las incógnitas fundamentales del problema. Dentro de cada elemento, los movimientos de cualquier punto se obtienen a partir de los movimientos de los nodos del elemento. La modelización numérica de edificios históricos representa, actualmente, una herramienta prácticamente imprescindible para entender su comportamiento estructural, más si de lo que se trata es de asumir un estudio para su conservación y/o rehabilitación”.

Modelo numérico de la Iglesia de San Mateo Ahuirán

La modelización numérica de edificios históricos representa, actualmente, una herramienta prácticamente imprescindible para entender el comportamiento estructural de edificios sometidos a la acción de diferentes tipos de cargas como pueden ser, la acción del sismo, cargas permanentes, desplazamientos diferenciales, etc.

El modelo numérico puede corresponder únicamente a una parte de la estructura o bien a la estructura completa, esto depende del fenómeno que se este estudiando.



IV.1 Marco teórico

El modelo numérico puede ser tan refinado como se desee, esto depende básicamente de las herramientas computacionales con que se cuente y del nivel de refinamiento deseado.

Existen técnicas de optimización de la malla de soporte, las cuales proporcionan mallados “adecuados”, que en algunos casos puedan llevar a modelos numéricos muy robustos los cuales consumen tiempos grandes de computadora.

En el caso que nos ocupa, se modeló únicamente los principales elementos estructurales, muros, contrafuertes, orificios de puertas y ventanas, respetando las dimensiones de estos elementos.

IV.2 Modelo numérico de la Iglesia

El modelo analítico se elaboró en el programa SAP2000 (Wilson, 2004) utilizando un modelo elástico tridimensional, los muros se modelaron con elementos finitos isoparamétricos de ocho nodos como se muestra en la *figura 4.1*. El sistema de techo no se incluyó en el modelo numérico ya que el interés de este trabajo se centró en determinar las propiedades dinámicas de los muros de piedra.

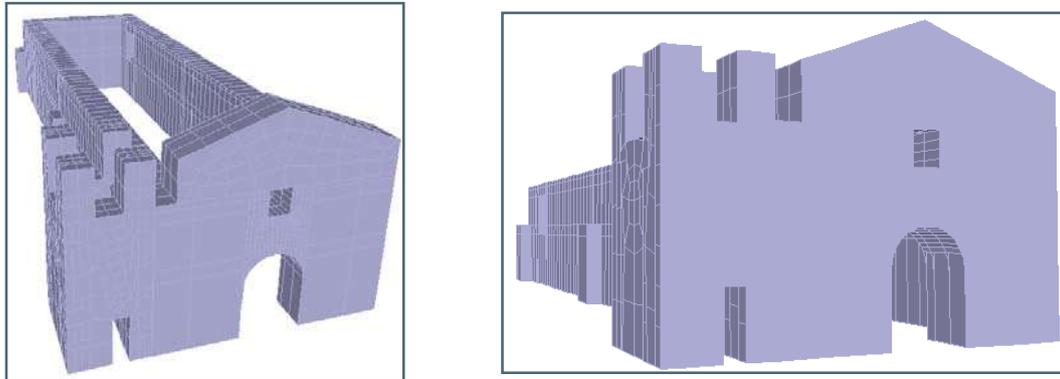


Figura 4.1. Modelo tridimensional del la Iglesia.

El análisis dinámico modal permite determinar las formas modales de la estructura, de esta manera el primero y segundo modos del la Iglesia se presentan en el muro Norte y muro Sur correspondientes a modos de flexión lateral (dirección N-S) con periodos fundamentales de $T=0.252$ s y $T=0.233$ respectivamente (ver figura 4.2).

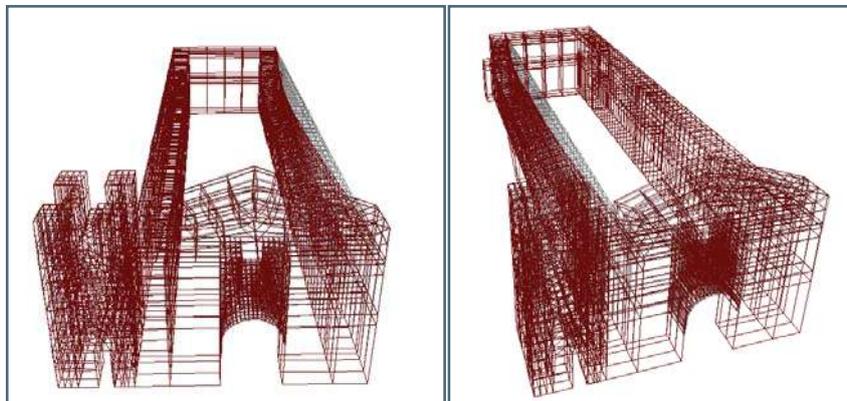


Figura 4.2. Primero y segundo modo de vibrar de la estructura, $T=0.252$ s y $T=0.233$ s.

El la figura 4.3, se muestra de forma esquemática el tercero y cuarto modos de vibrar de la estructura, estos modos se presentan en los muros Norte y Sur, los cuales se flexionan en curvatura doble en dirección lateral (dirección N-S) con periodos $T=0.204$ s y $T=0.201$ s. En el tercer modo se observa que el muro de fachada se desplaza en la dirección E-W mientras que en el modo cuatro la torre del campanario se desplaza en la dirección N-S,



este efecto muestra un acoplamiento del movimiento de los muros laterales con el muro de fachada y la torre, respectivamente.

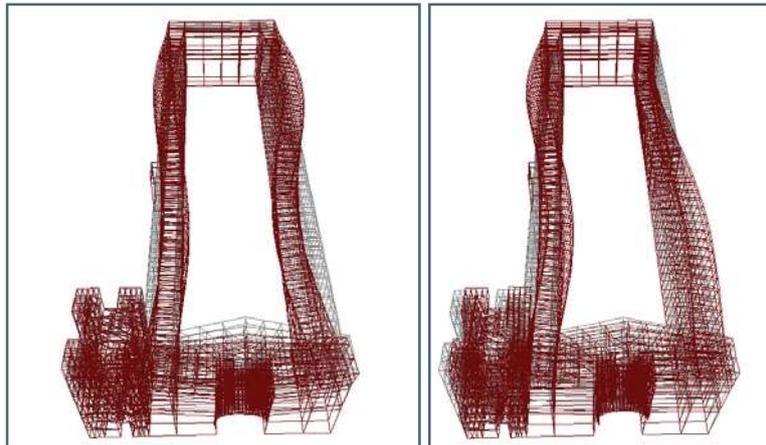


Figura 4.3. Tercero y cuarto modo de vibrar de la estructura, $T=0.204$ s y $T=0.201$ s.

Finalmente los modos quinto y sexto corresponden a traslación de la torre en la dirección N-S y traslación del muro de fachada en la dirección N-S, con periodos de $T=0.193$ s y $T=0.179$ s (ver figura 4.4).

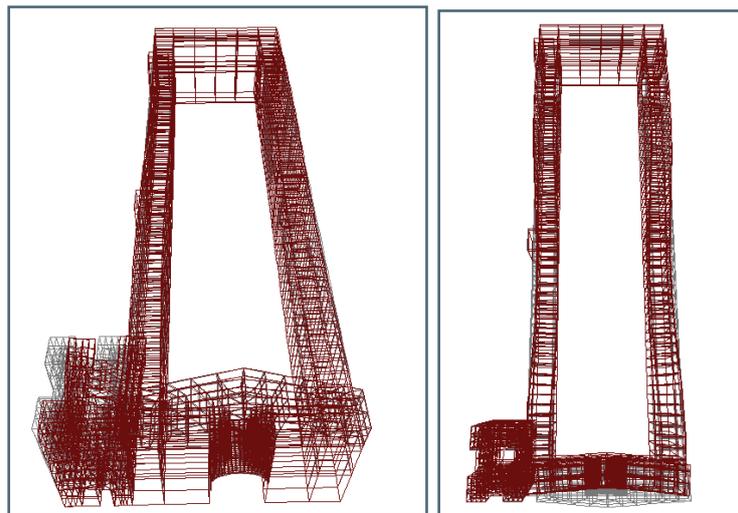


Figura 4.4. Quinto y sexto modos de vibrar de la estructura, $T=0.193$ s y $T=0.179$ s.



Capítulo V

“Al estudiar el comportamiento dinámico de edificios se instrumentan para determinar algunas de sus características dinámicas. Con misma la finalidad se realizan pruebas de vibración forzada y vibración ambiental. El uso de vibración ambiental o cultural, tiene la ventaja, sobre los trabajos en otras fuentes de excitación de ser eficiente, rápido y económico. En un estudio sobre medida de periodos propios en edificios, presentan los principales objetivos del análisis de la respuesta dinámica de edificios usando vibración ambiental. Control de calidad de una obra, control de daños causados por un sismo, verificación de reparaciones o modificaciones, control de una estructura durante su vida útil”

Pruebas de vibración Ambiental

Tradicionalmente el ruido ambiental ha sido considerado como algo negativo, molesto y que hay que cancelar o evitar. En la actualidad, lo que hace pocas décadas era un estorbo en los estudios de propagación y atenuación de ondas sísmicas se ha convertido en una herramienta excelente para caracterizar los efectos locales y las propiedades dinámicas del lugar de registro y de las estructuras. Así pues, para los estudios de vibración ambiental, el ruido es la señal y las ondas que lo integran se suele llamar en inglés, “microtremors”; en castellano no hay uniformidad en el nombre aplicado y se usan con el mismo significado las palabras microtemblores, microvibraciones, vibración ambiental y ruido cultural. Fundamentalmente son vibraciones de muy pequeña amplitud y periodos comprendidos entre 0.1 y 10 s (Architectural Institute of Japan, 1993).

La vibración ambiental se genera principalmente por la actividad humana y se debe al funcionamiento de maquinaria industrial y al tráfico de vehículos (Kanai y Tanaka, 1961).



Además también contiene vibraciones producidas por el viento, que son introducidas en el subsuelo por arboles, edificaciones o por un impacto con el relieve (Seo, 1995 a). Su fuente no esta asociada a terremotos y algunos investigadores consideran que el ruido de origen natural está formado por ondas superficiales generadas en zonas de interacción océano-continente, modos fundamentales de vibración del planeta, cambios en la presión atmosférica y actividad volcánica interna, además de las fuentes artificiales anteriormente citadas.

V.1 Técnicas para el análisis espectral

La determinación de características dinámicas del suelo utilizando vibración ambiental fue principalmente impulsada gracias a la técnica de Nakamura (Nakamura, 1989) que en la actualidad constituye una herramienta aceptable para determinar los espesores de los sedimentos (Sent y Wohlenberg, 1999) y ha demostrado ser una de las técnicas más baratas y convenientes para estimar confiablemente las frecuencias predominantes de los depósitos de suelos blandos. Por otra parte su utilización también ha sido bastante controvertida, pero hay consenso en que la técnica es capaz de determinar bien los periodos predominantes del movimiento del suelo pero no identifica bien los factores de amplificación (Bard, 1997). Sin embargo, no es la única técnica que existe para el análisis de señales como se describe a continuación.

V.1.1 Método Espectral

Este método fue introducido por Barcherdt (1970) y es utilizado en el análisis de registros de microtemores y de eventos sísmicos. El método se basa en compensar los efectos de fuente y trayecto usando registros de microtemores en dos estaciones, en la que una de ellas debe cumplir con las características de una estación de referencia; por lo tanto debe estar instalada en roca y la estación de interés en suelo blando. Suponiendo, que los dos tienen efectos similares de fuente y de trayecto, y para el sitio de referencia hay una respuesta de sitio despreciable al realizar la razón espectral de las componentes horizontales



tanto la estación de interés y de referencia, siendo el resultado el efecto de sitio. El esquema del método descrito se muestra en la *Figura 5.1*

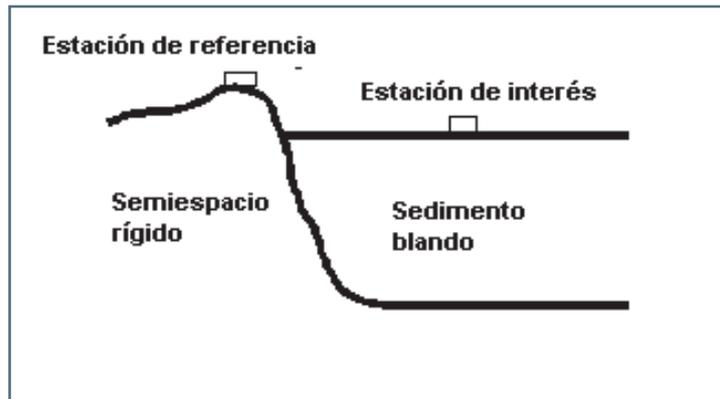


Figura 5.1. Distribución de sensores para el registro de microtremores, con el método de cocientes espectrales con una estación de referencia.

Este método fue aplicado con éxito por Field (1990), Akamatsu (1991), Dravinski (1991) y Seo (1992), para estudios de microzonificación sísmica en EEUU.

V.1.2 Método de análisis de Autocorrelación Espacial (SPAC)

El método SPAC fue propuesto por Aki (1957) y se basa en la obtención de registros de microtremores a partir de arreglos instrumentales de tipo circular o semicircular y así obtener una función de correlación promedio acimutal y por tanto, una estimación de la velocidad de fase, sin importar la dirección de propagación de las ondas.

Aki (1957), analizó los microtremores estadísticamente en el espacio y en el tiempo como ondas estocásticas estacionarias y las consideró como ondas de superficies dispersas. El principio de este método se basa en que la función de correlación de registros de ruido entre estaciones equidistantes promediadas espacialmente, tiene la forma de una función Bessel de orden cero de primera clase.



V.1.3 Método de Análisis Espectral F-K

Este método asume que los registros son espacialmente estacionarios, lo cual es razonable dado que las fuentes generadoras están alejadas del arreglo a una distancia mucho mayor que la distancia entre arreglos y la localización del arreglo es “no dispersivo” para la propagación de las ondas. Este método provee información respecto a la velocidad de fase y al azimut de la fuente dando buenos resultados en su aplicación para la determinación de velocidades de fase comparables con los modelos de velocidad obtenidos a partir de perforaciones de pozos. La limitación de este método en relación al método descrito anteriormente, es que se requiere de un número mayor de estaciones para establecer los arreglos. Un ejemplo de aplicación de este método fue hecho por Matsushima y Okada (1990) quienes analizaron la frecuencia y número de onda, para determinar la estructura profunda en el valle de Hokkaido, Japón; obteniendo buena correlación con los datos de gravimetría.

V.1.4 Método Espectral de Nakamura

La metodología H/V, desarrollada por Nakamura en el año 1989, esta basada en la suposición de que el cociente espectral entre las componentes horizontales y la componente vertical de las microtrepidaciones es una aproximación de la función de transferencia de los suelos, a partir de este procedimiento se puede evaluar los efectos de sitio, al obtenerse a partir de la aplicación de este método la frecuencia fundamental de resonancia (Rosales, 2001).

Esta metodología, ha ganado popularidad en los últimos años por ser un procedimiento económico y fácil de aplicar, obteniéndose a partir de este los valores de frecuencia y periodo fundamental de un sitio, parámetros claves a la hora de realizar una caracterización del sitio. Este procedimiento emplea mediciones de ruido ambiental (compuestos de ondas superficiales tipo Rayleigh) producido por la interacción viento-estructura, tráfico y varias formas de actividad humana (Lermo y Chavez García, 1994). Se ha demostrado que el cociente espectral entre los componentes horizontales y verticales de estas mediciones ofrece una buena estimación de la frecuencia fundamental de depósitos sedimentarios sueltos, y en cierta forma, el factor de amplificación. El uso extensivo del Método permite



el mapeo rápido y detallado de estas frecuencias en áreas urbanas, combinando informaciones sobre la respuesta de vulnerabilidad, se puede anticipar los efectos potenciales de un sismo a edificios y estructuras civiles.

La teoría y la hipótesis del método no ha sido aceptadas unánimemente por la comunidad científica, pero las comparaciones con otras técnicas han comprobado en diversos estudios recientes la validez y la eficiencia del método (Lermo, Chavez-Garcia, 1994).

Nakamura en 1989 desarrolló la técnica basado en tres hipótesis principales:

- 1) El ruido ambiental es generado por la reflexión y refacción de ondas de corte al interior de capas de suelos superficiales y por ondas de superficie.
- 2) Fuentes superficiales locales de ruido no afectan al ruido ambiental en la base de la estructura no consolidada.
- 3) Capas de suelo blando no amplifican la componente vertical del ruido ambiental.

A continuación se describe la metodología de Nakamura.

La función de transferencia se define con la siguiente ecuación

$$S_t = \frac{Sh_s}{Sh_b}$$

Donde:

S_t , Función de transferencia

Sh_s, Sh_b , Espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en la superficie y del movimiento incidente en el basamento rocoso, respectivamente.



Sin embargo, el espectro de la componente horizontal en la superficie Sh_s , esta afectada fácilmente por las ondas superficiales, ya que la mayoría de los casos el ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh, probablemente Sh_s , se encuentra afectado por estas. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluida en el espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie S_{vs} , pero no en el espectro de la componente vertical del movimiento en el basamento rocoso S_{vb}

Asumiendo que el movimiento vertical no se amplifica por las capas superficiales, E_s representa el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical.

$$E_s = \frac{S_{vs}}{S_{vb}}$$

Donde:

E_s Representa el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical.

S_{vs} Espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie.

S_{vb} Espectro de la componente vertical del movimiento en el basamento rocoso.

Si no existiera onda Rayleigh entonces $E_s=1$, si se aumenta el efecto de la onda Rayleigh, E_s se hace mayor que la unidad.

Asumiendo que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal, se considera que la relación $S_{tt} = \frac{S_t}{E_s}$ es una función de transferencia más fiable, después de eliminar el efecto de las ondas Rayleigh, y llamado:

$$S_{tt} = \frac{R_s}{R_b}$$



Donde:

$$R_s = \frac{R_{hs}}{S_{vs}} \text{ y}$$

$$R_b = \frac{S_{hb}}{S_{vb}}$$

R_s y R_b fueron obtenidas dividiendo el espectro horizontal entre el espectro vertical, para los microtemores en superficie y en el basamento.

Esto implica que para el basamento la propagación es la misma en todas las direcciones

$$R_b \cong 1$$

Y por tanto,

$$S_{tt} \cong R_s$$

Esto significa que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir, únicamente, del movimiento en superficie. De tal manera, el movimiento vertical en la superficie retiene las características del movimiento horizontal en el substrato, sustituyendo el último; pero R_s se vuelve cercano a uno en el rango de las frecuencias donde la onda Rayleigh prevalece, y esto no es notario en la función de transferencia estimada. Hasta este punto se asume que R_s incluye dicho efecto con lo cual se elimina el efecto de la onda Rayleigh.



V.2 Identificación dinámica del inmueble

Las pruebas de vibración ambiental de la iglesia de San Mateo Ahuirán, se realizaron el día 12 de Septiembre de 2008, con el fin de investigar las características dinámicas de la estructura. El estudio contempla la medición de los muros laterales (norte y sur), muro de fachada y la torre (campanario).

V.2.1 Equipo utilizado

Las mediciones se realizaron utilizando un acelerómetro K2 de Kinometrics de 12 canales. Se utilizaron nueve sensores de balance uniaxial colocados en el cuerpo de la estructura y un sensor triaxial colocado en campo libre, todos los sensores se montaron en una placa de aluminio de 2.54 x 35 x 35 cm. En la *figura 5.2* se muestra el equipo de medición y los sensores montados sobre la placa de aluminio conectados a la consola mediante cables blindados especiales para las pruebas de vibración.



Figura 5.2. Equipo de medición empleado durante la prueba de vibración.



V.3 Mediciones de vibración ambiental

El sensor triaxial se colocó en campo libre en el lado Este de la Iglesia, el resto de los sensores se colocaron en cuatro arreglos: en el primer arreglo se colocaron los sensores en la dirección longitudinal del muro Norte (E-W), canales 4 a 6 extremo Este, canales 7 a 9 en el centro y los canales 10 a 12 en el extremo Oeste (ver figura 5.3).

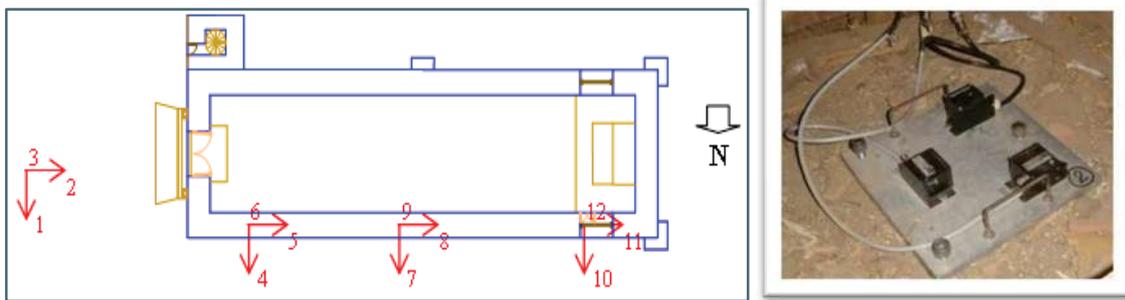


Figura 5.3 Ubicación de los sensores en el muro Norte.

En el segundo arreglo se colocaron los sensores en la dirección longitudinal del muro Sur, canales 4 a 6 en el extremo Este, canales 7 a 9 en el centro y los canales 10 a 12 en el extremo Oeste del muro Sur (ver figura 5.4), en las mismas figuras las flechas indican la dirección en la que se colocaron los sensores.

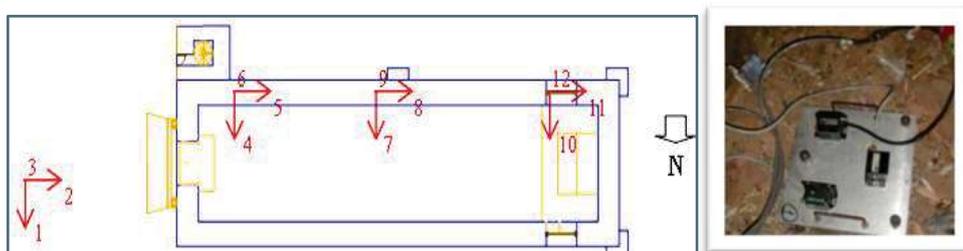


Figura 5.4 Ubicación de los sensores en el muro Sur.



En lo que respecta al tercer y cuarto arreglos, sólo se colocaron los sensores correspondientes a campo libre y tres sensores de los canales 4 a 6 en el muro de fachada y en el campanario, respectivamente (ver figuras 5.5 y 5.6).

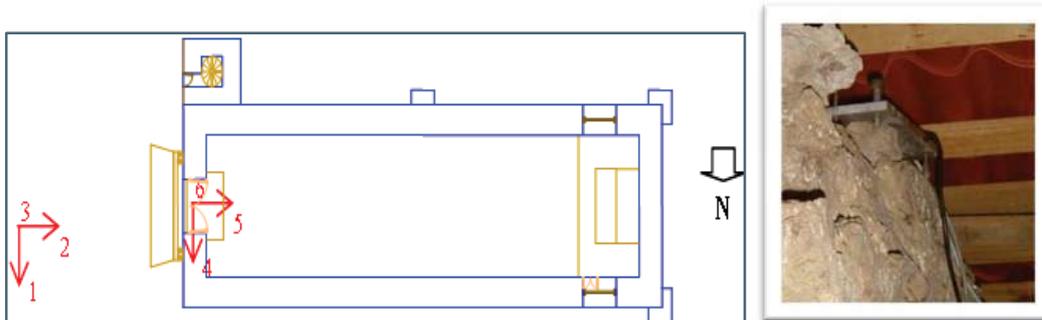


Figura 5.5 Ubicación de los sensores en el muro de fachada.

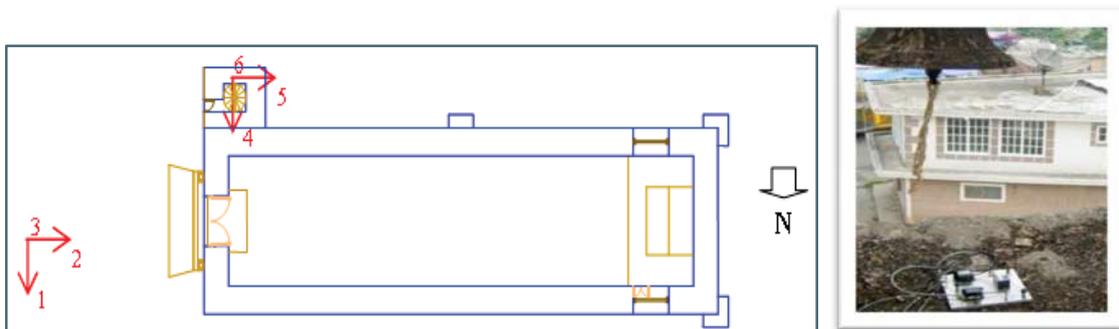


Figura 5.6 Ubicación de los sensores en la torre del campanario.

Se hace notar que los canales 1, 4, 7 y 10 corresponden a la dirección transversal de la Iglesia, dirección N-S; los canales 2, 5, 8 y 11 a la dirección longitudinal de la Iglesia, dirección E-W y los canales 3, 6, 9 y 12 a la dirección vertical.

En las figuras (5.7 a 5.9) se muestra una parte de los registros obtenidos mediante vibración ambiental en el muro norte, muro sur, cumbre y torre de campanario, respectivamente. En el eje horizontal se grafica el tiempo en segundos y en el eje vertical la aceleración en gal.



En la siguiente grafica (*figura 5.7*) se muestra el registro del muro norte, segunda medición, séptima aceleración.

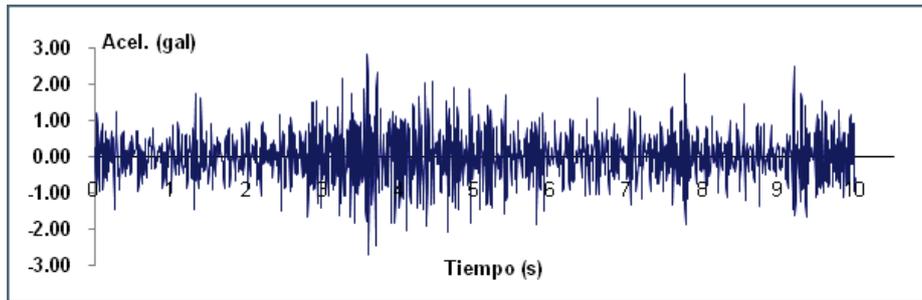


Figura 5.7 Registro obtenido en el muro norte.

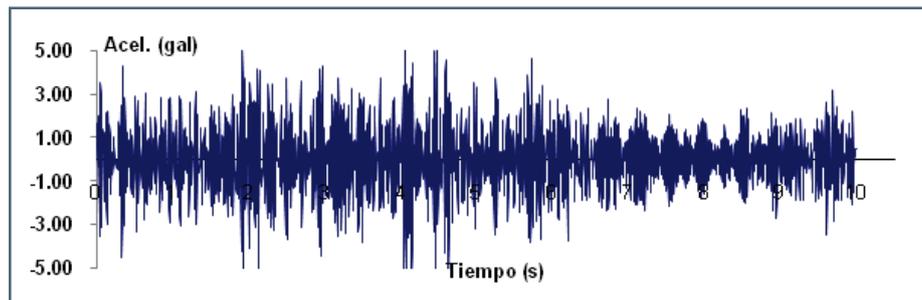


Figura 5.8 Registro obtenido en el muro sur.

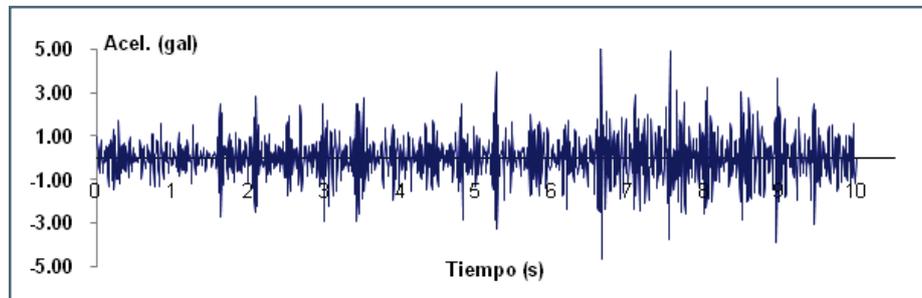


Figura 5.9 Registro obtenido en la torre de campanario.



Capítulo VI

Las señales registradas se procesaron para determinar desplazamientos, velocidades, aceleraciones, espectros de amplitudes de Fourier y funciones de transferencia a partir de las cuales se determinan las frecuencias naturales de vibración (Venda, 1993).

Procesamiento y análisis de resultado

Para el análisis de microtremores existen una gran variedad de métodos y sus diferencias están referidas principalmente al número de instrumentos requeridos, al uso de una u otra componente de registro que se usa en el análisis, al tipo de onda registrada y al tipo de resultado que se obtiene con cada metodología. En este trabajo se empleará el método propuesto por Nakamura (1989), ya que permite conocer la frecuencia fundamental de la estructura. Este método se basa, como se comentó anteriormente, en relacionar los espectros de amplitudes de Fourier de las componentes horizontales y verticales de los registros obtenidos en la estructura y los registros obtenidos en campo libre. Este es uno de los métodos mas utilizado en el análisis de microtremores, debido a su bajo costo y simplicidad en la toma de datos con un sensor de tres componentes.



VI.1 Procesamiento de señales y análisis de resultados

Se realizaron doce mediciones con duración aproximada de 5 minutos cada una con un intervalo de tiempo de 0.005 s, tres mediciones para cada uno de los arreglos mostrados en las *figuras 5.3 a 5.6*, del capítulo V. Las señales registradas se procesaron para determinar desplazamientos, velocidades, aceleraciones, espectros de amplitudes de Fourier y funciones de transferencia a partir de las cuales se determinan las frecuencias naturales de vibración (Venda, 1993).

En las (*figuras 6.4 a 6.7*) se presentan las funciones de transferencia promedio para las direcciones horizontales, estas funciones se obtuvieron con base en las señales registradas como el cociente de los espectros de amplitudes de los sensores en el sistema estructural entre los espectros de amplitudes de los sensores en campo libre. En el eje de las abscisas se grafica la frecuencia en radianes/segundo y en el eje de las ordenadas la amplitud. Asimismo, en la *figura 6.8*, se presentan los espectros de amplitudes obtenidas con base en las señales registradas en la torre del campanario, en el eje horizontal se grafica la frecuencia en rad/s y en el eje vertical la amplitud.

En la *figura 6.4*, se muestran las funciones de transferencia obtenidas a partir de los registros de los sensores 1-4,1-7,1-10, dirección N-S para el arreglo 1, correspondiente al muro Norte. Las gráficas muestran una concentración energética importante alrededor de la frecuencia de 25 rad/s que corresponde a un periodo $T=0.251$ s, el cual se asocia a la primera forma modal y corresponde al muro Norte, el cual se desplaza en dirección N-S. Los periodos obtenidos analíticamente y mediante vibración son prácticamente iguales.

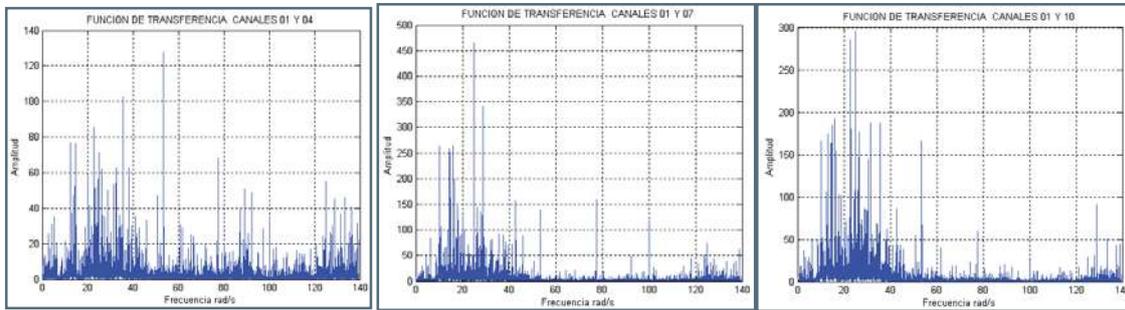


Figura 6.4. Función de transferencia canales 1-4, 1-7 y 1-10. Medición muro Norte.

De la misma manera, en la figura 6.5, se muestran las funciones de transferencia obtenidas a partir de los registros de los sensores 1-4, 1-7, 1-10 dirección N-S para el arreglo 2 correspondiente al muro Sur. Las gráficas muestran una concentración energética importante alrededor de la frecuencia de 30.8 rad/s que corresponde a un periodo $T=0.204$ s, el cual se asocia a la tercera forma modal y corresponde a un modo en flexión doble en el sentido transversal de la Iglesia (dirección N-S). Nuevamente el periodo obtenido analíticamente y mediante vibración son prácticamente iguales.

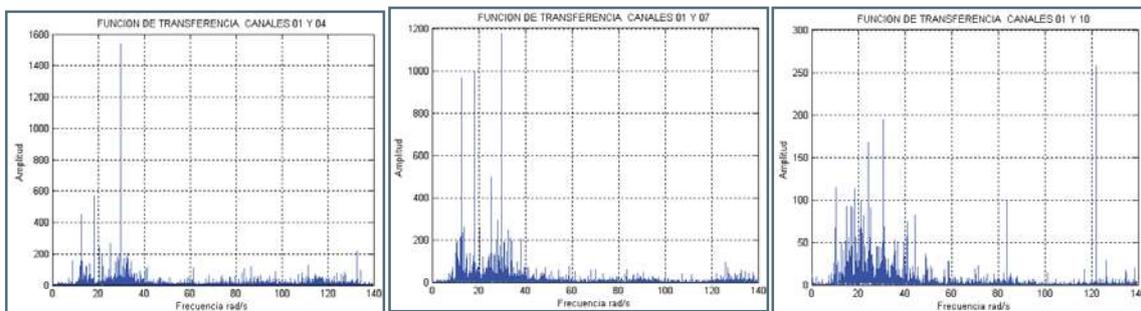


Figura 6.5 Función de transferencia canales 1-4, 1-7 y 1-10. Medición muro Sur.

En la figura 6.6, se muestran las funciones de transferencia obtenidas a partir de los registros de los sensores 1-4, 2-5 y 3-6 para el arreglo 3 correspondiente al muro de fachada. Las gráficas muestran una concentración energética importante alrededor de la frecuencia de 34.08 rad/s que corresponde a un periodo $T=0.184$ s, el cual se asocia al sexto forma modal correspondiente a la traslación en la dirección E-W del muro de fachada. El periodo obtenido analíticamente es un 2.7% menor que el obtenido mediante vibración.

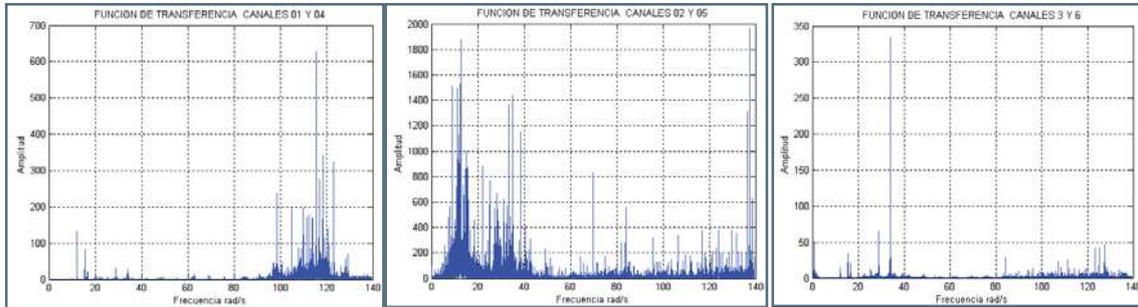


Figura 6.6. Función de transferencia canales 1-4, 2-5 y 3-6. Medición muro de fachada.

Finalmente, la figura 6.7, se muestra las funciones de transferencia obtenidas a partir de los registros de los sensores 1-4, 2-5 y 3-6 para el arreglo 4 correspondiente a la torre del campanario. Las gráficas muestran concentraciones energéticas importantes alrededor de las frecuencias 12, 15 y 24 rad/s, las cuales corresponden a periodos $T=0.26$ s, $T=0.41$ s y $T=0.55$ s, respectivamente. Estos periodos no corresponden a las formas modales del campanario. Sin embargo, en las mismas figuras se observan concentraciones energéticas con amplitudes menores que las anteriores alrededor de 32 rad/s como se puede observar en los espectros de amplitudes (ver figura 6.8), esta frecuencia corresponde a un periodo $T=0.196$ s, el cual se puede asociar a la quinta forma modal.

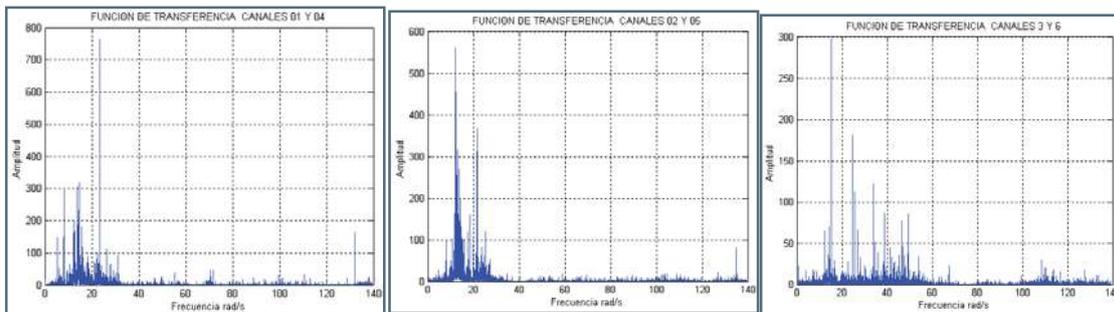


Figura 6.7 Función de transferencia canales 1-4, 2-5 y 3-6. Medición torre del campanario.

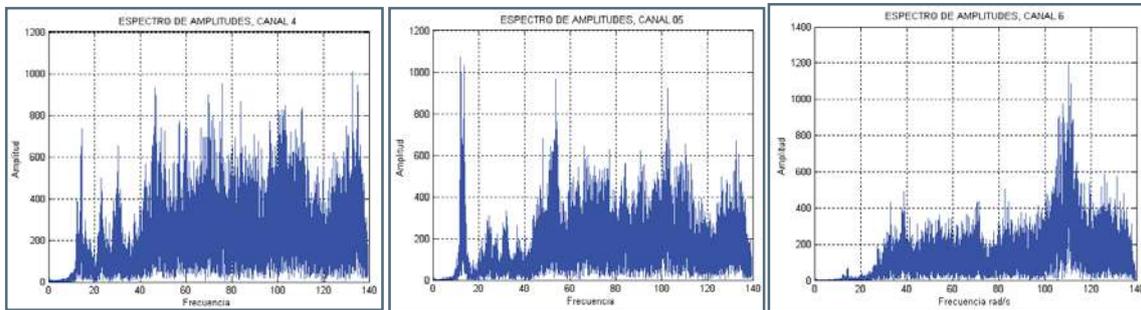


Figura 6.8 Espectros de amplitudes canales 4, 5 y 6. Medición torre del campanario.

Cabe mencionar que en las gráficas anteriores también se observa concentraciones importantes de energía para frecuencias inferiores a 20 rad/s, estas frecuencias probablemente corresponden a los elementos de la cubierta.

Los resultados analíticos y de vibración ambiental muestran las frecuencias y formas modales de la estructura.

VI.2 Comentarios finales

La medición de vibración ambiental es una herramienta muy útil para determinar las propiedades dinámicas de una estructura, con base en la obtención de los espectros de amplitudes de Fourier y las funciones de transferencia.

Los resultados experimentales permitieron calibrar adecuadamente el modelo numérico de la iglesia de San Mateo Ahuirán. Lo cual permitió contar con un modelo confiable, logrando así determinar las formas modales de la estructura, la primera, segunda, tercera y quinta así como sus respectivos periodos obtenidos.



El modelo numérico permitirá identificar en lo posible los elementos estructurales susceptibles de sufrir ante la presencia de acciones externas, tales como sismos y así tomar las medidas necesarias para evitar en lo posible el deterioro de la estructura.

Consideramos que la iglesia de San Mateo Ahuirán es importante, principalmente por su valor histórico, arquitectónico y cultural caracterizada en la región P'urhépecha.

Por último consideramos pertinente mencionar algunos otros estudios de microzonificación sísmica en la región (Meseta P'urhépecha).

En Uruapan, se realizaron mediciones de microtemores usando sensores Guralp de banda ancha. De acuerdo a las dimensiones de la ciudad se propusieron 18 arreglos en forma de triángulos equiláteros, procurando cubrir toda la ciudad, y al mismo tiempo tener el mayor número de registros posible. Se instalaron también dos acelerómetros K2 que se ubicaron: en dos tipos de suelo, uno en roca y otro en suelo blando. Estos acelerómetros se quedaron instalados durante un mes, dentro del cual se logró registrar un evento sísmico que fue de gran apoyo para este trabajo de investigación. Con estos registros se calcularon los cocientes espectrales (H/V) y funciones de transferencia entre la estación en suelo blando y la estación en roca. Una vez procesados los resultados de los cocientes espectrales de microtemores y los cocientes espectrales del evento, junto con la función de transferencia de Fourier de dicho evento, se pudieron observar las frecuencia pico en los cocientes espectrales de microtemores alrededor de $f = 4.8$ Hz., y periodos máximos de alrededor de $T = 0.6$ seg. y un mínimo de $T = 0.10$ seg.

Con estos valores de frecuencias y de periodos se elaboro la propuesta de Microzonificación sísmica de la ciudad de Uruapan Michoacán con el fin de que este mapa pueda servir de base para estudios de riesgo sísmico así como apoyo para la elaboración o actualización del reglamento de construcción.



En Zamora se empleó registros de microtemores en 30 sitios de la ciudad de Zamora se construyó el mapa de isoperiodos. Los valores obtenidos de los periodos fundamentales oscilan entre $T = 0.5 \text{ seg.}$ y $T = 3 \text{ seg.}$ Cabe mencionar que para tener una mejor robustez en los resultados es necesario compararlos con datos de aceleración de un evento sísmico. Ya que en este trabajo no se logró registrar un evento sísmico en la estación fija instalada en roca durante un mes.



Bibliografía citada

Architectural Institute of Japan, (1993), Earthquake Motion and Ground conditions in commemoration of the 20 th anniversary of the Rodcarch subcommittee on Maruzan Press Tokio, Japon.

Bard P.Y. (1999), local effects on etrory Ground Motion Basic Physical Phenomeno and Estimation Methods for Microzonny studes. Procedigns of the advanced study course on sismic Rick "SERINA-seismic Risc: An integrated seismonical, geotechnical and structural Approach". Thessaloniki, Grecia.

Bérchez, J. (1992), "Arquirectura Mexicana de los siglos XVII y XVIII", Arte Novohispano, pp. 17,43, 44, 88, impreso en Italia.

D'Ayala D.F. (2000) Establishing correlation between vulnerability and damage survey for churches. 12th World Conference on Earthquake Engineering, paper no. 2237. Nueva Zelanda.

Doglioni F., Moretti A. and Petrini V. (1994). Churches and earthquakes. LINT. Trieste (en italiano).

Garduño Monroy, V.H. (1998), la falla de Tamazula (limite de suroriental del bloque Jalisco y sus relaciones con el complejo volcánico de Colima, México.

Kanai K. Tanaka T. (1961), on microtremors VIII, bulletin of the Eathquake Research Institute vol. 39, pp. 97-114.

Kubber, G. (1992) "Arquitectura Mexicana del siglo XVI", Fondo de la Cultura Económica, pp. 241, 242, 254-256, México.

Lermo J., Chávez-García, F. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?. Bulletin of Seismological Soc. Of Am., Vol. 84, No. 5, pp. 1350-1364.

Nakamura Y. A. (1989). Method for Dynamic Characteristic Estimation of SubSurfaceusing Microtremor on the Ground Surface. Q Rep Railway Tech Res Inst;30(1):25-33.



Nishenko S.P. y Singh S.K. (1987), "Conditional probabilities for the recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone", Bulletin of the Seismological Society of America, 77, pp 2095-2114.

Sánchez Garcilazo V., Tesis, Estudio de la Macrosismicidad del Edo. De Michoacán", Capítulo VI, Página (96-99)

Seo K., (1997), Comparison of measured Microtremors with damage distribution; Japan international cooperation agency (JICA), Japan.

Seth M.I. y Wohlwnberg J., (1999), "Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bulletin of the seismological society of America, vol. 89, no pp. 250-259.

Slatan J.A. and Foissner P., (1995). Masoyn building dynamic characteristic evaluation by means of ambient vibration. Proceedings of 10 th European conference on Earthquake engineering Rotterdam.



Bibliografía consultada

Arnold C., Reitherman R., Whitaker D., (1987), "Configuration y Dissent seismic de Edifices", San Mateo Redwood City, California E.U. September de 1982.

Arroyo, Fray Esteban, (1955), "Arquitectura y Arquitectos Coloniales en Oaxaca: La Catedral", en Archivo Español de Arte, Instituto Diego Velázquez, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, No. 207, Madrid, 1979.

A. Peterson F., (1966.), "México antiguo", México: Ed. Herrero, S. A. 426 p.

Comisión Federal de Electricidad (CFE), Manual de Obras Civiles, Ed 1993

Cuadra Monreal P. (2007), "Aplicación de Técnicas de Vibraciones Ambientales: análisis de microtemores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio", Proyecto de grado, como requisito parcial para optar al Título de ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar.

Bonet Correa A., "Urbanismo e historia urbana en el mundo hispano", Segundo

Bravo Ugarte J., "Historia Sucinta de Michoacán"; página. (250-255).

Burgoa Fray Francisco de Palestra, (1989), "Historial de Virtudes y Ejemplares Apostólicos Fundada del Celo de Insignes Héroe de la Sagrada Orden de Predicadores en este Nuevo Mundo de la América en las Indias Occidentales", México D.F., Editorial Porrúa, 3a. Edición,

Cárdenas Argudon LM., (1978), "Estudio histórico-artístico de los edificios del siglo XVI en el conjunto de la catedral de Cuernavaca". (Tesis de maestría), México, Universidad Iberoamericana.

Díaz del Castillo B., (1984), "Historia verdadera de la conquista de la Nueva España", Madrid: Historia 16. 558 p.

El Sismo de Tecomán, México del 21 de enero de 2003, Informe de la SMIS y el EERI dentro de la serie "Aprendiendo de los Sismos"., pág. 10.

Figueroa Esquinca C., (2009), "Vulnerabilidad Sísmica en Iglesias Mexicanas, caso de estudio: Templo de Santa Lucia, SCLC, Chiapas", Tesis para obtener el Grado de Maestro, FIC. UMSNH, Morelia, México.



Florescano Enrique (Compilador), (1993), El patrimonio cultural de México. México: F. C. E. 424 p.

Florescano Enrique., Historia General de Michoacán Volumen II; Pág. (105-122).

Flores Macías Ó., Lozano Mercado J., y Ramírez de Alba H., XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León Guanajuato, "Artículo XIV-10 "Refuerzo del Templo de Nuestra Señora del Refugio".

Gutman Margarit, Hadoy Jorge Enrique, (1992), "Impacto de la urbanización en los centros históricos de Iberoamérica", Madrid: Mapfre. 460 p.

Kotetze Richard, (1966), "América Latina, II. La época colonial", México: Herrero, S. A. 426 p.

Kubler, George, (1982), Arquitectura mexicana del siglo XVI, México, FCE.

Martínez, R, G; Tesis doctoral "Vulnerabilidad sísmica para edificios históricos de obra de fabrica de mediana y gran luz"; pág. 10, 11,12

Meli, R. (1998), "Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos". Fundación ICA, México.

México Desconocido. Ciudades coloniales (1994), Edición Especial No. 5. México, D. F. 96 p.

Ramos Rodríguez M. (2008), "Breve historia de Ahuirán". Pasante de la carrera de Letras UMSNH.

Rivera Camba M. (1972), "México pintoresco, artístico y monumental", 3 T. México, Editorial del Valle de México,

Sánchez Garcilazo V., Tesis, Estudio de la Macrosismicidad del Edo. De Michoacán", Capitulo VI, Página (96-99)

Simposio, 1982. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. 1985. 680 p.

Sistema digital de daños (SDD), Sismo de Tehuacán, Puebla del 15 de junio de 1999, Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla, A.C., México,

Vázquez Ricardo R., Tesis, Propuesta de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Uruapán, Michoacán. Capitulo V, Pág (15-25)

Paginas web consultada

<http://cicp.tripod.com/sdd/sdd.html>



Entrevistas

Asamblea comunal, enero 2008, información recabada de los acuerdos tomados.

Campos Silva R, Marzo 2007, Jefe de tenencia de 2007-2008, información recabada.

Pascual Martínez A, Mayo 2009, comunicación personal, encargado de la reconstrucción de la techumbre.

Ramos Estrada F, Marzo 2008, comunicación personal, carpintero encargado de restaurar la techumbre 2008. Comunicación personal carpintero encargado de restaurar la techumbre 2008.

Rodríguez Martínez T, Septiembre 2008, comunicación personal, carpintero encargado de restaurar la techumbre 2008. Comunicación personal carpintero encargado de restaurar la techumbre 2008.

Silva Rodríguez M, enero 2008, comunicación personal, cabildo de la iglesia de San Mateo.



GLOSARIO

Ábside

Prolongación semicircular o poligonal del recinto, en la arquitectura religiosa (generalmente terminación del coro por Este).

Acelerómetro

Instrumento para medir aceleraciones del terreno en función del tiempo.

Amplitud (de una onda)

Altura máxima de la cresta o del valle de una onda con respecto a la línea base.

Bóveda

Cierre superior curvado de un recinto

Bóvedas de aristas

Las superficies abovedadas de esta forma de bóveda se entrecruzan en forma de cortes.

Capilla

Recinto sagrado pequeño; puede estar aislada o forma parte de una iglesia.

Columna

Soporte de corte circular, consta de basa, fuste con énfasis (abultamiento) y capitel.

Cordillera (centrooceánica)

Alineación de tierra elevada del fondo del océano, que se extiende por cientos de kilómetros.

Corteza (de la Tierra)

La parte rocosa más externa de la Tierra.

Crucero

En las iglesias punto de intersección de la nave mayor y de la nave transversal; suele realizarse arquitectónicamente

Cruz griega

Cruz con los brazos longitudinal y transversal de la misma longitud.

Cruz latina

Cruz con los brazos longitudinal y transversal de distinta longitud

Cúpula

Forma abovedada que recubre espacios circulares, cuadrangulares o poligonales.



Densidad

Masa por unidad de volumen de una sustancia, normalmente expresada en gramos por centímetro cúbico.

Desplazamiento (de falla)

Movimiento relativo de una cota de la falla con respecto a la otra.

Discontinuidad de Mohorovicic

Frontera entre la corteza y el manto, marcada por un crecimiento rápido de la velocidad de la onda sísmica a más de 8 kilómetros por segundo. Profundidad: de 5 kilómetros (bajo los océanos) a 45 kilómetros (bajo las montañas).

Discontinuidad sísmica

Superficie o capa delgada de la Tierra a través de la cual la velocidad de las ondas P o S cambia rápidamente.

Dispersión (de ondas)

La expansión de un tren de ondas debido a que cada longitud de onda viaja con su propia velocidad.

Duración (del temblor fuerte)

La duración (limitada) es el intervalo de tiempo entre el primer pico y el último de los picos del movimiento del suelo por encima de una amplitud específica.

Epicentro

El punto de la superficie de la Tierra directamente encima del foco (o hipocentro) de un terremoto.

Esfuerzo (elástico)

Medida de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en unidades de fuerza por unidad de área.

Fachada

Paramento exterior de un edificio

Falla

Una fractura o zona de fractura en rocas a lo largo de la cual los dos lados se han desplazado, el uno con relación al otro, paralelamente a la fractura. El desplazamiento total puede variar desde centímetros a kilómetros.

Falla activa

Falla a lo largo de la cual ha habido desplazamientos en tiempos históricos (Holoceno) o donde se han localizado focos de terremotos.

Falla de rumbo

Falla en la que el desplazamiento relativo es puramente horizontal. Por ejemplo el de la Falla de San Andrés.

**Falla normal**

Falla vertical en la que las rocas por encima del plano de falla se han movido hacia abajo en relación al bloque que estaba por debajo.

Falla oblicua

Falla que combina movimientos de desgarradura y vertical.

Falla vertical

Falla en la que el desplazamiento relativo es a lo largo de la dirección del buzamiento de la falla. El desplazamiento es normal o invertido.

Foco (hipocentro)

Lugar donde empieza la ruptura y liberación de la energía sísmica.

Frontón

Cierre anterior, generalmente representativo, de un hecho de dos vertientes, de una ventana o de un edículo, su forma puede ser triangular, escalonado o arqueado. El tímpano presenta con frecuencia ornato escultural.

Hertz

Unidad de frecuencia equivalente a un ciclo por segundo o $2 \times \pi \times$ radianes por segundo.

Hundimiento (de falla)

Una depresión estrecha geológica que se encuentra en zonas de fallas de desgarradura. Las que contienen agua se llaman lagunas de hundimiento.

Intensidad (sísmica)

Una medida del efecto del temblor obtenida del daño causado a estructuras edificadas por el hombre, cambios en la superficie de la Tierra y la percepción humana del movimiento. En muchos países, entre ellos México, se emplea la escala de Mercalli para asignar grados de intensidad a los diferentes sitios afectados por un sismo.

Lava

Magma o roca fundida que ha alcanzado la superficie.

Licuación (del suelo)

Proceso en el que la tierra y la arena se comportan como un fluido denso más que como un sólido húmedo durante un terremoto.

Linterna

Remate de una cúpula para dejar pasar luz

Litósfera

La parte externa, rígida, de la Tierra por encima de la astenósfera. Constituida por la corteza y la parte superior del manto. Las placas tectónicas son porciones de litósfera.



Longitud de onda

Distancia entre dos crestas o dos valles de onda sucesivos.

Magma

Material de roca fundido mezclado con gases, en mayor o menor proporción, que forma las rocas ígneas cuando se solidifica.

Magnitud (de sismos)

Medida del tamaño de un terremoto, determinado tomando el logaritmo (en base 10) del mayor movimiento del suelo registrado en un sismograma durante la llegada de un tipo de onda sísmica y aplicando la corrección estándar por la distancia al epicentro. En términos de energía, un grado de magnitud implica una diferencia de aproximadamente 32 veces. De ese modo, un sismo de magnitud 7 es 32 veces más energético que uno de 6 y queda claro que un sismo de magnitud 4 no es la mitad de uno de 8.

Manto (de la Tierra)

La parte más voluminosa de la Tierra entre la corteza y el núcleo, variando desde profundidades de unos 40 kilómetros a 2,900 kilómetros. Está compuesto de rocas silicatadas densas y dividido en varias capas concéntricas.

Momento sísmico

Rigidez de la roca multiplicada por el área de la falla y por la cantidad de deslizamiento. Es una medida del tamaño de un terremoto.

Nave

Espacio interior longitudinal o transversal de la iglesia, teniendo en cuenta los soportes, se distinguen la nave central y las naves laterales.

Núcleo (de la Tierra)

Parte central de la Tierra a una profundidad superior a los 2,900 kilómetros. Se cree que está compuesto de hierro y silicatos y que está fundido por su parte externa y sólido en la parte central.

Ondas Love

Ondas sísmicas superficiales con movimiento sólo horizontal de cizalla normal a la dirección de propagación.

Ondas P

La primera onda, o la más rápida, viajando desde el lugar del evento sísmico a través de las rocas y que consiste en un tren de compresiones y dilataciones del material.

Ondas Rayleigh

Ondas sísmicas superficiales con movimiento del suelo sólo en el plano vertical conteniendo la dirección de propagación de la onda.



Ondas S

Ondas sísmicas secundarias, viajando más lentamente que las ondas P y que consisten en vibraciones elásticas transversales a la dirección de recorrido. No pueden propagarse en líquidos.

Onda sísmica

Onda elástica en la Tierra, normalmente generada por un terremoto o una explosión.

Ondas superficiales (de terremotos)

Ondas sísmicas que sólo siguen la superficie de la Tierra, con una velocidad menor que la de las ondas S. Hay dos tipos de ondas superficiales, ondas Rayleigh y ondas Love.

Periodo (de una onda)

Intervalo de tiempo entre dos crestas sucesivas en un tren de ondas sinusoidales. El período es el inverso de la frecuencia en un evento cíclico.

Placa (tectónica)

Parte de la litosfera de la Tierra, grande y relativamente rígida, que se mueve en relación con otras partes de la litosfera sobre zonas más profundas del interior de la Tierra. Las placas chocan en zonas de convergencia y se separan en zonas de divergencia.

Plano de falla

Plano de contacto entre dos bloques con movimiento relativo entre sí.

Pórtico

Atrio con columnas

Predicción (de terremotos)

Determinación del lugar, fecha y magnitud de un terremoto.

Profundidad focal (de un terremoto)

Profundidad del foco por debajo de la superficie de la Tierra.

Región asísmica

Aquella en que prácticamente no ocurren terremotos.

Réplicas

Terremotos menores que siguen a uno mayor, concentrados en un volumen restringido de la corteza.

Desplazamiento asísmico

Desplazamiento lento a lo largo de una falla, sin que se produzcan terremotos.

Rigidez

Relación entre el esfuerzo de cizalla y la cantidad de rotación angular que produce en una roca.

Sismicidad

La ocurrencia de terremotos en el espacio y en el tiempo



Sismógrafo

Instrumento para registrar los movimientos de la superficie de la Tierra, en función del tiempo, que son causados por ondas sísmicas

Sismología

El estudio de terremotos, fuentes sísmicas y propagación de ondas a través de la Tierra.

Sismómetro

Parte sensora de un sismógrafo, normalmente un péndulo suspendido.

Sismoscopio

Sismógrafo elemental que registra en una placa sin señales de tiempo.

Tambor

Parte baja de la cúpula, puede ser cilíndrica o poligonal.

Techo

Formas habituales en el barroco: de mansarda, en atril, de faldón, de dos vertientes, de pabellón.

Tectónica

Gran deformación de la parte más extensa de la Tierra resultante de fuerzas de la misma.

Tectónica de placas

Teoría del movimiento e interacción de placas. Un intento de explicar terremotos, volcanes y formación de montañas como consecuencias de grandes movimientos superficiales horizontales.

Templo

Lugar de culto no cristiano, sobre todo en la antigüedad. El frente del templo clásico tuvo gran importancia de la configuración de la fachada barroca.

Terremoto

Vibraciones de la Tierra causadas por el paso de ondas sísmicas irradiadas desde una fuente de energía elástica. También llamado sismo o temblor.

Terremotos tectónicos

Terremotos que son el resultado de la liberación súbita de energía acumulada por deformación de la Tierra.

Terremotos volcánicos

Terremotos asociados con la actividad volcánica.

Volcán

Apertura en la superficie de la corteza que permite la salida del magma.



Zona de subducción

Región de contacto entre dos placas tectónicas, donde una de ellas desciende por debajo de la otra hacia el interior de la Tierra, alejándose de la fosa oceánica. Normalmente es el lugar de ocurrencia de terremotos someros, intermedios y profundos que definen la zona de Benioff.