



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA  
LA CONSERVACIÓN DE BÓVEDAS Y  
CÚPULAS ANTE SISMS**

**CASO DE ESTUDIO: EL TEMPLO DE SANTIAGO  
APÓSTOL, JIUTEPEC, MORELOS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN ARQUITECTURA EN EL CAMPO  
DE CONOCIMIENTO DE RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

PRESENTA:

ARQ. FABIÁN BERNAL OROZCO BARRERA

TUTOR

DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ  
Facultad de Arquitectura UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DR. SANTIAGO HUERTA FERNÁNDEZ  
Universidad Politécnica de Madrid

DR. XAVIER CORTÉS ROCHA  
Facultad de Arquitectura UNAM



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



## Agradecimientos

A la UNAM por sus amplias posibilidades y recursos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyar económicamente mis estudios.

Al Dr. Agustín Hernández por brindarme siempre apoyo y libertad en mi investigación.

Al Dr. Santiago Huerta por recibirme en la Universidad Politécnica de Madrid y compartir sus conocimientos.

Al Dr. Xavier Cortés, así como a mis sinodales, la Dra. Diana Ramiro y al Dr. Tarsicio Pastrana, por acompañar mis estudios.

Un agradecimiento al profesor Maurizio Angelillo por darme claridad en el tema de sismo.

Al Arq. Antonio Guerrero por permitirme acceder al templo y exconvento de Santiago Apóstol.

A mis amigos del Laboratorio de Estructuras del CIAUP, por su ayuda en los levantamientos y registros fotográficos.

# Índice

<b>Presentación del tema.</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Abstract</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>Capítulo 1. La Arquitectura conventual SXVI presente en el conjunto conventual de Santiago Apóstol.</b> . . . . .	<b>8</b>
1.1. El origen del conjunto conventual. . . . .	10
1.2 Partido Arquitectónico, elementos constitutivos.. . . .	14
<b>Capítulo 2 Trazo, y construcción de las bóvedas y cúpula octagonal del templo de Santiago Apóstol.</b> . . . . .	<b>.21</b>
2.1 Historia constructiva del conjunto de Santiago Apóstol . . . . .	23
2.2 Secuencia constructiva de las cubiertas del templo de Santiago Apóstol. . . . .	25
2.3 Reglas estructurales históricas, tratadística. . . . .	28
2.4 Construcción de las bóvedas de lunetos del templo de Santiago Apóstol. . . . .	32
2.5 Trazo y construcción de la cúpula octagonal de Santiago Apóstol . . . . .	38
2.6 Características de la mampostería en la región. . . . .	46
<b>Capítulo 3 Análisis límite de las estructuras de mampostería.</b> . . . . .	<b>.50</b>
3.1 Teoría del análisis límite y su implementación mediante la estática gráfica. . . . .	51
3.2 Bóveda de lunetos, Templo de Santiago Apóstol. . . . .	56
3.3 Cúpula octogonal y semicúpula de Santiago Apóstol. . . . .	64
3.4 Seguridad de los muros y contrafuertes . . . . .	70
<b>Capítulo 4 La sismicidad regional y el comportamiento sísmico de bóvedas de mampostería</b> . . . . .	<b>.71</b>
4.1 El fenómeno sísmico generalidades. . . . .	72
4.2 Registro histórico de sismicidad y riesgo sísmico en la región . . . . .	78
4.3 El comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería. . . . .	84
4.4 Modelos de análisis y experimentación física. . . . .	90
<b>Capítulo 5. Relevancia de la metodología de análisis límite para la Restauración y conservación</b> . . . . .	<b>.99</b>
5.1 Criterios errados utilizados en refuerzos de bóvedas y cúpulas. . . . .	100
5.2 Trabajos propuestos para la conservación de las bóvedas y cúpulas de Santiago Apóstol. . . . .	103
5.3. Evaluación de criterios en la intervención realizada para bóvedas y cúpulas del templo. . . . .	106
5.4. Proceso metodológico. . . . .	109
<b>Conclusiones.</b> . . . . .	<b>115</b>
<b>Anexos</b> . . . . .	<b>116</b>
<b>Bibliografía</b> . . . . .	<b>120</b>

## Presentación del tema

La arquitectura conventual del siglo XVI ha despertado gran interés entre los investigadores, y ha sido de los temas más estudiados en México. Sin embargo, son muy escasos los estudios técnicos que puedan ser de ayuda en situaciones posteriores a sismos como el ocurrido el 19 de septiembre de 2017. Debido a su magnitud, generó un movimiento muy intenso del suelo que provocó daños importantes en las construcciones cercanas al epicentro. De forma masiva fueron dañados cientos de inmuebles, entre ellos los templos, sus bóvedas y cúpulas de mampostería. Su estudio minucioso y conservación son una necesidad prioritaria, no solo por su declaratoria como patrimonio cultural de la humanidad, sino por la función que aun desempeñan, y cuya pérdida es irreparable. Uno de estos conjuntos conventuales es el de Santiago Apóstol en Jiutepec.

Para la restauración es un gran reto buscar la seguridad estructural de un inmueble que fue realizado con materiales poco comprendidos en nuestro tiempo. Intervenirlo sin alterar su fisonomía o sin dejar evidentes refuerzos estructurales de materiales nuevos es uno de los mayores desafíos. Aunque cada inmueble tiene sus particularidades y problemáticas, existen constantes como la falta de mantenimiento, la adición de sistemas constructivos nuevos, que carecen de criterios técnicos para una adecuada combinación de materiales. Por falta de presupuesto, negligencia o ignorancia se ha permitido que los templos y conventos que conservan algunas de las primeras bóvedas y cúpulas continúen deteriorándose. Los daños ocasionados por los sismos parecen ser el último paso en la destrucción del patrimonio arquitectónico, en gran parte ya alterado y deteriorado.

El presente trabajo busca un método de análisis razonado que permita comprender su estabilidad y seguridad estructural para garantizar su conservación, lo cual solo puede ser posible investigando el origen y la historia constructiva de dichos inmuebles, comprendiendo los sistemas constructivos y su conceptualización en un tiempo y espacio determinados, así como las alteraciones y deformaciones intrínsecas que han sobrellevado a lo largo del tiempo.

El enfoque del equilibrio descrito por Jaques Heyman es la forma más clara para analizar los problemas que enfrenta las estructuras de mampostería, este enfoque permite emitir un juicio razonable basado en datos medibles y comprobables. Antonino Giuffré en Italia analizó el efecto de los sismos con un enfoque similar, y en México tenemos la experiencia de Fernando López Carmona que comprendió y aplicó el enfoque del equilibrio analizando la geometría como única forma de garantizar la estabilidad. A pesar de estas experiencias, el análisis

estructural que predomina actualmente en México y otros países carece de este enfoque, produciendo o justificando intervenciones de un costo muy elevado, a veces innecesarias y en algunos casos perjudiciales para las estructuras de mampostería.

Este trabajo es el resultado del estudio del templo de Santiago Apóstol, a partir de levantamientos geométricos, con énfasis en las bóvedas y las cúpulas. Se utilizan diversos procedimientos, desde la obtención de coordenadas y nivelaciones láser, obteniendo también las deformaciones, generando planos estructurales. También se caracterizaron los materiales que componen el sistema constructivo, identificando sus alteraciones y diferentes etapas.

En la actualidad, gran cantidad de intervenciones al patrimonio se han realizado y continúan llevándose a cabo con la llamada “reconstrucción”. En este universo de intervenciones surgen varias interrogantes, ¿qué tan seguras son las bóvedas y las cúpulas?, ¿qué tipo de intervención debe realizarse?, y ¿cómo podemos evaluar su pertinencia?. Este trabajo presenta una propuesta metodológica para analizar estas estructuras, que con sus diferencias puede ser aplicable a otras similares. Siempre con el enfoque de la conservación, buscando evitar el miedo y demoliciones innecesarias, con un respaldo técnico. Los beneficiados de esta metodología de análisis son los monumentos mismos y los encargados de los trabajos de restauración, ya que puede arrojar claridad en situaciones que pueden llegar a ser riesgosas y de gran incertidumbre.

En el primer capítulo se aborda el origen del conjunto conventual de Santiago Apóstol y sus partes. A partir del capítulo 2 se hace énfasis en el templo y en el capítulo 3, se aplica el análisis límite con el método de secciones. Finalmente en el 4 se evalúa la respuesta ante el sismo de las bóvedas del templo de Santiago Apóstol y la cúpula octagonal. En el capítulo 5 se propone la metodología correspondiente al proceso de análisis y sus elementos.

## Abstract

16th century convent architecture is cause of great interest for researchers; actually, it has been one of the most studied topics in México. Nevertheless, there is a lack of technical studies that could be of help in situations like the one that occurred after the September 19, 2017 Earthquake, where hundreds of buildings were damaged, like masonry vaults and temple cupolas. Their in-depth study and conservation are a priority, not only because they were declared a world-culture heritage site, but for the role that they still play. Their loss would entail irreversible damage. Jiutepec Santiago Apostol is one of these cases.

A mayor challenge in restoration is to look for structural security in a building without altering its appearance or without leaving evident structural reinforcements of new materials. The damage caused by earthquakes seems to be the last step in the destruction of the architectural heritage, already largely altered and deteriorated. The present work seeks a method of reasoned analysis that allows for the understanding of stability and structural safety to guarantee its conservation.

The equilibrium approach described by Jaques Heyman is the clearest way to analyze the problems masonry structures face, and it allows a reasonable judgment based on measurable and verifiable data. Antonino Giuffré in Italy has analyzed the effect of earthquakes with a similar approach, and in Mexico we have the experience of Fernando López Carmona who understood and applied geometry as the only way to guarantee stability. Despite these experiences, the structural analysis that currently prevails in Mexico and other countries lacks this approach, producing or justifying costly interventions that are sometimes unnecessary and, in some cases, harmful to the masonry structures.

At present, a large number of heritage interventions have been carried out and continue with the so-called “reconstruction”. In this universe of interventions, several questions arise: how safe are vaults and domes? What kind of intervention should be carried out? And how can we evaluate their pertinence? This work presents a methodological proposal to analyze these structures with a conservation approach, aiming to avoid fear, demolitions or unnecessary reinforcements, understood from a technical standpoint.

# Capítulo 1. La Arquitectura conventual SXVI presente en el conjunto conventual de Santiago Apóstol.

En este apartado se aborda el género de edificio relativo a los conventos del siglo XVI, de clero regular masculino, particularmente del franciscano. La siguiente interpretación está basada principalmente en autores como George Kubler, J. B. Artigas, y Carlos Chanfón entre otros.

El género de los conventos proviene de Europa. Durante la Edad Media fueron creados múltiples conventos para albergar monjes que vivirían según ciertas reglas según las cuales debían distribuir su tiempo entre la oración y el trabajo manual. El coro se ubicaba dentro del templo con presbiterio hacia el oriente, incluyendo al claustro y a las dependencias. El claustro era un lugar cerrado exclusivo para los monjes, con espacios como apéndices.

Una de las características principales de las órdenes mendicantes fue la promoción de una reforma en contra de la riqueza de los monasterios cistercienses en el siglo XII. Domingo de Guzmán de Burgos y Francisco de Asís fueron algunos de los promotores principales, que fundarían después sus propias órdenes. Francisco de Asís fundaría la orden de los hermanos Menores, dedicados a la caridad y con voto de pobreza. Esta fue la primera orden en llegar al nuevo mundo.

El caso de los conventos novohispanos mendicantes durante el siglo XVI es muy particular. Las diferencias entre los mendicantes y la vida monacal medieval radica en la necesidad de predicar y de participar en la educación de la sociedad en todos sus niveles. Los benedictinos no salían de sus monasterios; en cambio, los mendicantes eran itinerantes, viajando de un establecimiento a otro predicando, buscando cubrir un territorio y distribuirse para hacer más efectivo su trabajo. Los monasterios medievales podían llegar a saturarse. En cambio, los conventos del nuevo mundo se quedarían con el mínimo número posible de monjes para mantenerlo. Con esto también cambió la escala de los conventos, siendo en general más pequeños.

Durante el primer siglo posterior a la conquista, en el Virreinato de la Nueva España se lograrían construir más de 300 conventos en poco más de medio siglo. Esta campaña constructiva fue gigantesca y no tuvo precedentes. Los conventos se extienden por toda Mesoamérica como testigos de los procesos de congregación y ocupación del territorio, así los frailes se convirtieron en agentes fundamentales para la reorganización territorial.

Las condiciones climáticas y disponibilidad de materiales con las que contaba cada región nos permiten contextualizar estas construcciones, y entender por qué se realizaron y por qué aún existen pese a las grandes transformaciones que han sufrido. Estos conjuntos conventuales comparten características similares, inclusive perteneciendo a órdenes religiosas distintas. Responden a un partido arquitectónico muy similar. Así, los principales elementos eran tres: el atrio, el convento y el templo de una sola nave adosado al convento. Estos elementos solo se pueden entender de forma integral formando una unidad, y están constituidos basados en una traza con pocas variaciones pese a tener ubicaciones separadas por cientos de kilómetros. Esto obedece a la forma en que fueron proyectadas y a las reglas utilizadas para su trazo. Es evidente que existieron limitaciones regionales tanto de materiales como de recursos. Los primeros dependían principalmente de la cercanía a los bancos de materiales y a la habilidad de la mano de obra local y la traída ex profeso para realizar las construcciones.

Sin embargo, la construcción de los conjuntos conventuales fue realizada durante diferentes campañas constructivas que duraron años, quedando a veces abandonadas por las limitaciones que pudieran tener, como las fluctuaciones de la población por epidemias, rivalidades, conflictos religiosos, entre otros factores. La comprensión histórica es esencial para poder iniciar el análisis del inmueble. Debemos hacer énfasis en la necesidad de comprender la historia de la construcción en esa época, ya que más allá de la necesidad fundamental de saber cómo fueron construidos, requerimos entender la lógica que utilizaron sus constructores en las intervenciones previas al siglo XX.

Para el siguiente apartado, que refiere a la reconstrucción histórica, se tomaron en cuenta principalmente los datos y fechas referidos en las crónicas de la orden Franciscana, y los documentos de la época que apoyan las hipótesis realizadas; así como otros textos que permiten una interpretación histórica del tema. Se analizan también las funciones y fisonomía que pudo conformar al conjunto conventual.

## 1.1. El origen del conjunto conventual

### El Convento de Santiago Apóstol, Jiutepec Morelos.

El convento de Santiago Apóstol se encuentra dentro de lo que era llamado el Marquesado del Valle, la jurisdicción eclesiástica de los Franciscanos era parte de la Provincia del Santo Evangelio. Cuernavaca fue la sede del marquesado del valle y tuvo una relación estrecha con Jiutepec desde tiempos prehispánicos. Existió una presencia muy importante de los franciscanos en toda la región.

Éste convento fue la sexta casa de los franciscanos y la primera visita de Cuernavaca. Se fundó posiblemente en 1529 según una inscripción no tan antigua en el convento. Sin embargo en el *códice franciscano*<sup>1</sup> no se menciona a Jiutepec, por lo que su fundación pudo ser posterior a 1569, George Kubler identifica su actividad constructora de 1570 a 1580.<sup>2</sup> Su vocación es a Santiago Apóstol.

Según las crónicas del visitador Ponce y su secretario Antonio de Ciudad Real, en Enero del año de 1586 visita el pueblo y convento de Xiuhtepec<sup>3</sup> y lo reseña como un pueblo de mediana vecindad. El convento lo describe como acabado todo de bóveda, que solo le faltaba la iglesia, donde habitaban solo dos frailes (situación común en esa época). También relata que existían una buena huerta mantenida con abundante agua. Con respecto al convento señala que: *“..con un temblor grande de la tierra se cayó la mayor parte de él; lo demás quedó abierto como una granada. Aderezáronse tres o cuatro celdas en que moran los religiosos”*.<sup>4</sup> En octubre del mismo año volvió a visitar el pueblo de Xiuhtepec, y menciona que allí *“tuvo la Fiesta de nuestro padre san Francisco, y dio la misa mayor.”*<sup>5</sup> Aunque Ponce no relata la existencia de una “capilla de indios” Es probable que se reconstruyera una posterior a su primera visita, adosada al convento como parte de la portería, para que los frailes pudieran continuar su labor. Se desconoce cuanto tiempo permaneció destruido el convento, pero continuó en uso, aunque algunas partes quizás quedaron destruidas por décadas antes de que se hiciera otra adición.

---

1 El *Códice Franciscano* comprende los informes de la Provincia del Santo Evangelio, relaciones que hacia 1569 dieron a conocer los franciscanos.

2 *Arquitectura Mexicana del siglo XVI*. George Kubler 1983. pag. 107.

3 El nombre Xiuhtepec es utilizado en las corónicas del siglo XVI, y durante el XVII se utiliza con indiferencia Xiuhtepec- Jiutepec. A partir del siglo XVIII el uso de la “J” se hace presente en los textos como: Jiuhtepec, y finalmente como Jiutepec. Todas las derivaciones provienen de la misma toponimia “Xihuh” de Xihuitl que significa turquesas, hierba, azul y también piedras preciosas, sumado a “Tepetl” que significa cerro.

4 Antonio de Ciudad Real “De cómo salió otra vez de México el padre comisario

en prosecución de su visita” Capítulo XVII. Tomo 1, p. 124.

5 *Ibidem*, Tomo 2, p. 60



Fig.1 Fotografía del convento de Santiago Apóstol, 1998. Espacio conocido actualmente como "Las caballerizas" Proporcionado por J. Rodríguez de Gante.

Se puede suponer que durante principios del siglo XVII se reconstruyó la mayor parte del convento y se realizó el templo, quizás con una techumbre provisional<sup>6</sup>.

El cronista del Santo Evangelio, Fray Agustín de Vetancourt [sic], en un escrito publicado en 1697-8, conocido como Teatro Mexicano, menciona: "*De la otra banda del Sur, en la tierra caliente, hay hermosísimas fuentes que forman arroyos que componen rios.... A las faldas del cerro de Tepoztlan, está un manantial tan cristalino, que le llaman los naturales Atzcatl, que es cristal de agua: baja á Xiuhtepec, y de ella entra en el convento*".<sup>7</sup> Gracias a este relato podemos suponer que existió una infraestructura hidráulica importante que abastecía al convento. Otras referencias en la misma obra se encuentran en las descripciones de plantas que hace "*El cinamomo llaman los naturales moyoxochitl,... es tan fragante, que solía ponerse en el convento de Jiutepec los viérnes de cuaresma en la iglesia, y todo el convento olia á ámbar*." También menciona referente a las Habillas purgativas: "*las hay en el patio de la iglesia de Jiutepec, donde las vi siendo guardian de aquel convento*."<sup>8</sup> Que Vetancourt fuera guardián del convento explica su conocimiento de todas las especies y rituales del lugar. De tal manera que por lo menos para la segunda mitad del siglo XVII ya se había construido un templo y que se encontraba en uso. Debido a su cercanía a Cuernavaca probablemente el convento de Jiutepec perdió importancia.

6 En el capítulo número 2 se debatirían las posibles techumbres y la construcción de las bóvedas definitivas.

7 Agustín de Vetancourt. Teatro Mexicano, TOMO 1, p. 109

8 *Ibidem*, p. 166.



Fig.2 Fotografía del templo de Santiago Apóstol, 1925 archivo familia Mendoza Samano.



Fig.3 Fotografía del templo de Santiago Apóstol, 1960 archivo José Luis de Gante.

Existe un documento<sup>9</sup> que sugiere que el templo fue hecho a principios del siglo XVIII, de 1706 a 1712. Lo más probable es que se refiera a la construcción de las bóvedas que datan de principios de ese siglo. La actividad como parroquia puede constatarse en su archivo histórico<sup>10</sup>, donde existen documentos relativos a las actividades de las diferentes cofradías, y los registros de matrimonios, bautizos y enterramientos, por lo menos referidos desde 1652 hasta 1705, haciendo referencia también a otros pueblos cercanos que tuvieron estrecha relación con Xiuhtepec.

Algunas variaciones realizadas en los templos durante el siglo XVIII son la adición de cúpulas, capillas laterales y torres, estas últimas no fueron muy usadas en la arquitectura del siglo XVI, ya que se daba preferencia a las espadañas para colocar las campanas. Los templos de Jonacatepec y Hueyapan tienen cúpulas en la nave, y los templos de Jiutepec y Xochitepec, sobre el presbiterio. Unas de las variaciones realizadas durante el siglo XIX fue que se agregó un reloj sobre el hastial de la portada principal, como se observa en la figura 2. Para este momento ya era considerado una vicaria foránea de Cuernavaca<sup>11</sup>.

Un episodio conocido en el pueblo es que durante la revolución mexicana (1910-1917) las tropas carrancistas utilizaron la parte posterior del convento como caballeriza, esta parte del convento se encontraba sin cubiertas, este fue el origen del nombre coloquial que ha tenido este espacio desde entonces. En el año de 1940 fue

9 Archivo General de la Nación/ instituciones Coloniales/Real Audiencia/indios (058)/con-tenedor 21/Volumen 38/. Compendio de litigios, durante los años 1712-1713, donde se menciona "ni atraso alguno a dichas minas, pues los operarios que hasta ahora ha dado este pueblo, los subrogarán otros que los puedan reemplazar, y para que tenga efecto que se consiga esta fábrica, por el presente concedo a dichos naturales del referido pueblode Jiutepec la reserva que piden de trabajar en las minas de Tasco por tiempo de seis años, en el cual podrán fabricar el templo", documento encontrado por Cristina Mejía en 2016.

10 El historiador José Luis de Gante digitalizó parte del archivo parroquial, con énfasis en la actividad de las cofradías, este material se encuentra inedito.

11 Fortin Hipólito Vera 1880 "Itinerario Parroquial del arzobispado de México y reseña

catalogado y declarado monumento histórico por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). En el archivo Jorge Enciso de la Coordinación Nacional de Monumentos del INAH, existe un documento del 6 de marzo de 1959, del Obispo Sergio Méndez Arceo, quien menciona que el convento se incendió y también hay reportes de daños en una parte del conjunto y en algunas crujiás, tales como desplome de techumbre, vegetación en piso, entrepiso y muros, así como grietas en la bóveda, cúpula y coro. En la década de 1960 fue retirado el reloj del hastial y se abrieron algunos vanos de la “capilla abierta”. Algunos daños importantes fueron ocasionados por sismos como los de 1957 y 1973. Son visibles las intervenciones en los años setentas y la última es de 1985.<sup>12</sup> Hay varias ampliaciones y cambios de sistemas constructivos. Existen losas de concreto armado que sustituyeron a bóvedas, sobre todo en el claustro alto.

Este conjunto conventual tuvo múltiples modificaciones, adiciones, reconstrucciones y adaptaciones a lo largo de su historia. En el siguiente capítulo se hará énfasis en la progresión de sus etapas constructivas, pero antes se describirán sus elementos característicos.

Durante el sismo de 19 de Septiembre de 2017, el conjunto conventual sufrió fuertes daños, en los capítulos 4 y 5 de éste trabajo se abordará específicamente dicho tema.

---

histórica, geográfica y estadística de las parroquias del mismo arzobispado. Colegio Católico. p. 26  
12 Archivo Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles de la Coordinación Nacional de Monumentos Históricos. INAH. 1998 p. 2

## 1.2 Partido Arquitectónico, elementos constitutivos.



Fig 4. Portada de Rhetoria christiana, Diego de Valadéz, 1579.



Fig 5. Fragmento de la portada de Rhetoria christiana

Los conjuntos conventuales normalmente fueron emplazados en sitios estratégicos para ejercer un dominio sobre el territorio. Están constituidos por la iglesia de nave rasa y el convento, ambos se desplantan en la superficie plana del atrio, dispuestos uno adyacente al otro, la iglesia destaca en altura como forma de jerarquía. Usualmente los componentes típicos de los conjuntos conventuales del siglo XVI son los siguientes: atrio, el convento y sus dependencias, que pueden ser:

Celdas de los religiosos, refectorio o comedor, sala capitular, claustro, locales de servicios, cocina, almacenes, huerto, tierras laborables, capilla abierta, fuente de agua, panteón, y la capilla o Iglesia.

El atrio es un espacio descubierto, que precede al convento y templo, generalmente con tres entradas, dos laterales y la principal formada por una arcada real. Los elementos que usualmente encontramos conducen de la arcada real a la puerta del templo y normalmente se encuentra una cruz atrial sobre este eje. El atrio es el elemento más característico de la arquitectura conventual del siglo XVI por lo que es una de las aportaciones principales, ya que solo se encuentra presente en la Nueva España, debido a que durante el inicio de la evangelización todas las actividades se hacían en un espacio abierto. Las arcadas estaban relacionadas con el camino procesional. Dicho camino es otro elemento que une a las capillas posas, y se sitúa paralelo a la pared perimetral del atrio. Las capillas pozas son una construcción rectangular abierta por uno o por dos lados, techado y almenados, y tiene la función de recibir el Santísimo sacramento en las procesiones de Semana Santa, el cual se posa sobre el altar que se sitúa en el fondo de la capilla. Normalmente son 4 capillas pozas, una en cada vértice del atrio<sup>13</sup>.

El atrio responde a la necesidad mesoamericana de reunirse al aire libre, ya que toda la religiosidad era vivida al exterior de los antiguos templos prehispánicos. Las actividades incluyen celebraciones con procesiones y peregrinaciones. Existe siempre una abundancia de flores, cantos y danzas de día y noche a la manera mesoamericana. Fue un lugar de actividades diversas, e incluso no relacionadas con las labores de conversión o la religión tales como: aprender a pintar y dibujar, como menciona Pedro de Gante<sup>14</sup>.

Existían actividades para adultos y para niños, como la enseñanza de las primeras letras o música, y también para etapas más avanzadas. También se impartía justicia en este espacio, como lo describe Fray Diego de Valdés<sup>15</sup>, donde menciona que, según la autoridad conferida a los frailes, estaban encargados de escuchar las controversias de los

13 J. B. Artigas, *op. cit.*, p. 290

14 De la Torre Villar, E. 1974. Fray Pedro de Gante, maestro y civilizador de América. Estudios de Historia Novohispana, p. 8

15 Valadés D., *Rethorica chistriana ad concionandi et orandi usum accomodata utriusque facultatis exemplis suo loco insertis*, Perusa, 1579, Ver: *Indorum Reipublicae Descriptio*.

indígenas y poner fin a ellas ya que las aceptarían como si vinieran de Dios. Estas actividades reflejan la enorme importancia de los atrios para la organización de los pueblos de indios y la enseñanza. Esta versatilidad de funciones queda ilustrada de forma muy clara en el grabado de Fray Diego Valadés (fig. 4 y 5) donde se muestran las diferentes actividades que se realizaban en estos espacios, curiosamente nunca les llama “atrio” como tal.

El atrio del conjunto conventual de Santiago Apóstol que se ilustra la figura 6, se conserva en forma de “L”, con dos accesos, el de la arcada real y una lateral. La cruz atrial está ausente así como las capillas posas. Existe una barda perimetral coronada por almenas, que por sus características probablemente fue construida en el siglo XIX. El camino que encontramos conduce de la arcada real a la puerta del templo, este camino se sigue utilizando en la actualidad para “recibir” a Santiago Apóstol, fiesta que dura del 20 al 27 de Julio. El camino se ilumina incluso con velas durante la noche esperando la imagen del santo patrono.

Como menciona Ricard Robert, la Evangelización se organizó en torno a un espacio abierto que hacía al mismo tiempo oficio de plaza mayor y de mercado o tianguis. Esta plaza era, y sigue siendo<sup>16</sup>, el corazón del pueblo y su centro vital. Podemos comprobar en Jiutepec la presencia de los elementos principales de la organización territorial impuesta por los españoles, el templo y el convento, la plaza principal, la alcaldía, con alteraciones en sus dimensiones aún presente la disposición típica, Plaza Mayor: Área 5354m<sup>2</sup> Dimensiones: 43.9mx93.23m 52 varas x 111varas, la vara utilizada era cercana a los 84cm.<sup>17</sup> Las dimensiones no coinciden con la proporción de vez y media de largo con respecto al ancho que las ordenanzas en la cédula<sup>18</sup> de Felipe II recomendaban. Tampoco respeta los mínimos de 54m x 81m (200 pies x 300 pies) aunque se acerque más a esta recomendación. Quizás estas variaciones son debidas a la transformación urbana que ha tenido Jiutepec, y que también explicaría su posición que no coincide totalmente con el eje del convento. Podemos suponer que la plaza en un inicio tuvo mayores dimensiones de las actuales (sobre todo en el ancho, incluso hasta el doble de tamaño).

---

16 Aun es utilizado el atrio como tianguis, parque público y lugar de culto.

17 Cortés Rocha, *Arquitectura Mecánica La profesión y el oficio* 2019. El patrón de longitud de la arquitectura novohispánica era la vara mexicana de tres pies, contrastada con la de Burgos, patrón oficial castellano. Una vara equivale a 0.8359 metros y era la medida básica para longitudes.

18 Cortés Rocha, *El clasicismo en la arquitectura Mexicana* p. 186, Ordenanzas en materia de urbanismo La cédula de Felipe II.

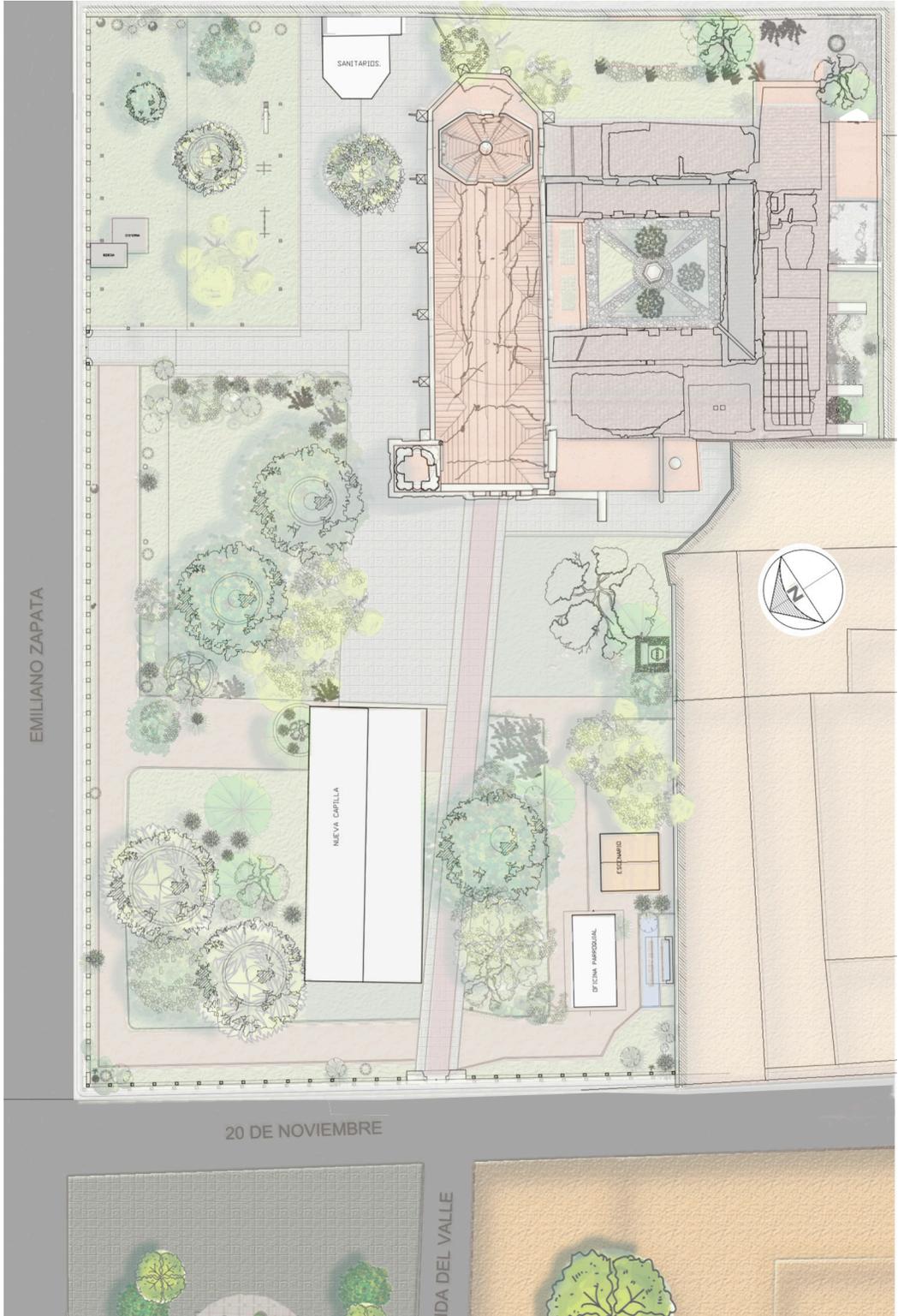


Fig. 6 Planta de conjunto de parroquia y exconvento de Santiago Apóstol, 2018 plano de elaboración propia.

## Convento

El convento es un conjunto de espacios destinados a la habitación de los frailes y sus actividades. Típicamente se orientaba al sur del templo. Existen excepciones como Jonacantepec y en algunas partes de Yucatán donde es ubicado al norte presumiblemente para evitar en lo posible al sol. Los conventos podían tener varios patios, el principal se denomina claustro y se encuentra cerrado y con un jardín, en el también puede existir una fuente, o servir para captación de agua. El eje de composición va de oriente a poniente, y el de norte-sur. Su forma suele tender al cuadrado, aunque en ocasiones las crujías pueden sobresalir. Alrededor del claustro se articulan las demás dependencias, que según Kubler<sup>19</sup> típicamente eran:

De Profundis, refectorio y cocina en el claustro bajo; celdas y dormitorios para viajeros en el claustro alto, así como biblioteca en algunos casos. En las alas sobresalientes se albergaban los servicios y bodegas del convento. Pocos conventos llegaron a tener todas estas dependencias completas, ya que la gran cantidad de conventos y el poco personal con que contaban los frailes era difícil mantenerlos. A pesar de que llegaron a tener ayuda de algunos naturales para dar el mantenimiento al convento.

Cada orden de frailes tenía diferentes símbolos con los cuales se diferenciaban, así como escudos, que podían ser mostrados en pinturas o alto relieves. A pesar de estas diferencias el partido arquitectónico era muy similar, ya que era una disposición general que solía seguirse.

En la crujía que da hacia la fachada principal (hacia el atrio), se ubicaba la portería, y en ocasiones funcionaba de nave transversal de una capilla abierta<sup>20</sup>, la cual tiene el presbiterio detrás y a nivel más alto. Desde dicha portería una puerta conduce al patio del convento a través de un zaguán. Las capillas abiertas de varios arcos en el frente pueden convertirse en la portería del convento después de haber entrado en desuso.<sup>21</sup>

En el muro contiguo a la iglesia y desde el patio se abren dos puertas, una a partir del corredor bajo del mismo patio y la otra que lleva de la habitación de la antesacristía a la bema (sección baja del presbiterio). Pueden existir uno o dos confesionarios en el muro, el fraile entra desde el convento y el feligrés desde el templo. A mitad de la crujía opuesta al templo suele existir un vestíbulo en planta baja que relaciona el patio con otros servicios: con el refectorio y con la cocina frente a este último, con dicho vestíbulo de por medio.

---

19 George Kubler. *op. cit.*, p. 413.

20 Capilla abierta: Capilla provisional o auxiliar donde puede celebrarse la misa (Kubler, 390). Es un elemento que ha sido estudiado ampliamente por autores como J. B. Artigas, y Toussaint.

21 J. B. Artigas, *op. cit.*, p. 379

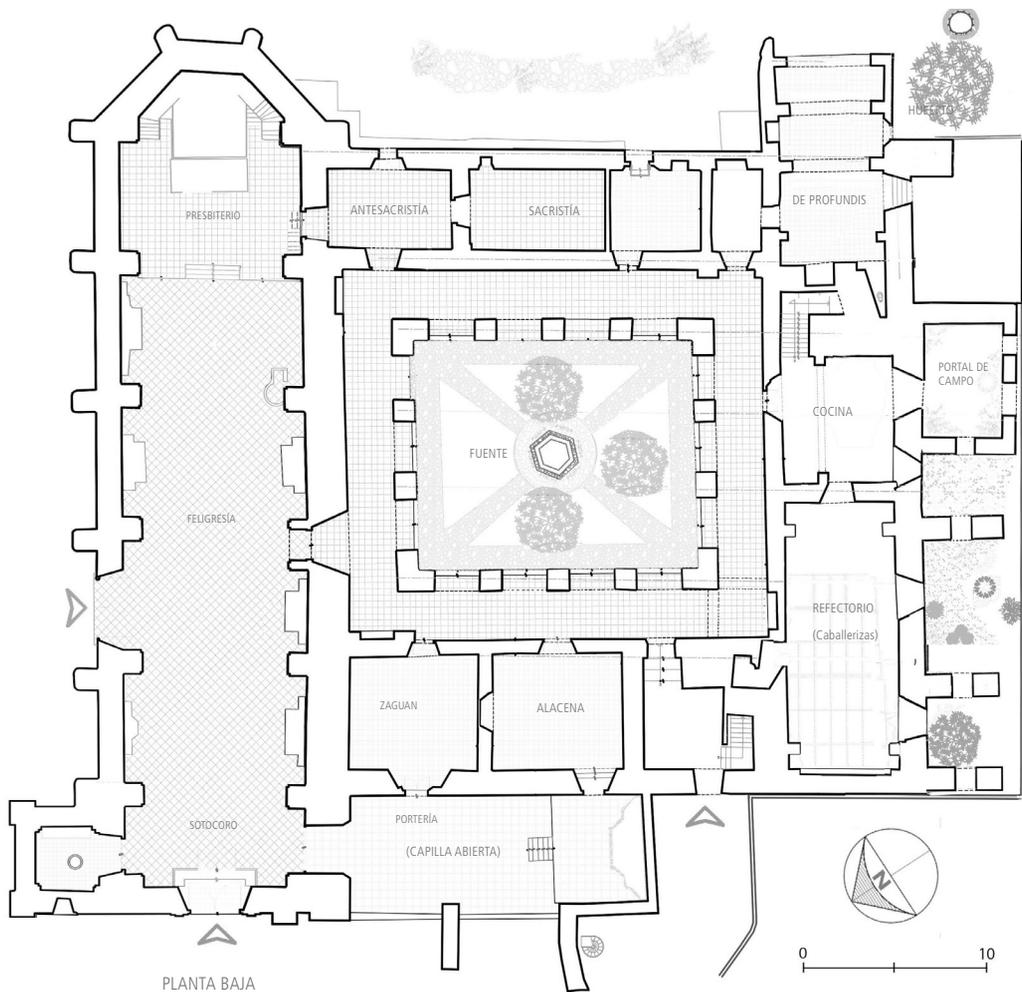


Fig. 7 Planta baja, Conjunto conventual de Santiago Apóstol. Plano de elaboración propia 2018.

Frente a la puerta del pasillo hacia el claustro, bajo dicho vestíbulo, abre otra puerta que conduce al patio exterior lateral o a la huerta. Desde la cocina que usualmente contaba con tiro de chimenea, se alcanza la despensa con orientación hacia un lugar fresco. Algunos conventos tienen en esta crujía una escalera que conduce a la planta alta, contigua a este vestíbulo. En casos excepcionales existe el portal de campo, lugar exclusivo y fresco para un reducido número de comensales. En muchos casos los pasillos del claustro contienen nichos.

En la planta baja en la crujía oriental se puede encontrar la sala De Profundis donde se velaba a los muertos. Solo en los casos donde no estaba la sacristía y ante sacristía ocupando este lugar.

Las celdas de visita eran muy importantes, pese a permanecer vacías la mayor parte del tiempo, ya que los funcionarios civiles, otros monjes e incluso el propio virrey necesitaba alojarse en conventos para pasar la noche.

La disposición típica según Chanfón es la siguiente: al sur estaba el refectorio en planta baja, y la ropería en planta alta. Al poniente el almacén y arriba la alacena. Al oriente la sala diurna en planta baja y en los altos el dormitorio. La planta alta se reservaba para las celdas. En planta alta también podía estar la biblioteca y la sala capitular.

### Templo de una sola nave

El templo es el elemento de mayor altura y volumen cubierto, llamado también nave rasa.<sup>22</sup> Consiste en una planta austera, rectangular alargada y consta principalmente tres partes, el presbiterio donde se encuentra el altar, la nave y el coro. Tiene un tratamiento económico y estereotipado de los accesos. Su portada y acceso principal suele estar orientado al oeste, complementada por otras tres vías de acceso al conjunto arquitectónico: una hacia el norte, que da a un patio lateral, otra hacia el sur, que da al pasillo del claustro, y por último, la que da acceso al presbiterio.

La puerta principal y el altar se encuentran enfrentados. La nave tiene una altura considerable. La planta expresa esa búsqueda de sencillez de los primeras iglesias en el “Nuevo Mundo”<sup>23</sup>. Se trataba de que todos tuvieran una vista óptima del ritual religioso desde cualquier punto del interior de la iglesia. El clero deseaba mantener bajo constante vigilancia a la congregación. Se buscaba que la atención de los nuevos conversos se dirigiera hacia un solo punto, ya fuera el altar o el púlpito, propósito que el templo de una nave cumplía de forma eficiente.<sup>24</sup> La planta está conformada por tres espacios interiores dispuestos uno a continuación del otro a partir del acceso principal, al acceder se llega al sotocoro. El segundo es la nave para los feligreses, delimitada desde el sotocoro hasta el arco triunfal, y el tercer espacio es el presbiterio que va desde el arco triunfal hasta el muro testero. Este último espacio es el sagrado, desde donde se oficiaba la misa en torno al altar. El sotocoro sirve de transición entre el exterior y la nave, ya que la altura de éste es menor, y permite apreciar la gran altura de la nave, y también sirve como vestíbulo.

El espacio es continuo entre el nivel de feligresía y el del presbiterio. La zona construida que contiene al presbítero es el ábside, que delimita el espacio sagrado. El altar debe ubicarse por lo menos a tres escalones del piso circundante para ser más visible y contar con mayor jerarquía, por ello el presbiterio de uno o dos cuerpos se encuentra levantado. Su cubierta suele ser mas elaborada que la de la nave. El espacio bajo el presbiterio lo denominamos bema (término paleocristiano).

A su vez la bema se comunica con la antesacristía, de la cual se pasa a la sacristía, que tiene una dimensión considerable. Ambas se encuentran en el cuerpo del convento.

---

22 El termino nave rasa fue acuñado por George Kubler en 1948 p. 242- 243.

23 George Kubler *op. cit.*, p. 299.

24 *Ibid*, p. 300.

Otra habitación que complementa el templo es el baptisterio, usualmente ubicado a un costado del sotocoro, en un espacio que puede ser el cuerpo bajo de una torre o una zona en la planta baja del convento. Este espacio cuenta con una pila de agua bendita (Pila bautismal) labrada de piedra, a veces con motivos prehispánicos. Se colocaba a la entrada del templo.

En el caso de los templos franciscanos existe otra puerta que da al exterior, siendo esta lateral al templo, usualmente ubicada al norte, y que recibe el nombre de porciúncula<sup>25</sup>, haciendo referencia a la capilla en que tuvo revelaciones San Francisco de Asís, fundador de dicha orden. Solamente se abría el día 1 de agosto, y se cerraba el 2 de agosto. Se empleó para impartir el catecismo. En México los mendicantes concedieron a ese acceso al templo una importancia mayor, por el gran número de recién conversos indígenas. El muro de la epístola marca en muchas ocasiones donde se desarrolla el convento, y tiene dos puertas, una directamente hacia el pasillo del claustro y otra hacia la antesacristía.

Las iglesias de nave rasa que están cubiertas con bóvedas suelen ser de dos formas, bóveda de cañón hasta el arco triunfal, y a partir del presbiterio se utiliza una cúpula de nervaduras sobre el altar como espacio de planta ochavada. Las ventanas en la bóveda de cañón corrido se encuentran por debajo del nivel de impostas, dotando a la nave de una iluminación uniforme, también cuenta con una ventana por encima de la puerta principal, para iluminar el coro.

La ornamentación es parte fundamental del funcionamiento del inmueble, y esta ha cambiado con el tiempo, sin embargo, la pintura mural original se conserva en muchos casos bajo gruesas capas que se han adicionado durante siglos. También existen frisos horizontales que atraviesan la nave por los muros laterales, enfatizando el punto de fuga, uno se encuentra en la parte baja y otro a mayor altura a manera de cornisa en el arranque de las bóvedas.

Los programas arquitectónicos de los conventos del siglo XVI no fueron construidos en un solo impulso, fueron creados al mismo tiempo que los sistemas de adoctrinamiento de los grupos indígenas, e incluso con la conformación de los asentamientos humanos.<sup>26</sup>

---

<sup>25</sup> Juan Benito Artigas et al. 1980. Vocabulario Arquitectónico Ilustrado. p. 300  
<sup>26</sup> Juan Benito Artigas. *Arquitectura del.... op cit.* 340.

# Capítulo 2 Trazo, y construcción de las bóvedas y cúpula octagonal del templo de Santiago Apóstol.

## Historia de la construcción.

La historia de la construcción se convierte en un requerimiento técnico, sin el cual la comprensión de un edificio es limitada. Puede obtenerse mediante la recopilación documental y la investigación de diferentes fuentes históricas, sin embargo, un paso esencial es el análisis minucioso de la obra construida. Se deben realizar levantamientos geométricos para plasmar la información en planos con la mayor fidelidad. Se realiza un análisis visual de cada cuerpo de mampostería, identificando cambios de materiales y de técnica constructiva.

Una parte esencial es por medio de calas dispuestas estratégicamente, retirando porciones de material de recubrimiento para determinar los materiales y espesores que constituyen la estructura de mampostería. Sin embargo, los análisis no destructivos son cada vez más factibles de hacer con el avance de la tecnología, y pueden contribuir en gran medida a evitar las calas al mínimo. Una vez obtenida esta información se procede a su interpretación, identificando la correlación entre muros y cubiertas, vanos y macizos. Así, es posible realizar hipótesis razonadas sobre cada etapa constructiva y sus transformaciones específicas como apertura o clausura de vanos o el adosamiento de algún elemento al edificio. De esta forma, no solo es posible determinar los espacios que responden a un plan o programa arquitectónico primigenio, sino que ayudará en gran medida a interpretar las deformaciones y vicisitudes que ha tenido el inmueble.

Se resalta que la arquitectura conventual no es un conjunto de estratos horizontales, sino la expresión de un conjunto de cuerpos de fábrica que responden a una disposición intencionada y pensada para cumplir una función. Una instancia de lo anterior a tomar en cuenta es que se debía asegurar la estabilidad en cada uno de los momentos de su construcción.

También se consideran las crónicas y documentos mencionados en el capítulo anterior, elementos que permiten hacer hipótesis sobre la temporalidad de cada etapa.

Algunas diferencias de esta época fueron que no existía una definición de qué elementos constructivos eran “estructurales” y cuales no, sin embargo ya se conocía una correlación entre algunos elementos que debían tener ciertas dimensiones mínimas y los cuales dependían del tipo de cubierta al cual recibirían (especialmente para

las bóvedas). Se realizaban los muros y las cubiertas y posteriormente los recubrimientos, los muros cumplían una función y no eran solo divisorios, sino parte esencial de la traza original. Por dicho motivo, lo anterior supone espesores de muros muy considerables. Las cubiertas principales que se utilizaron durante el siglo XVI fueron las techumbres de madera y las bóvedas. Para claros pequeños se utilizaban vigas de muro a muro, canes y gualdras, armaduras de par y nudillo, a dos aguas, e inclusive artesonados. Las bóvedas más usuales fueron las de cañón corrido y algunas de crucería. Después del siglo XVI fue que se comenzaron a implementar con mayor regularidad las cúpulas, por lo que las techumbres “planas” fueron la excepción y no la norma.

A continuación se analiza la fisonomía que pudo conformar al conjunto conventual, así como los conocimientos y posibilidades que poseían los maestros constructores de cada etapa. Esto se realiza a través del análisis de los métodos de trazo y dimensionamiento de los elementos que constituyen una edificación.

## 2.1 Historia constructiva del conjunto de Santiago Apóstol

En el presente apartado se describen las distintas etapas constructivas presentes en el conjunto conventual. Como se muestra en la figura 2.1, se identifica cada etapa con un color, tanto de muros como cubiertas, que en la mayoría de los casos son bóvedas. Los muros y bóvedas color morado corresponden al siglo XVI representando en gran medida el partido arquitectónico primigenio del claustro y sus dependencias. Estos muros se encuentran contruidos de tezontle irregular con mortero de cal y arcilla, los espesores de sus muros varían aunque su característica esencial es un considerable grosor. El claustro alto corresponde en general a una etapa posterior. La planta baja es la mejor conservada y presenta los menores daños y modificaciones. La planta alta esta gravemente alterada y presenta también la mayor parte de los colapsos.

Fig. 2.1 Planta baja, los colores señalan distintas etapas constructivas. Elaboración propia sobre levantamiento arquitectónico 2018.

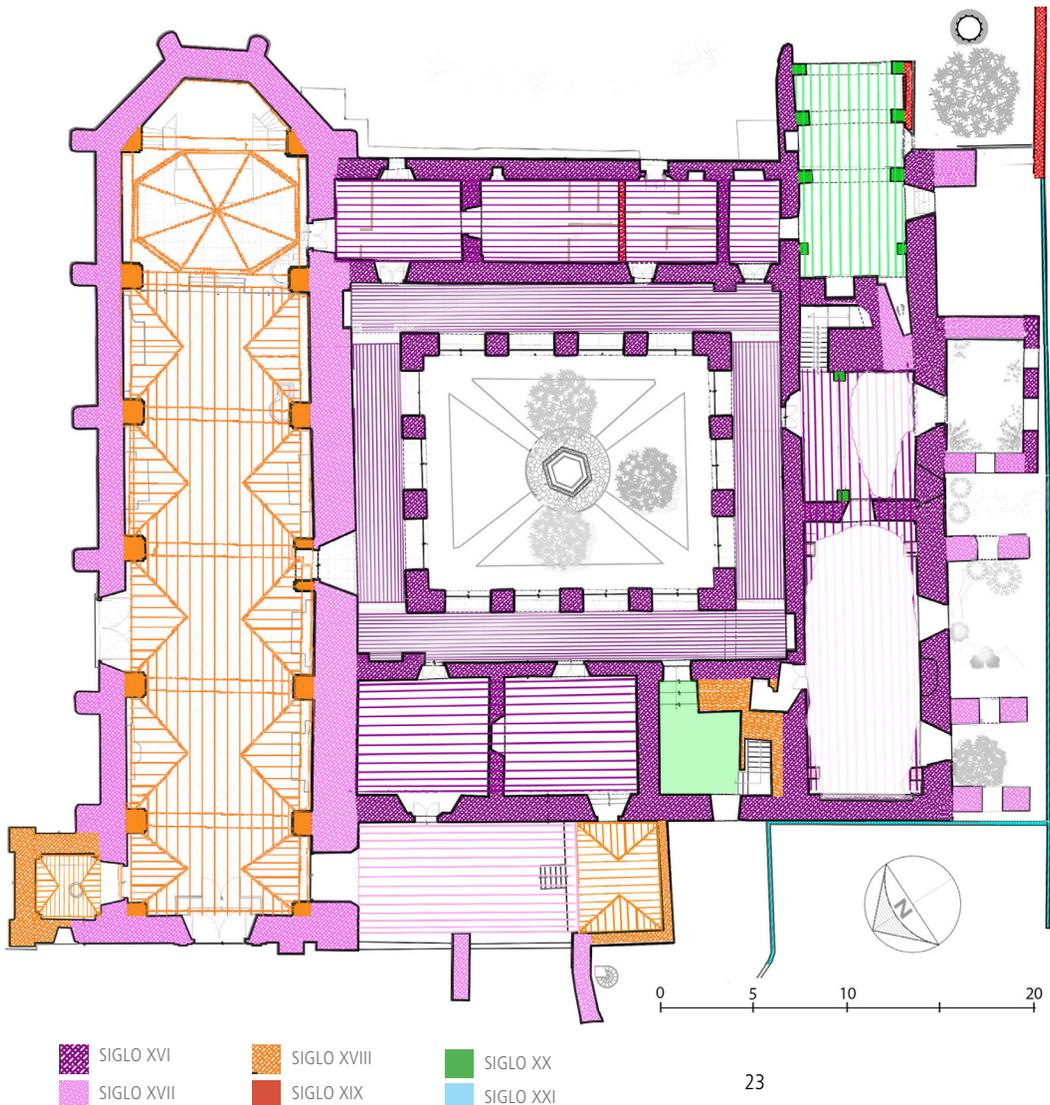




Fig 2.2 Claustro bajo, fotografía tomada en 2019.



Fig 2.3. Contrafuerte adicionado a claustro, fotografía tomada en 1998. JLRDG.



Fig 2.4. Interior del templo, foto 2016.

A fin de tener un templo como tal, se edificó éste adosado al convento. Como vimos en el capítulo anterior, para 1586<sup>27</sup> aun no existía dicho templo, por lo que debió ser realizado a principios del siglo XVII. Los vestigios correspondientes a este siglo se encuentran representado por el color rosado, que corresponde a la construcción de los muros del templo y algunas adecuaciones realizadas al convento, como la adición de contrafuertes al ala extrema del convento. Los vanos más antiguos están formados por tezontle dovelado, labrado de forma sencilla formando arcos rebajados. Otros vanos están formados con piedra caliza, generalmente conformando una platabanda y recubriendo las esquinas de las jambas. Las dos entradas al templo desde el atrio también se encuentran construidas con piedra caliza formando arcos de medio punto. Las bóvedas de cañón del claustro bajo son de tezontle irregular. Lo que queda de los arcos escarzanos en el claustro alto muestra su constitución de tabique rojo recocado, los muros del claustro fueron cubiertos con frescos estucados y decorados con colores rojo, negro y blanco aún visibles actualmente. Para la mampostería los recubrimientos de cal y arena son una protección esencial.

El color naranja de la figura 2.1 corresponde al siglo XVIII, en el templo se observan las pilastras (o medias muestras) como soporte de los arcos de las bóvedas, que también fueron construidas durante esta etapa, así como algunos de los muros de la “capilla abierta” que soporta el mismo tipo de bóvedas de lunetos. Destaca la torre de dos cuerpos sobre el templo. La segunda escalera del convento y sus vanos corresponden presuntamente a esta etapa.

El color rojo muestra las intervenciones del siglo XIX y principios del XX que aún se encuentran realizadas con mampostería, aunque su grosor disminuyó progresivamente. Podemos constatar el cambio y pérdida de la tradición constructiva de los tres siglos anteriores, ya que cambian totalmente la fisonomía y el sistema constructivo típico. En el léxico de la restauración se les conoce como “agregados”. En la planta podemos ver identificadas con color verde a las columnas de concreto armado ocasionalmente chapeadas con piedra que soportan techumbres o apuntalan secciones de bóveda y muros divisorios de mampostería confinada con concreto armado. Los muros ilustrados de color café y azul cian también corresponden a este periodo. Los más delgados son los muros de tablarroca (en café) que tenían la función de subdividir espacios, los de color cian representan bardas perimetrales.

Hasta el siglo XVIII los sistemas de cubiertas siempre fueron abovedados o de madera. Las intervenciones a partir del siglo XX en techumbres han sido principalmente de concreto armado. Cuando colapsa una bóveda suele ser sustituida con una losa de concreto

<sup>27</sup> Antonio de Ciudad Real, *opcit.* pag. 124.

plana o en forma de bóveda, como sucedió en el convento de Jiutepec, cambiando sus características constructivas y comportamiento estructural típico. Como menciona Luis Arnal, “... es una de las causas más importantes de la destrucción de los bienes patrimoniales o simplemente de la arquitectura del pasado: al no entender ni conocer la historia, la destruimos o la canjeamos por otros signos que si podemos comprender y traducir a nuestro lenguaje.”<sup>28</sup>

## 2.2 Secuencia constructiva de las cubiertas del templo de Santiago Apóstol.

A partir de esta sección el trabajo se centrará en el análisis del templo. Se confirma la existencia del templo hasta principios del siglo XVII<sup>29</sup>, Al analizar el edificio podemos inferir sus etapas constructivas y realizar las hipótesis de las techumbres que pudo tener. Aunque no tenemos pruebas documentales, sabemos que las dimensiones de los contrafuertes corresponden a recibir una cubierta de bóveda (como se verá en el apartado 2.3) que descansa su peso sobre los muros y típicamente tiene poca iluminación. Una práctica común en la época fue realizar una techumbre “provisional” de madera que posteriormente fuera sustituida por una bóveda usualmente de cañón, de esta forma los muros y contrafuertes solían dejarse preparados para recibirla<sup>30</sup>. Sin embargo, actualmente no se han encontrado indicios de dicha techumbre de madera por lo cuál solo es una hipótesis, ver figura 2.5. Un indicio que se puede buscar es la posición de las ventanas, ya que en los templos con cubierta de bóveda de cañón suelen estar por debajo del nivel de impostas<sup>31</sup>. Al analizar la posición de las ventanas en el templo de S. Apóstol, podemos ver que su patrón coincide con el de los contrafuertes y no con el de las pilastras. Sin embargo las ventanas se encuentran sobre el nivel de impostas, lo que puede suponerse es que fueron realizadas durante la misma etapa constructiva de los muros.

Sin embargo esta bóveda de cañón no llegó a construirse, y el templo debió funcionar con su techumbre provisional. Lo cierto es que a principios del siglo XVIII cambiaron las formas construidas y se sustituyó la cubierta del templo con una de bóveda de cañón con lunetos. También se adicionó una torre de dos cuerpos constituida con tezontle labrado pegado con mortero cal-arena y elementos decorativos de tabique rojo de 5cm x 23cm.

Existe evidencia de que sobre el presbiterio no se había planeado una cúpula al iniciar las bóvedas, ya que existen dos pares de arcos formeros de distintas dimensiones. Uno corresponde a una continuación inicial

28 Luis Simón Arnal. 1999. Formación del profesionista y el investigador de la restauración de monumentos. p.95

29 Agustín de Vetancourt. Teatro Mex..... *Opcit*, p. 109

30 George Kubler. *Op cit* p.234

31 *Ibidem*, p.341

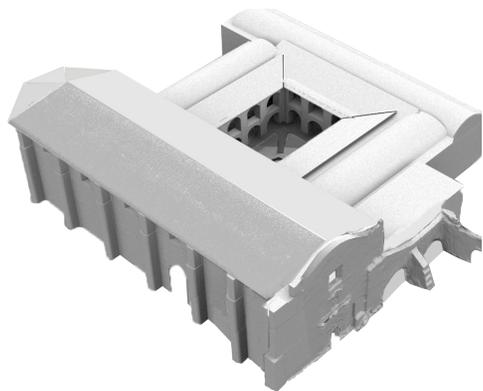


Fig. 2.5 Hipótesis de techumbre de madera a dos aguas durante el siglo XVII, esquema de elaboración propia.

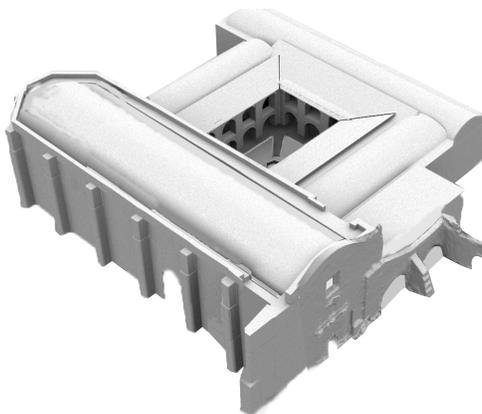


Fig. 2.6 Hipótesis de bóveda de cañon sobre el templo siglo XVII. Esquema de elaboración propia.

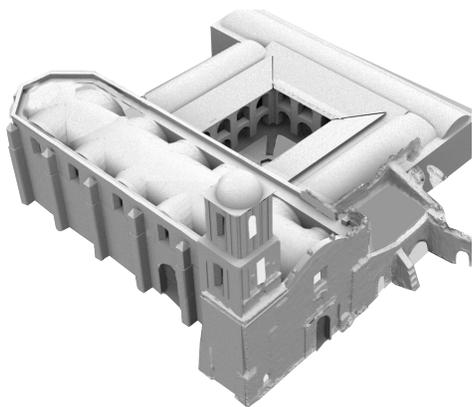


Fig. 2.7 Hipótesis de bóvedas de pañuelo sobre el presbiterio y torre durante el siglo XVIII. Esquema de elaboración propia.

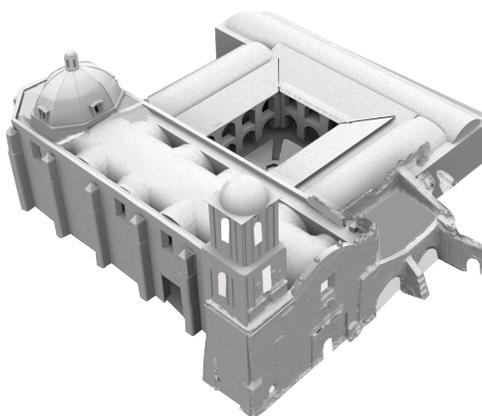


Fig. 2.8 Hipótesis de secuencia constructiva durante el siglo XVIII. Esquema de elaboración propia

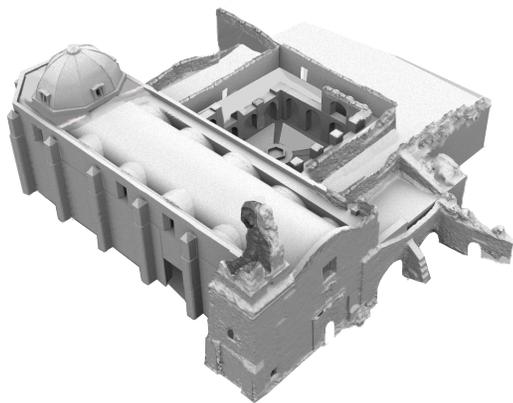


Fig. 2.9 Estado del conjunto posterior al sismo del 19 de Septiembre de 2017.

del sistema abovedado como remate del presbiterio, y el otro a un par de arcos formeros de mayor altura (con peralte) que son el soporte actual de la cúpula y sus pechinas. Lo anterior conduce a imaginar que la cubierta sobre el presbiterio pudo haber sido planteado en primera instancia como una bóveda (ver figura 2.7). Considerando también el caso de la catedral de Cuernavaca (de fundación franciscana) donde el presbiterio se encuentra cubierto con una bóveda vaída o de pañuelo, solución de cubierta que llegó a utilizarse a finales del siglo XVI<sup>32</sup>. En el templo de Jiutepec la cúpula octogonal se decidió en algún momento posterior durante el siglo XVIII (ver figura 2.8) y quizás como un cambio arriesgado por parte de los constructores al realizar una cúpula de ese tamaño, sin embargo, el sistema constructivo es compatible con los anteriores y utiliza el mismo tipo de material. A diferencia de las etapas previas, los constructores ya no eran frailes. Fueron obras encargadas por el clero secular a maestros con una formación gremial y los albores de la academia<sup>33</sup> en la Nueva España. En este siglo cambió el paradigma del constructor, siguiendo los mismos principios de construcción, siendo más osados que los primeros frailes constructores de los siglos anteriores. Al menos en la Ciudad de México eran comunes los encargos de obras civiles y religiosas a maestros, y no es descabellado pensar que se pudieran encargar trabajos de menor envergadura pero de gran importancia para la comunidad, como es el caso de Jiutepec.

---

32 Xavier Cortés Rocha, El clasicismo... *Op. cit.* p.145

33 En el manuscrito del siglo XVIII titulado "*Architectura Mechanica*" bajo la interpretación de Xavier Cortés Rocha, nos proporciona una visión clara de la transición entre la profesión del constructor gremial y la arquitectura como arte liberal con su formación académica. A partir de la fundación de la Escuela de San Carlos en 1783.

## 2.3 Reglas estructurales históricas, tratadística.

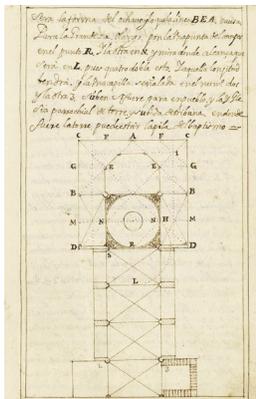
Fig. 2.10 Manuscrito, Compendio de arquitectura y simetría de los templos. Biblioteca Nacional de España, MSS/8884. García, Simón (fl. 1651-1681) Gil de Hontañol, Rodrigo (1500-1577) Publicado entre 1681 y 1683.

a) Portada

b) Templo con capillas. Folio 15r



a)



b)

Las reglas de la arquitectura del siglo XVI al XVIII eran esencialmente reglas geométricas, las nociones de mecánica y resistencia de materiales están totalmente ausentes. Por lo anterior la estabilidad de las edificaciones en esa época depende de la calidad de la construcción y la correcta proporción asignada a los diferentes elementos constructivos.

Existieron diferentes reglas geométricas que llegaron de Europa para el trazo de los templos, difundidas por medio de tratados y libros de monte<sup>34</sup>, así como la experiencia que pudieran tener algunos constructores y frailes que provenían particularmente de España. No se puede comprobar que fueron utilizadas de la misma manera por los constructores en la Nueva España, pero sí podemos constatar que las dimensiones siguen los mismos resultados dimensionales que muchas de estas “reglas”. Los antiguos tratadistas, además de desarrollar reglas estructurales de tipo geométrico y aritmético, describieron procedimientos constructivos para distintas situaciones. Su relevancia radica en que gracias a la comprensión de la geometría original se pueden entender las deformaciones, y estas hipótesis se hacen en base a tratados existentes. El dimensionamiento incorrecto de ciertos elementos puede ocasionar su colapso.

Las reglas utilizadas por los antiguos constructores son proporcionales a todo el edificio, y controlan su forma total independientemente de su tamaño. La mayor parte de estas reglas no fueron escritas y se han perdido con el paso del tiempo, sin embargo es evidente que los antiguos utilizaron alguna guía para la construcción. Comparando el edificio construido con algunas reglas, que si bien no son idénticas a las utilizadas por los constructores, obtenemos los mismos resultados en las dimensiones de los elementos constructivos.

Hay que recalcar que existe una diferencia importante entre la traza general y el dimensionamiento de los elementos constructivos, siendo los segundos el principio de la división entre elementos estructurales, y no estructurales<sup>35</sup> como hizo Rodrigo Gil de Hontañol en España durante el siglo XVI. Sin embargo todo lo que se conoce del tratado de Gil de Hontañol es gracias a Simón García, quién en un manuscrito publicado en 1681 plasmó los conocimientos de Gil y los suyos. Es muy posible que estos conocimientos fueran transmitidos entre los constructores de la Nueva España<sup>36</sup>.

34 Cortés Rocha, El clasicismo... *opcit*, p. 106

35 Santiago Huerta. 2004. Arcos bóvedas y cúpulas, p. 209.

36 En 1979 Chanfón Olmos, publicó de forma íntegra el *Compendio de Arquitectura y Simetría de los Templos*, Simón García y la proporción geométrica. Su investigación fue el resultado de la comparación entre las proporciones descritas en el tratado y los edificios construidos en México.

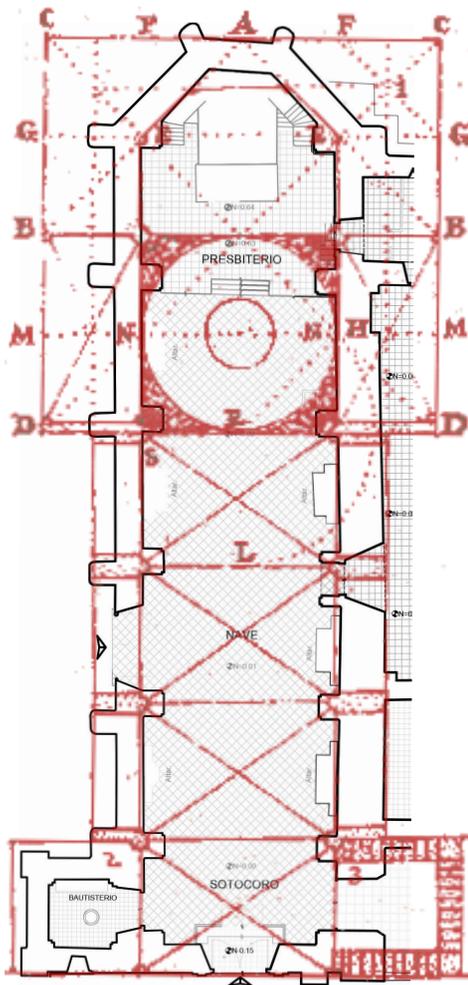


Fig. 2.11. Planta del templo de Santiago Apóstol medida en 2018, con la superposición del trazo extraído del fol. 15r del compendio de arquitectura y simetría de los templos en coloración roja, esquema de elaboración propio.

## Trazo del Templo

Comenzaremos por analizar el trazo del templo de Santiago Apóstol. El primero en realizar una comparación entre los templos de nave rasa y las trazas de Gil de Hontañol fue George Kubler, donde señala las características de los templos y similitudes con su antecedente Español. Sin embargo el esquema que coloca en su libro<sup>37</sup> no coincide exactamente con el folio 15r (figura 2.10 b).

En la figura 2.11 se compara sobreponiendo el trazo para un templo contenido en el Compendio de Arquitectura y Simetría de los Templos del folio 15r con la planta de Santiago Apóstol medida en 2018. Se puede observar que la proporción es muy similar, inclusive en la dimensión de los contrafuertes y su equivalente grosor del

37 George Kubler *Opcit*, p.302. Esta discrepancia entre el dibujo colocado por Kubler y el dibujo de Simón García, puede ser debido a algún cambio de proporción previo a la imprenta de la segunda edición en 2012, o debido a que no tuvo acceso a un facsímil del folio 15r, que hoy en día se encuentra disponible de forma digital, en la Biblioteca Nacional de España.

muro adosado al convento. La diferencia principal es la ausencia del crucero y la cúpula de proporción cuadrada sobre éste. La proporción de la torre de uno de los costados es mas pequeña que la indicada por Hontañon, y debió ser una adición posterior a los muros y contrafuertes. La nave y el presbiterio es poligonal, cuya combinación depende de la proporción entre la longitud y la anchura así como la forma del presbiterio. Kubler<sup>38</sup> da como medidas las siguientes: el ancho de la nave debe guardar una proporción de 1:5 con el largo, y cada brazo del crucero debería tener una profundidad de la mitad del ancho de la nave. Sin embargo, en la práctica la proporción entre el largo y el ancho en México fue de 1:4 o 1:4.5 y resulta de esta última la proporción del templo en Santiago Apóstol, con un largo de 51.04m (61varas) x 11.22m (14.4varas) de ancho, teniendo como resultado una proporción de 4.54.

Una diferencia es la posición de los contrafuertes, ya que en el caso de Santiago Apóstol están dispuestos a distintas distancias, y las pilastras del interior no son colineales a éstos. Lo anterior no preocupó a sus constructores ya que la proporción general se conserva.

Las diferencias entre la teoría española y la práctica virreinal, se debieron a la ausencia de cruceros en los templos de México. Ya que una nave continua con proporción 1:5 daba un volumen más grande<sup>39</sup>. Hontañon también dio proporciones para el diseño del presbiterio poligonal, que debía tener 12 unidades de ancho, en largo 3. Pero esta proporción dependía de la presencia del crucero, sin éste sus proporciones podían ser más flexibles. La forma más común del presbiterio es trapezoidal, con una gran cantidad de variaciones como menciona Kubler. La profundidad del presbiterio mide más de la mitad del ancho de la nave a partir del arco del presbiterio.

## El trazo de los contrafuertes

Los Contrafuertes del templo de Santiago Apóstol están formados por dos cuerpos, los cuales están dispuestos del lado norte del templo y en el presbiterio. Del lado sur parecen ser sustituidos por un engrosamiento.

El trazo al que corresponden los contrafuertes pudiera estar basado en la regla número 4 de Gil de Hontañon, que es aplicable para arcos apuntados, de medio punto y rebajados. El dibujo se basa en la línea del intradós sin considerar el espesor del arco haciendo mas sintética la regla<sup>40</sup>, ya que dada una altura de la clave, representada por un punto sobre la vertical que pasa por el arranque del arco, el estribo de cada uno de ellos se obtiene uniendo el punto medio de la curva de intradós con dicho punto (ver fig 2.13). En la figura 2.14

---

38 George Kubler *Opcit*, p.301

39 *Idem*.

40 Santiago Huerta. *op. cit*, p, 235.

se sobrepone dicho trazo con una sección transversal del templo y se observa como la dimensión del estribo coincide en gran medida con el templo. Aunque las bóvedas hayan sido construidas en el siglo XVIII, el claro no ha cambiado sustancialmente desde el trazo original de los muros. Es importante resaltar que del lado del convento no existen contrafuertes, por lo que los constructores aumentaban el grosor de dicho muro, que cumpliría la función de recibir el coceo de las bóvedas, y este engrosamiento responde a la misma proporción de los contrafuertes. En la planta de Santiago Apóstol se puede observar que cuando el grosor del muro se disminuye al acercarse al presbiterio, colocaron un contrafuerte.

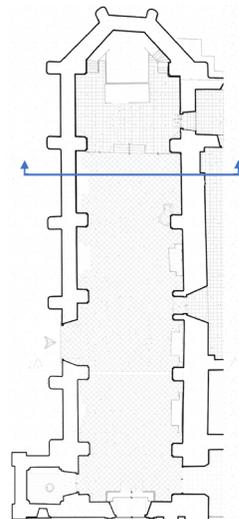


Fig. 2.12 Esquema del Templo, se ubica el corte A-A

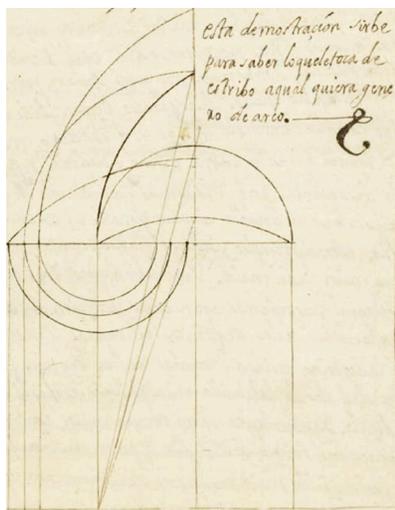


Fig. 2.13 Regla número cuatro Gil de Hontañol, fol. 59r del Compendio de arquitectura y simetría de los templos. El dibujo dice: "Esta demostración sirve para saber lo que le toca de estribo a cualquier genero de arco".

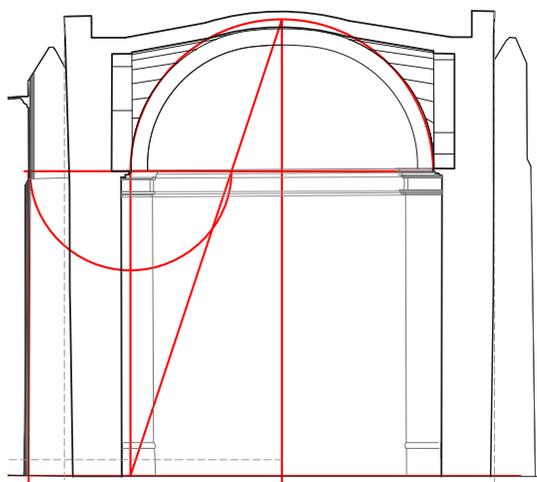


Fig. 2.14 Sección transversal del templo A-A, y sobre posición del Trazo de contrafuerte según la regla 4 de Hontañol. Esquema de elaboración propia.

## 2.4 Construcción de las bóvedas de lunetos del templo de Santiago Apóstol.

### Bóvedas de Lunetos

En el siglo XVII en Europa se consolida el sistema de techumbre abovedada clásico o renacentista<sup>41</sup>. El luneto apuntado, tiene su origen en un modelo del Quattrocento italiano. Se utiliza por primera vez en España en la cripta de la capilla del Palacio de Carlos V en Granada (1538 - 1542).

En los tratados aparece descrito por primera vez en el de Fray Lorenzo de San Nicolás en 1639, en su obra *Arte y Uso de Architectura*, (figura 2.15), que le da el nombre de luneta<sup>42</sup>. Justifica el nombre de luneto capialzado por ser “*más alto por una cabeza que por la otra*”, pero a continuación se refiere a ellos como «[...] *estos lunetos capialzados, apuntados o de aristas*”, que describe en el capítulo LVII donde «*Trata de la forma de traçar, y labrar las lunetas*»<sup>43</sup>. En el tratado Fray Lorenzo, omite la planta, coloca los dos alzados uno al lado del otro (ver fig 2.17).

Las bóvedas de cañon con lunetos fueron utilizados en la Nueva España hasta las primeras décadas del siglo XVII. En la catedral metropolitana se encuentran presentes a partir de 1651 en la nave mayor construida por Claudio de Arciniega. A partir de entonces sería la bóveda mas utilizada para cubrir templos en los siglos XVII y XVIII.<sup>44</sup>

Su característica principal es que brindan mayor iluminación al templo, permitiendo tener ventanas a nivel de las impostas a partir de intersecciones en la bóveda de cañon, por lo que suelen tener ventanas en cada luneto.

Como se mencionó anteriormente, las bóvedas en el templo de Santiago Apóstol son de lunetos y fueron construidas a principios del siglo XVIII. En Jiutepec hay 4 lunetos que no actualmente no tienen



Fig. 2.15 Portada del tratado, Arte y Uso de arquitectura. De Fray Lorenzo de San Nicolás. 1639.



Fig. 2.16 Portada del tratado, Arte y Uso de arquitectura. De Fray Lorenzo de San Nicolás.

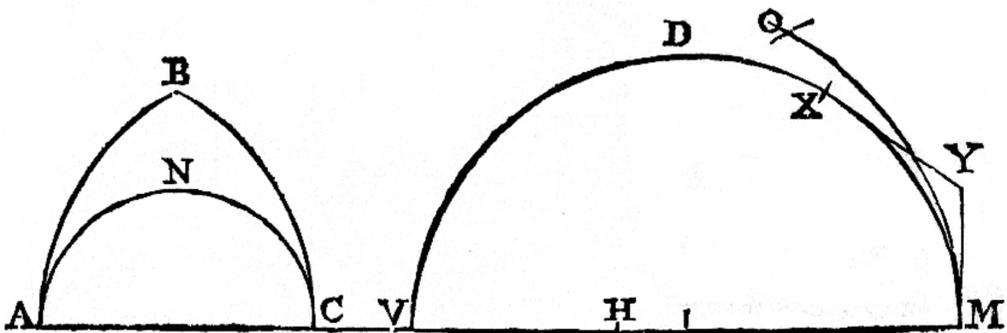


Fig. 2.17 Trazo de Fray Lorenzo de San Nicolás para describir la simplificación de la cimbra para lunetos. p.104r

41 *Ibidem* p. 239

42 Fray Lorenzo de San Nicolás, 1639, *Arte y Uso de Architectura* Primer tomo p. 103r.

43 *Idem*.

44 Cortés Rocha El clacisismo.... *Op cit*, p. 239

ventana, el par sobre el coro, uno frente a la escalera que sube a las bóvedas, y la que fue tapiada cerca del presbiterio. Los lunetos tienen una proporción distinta a los mostrados por Fray Lorenzo, ya que son de  $L/3$  (un tercio de la luz de la bóveda), y su ancho es bastante grande siendo de 7.3m, a diferencia de lo indicado por Fray Lorenzo que considera conveniente que la luneta tuviese de luz la mitad de la luz de la bóveda ( $2/L$  ver figura 2.19), en las bóvedas de Santiago Apóstol el único par de lunetos que siguen esta proporción son los que se encuentran sobre el coro (ver fig 2.18). Es decir que los lunetos tienen dimensiones considerables que se acercan a los de una bóveda de arista. Esta puede ser una característica del uso de los lunetos en la Nueva España.

Geoméricamente cada luneto se genera como una superficie definida por la intersección de planos verticales trazados en planta con la bóveda de cañón de directriz circular, la curva resultante debe subdividirse y unirse por medio de generatrices usualmente rectas que forman una superficie de doble curvatura denominada conoide<sup>45</sup>.

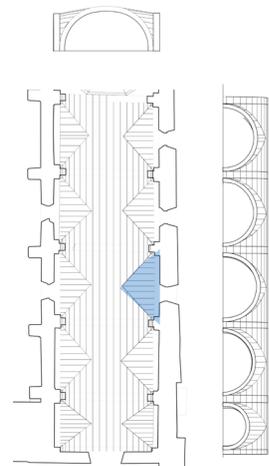


Fig. 2.18 Montea de las bóvedas de lunetos a nivel de impostas del templo de Jiutepec. Elaboración propia.

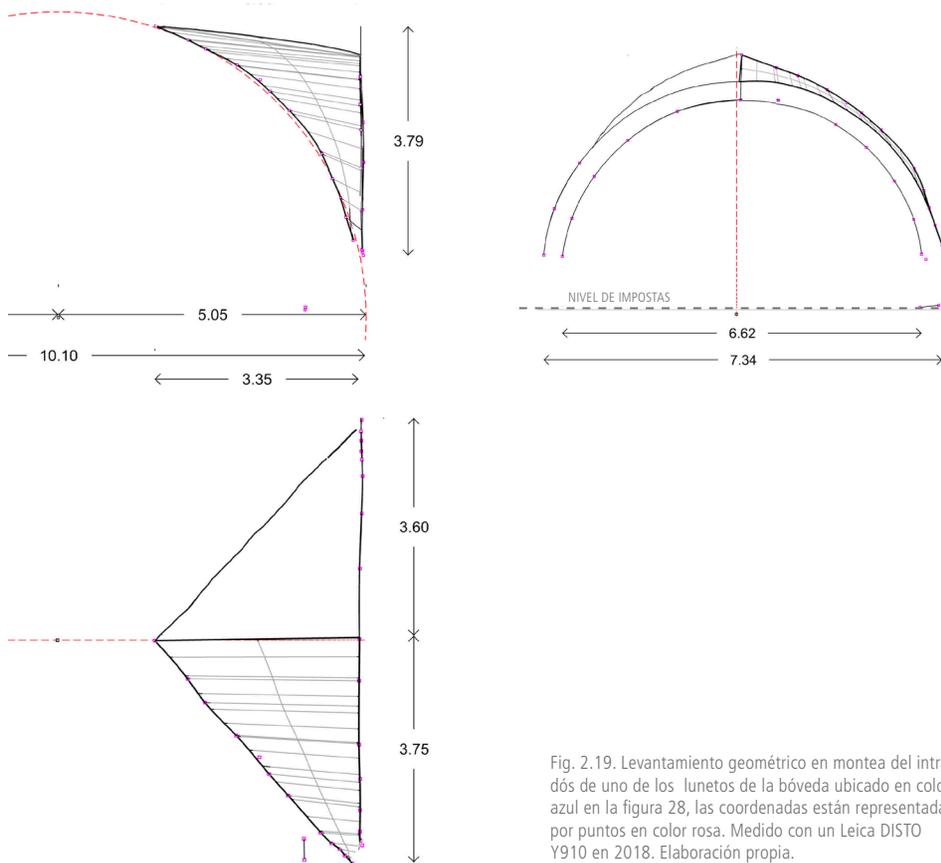
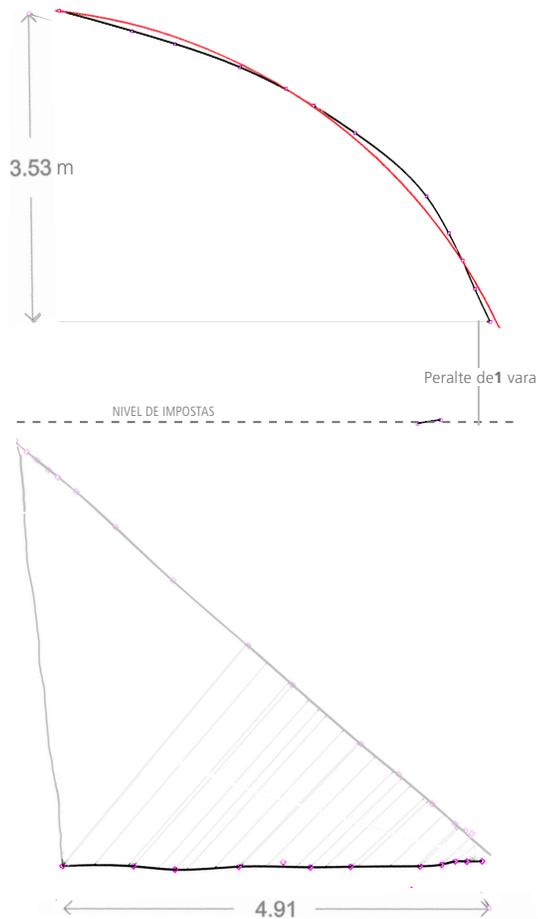


Fig. 2.19 Levantamiento geométrico en montea del intradós de uno de los lunetos de la bóveda ubicado en color azul en la figura 28, las coordenadas están representadas por puntos en color rosa. Medido con un Leica DISTO Y910 en 2018. Elaboración propia.

45 Hernández, A. y López, C. 2017 Proyecto de corrección geométrica Catedral y Sagrario Metropolitanos p.78 y p. 185

Fig. 2.20. Comparación del perfil teórico de la cimbra de Fray Lorenzo (color rojo) y la geometría real en verdadera forma y magnitud de la arista del luneto.



La intersección de cilindros de diferente radio presenta un problema geométrico, y de esta forma se evitaba, pero ahora el resultado de la intersección entre un plano inclinado y el cilindro es una elipse, y el trazo de una cimbra en forma de una elipse resulta poco práctico en la construcción, sobre todo por el control geométrico que requiere. De tal manera que el procedimiento de Fray Lorenzo se resolvía simplificando la intersección al definir una cimbra como sección de arco circular descrita en la figura 2.17.

Al comparar la geometría real con la plantilla de Fray Lorenzo aplicándola al mismo luneto (Fig. 2.20), observamos que coinciden aproximadamente en su longitud, y en su forma general. Estas variaciones resultan de las deformaciones y vicisitudes que ha tenido la nave del templo desde su construcción, esta coincidencia nos lleva suponer que se utilizó una regla similar para nuestro caso de estudio. Otra característica que podemos observar al analizar la geometría real, es que los constructores levantaron el centro de la circunferencia que define al luneto sobre el nivel de impostas, por lo que el arranque de los lunetos se encuentra a una vara de distancia sobre el

nivel de impostas, a esta situación se le puede denominar peralte<sup>46</sup>, que aplicaban los constructores cuando las cornisas de las impostas eran prominentes, o se sitúan muy elevadas, el peralte permite percibir el inicio y el final de cada luneto desde el punto de vista del observador a nivel de feligresía. Esta práctica refleja una intención de los constructores y una maestría del proyecto arquitectónico. De la misma forma la bóveda podía tener peralte, sin embargo resulta mas complicado determinar su altura por las deformaciones que tiene, como se verá en el siguiente capítulo.

En la figura 2.21 podemos observar los cinco pares de lunetos que conforman la bóveda, partiendo de los arcos formeros en ambos muros. La bóveda comienza con el primer arco fajón en el muro que soporta el hastial de la fachada principal y termina en el otro extremo donde se interrumpe con el arco triunfal, que es compartido como directriz de la bóveda y como soporte de la cúpula que remata sobre el presbiterio. De esta última hablaremos en la siguiente sección.

Hasta ahora solo se han abordado las bóvedas por el intradós, para poder entender su construcción y funcionamiento a continuación se analizará el proceso constructivo y el extradós de la bóveda.



Fig. 2.21. Vista de lunetos a nivel de feligresía. Templo de Santiago Apóstol, 2017.

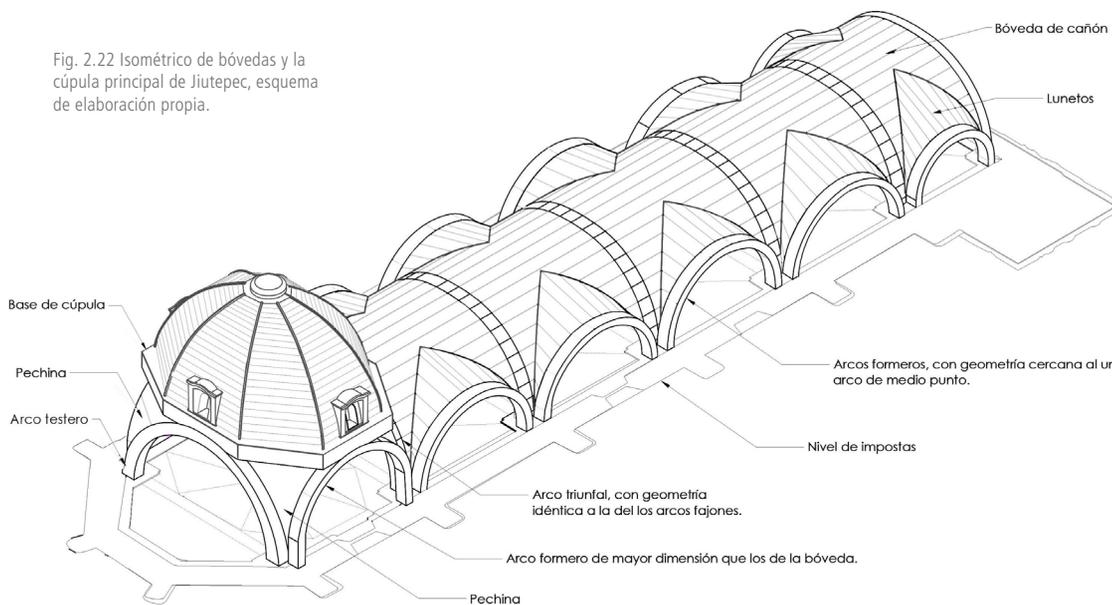


Fig. 2.22 Isométrico de bóvedas y la cúpula principal de Jiutepec, esquema de elaboración propia.

46 Ros Ana Guerra Pestonit, 2012. Tesis doctoral, Bóvedas y contrarresto del colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos. Escuela Técnica Superior de Arquitectura p. 336



Fig. 2.23 Pilastra separada de muro del templo. Fotografía del autor 2018.

## Proceso constructivo

El primer paso para la construcción de las bóvedas del templo fue la preparación del desplante de las mismas, y esto debió comenzar con la construcción de las pilastras. Las pilastras están compuestas de grandes bloques de tezontle labrado, pegado con un mortero de cal y arena con gruesas juntas. Tienen un aplanado de 4 cm de espesor de cal arena, y pintura mural. El remate de las pilastras es de tabique rojo, formando las molduras a nivel de las impostas de los arcos. Aunque dichas pilastras parecen estar unidas a los muros, no existe una ligazón mecánica entre las pilastras y estos, ya que solo se encuentran adosados. Aún cuando pudieran compartir algunos sillarejos, fueron construidos en periodos diferentes y como se vio anteriormente su disposición no coincide con los contrafuertes que fueron construidos junto con los muros en una etapa anterior.

La siguiente etapa consistió en el cimbrado, utilizando madera de la región para su construcción. Los lunetos, como vimos, son de dimensiones bastante considerables al tener un radio de más de un tercio del claro (12 varas) a cubrir, que van desde 5m ( 6 varas) a 8m (9.5 varas). El primer paso debió ser la colocación de una cimbra apoyada sobre las pilastras para poder realizar la construcción de los arcos formeros y fajones. Gracias a lo anterior se pudo construir por partes, probablemente comenzando por el presbiterio desplazando la cimbra para construir los arcos y la bóveda. Para la cimbra de los lunetos se utilizó una simplificación del perfil como la descrita por Fray Lorenzo.

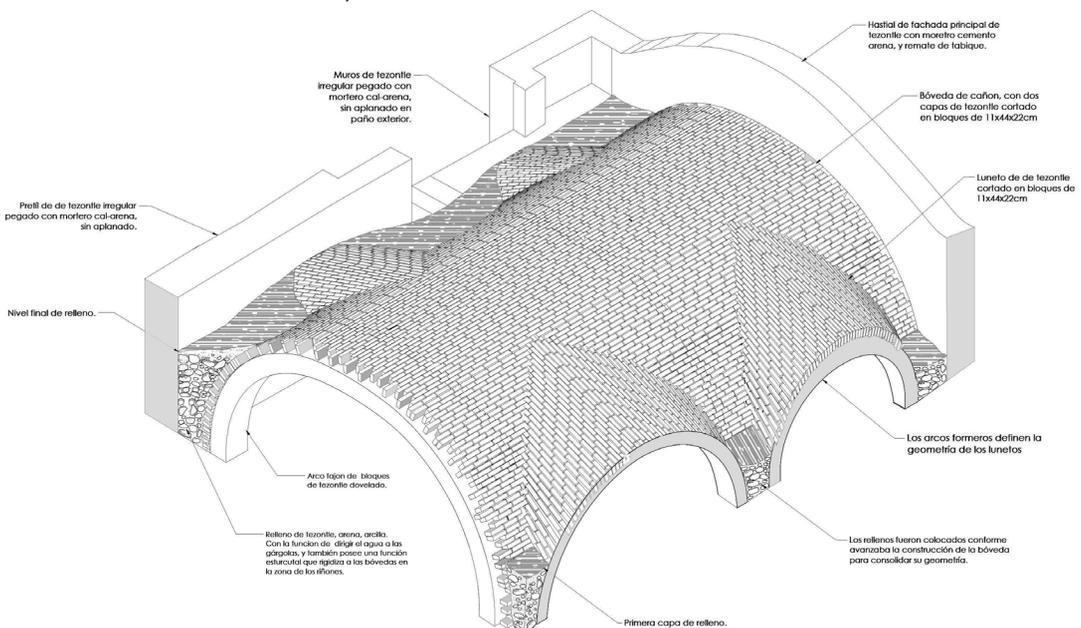


Fig. 2.4 Esquema constructivo de las bóvedas de lunetos de Jiutepec, hipótesis de la composición de los rellenos, esquema de elaboración propia.

Los arcos fajones están hechos de tezontle labrado burdamente con piezas grandes que asemejan dovelas, con gruesas juntas de mortero con pequeñas piedrecillas de tezontle para absorber las irregularidades entre las diferentes piedras. Algunas de estas dovelas de tezontle se comparten con la bóveda a cada 40 o 50 cm como se muestra en la figura 2.26, logrando así una pequeña ligazón entre la bóveda y los arcos.

Las bóvedas del templo están constituidas por tezontle oscuro labrado a manera de sillarejos de 46cm x 15cm x 20cm en dos capas. La estereotomía de la bóveda está definida por su geometría expresada por la cimbra. Como ya describimos, es una bóveda de cañón con lunetos y sus hiladas siguen en gran medida dicha geometría. El relleno de la bóveda constituye una parte esencial para la estabilidad de la misma<sup>47</sup>. Éste se colocaba generalmente en dos partes, el primer tercio<sup>48</sup> era de un relleno firme, usualmente de la mismo material y calidad que la bóveda, la segunda parte del relleno podía ser producto de demoliciones, o inclusive de tierra, hasta llegar a una altura de dos terceras partes de la altura de la bóveda, ver figura 2.24.

La función práctica que tiene el trasdós de la cubierta es conducir el agua hacia las gárgolas en los contrafuertes. Debió tener una impermeabilización que requería de mantenimiento con cierta frecuencia. En el trasdós y sobre el relleno las bóvedas tienen un enladrillado que debió ser añadido en el siglo XX. Finalmente tiene una capa de impermeabilizante plástico que representa un problema ya que no permite la transpiración del material.



Fig 2.25 Sillarejos de tezontle del intradós de la bóveda 2018.



Fig 2.26. Dovelas comunes a bóveda y arco fajón, solo visibles por el colapso del mismo. Foto 2019 fotografía propia.

47 Santiago Huerta. *op.cit*, p, 249.

48 Fray Lorenzo de San Nicolás, *op.cit* capítulo LII. Escribe: "y así como vayas tabicando, la iras doblando y macizando las embedaduras hasta el primer tercio, y esto ha de ser en todas las bobedas, echando sus lenguetas a trechos, que levantan el otro tercio para que así reciban todo el empujo ò peso de la bobeda"

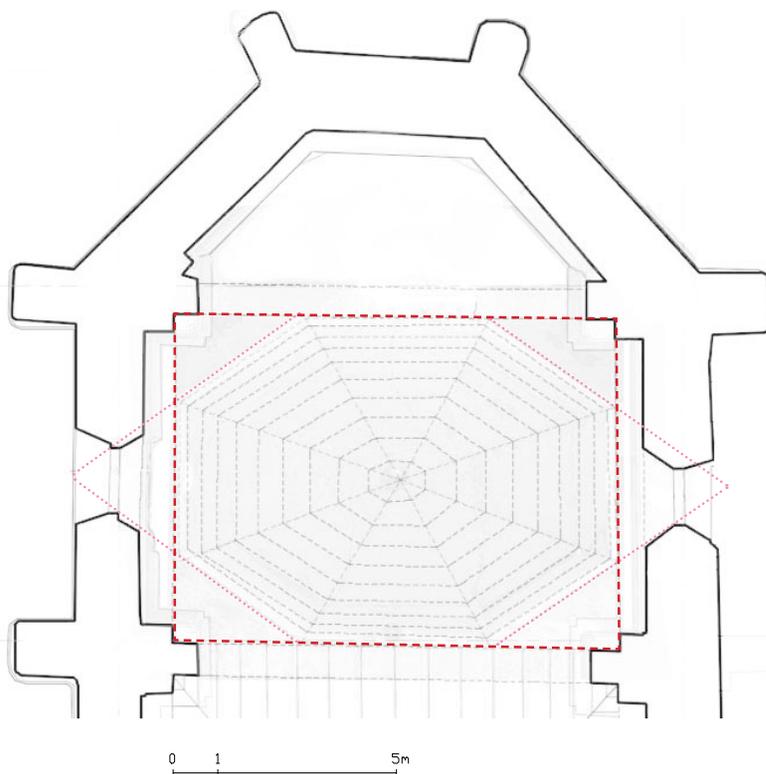
## 2.5 Trazo y construcción de la cúpula octagonal de Santiago Apóstol

### El trazo

Las construcciones con cúpula fueron poco usuales durante el siglo XVI en la Nueva España, ya que se contaba con constructores poco experimentados para ésta tarea. Sin embargo, para el siglo XVIII se encontraba en auge la construcción de cúpulas de diversa índole sobre los templos, octagonales, semiesféricas, con tambor, sin tambor, entre otras variantes. A diferencia de su contraparte europea, donde las cúpulas suelen colocarse en el trancpto sobre un cimborrio o tambor, en la Nueva España sobre los templos del siglo XVI carentes de crucero su ubicación era elegida cerca del presbiterio o inclusive sobre éste.

La cúpula de Santiago Apóstol construida sobre el presbiterio es muy particular, es octagonal, carece de tambor, con linterna ciega y cada uno de los gajos está formado por generatrices rectas, lo que mas llama la atención es que su desplante no es un octágono regular, ya que se encuentra elongado transversalmente, debido a que el espacio a cubrir en el presbiterio corresponde a un rectángulo, como se muestra en la figura 2.27.

Fig. 2.27. Planta a nivel de impostas, zona del presbiterio, medido en 2018. Plano de elaboración propia. La línea punteada roja es el espacio cubierto por la cúpula.



Al analizar el trazo de la cúpula en planta, surge la hipótesis que su desplante puede corresponder a un octágono inscrito en un óvalo subdividido. El trazo del óvalo era conocido desde Sebastián Serlio<sup>49</sup> en 1571, ver figura 2.28-2.29. Este mismo trazo se encuentra presente en el convento en la arcada del claustro alto. El trazo de los arcos se realizó siguiendo tres centros. En la fig. 2.30 se sigue el mismo procedimiento sobre la planta de la cúpula, corroborando que los vértices del octágono coinciden aproximadamente con el borde del óvalo. La intersección de los tres círculos del mismo diámetro unidos al centro geométrico tienen como resultado la subdivisión de un octágono, comprobando así que la hipótesis resulta plausible.

Sin embargo la subdivisión en gajos de la cúpula tiene diferentes proporciones en los extremos. Es posible que la subdivisión de los extremos fuera a manera de ochavado, ya que como vemos en la figura 2.27, el trazo que resulta de extender los lados del ochave coinciden parcialmente con los vanos del derrame de las ventanas, a excepción del lado derecho, que no es del todo representativo ya que hay claros indicios de que las ventanas sobre el muro adosado al convento, sufrieron grandes modificaciones.

Otro fenómeno que se observa es que cada lado de la cúpula tiene una dimensión distinta, hecho que no es de extrañar ya que las medidas de los lados del rectángulo sobre el que se desplanta la cúpula varían. Estas diferencias en las medidas siempre fueron resueltas por medio de ajustes realizados por los constructores y dichas discrepancias en medidas solo son visibles hasta hoy en día que realizamos una medición precisa. Como se comentó anteriormente, el sistema de medidas de los constructores era en varas con sus subdivisiones y nosotros al medirlo utilizamos decimales, es decir una precisión mayor que no fue necesaria para su construcción.



Fig. 2.28 Portada del Tercero y Cuarto libro de Arquitectura, de Sebastián Serlio, traducido por Francisco de Villalpando, Toledo, 1552.

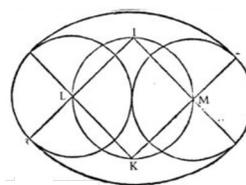


Fig. 2.29 Trazo de un óvalo según Sebastián Serlio en el Tercero y Cuarto libro de Arquitectura. 1552.

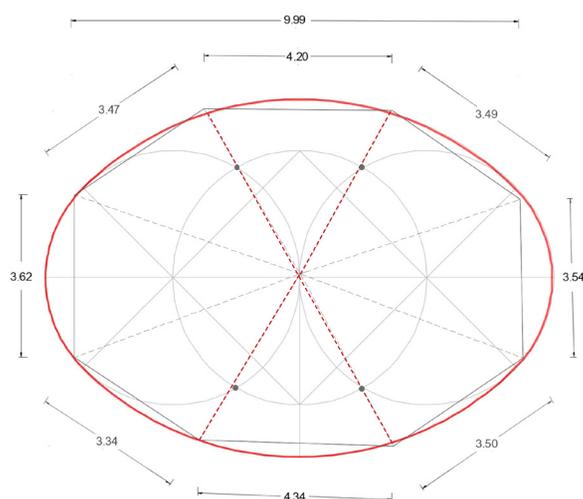
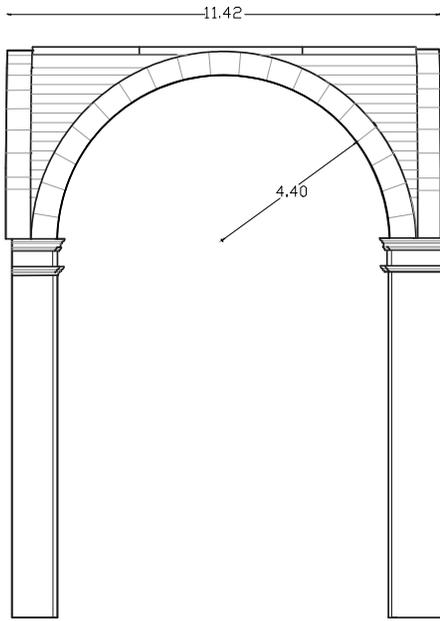
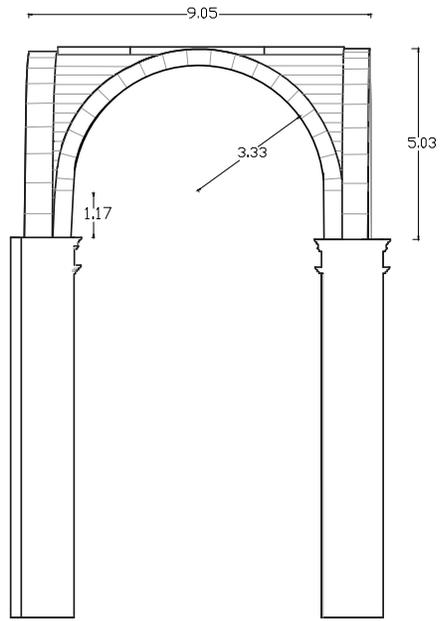


Fig. 2.30 Trazo de un óvalo (color rojo) siguiendo el trazo descrito por Sebastián Serio sobrepuesto a la planta del desplante de la cúpula.

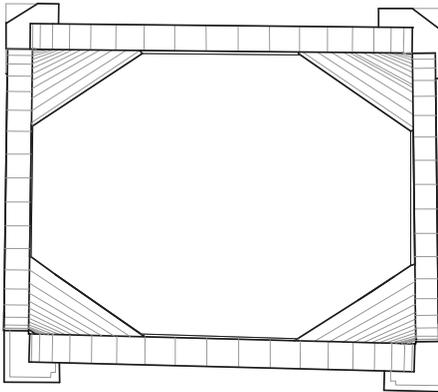
49 Serlio Bolognese, Sebastiano. Tercero y Cuarto Libro de Arquitectura. 1584. Reglas Generales de Arquitectura. Tratado, Editorial Alta Fulla. Barcelona 1990.



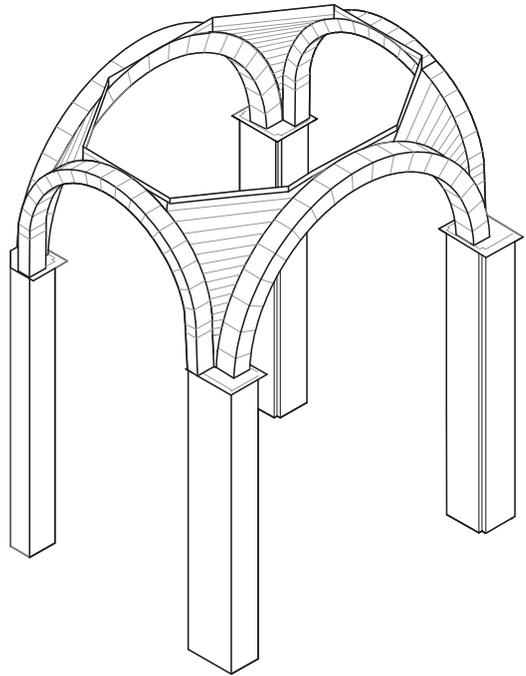
FRONTAL



LATERAL



PLANTA



ISOMÉTRICO

Fig. 2.31 Montea del sistema de apoyos de la cúpula octogonal de Jiutepec. Esquema de elaboración propia.

La figura 2.31 muestra la geometría de los apoyos y desplante de la cúpula. Las pilastras definen la posición de los arcos que soportan a la cúpula que en planta forman el rectángulo, el par de arcos formeros tienen un peralte de vara y media, el testero y el triunfal tienen una dimensión un poco mayor a la de los arcos fajones en la bóveda de lunetos. Estos cuatro arcos elevan el desplante de la cúpula al nivel del trasdós de la bóveda de lunetos a (15.65m sobre el nivel de feligresía). Sobre estos 4 arcos se desplantan las pechinas. Las pechinas se implementan para resolver la transición entre una planta cuadrangular y una circular, y típicamente están conformadas por una porción de esfera. En cambio, a la transición de una planta cuadrangular a una cúpula octagonal se le denomina trompa, normalmente siendo una sección de cono. Sin embargo, su función es la misma. En el caso de Santiago Apóstol, la transición al octágono es a través de la superficie que se forman entre los arcos a manera de secciones rectas de cilindro. Sobre las pechinas existe un basamento también octagonal del que desplanta la cúpula.

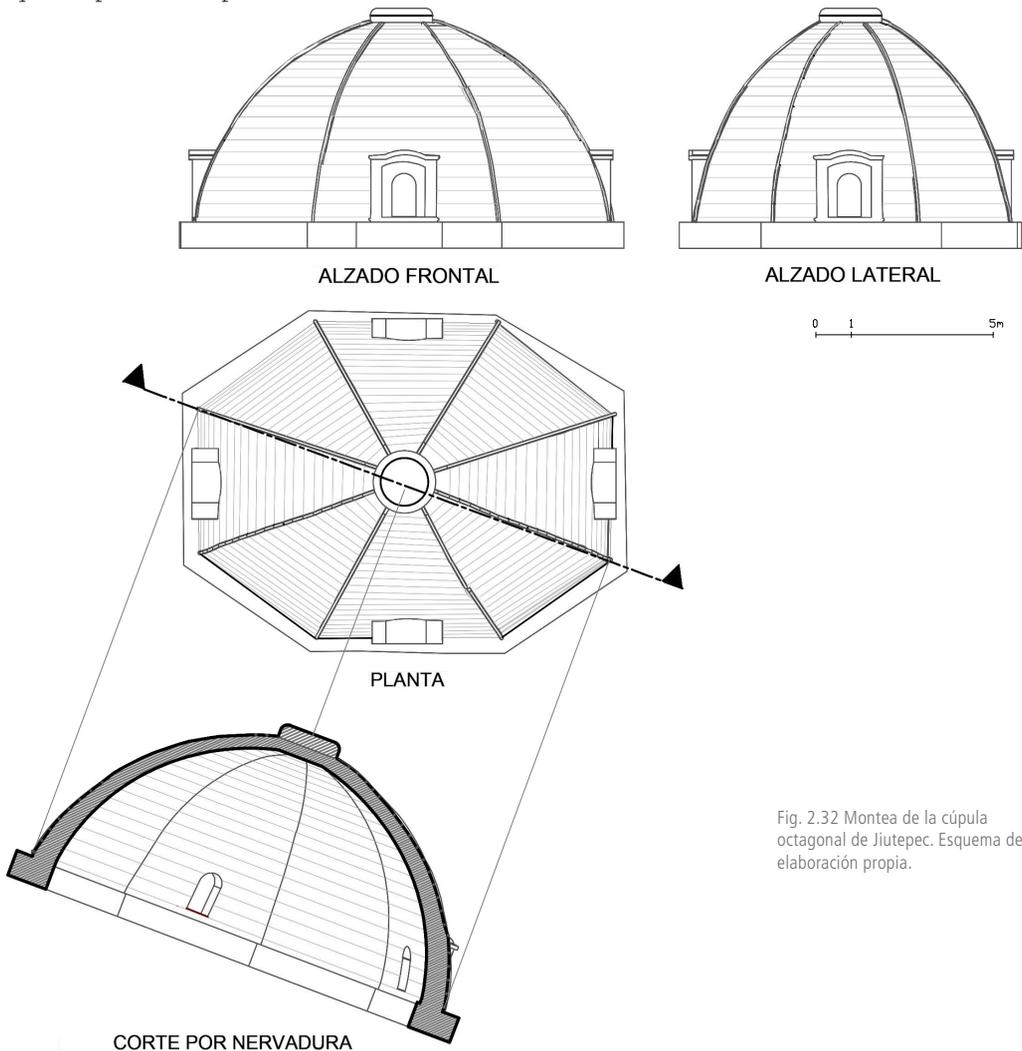


Fig. 2.32 Montea de la cúpula octagonal de Jiutepec. Esquema de elaboración propia.

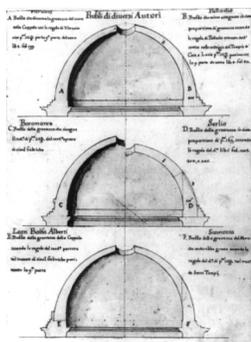


Fig. 2.33 Comparación cúpulas tomadas de: A, Vitruvio; B, Palladio; C, Bramante; D, Serlio; E, Alberti y F, Samozzi. (Fontana 1673).

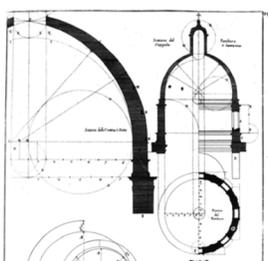


Fig. 2.34 Regla de Carlo Fontana para el proyecto de las cúpulas «simples», de una sola hoja. 1694.

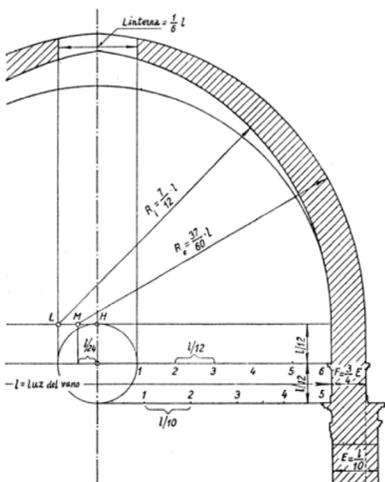


Fig. 2.35 Regla de Fontana, 1694. Interpretación de Straub 1949.

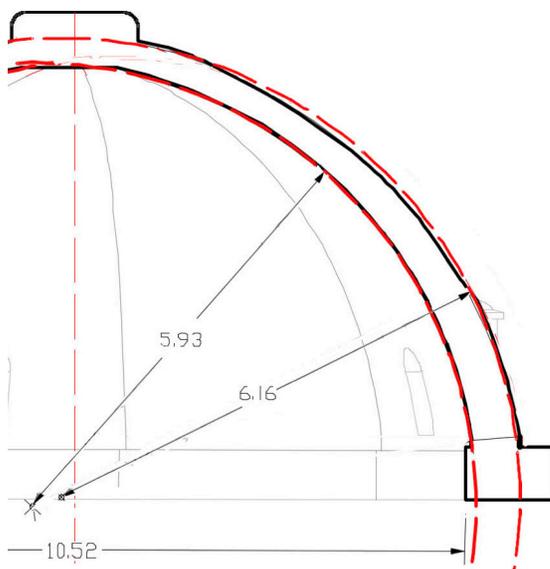


Fig. 2.36 Análisis del trazo geométrico de la cúpula de Jiutepec, a partir de corte de la figura 2.32, esquema de elaboración propia.

Carlo Fontana fue uno de los arquitectos italianos que más analizó cúpulas durante el siglo XVII,<sup>50</sup> como se ve en la figura 2.33 donde busca una regla para obtener el espesor de la cúpula en el arranque, comparando a diferentes tratadistas, y define sus reglas geométricas, dividiéndolas en cúpulas dobles y cúpulas simples, nos ocuparemos de estas últimas (ver figura 2.34-35). En el proyecto para cúpulas de una sola hoja se describe una serie de trazos geométricos donde los centros son determinados por fracciones simples de las dimensiones principales, como la luz de la cúpula. De esta forma se definen las dimensiones de la linternilla, así como la sección variable de la cúpula. No hay seguridad de que en la Nueva España se utilizara la regla de Fontana antes descrita, sin embargo, es evidente que las estructuras construidas responden a reglas similares que se utilizaron. De la misma forma que los tratadistas intentaban derivar de las obras construidas por los romanos reglas generales, ahora buscamos reglas que puedan aplicarse a nuestras construcciones independientemente del tamaño de la cúpula.

Se aplicó el procedimiento descrito por Fontana de la figura 2.34 y se procedió a analizar el alzado de la cúpula por medio de una comparación de un corte colineal a las nervaduras como se muestra en la figura 2.35-36. Al analizar el intradós se puede observar que éste fue trazado por medio de dos radios de aproximadamente 7 varas (5.93m), y constituye a su vez el eje de trazo para su construcción. Este mismo trazo puede repetirse para cada una de las nervaduras con distinto radio, pero forman el intradós de cada una de las aristas de la cúpula.

50 Santiago Huerta. *op.cit*, p. 266.





Fig 2.37. Intradós de la cúpula, hiladas horizontales visibles en uno de los gajos que coincide con las grietas horizontales. , foto 2018.

## La construcción de la cúpula octagonal

La adición de la cúpula sobre el presbiterio debe ser posterior a la bóveda. Se debieron construir los arcos formeros de mayor peralte, el testero y el triunfal. Posteriormente se construyeron las pechinas y una vez definido el trazo se debió hacer el basamento para recibir a la cúpula. Este basamento también tiene forma octogonal y en algunas partes tiene una altura de hasta 2 metros como sucede en el desplante sobre el relleno de las bóvedas.

La cúpula está formada por mampostería dovelada por el intradós e irregular por el trasdós, pegados con mortero cal-arcilla arena, con un espesor variable que va de los 60 cm en el desplante hasta los 38 cm en la parte alta (ver fig 2.43 ). Como vimos, su trazo regulador está definido por el intradós. Su geometría sigue una serie de hiladas horizontales a manera de generatrices de una sección cilíndrica de cada uno de los 8 gajos de la cúpula. Es posible que sigan dicho trazo gracias a que los sillarejos en el intradós son más regulares en sus dimensiones. Las nervaduras son solo decorativas ya que fueron una adición realizada para acentuar la forma geométrica (ver figura 2.42), están hechas de tezontle irregular con gruesas juntas de mortero sobrepuestas a las aristas en el extradós de la cúpula.

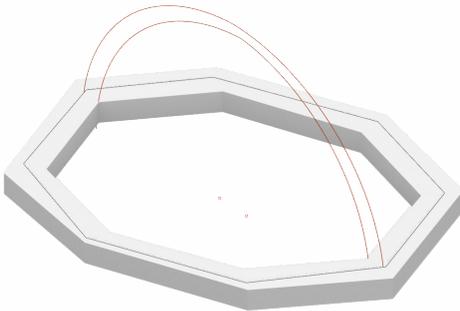


Fig. 2.38 Diretrices diagonales de cúpula de sección variable con dos centros, intradós y trasdós (de color rojo), a partir de trazo en planta. (esquemas de elaboración propia).

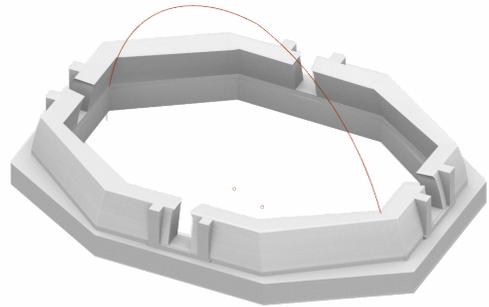


Fig. 2.39 Hiladas horizontales que siguen la geometría definida desde el intradós de la cúpula (línea roja)-Esquema de elaboración propia

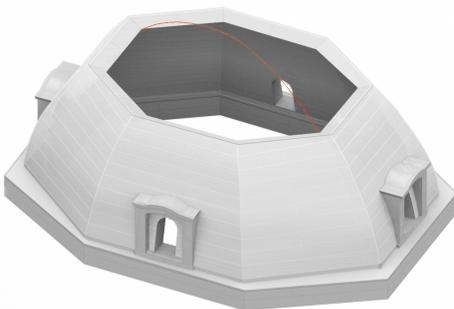


Fig. 2.40 Hiladas horizontales que siguen la geometría definida desde el intradós de la cúpula (línea roja)-Esquema de elaboración propia

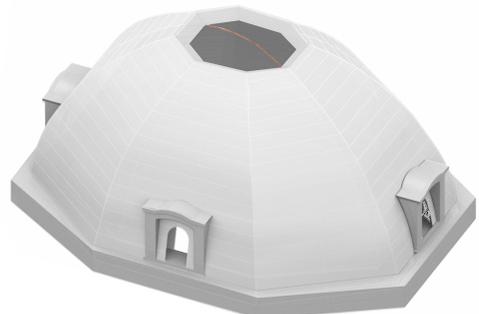


Fig. 2.41 Hiladas horizontales que siguen la geometría definida desde el intradós de la cúpula antes de colocar el basamento de la linterna- Esquema de elaboración propia.

Una hipótesis es que esta cúpula pudo haberse construido sin una cimbra, es decir únicamente con algunas guías y andamios para subir el material a una plataforma para que pudieran trabajar los constructores, se debieron formar anillos completos en cada hilada, hasta cerrar la clave. Alberti menciona que la cúpula poligonal es, en determinadas condiciones, autoportante y puede construirse sin cimbra<sup>51</sup>. Define una condición geométrica para que esto sea así: “Tambien podras levantar sin algunas cimbrias la boveda angular espherica, con tal que entretexeras por la grosseza de ella misma”.<sup>52</sup> Es evidente que al hacer una sección horizontal a cualquier altura de la cúpula no se podrá hallar ningún círculo inscrito en ella, sin embargo, un ovalo podría ser hallado. De la misma forma, para garantizar su estabilidad podemos imaginar que en cada hilada podría ser parte de una pirámide recta y por lo tanto ser estable (Ver figura 2.38 a 2.41).

Esta cúpula es ciega ya que la linternilla de ladrillo rojo recocido tiene un basamento que le proporciona mayor peso en esta zona dándole mayor estabilidad a una geometría basada en un arco apuntado<sup>53</sup>.



Fig. 2.42 Nervaduras adosadas a la cúpula, formadas por pequeñas piedras de tezontle. Foto 2018.

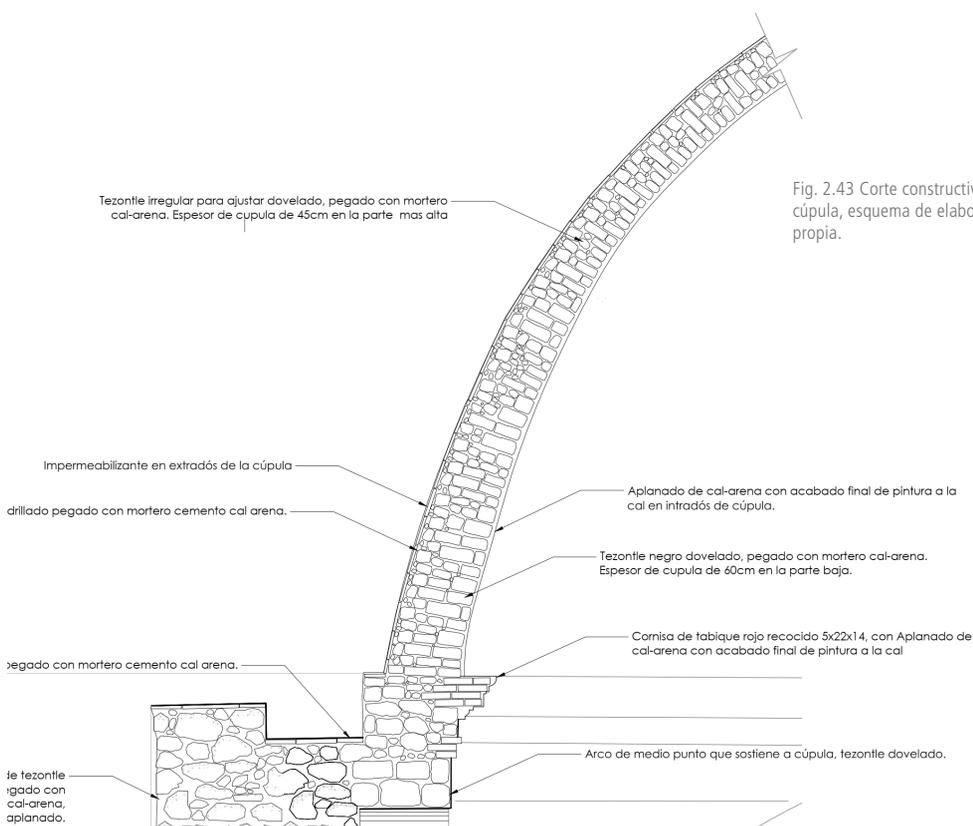


Fig. 2.43 Corte constructivo de la cúpula, esquema de elaboración propia.

51 *Idem.* p.186

52 Leon Battista Alberti, Libro tercero, p. 88 párrafo 15.

53 Santiago Huerta. *op.cit*, p, 101.

## 2.6 Características de la mampostería en la región.

La primera cuestión es, ¿A qué se le considera mampostería?, ya que esta denominación puede referirse a distintos tipos de material y también se le puede denominar fábrica. Se le conoce como mampostería al sistema de construcción que consiste en erigir estructuras mediante la colocación manual de los materiales que las componen (denominados mampuestos) que pueden ser desde tabiques hasta casi cualquier tipo de piedra, apilados o amontonados de forma ordenada, usualmente unidas mediante juntas de mortero o argamasa y pequeñas piedras.

Las características mecánicas de la mampostería como la resistencia y la rigidez no son tan relevantes como su geometría final, ya que es un material fundamentalmente unilateral, heterogéneo, anisótropo, y su comportamiento se puede simplificar por medio de modelos simples basados en la premisa de su trabajo único a compresión como se verá en el siguiente capítulo.

Los dos componentes principales de la mampostería son la piedra y el mortero. Aunque ya se ha descrito en el capítulo anterior el tipo de materiales que componen las fábricas del convento y templo de Santiago Apóstol, a continuación se ampliarán dichos conceptos así como los elementos particulares que los constituyen.

### Piedra

La región de Jiutepec se encuentra cerca del Eje Neo Volcánico transversal, se encuentra rodeado principalmente por rocas ígneas derivadas de la actividad volcánica. Las rocas más antiguas en el Eje Neovolcánico son las ígneas extrusivas de composición intermedia (andesitas) y datan posiblemente del Terciario Medio.

Los materiales que podemos encontrar en el conjunto conventual son la piedra caliza arenisca, basalto, utilizados con una disposición generalmente regular para definir esquinas de los vanos en jambas y algunos arcos. En menor proporción se utiliza el barro cocido en forma de ladrillos y tabiques que son una piedra artificial con una forma predefinida en el molde del cual están hechos, fueron utilizados para formar molduras y salvar los vanos formando arcos principalmente rebajados en ventanas. Sin embargo el material predominante es el tezontle, que es una roca ígnea extrusiva, piroelástica, de tonalidades rojizas, violáceas y negruzcas. El tezontle se caracteriza por su textura afanítica y su estructura vesicular, por lo que es una piedra porosa, ligera, y a la vez dura pero fácil de trabajar. En la construcción se encuentran presentes tres clases, el ligero rojo, el ligero negro y el borriqueño o pesado. De este material están constituidos todos los muros y bóvedas. Fue utilizado desde las primeras etapas del siglo XVI, hasta las últimas del siglo XVIII. Una apreciación interesante sobre el tezontle se encuentra en el manuscrito titulado "Arquitectura

## Mechanica” del Siglo XVIII:

El Divino material se llama el tezontle por lo que agarra, y así aunque los cortes de una Bóveda no vayan con aquella perfección del arte, son tolerables; no se dice por esto que las bóvedas que se hacen en México no tienen cortes por que se verá que esta imperfección la suplen los indios con hacer las piedras a manera de un Cucurucho muy largo, y macizando bien por arriba con ripio, tezontle y mezcla de suerte que vista una bóveda por arriba parece un puercoespín, por la trabazón de todas sus partes pero se debe creer y entender que llevan cortes.<sup>54</sup>

Es difícil precisar el origen de los mampuestos que constituye los paramentos de Santiago Apóstol. Es claro que están constituidos por tezontle, pero en algunos casos pudo haber sido material tomada de algún adoratorio indígena cercano a la construcción<sup>55</sup>, o inclusive sobre el cual esta desplantada la misma, ya que muy seguramente muchas de estas piedras son de procedencia prehispánica,<sup>56</sup> pueden identificarse puesto que la piedra fue labrada contra otra piedra y sin herramientas metálicas. Podemos suponer que se conservó la tradición constructiva así como los mismos materiales de la época prehispánica. Este reciclamiento de materiales ha sido una constante a lo largo de la historia de la construcción, donde se utiliza cascote que solía constituir a las edificaciones precedentes que pasa a formar parte de la nueva construcción, ésta situación está particularmente presente en las primeras etapas del SXVI. No es extraño encontrar que parte de la cimentación corresponde a un basamento de mampostería prehispánico y los muros se desplantan con piedra irregular con menor cuidado que en otros elementos constructivos.

En las etapas constructivas del siglo XVIII los sillarejos de tezontle son de muy buena labra, claramente definidos y cortados por herramientas metálicas que forman a las bóvedas, opuesto a la descripción del párrafo anterior que aplica para los muros y las bóvedas de labra irregular.



Fig 2.44. Espesor de la cúpula octagonal.



Fig 2.45. Medición de sillarejos colapsados



Fig 2.46. Medición del espesor de semicúpula.

54 Cortés Rocha, 2019 *Arquitectura Mecanica op. cit.* p.33

55 Existen vestigios arqueológicos en toda la zona aledaña al convento, al menos a 600m a la redonda.

56 Ledesma, Gallegos 2011, "Materiales y sistemas constructivos en dos fundaciones mendi-cantes de las faldas del Popocatepetl" *Monumentos Históricas*, no.23 p. 9

## Mortero



Fig 2.47. Sección de muro del claustro alto del convento de Jiutepec.

El mortero también llamado argamasa es una mezcla de compuestos que forman una pasta que se dispone entre los mampuestos y que les da cohesión, su principal característica es la adherencia que proporciona.

Se ha observado que los morteros empleados en esta región durante el Virreinato fueron los mismos que se usaron en la época prehispánica, compuestos de cal apagada, arena de tezontle rojo o negro y arcilla.<sup>57</sup> Esta situación no es la excepción en Jiutepec, donde podemos comprobar la presencia de arcilla, arena de tezontle y cal en menor proporción, lo anterior para los muros más antiguos. Parece existir un aumento progresivo de la cal para las últimas etapas constructivas en el siglo XVIII. Sin embargo, la utilización de arcilla en el mortero continuó, como atestigua el manuscrito del mismo siglo antes citado “*Mezcla terciada o de cimientos prudencialmente 2 cajones de Cal, 6 de Arena y 12 de tierra*”<sup>58</sup> Aunque la frase anterior describe de forma clara el mortero para la mampostería de la cimentación, constata que hasta ese siglo se continuaba utilizando la arcilla en la mezcla.



Fig 2.48. Mampostería del contrafuerte, con presencia de nódulos de cal.

La proporción de los agregados en algunos casos es de uno a uno, aunque en otros la arcilla aparece en mayor cantidad. En algunos morteros también se les adicionaba pomex o caliche<sup>59</sup> formando un carbonato de calcio y fortaleciéndolo. Sin embargo, el papel del mortero solo es de un aglutinante que permite unir y absorber las irregularidades entre las piedras que fueron burdamente labradas en los muros, de esta manera las primeras etapas constructivas predominaba el mortero con poca cal, utilizando arcilla como principal aglutinante. Los aditivos utilizados fueron en el mortero fueron el mucilago de nopal, en la actualidad aún se utiliza.

Para la realización de las bóvedas se utilizó un mortero con mayor contenido de cal, aunque en ningún caso este mortero proporciona un trabajo mecánico a tensión de la mampostería. Tampoco es posible garantizar la formación de un monolito. Ya que esencialmente la fábrica está compuesta por agregados heterogéneos que se separarán en cuanto exista un trabajo mecánico a tensión o un deterioro progresivo del mismo.

Los nodulos de cal que se observan en el mortero (figura 2.48) nos indica que la cal se introdujo de forma semi-apagada o como mortero de cal viva. Los áridos son los compuestos que ocupan la mayor cantidad de volumen en el mortero, por ejemplo, las arenas, gravilla, tierra, cenizas, polvo de ladrillo, entre otros, que son los componentes encargados de dar cuerpo al conjunto.

57 *Idem*, p. 7

58 Cortés Rocha, 2019 *Arquitectura Mecánica op. cit.* f. 5. p.33

59 Ledesma, Gallegos, *Materiales y sistemas...* op. cit. p. 8

## Valores de la mampostería

Las propiedades mecánicas pueden ser determinadas mediante ensayos, aunque en el inmueble hay presencia de varios materiales el principal material constructivo de Santiago Apóstol es el tezontle, por lo que sólo se incluyen las características mecánicas de dicho material.

La mampostería irregular de tezontle soporta esfuerzos bajos a la compresión (esfuerzo último  $40\text{kg/cm}^2$ ),<sup>60</sup> y prácticamente nulos a la tracción, su esfuerzo admisible o de diseño a compresión sería cercano a los  $20\text{kg/cm}^2$ , siendo un material poroso, ligero e irregular.

El peso volumétrico de este material es de  $1,400\text{kg/m}^3$ , y el mortero de cal-arena tiene un peso aproximado de 1.4 a  $1.5\text{ ton/m}^3$  con una resistencia a compresión de entre 5 y  $20\text{kg/cm}^3$ .<sup>61</sup> Por lo que en el análisis del capítulo próximo se utilizará el peso de  $1500\text{kg/m}^3$  para el cálculo.

Otros valores que no sean de compresión resultan irrelevantes ya que aunque exista una pequeña resistencia a tracción tanto de la piedra como del mortero, una vez constituidos como mampostería cuando se le aplica un esfuerzo de tracción ésta se rompe separándose usualmente por la trayectoria donde ya existen las juntas.

El tipo de pruebas realizadas a los materiales, típicamente se caracterizan como “destructivas” y “no destructivas”. Los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del material requieren de muestras extraídas de la edificación y conllevan un daño. En cambio las pruebas no destructivas no alteran ni dañan al edificio, sin embargo en una situación después de una catástrofe como la que ocurrió el 19 de Septiembre, las muestras son fáciles de obtener, y los aparejos son visibles sin necesidad de hacer una cala. Pese a esto realizar ensayos del material que ya colapsó puede arrojar resultados que no sean los que representen a la mampostería que se encuentre en mejor estado, por lo que los análisis mecánicos realizados a la mampostería deben tomarse con mucha cautela. Como se explicará en el siguiente capítulo “la resistencia no es una característica estructural relevante en el análisis estructural de las fábricas.”<sup>62</sup>

---

60 Meli, Roberto. (2000). Ingeniería estructural de los edificios históricos. Fundación ICA. p.32

61 *Idem*, p. 28

62 Santiago Huerta. *op.cit*, p, 29

## Capítulo 3 Análisis límite de las estructuras de mampostería.

En el análisis estructural se busca entender la respuesta de una estructura ante un sistema de cargas externo y su vinculación con el entorno, aunque las cargas pueden definirse con precisión, las condiciones de contorno de la estructura son desconocidas y no puede saberse la trayectoria real que siguen las cargas. Por lo anterior existe un alto grado de incertidumbre y esta respuesta hiperestática es la que predomina en la mampostería. ¿Cómo podemos analizar un problema así para que sea seguro un inmueble con estas características?

La teoría de estructuras se preocupa por determinar el estado de una estructura, es decir, conocer las resultantes de los esfuerzos internos para que estén en equilibrio con las fuerzas externas. Estas resultantes de esfuerzos internos producen deformaciones que pueden ser calculadas a partir de las propiedades del material, esto es de lo que se ocupa la resistencia de materiales, que es más un comportamiento local que global. Estas deformaciones internas conducen a desplazamientos de la estructura y podemos realizar tres afirmaciones de equilibrio cumpliendo las ecuaciones de la estática, propiedades del material y la compatibilidad de deformaciones<sup>63</sup>.

Sin embargo, desde el punto de vista de las estructuras de fábrica, la estabilidad quedará asegurada en primera instancia por su forma y solo muy secundariamente por la resistencia del material que lo compone<sup>64</sup>. El análisis límite de eso se encarga, ya que busca analizar la estabilidad general de la obra construida por medio de la trayectoria de las cargas dentro de la mampostería y su posición con respecto al contorno de su geometría. Por lo mencionado anteriormente, esta teoría va acorde con lo que los antiguos constructores buscaban “una proporción correcta”.

En este capítulo se analizará la bóveda de lunetos obteniendo sus líneas de empujes, a partir de una sección transversal del templo de Santiago Apóstol, también se analizará la cúpula octogonal. El análisis se realiza hasta la base de los contrafuertes, buscando comprobar la seguridad y el equilibrio general de la estructura por medio de la línea de empujes.

---

63 Jaques Heyman. Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica, vol. 2.

64 Jaques Heyman, El esqueleto de Piedra. 1995, p.36

### 3.1 Teoría del análisis límite y su implementación mediante la estática gráfica.

#### El Análisis Límite

Jaques Heyman desarrolló de 1966 a 1999 la teoría del Análisis Límite de estructuras de fábrica.<sup>65</sup> Es importante recordar que una teoría explica lo que sucedió, lo que está pasando, y permite predecir consecuencias que aun están por ocurrir, debe cumplir todo lo anterior forma satisfactoria.

Al comparar dos estructuras de mampostería, por ejemplo dos bóvedas de cañón, la primera constituida por piedra de mayor resistencia y un mortero de mayor “tenacidad” con respecto a la segunda, solo comparten la misma geometría, su comportamiento estructural es idéntico, ya que es inherente a todas las estructuras de mampostería. La única variable relevante es su forma general, es decir su geometría, por lo que cambio de ésta puede representar una configuración estable o una insegura. Ambas bóvedas, sin importar su procedencia, temporalidad o destino del inmueble, tendrán el mismo comportamiento estructural. Para comprender lo anterior es necesario asumir las siguientes 3 hipótesis:

- 1) no resiste tracciones<sup>66</sup>
- 2) la resistencia a compresión es infinita
- 3) el fallo por deslizamiento no es posible

La primera de las hipótesis se mantiene del lado de la seguridad ya que un bloque de piedra sí tiene una resistencia a tracción, aunque su valor es muy bajo y prácticamente nulo en las juntas, ya que el mortero tiene incluso menos resistencia a tracción que la piedra. La segunda hipótesis podría ir en contra de la seguridad, ya que la evidencia demuestra una gran variabilidad en la resistencia a compresión de diferentes morteros y piedras, sin embargo esta hipótesis permite entender que la seguridad de la fábrica no depende de su comportamiento mecánico de compresión, ya que los esfuerzos generados dentro de la fábrica son sumamente bajos. La tercera hipótesis también va en contra de la seguridad. Empero las fuerzas de rozamiento (fricción) son altas en las fábricas y los fenómenos de deslizamiento poco comunes. Este aspecto esta relacionado con la disposición de las juntas entre las piedras y debe vigilarse la inclinación de los empujes para que no sobrepasen el ángulo de rozamiento.

Esta teoría fue comprendida por el profesor emérito Fernando López Carmona que después de conocer a Heyman aplicó un enfoque análogo

<sup>65</sup> *Idem.* Heyman expone la teoría general del análisis límite para estructuras de fábrica.

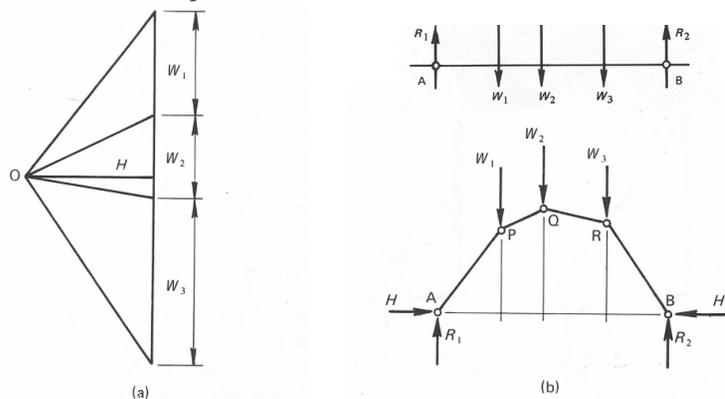
<sup>66</sup> En el reglamento de construcciones de la CDMX. No existe la palabra tracción, se utiliza únicamente la palabra “tensión” como sinónimo de estiramiento. Sin embargo la palabra tensión internacionalmente se refiere a lo que en México se le conoce como el “esfuerzo” al que está sometida una estructura.

en estructuras de mampostería. Carmona denominó “resistencia por forma” al papel preponderante que tiene la geometría sobre la estabilidad de la estructura, y designa como “la forma natural”<sup>67</sup> a aquella que se obtiene de un sistema de cargas y materiales que se encuentra definida por técnicas como el polígono funicular. El enfoque del equilibrio permite que el análisis límite pueda aplicarse en arcos por medio de una línea de empujes. Esta línea de empujes puede ser encontrada para cualquier otra estructura de mampostería. La implementación de la estática gráfica permite hallar dicha línea de empujes. Existen otros métodos, analíticos y gráficos como el de doble integración numérica,<sup>68</sup> sin embargo, nos concentraremos en el método del polígono funicular del sistema de cargas que a continuación se describirá.

### Estática gráfica

Los pesos propios de la estructura pueden ser representados como vectores con una escala acorde al dibujo y se obtienen mediante la división en bloques que corresponda a secciones de la estructura analizada. Mediante el polígono de fuerzas se ubica un polo que se une a cada una de las fuerzas y los ángulos que se forman resultan en un funicular del sistema de fuerzas. En la figura 3.1 se ilustra este procedimiento. Es posible manipular dicho sistema moviendo el polo de forma horizontal y vertical hasta obtener polígonos en equilibrio con las cargas que cumplan determinadas condiciones, hallando una solución de equilibrio que pueda explicar la transmisión de cargas dentro de la mampostería.

Fig. 3.1 Ejemplo de funicular sobre un arco, a la izquierda (a) se observa el polígono con polo en O (Heyman 1982, The masonry Arch p. 16).



El procedimiento antes descrito puede entenderse con la analogía de una cuerda sostenida en dos puntos, ésta adquiere la forma que le imponen las cargas verticales, colgando y formando una catenaria (al soportar su propio peso) en un estado de equilibrio de perfecta tracción. Al invertir la misma forma ahora representa un equilibrio a compresión pura, es decir un arco catenario (ver fig. 3.2). Robert

67 Carmona, F. L., Urbiola, X. G., Hernández, A., & San Martín, I. (2008). Fernando López Carmona arquitecto: 50 años de enseñanzas. FA. UNAM. p. 75

68 Este método fue utilizado ampliamente por Fernando López Carmona, y el funicular analítico resultante es idéntico al funicular obtenido de forma gráfica. Se aplicó sobre la sección de la catedral metropolitana de México.

Hooke fue el primero en advertir la relación entre una arco y una cadena colgante y en 1675 lo enunció de la siguiente forma “*como cuelga el hilo flexible, así pero invertido, se sostendrá el arco rígido*”.<sup>69</sup>

Puede existir un número infinito de líneas de empuje que pasan a través del material, pero están acotadas por la forma construida, ya que deben estar contenidos dentro de la fábrica. Con el polígono funicular puede obtenerse el empuje máximo y el mínimo. La importancia del análisis por medio de el polígono de fuerzas, radica en que se puede aplicar a geometrías no uniformes o deformadas, describiendo de forma geométrica la manera en que se transmiten las cargas.

### Grietas:

Gracias a la teoría de Heyman podemos comprender que el colapso de una estructura no se produce por falta de resistencia del material sino por la formación de un número suficiente de rótulas que convierten a la estructura en un mecanismo. De esta forma la rótula (o bisagra) corresponde al momento en el que la línea de empujes se acerca al borde de la sección produciendo tracciones que las juntas no pueden absorber por lo que la fábrica responde con una grieta. Esta teoría permite interpretar de forma clara y lógica los arcos de fábrica, donde la apertura de grietas es un comportamiento normal en respuesta a cualquier pequeño movimiento de sus apoyos. Este agrietamiento modifica la posición de la línea de empujes y por tanto el valor del empuje horizontal: si el movimiento es de apertura de la luz, adoptará el valor mínimo; si es de cierre, será el máximo como ilustra la figura 3.3. La línea de empujes real se encuentra entre estos dos valores extremos. Lo anterior es una forma de enunciar el teorema de la seguridad, que afirma que: **“mientras se encuentre una línea de empujes dentro de la fábrica, ésta será segura.”**

Esta última frase permite comprender toda la construcción histórica de la mampostería esencialmente como un problema geométrico; éste análisis límite corrobora las reglas de proporción de los antiguos constructores al llegar a las mismas consideraciones geométricas. Ellos entendían claramente dicha situación, sin tener nociones de mecánica o de un análisis estructural como tal. Como vimos en el segundo capítulo, a través de los tratados y manuscritos podemos constatar que la construcción tenía como base la geometría y la proporción de sus elementos: “Su seguridad depende de la estabilidad, y la estabilidad depende de la proporción”.<sup>70</sup>

Las rótulas típicas explicadas por Heyman son inocuas en un sentido estricto, ya que constituyen el común denominador de estas estructuras. Mientras existan 3 o menos rótulas la estructura es estable, y no representan un peligro, ya que son la manera en que el arco se adaptó a los pequeños movimientos y asentamientos.

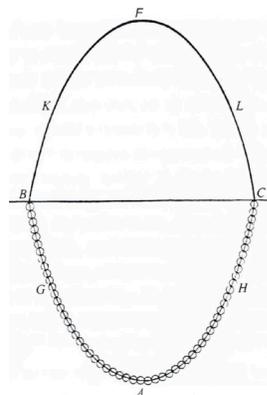


Fig. 3.2 La cadena colgante de Hooke (Heyman 1982, The stone skeleton p. 10).

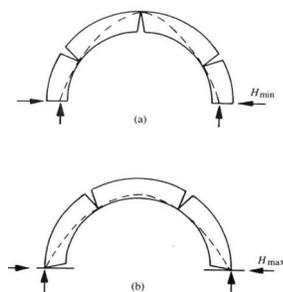


Fig. 3.3 Empujes máximos y mínimos del arco de medio punto sometidos a su peso propio peso, la línea punteada indica el funicular (Heyman 1999).

69 Heyman 1995. Teoría, historia... Op cit. . Vol. 1 p. 356  
70 Idem. p. 91

Fig. 3.4 Modelo de un arco de medio punto en yeso, realizada por S. Huerta. Fotos 2019.



a) Estado ideal del arco.



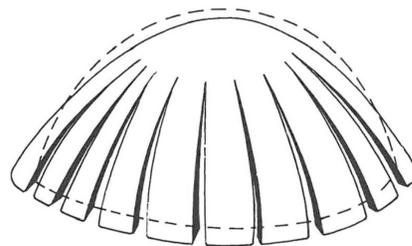
b) Apertura de la luz, induciendo mecanismo de 3 rotulas.

Se puede realizar un experimento sencillo que puede ser reproducido fácilmente con un modelo bidimensional o tridimensional de un arco dovelado. Como se muestra en la figura 3.4, en un arco hecho de bloques de yeso puede comprobarse que al realizar un movimiento de apertura en los apoyos aparecen las 3 grietas de forma prácticamente invariable.

### Cúpulas

Este mismo enfoque de análisis puede ser aplicado a otras estructuras de fábrica. En las cúpulas se desarrollan fuerzas anulares, en la parte superior son típicamente de compresión y la fábrica las puede absorber y la superficie de empujes se mantiene en la línea media a manera de un estado de membrana. Pero en la parte inferior (a partir de aproximadamente  $52^\circ$  para cúpulas semiesféricas sometidas a su peso propio, y más arriba si la clave está cargada por una linterna) se desarrollan tracciones que la fábrica no puede absorber y se produce un agrietamiento. Heyman ha establecido que pequeños hundimientos en los apoyos elevan las grietas hasta una colatitud de aproximadamente  $25^\circ$  en cúpulas con linterna.

Fig. 3.5 Esquema "exagerado" para ilustrar el agrietamiento de una cúpula (Heyman 1999).



En cuanto a las cúpulas poligonales<sup>71</sup> Heyman expone que pueden estar expuestas a esfuerzos excepcionales en las uniones donde usualmente existen las nervaduras, y esto causa su "naturaleza segmentada" es decir la cúpula naturalmente se divide en partes, ya sea por un sedimento de los apoyos, o por algún movimiento ligero.

<sup>71</sup> Jaques Heyman, El esqueleto.. *Op. cit.* 1995, p.43

El enfoque del equilibrio en cúpulas fue realizado por Poleni por primera vez en 1748 para analizar la cúpula de San Pedro en Roma. Llegó a la conclusión que las grietas transversales no comprometen considerablemente la estabilidad de la cúpula.<sup>72</sup> Es posible afirmar lo anterior ya que toda la superficie estará agrietada y en la zona agrietada no se transmiten fuerzas anulares puesto que los empujes siguen su trayectoria del mismo modo que en los arcos (ver figura 3.6).

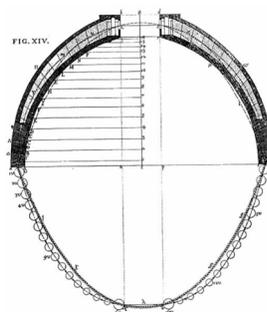


Fig. 3.6 Esquema "exagerado" para ilustrar el agrietamiento de una cúpula (Heyman 1999).

### Contrafuerte o Estribo

Los contrafuertes forman parte esencial del sistema de la estructura y su equilibrio debe analizarse globalmente. El razonamiento es el mismo que el realizado para arcos y bóvedas, si para un estado de cargas es posible encontrar una línea de empuje dentro de la sección de la fábrica la estructura es estable. Sin embargo, ¿cuál será el límite de esta seguridad?

El equilibrio de los estribos es sumamente delicado a diferencia de los arcos y bóvedas, ya que si falla una bóveda el resto de la estructura puede seguir en pie; si falla un contrafuerte el colapso es total, por lo que su estabilidad debe ser analizada con atención. Si la línea de empujes se acerca al extremo de la sección se corre el peligro de que se forme una rótula. La seguridad es un factor geométrico que cuantifica la distancia respecto a esa situación límite.

El coeficiente geométrico de seguridad ha sido buscado desde el siglo XIX. Rankine (1858) acuñó la expresión del coeficiente de seguridad de posición ( $q$ ) que limita la desviación de la línea de empujes del eje de la sección y lo expresa como una fracción del ancho de la sección. Santiago Huerta<sup>73</sup> ha propuesto otra formulación de este coeficiente que denomina  $c$  y que así se homogeniza con el utilizado por Heyman para arcos y bóvedas (valor de 2). Resulta del cociente entre la mitad del ancho de la sección ( $d/2$ ) y la desviación de la línea de empujes de su eje ( $x$ ) como se muestra en la figura 3.7, por lo que un coeficiente mayor a 2.5 es seguro.

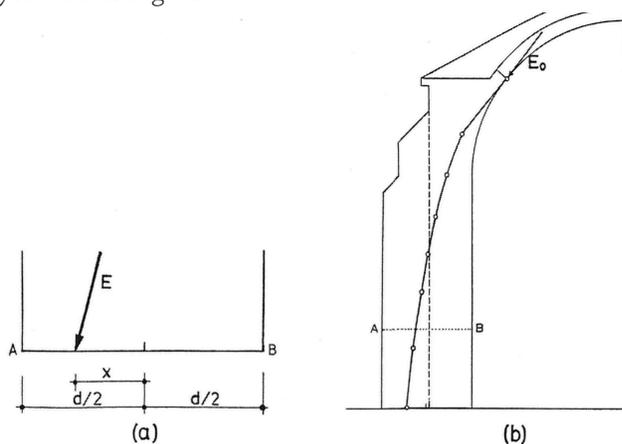


Fig. 3.7 Coeficiente geométrico de seguridad, propuesto por S. Huerta, en su libro Arcos, bóvedas y cúpulas.

72 *Ibidem.* p.44

73 Santiago Huerta. *op.cit.* p, 106.

### 3.2 Bóveda de lunetos, Templo de Santiago Apóstol

En este apartado se analiza la estabilidad de las bóvedas de lunetos a partir de la sección transversal del templo de Santiago Apóstol con el área tributaria de la figura 3.8. El primer paso es analizar su geometría. La sección transversal por los apoyos de la bóveda corresponde a la zona de rellenos donde la bóveda, arcos fajones y formeros se desplanta sobre las pilastras. Estas últimas no se encuentran al mismo nivel, ya que el eje B se encuentra 6 cm mas abajo que la pilastra del eje C. Existen desplomos diferidos que no superan el 3% en ambas pilastras, ver anexo A.

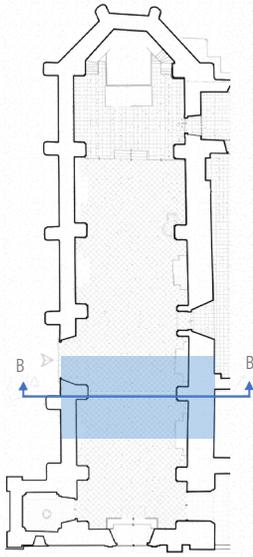


Fig. 3.8 Esquema del Templo con corte B-B', en color azul el área tributaria considerada.

Con el levantamiento geométrico, el perfil del intradós de la bóveda se definió con al menos 20 puntos, obteniendo sus coordenadas en el espacio (X, Y, Z) y proyectándolas de forma ortogonal para obtener la sección. La geometría del intradós del arco fajón se coloca de forma indicativa homologada a la de la bóveda, ya que solo se obtuvieron dos puntos cerca de los arranques para determinar su espesor. Sin embargo el arco fajón y pilastra del eje 14 fue medido con mayor detalle para comparar su geometría (figura 3.11). En la figura 3.9 se observa la sección B-B con los puntos que se obtuvieron directamente.

#### Deformación

A partir del dibujo con la geometría “real” se puede observar que la directriz de la bóveda asemeja a un óvalo más que a una circunferencia. Sin embargo, es posible interpretar dicha geometría como una deformación. Se observa que la porción de la bóveda desde su arranque hasta aproximadamente los  $46^\circ$  Y  $48^\circ$  en los ejes B y C respectivamente, mantiene una curvatura con un mismo radio

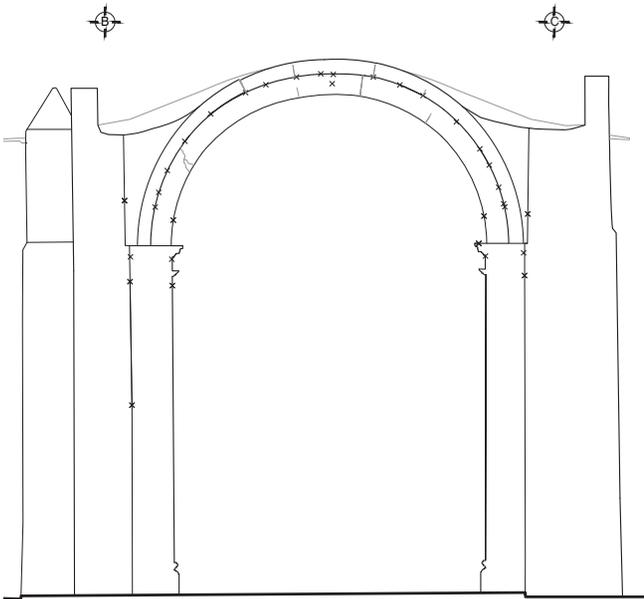


Fig. 3.9 Corte B-B. Medido 2018.

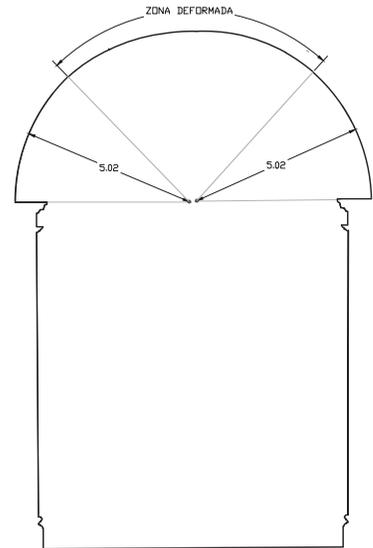


Fig. 3.10 Deformación de la bóveda por el intradós sin el arco fajón.

de 5.02m. A partir de allí existe una discontinuidad y la curvatura subsecuente no corresponde a un mismo centro. Este desplazamiento de los centros de circunferencia permite ubicar la zona deformada, como se muestra en la figura 3.10, donde se ilustra con el perfil del intradós de la bóveda y las pilastras, indicando el sector deformado.

La zona central de la bóveda se ha deformado en coincidencia con la presencia de grietas longitudinales, lo cual indica un desplazamiento horizontal de apertura en el arranque de las bóvedas que puede relacionarse con el desplome de los muros. A continuación se procederá a interpretar este mecanismo, pero antes se mencionará el origen de dicha interpretación.

Eugène Viollet-le-Duc en 1866 describe<sup>74</sup> por primera vez de forma gráfica el mecanismo de descenso de la clave y su relación directa con el incremento del claro. En la figura 3.12 se muestra un arco perpiño de una bóveda románica de 7m de claro y su deformación tipo carpanel con 7.40m de claro, existen dos curvas que unen a la rótula de la clave con la de los riñones (e y b) tanto del arco deformado de apariencia carpanel como la del arco de medio punto. Describen el desplazamiento de la posición original y la posición posterior a la deformación (e', b'), la longitud de las mismas no varía, solo cambian de posición rotando, descendiendo la clave y levantando los riñones. Sin embargo, Viollet-le-Duc no identifica con precisión la posición de los puntos de articulación (rótulas) en los riñones. No es sino hasta Heyman que identifica y explica su posición gracias a la línea de empujes como vimos en el apartado 3.1. Una aproximación mas precisa al mecanismo de deformación es la descrita por Huerta y López Manzanares<sup>75</sup> ilustrado en la figura 3.13 donde toman como rectas B y A y B' A', a manera de hipotenusas de triángulos, y de esta forma es posible relacionar sus ángulos con un desplazamiento que también se comprueba de forma analítica.

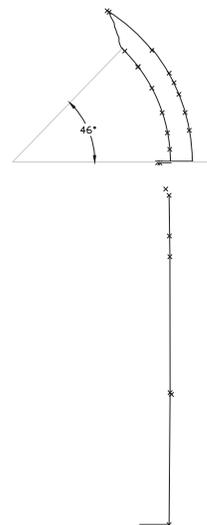


Fig. 3.11 Levantamiento geométrico de porción de arco fajón sobre el eje 14. Continúa en pie y sin deformar, conservando el radio de 5.02m.

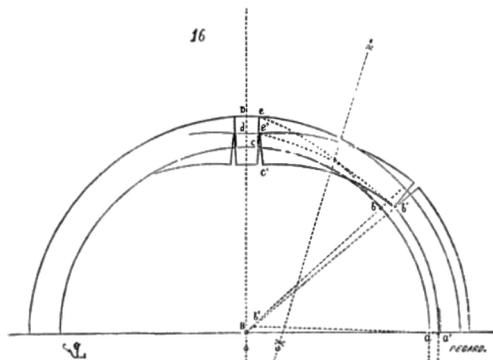


Fig. 3.12 Imagen de deformación de arco perpiño de medio punto dibujado por Viollet-le-Duc, 1866.

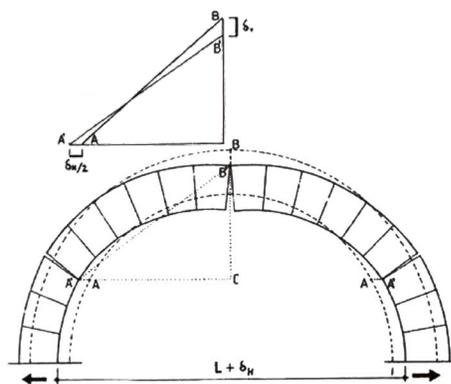


Fig. 3.13 Imagen de Huerta y López Manzanares 1996.

74 Viollet-le-Duc 1866. Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle, Edición publicada por el Instituto Juan de Herrera en 1996, p. 27-28

75 Santiago Huerta. *op.cit.*, p. 123

El primer paso para interpretar el mecanismo en nuestro caso de estudio es deducir la geometría teórica primigenia de la bóveda. Lo cual se realiza tomando en cuenta los radios de los sectores de arco sin deformar de la sección B-B y el radio de la bóveda inscrita en el muro de la fachada principal, que limitó sus deformaciones conservando una geometría clara, que muestra una generatriz de 5.02m (6varas) con centro a nivel de las impostas sin peralte alguno a diferencia de la directriz de los lunetos. En la figura 3.14 podemos ver ambos perfiles de la bóveda, el teórico y el real con un espesor de 42cm. Con una diferencia entre ambos de 14cm de descenso en la clave, al cambiar de una luz de 10.04m como directriz de medio punto, a una de 10.27m con directriz deformada. Aunque el perfil del intradós es el que fue medido, es posible dar un espesor a la bóveda y probar una solución de apertura y descenso que coincida con el espesor. Es así como se forman los triángulos descritos por Huerta, puede también encontrarse un centro instantáneo de rotación (CIR) a partir del cual rota la hipotenusa. De esta forma gráfica y sencilla se comprueba la hipótesis de mecanismo de apertura y descenso.

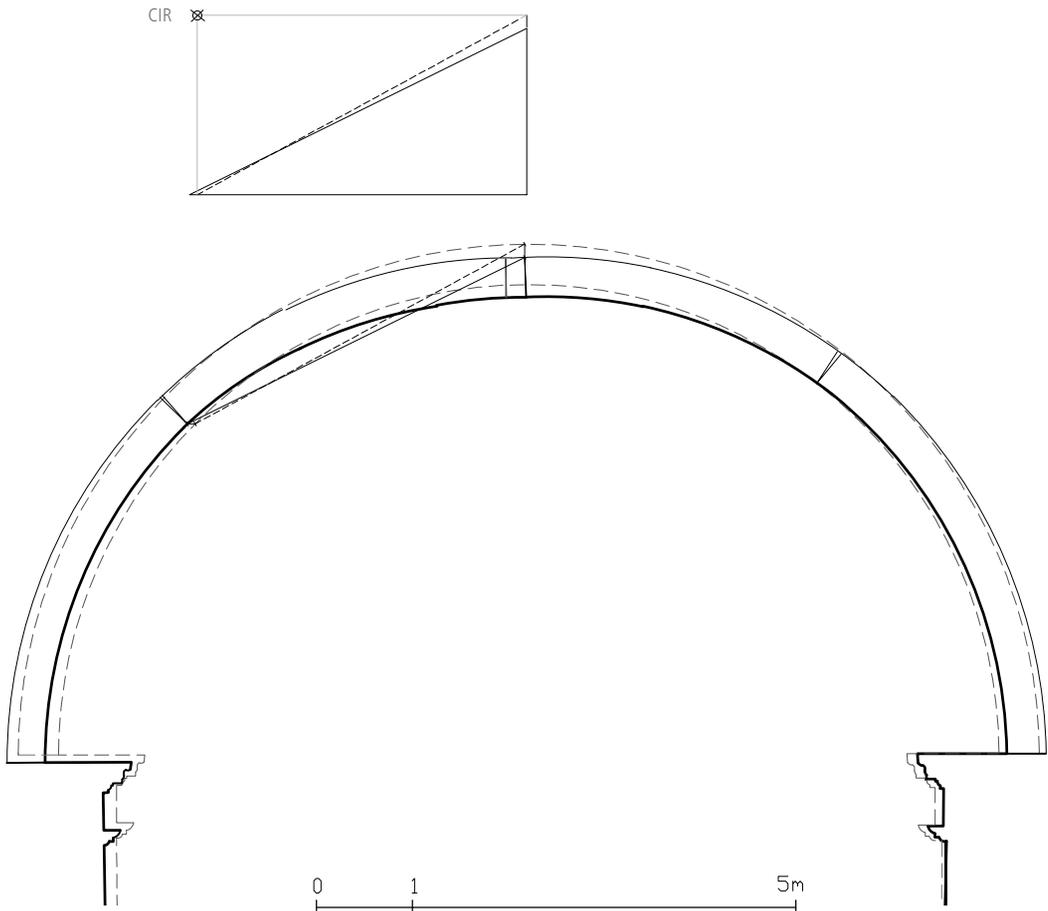


Fig. 3.14 Geometría teórica de la bóveda (línea punteada) sobrepuesta al perfil real deformado, con su mecanismo de deformación. En color negro perfil real del intradós medido.

Exagerando el desplome y el citado mecanismo de apertura de tres rótulas, visible en la sección que se muestra la figura 3.15, de continuar el desplome de los muros puede acercarse gradualmente a un estado límite en el cual la bóveda colapse. Aunque estas deformaciones son usualmente absorbidas por la adaptación de la propia estructura, será necesario evaluar la geometría deformada registrada en el levantamiento para comprobar la seguridad que proporcionan los contrafuertes para contrarrestar el empuje de la bóveda, revisando si es suficiente el estribo para que el aumento del claro no llegue a convertirse en un mecanismo de colapso.

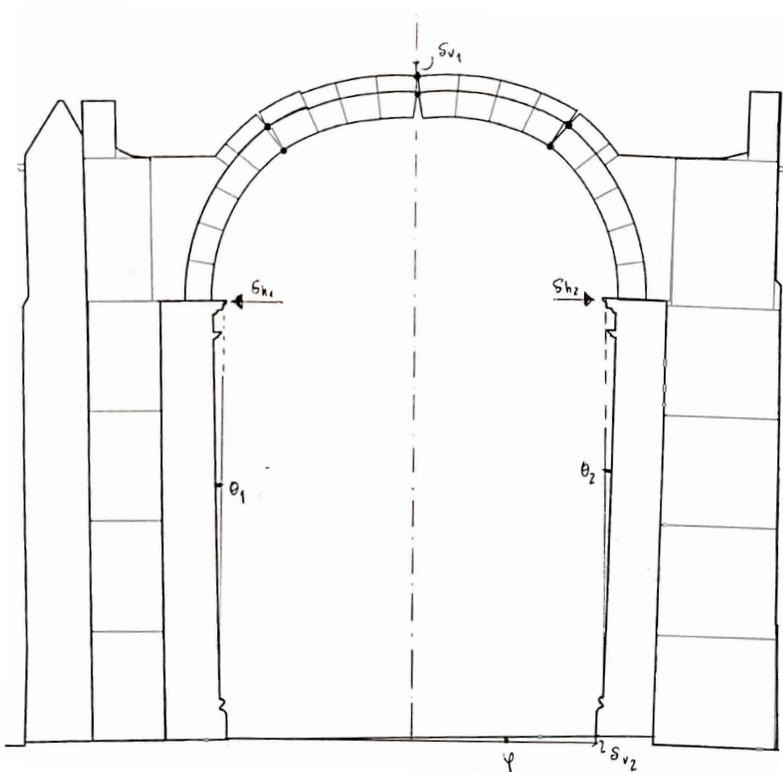


Fig. 3.15 Mecanismo de deformación exagerado, elaboración propia con ayuda se S. Huerta. En arcos superpuestos, las articulaciones se forman independientemente, mecanismo registrado por primera vez por Viollet-le-Duc 1866.

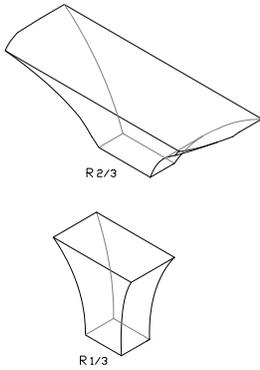


Fig. 3.16 Geometría de relleno R1/3 tiene función de enjarje de  $1.25\text{m}^3$  Y enjuta con volumen de  $5\text{m}^3$ .

## Análisis estático de la sección transversal

A continuación, se analiza la estabilidad de las bóvedas de lunetos a partir de la sección transversal B-B'. Siguiendo la descripción el punto 3.1, la estructura se divide en bloques obteniendo su volumen y centro de masa. La geometría del relleno de la bóveda es considerada en dos bloques (ver figura 3.16). El primer bloque integrado a la bóveda desde el arranque hasta una altura de  $1/3$  de la directriz de la bóveda. El segundo bloque fue definido como el volumen entre la bóveda de cañón y los lunetos hasta una altura de  $2/3$ , definida indirectamente gracias a la medición de la altura de las gárgolas en contrafuertes y muro sur, consideración a favor de la seguridad ya que existe un volumen irregular como pendiente para la canalización del agua sobre dicho corte horizontal definido sobre los  $2/3$ .

La bóveda se divide a cada  $10^\circ$  (ver figura 3.17). Los bloques o dovelas resultado de esta división tienen la misma dimensión a excepción a las que se encuentran en los arranques, debido a que no responden al mismo centro como explicamos anteriormente.

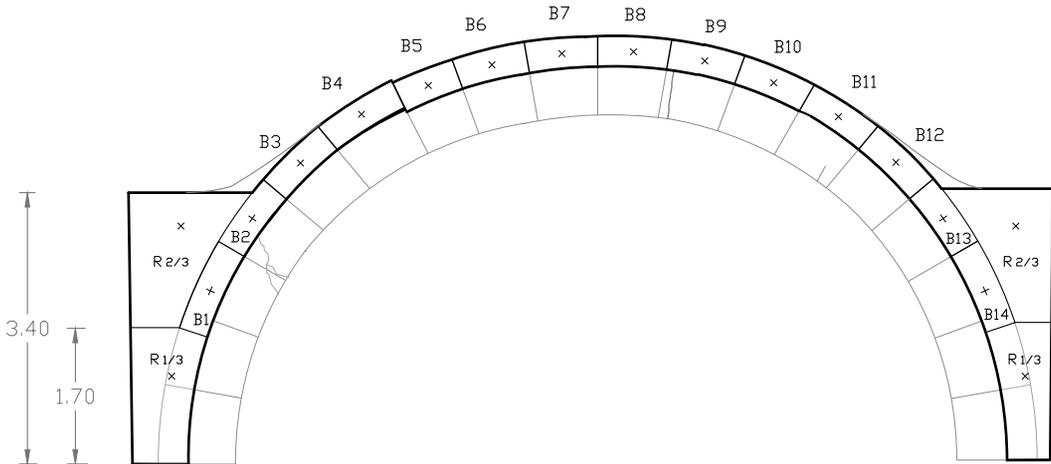


Fig. 3.17 Bóveda subdividida a cada  $10^\circ$  a manera de dovelas para obtener peso. Con centroides de cada una. Esquema de elaboración propia

### BÓVEDA

DOVELA"	Área $\text{m}^2$	L (m)	Volumen $\text{m}^3$	Peso kg	Peso (N)	Peso kN	Escala (m)
B1	0.423	1.6	0.68	1015.2	9,959.11	9.96	<b>0.199</b>
B2	0.35	3.4	1.19	1785	17,510.85	17.51	<b>0.350</b>
B3	0.35	4	1.40	2100	20,601.00	20.60	<b>0.412</b>
B4	0.39	5.71	2.23	3340.35	32,768.83	32.77	<b>0.655</b>
B5	0.3	7.59	2.28	3415.5	33,506.06	33.51	<b>0.670</b>
B6	0.35	8.49	2.97	4457.25	43,725.62	43.73	<b>0.875</b>
B7	0.35	8.49	2.97	4457.25	43,725.62	43.73	<b>0.875</b>
B8	0.34	8.49	2.89	4329.9	42,476.32	42.48	<b>0.850</b>
B9	0.35	8.49	2.97	4457.25	43,725.62	43.73	<b>0.875</b>
B10	0.35	7.06	2.47	3706.5	36,360.77	36.36	<b>0.727</b>
B11	0.35	5.26	1.84	2761.5	27,090.32	27.09	<b>0.542</b>
B12	0.35	3.68	1.29	1932	18,952.92	18.95	<b>0.379</b>
B13	0.35	3.4	1.19	1785	17,510.85	17.51	<b>0.350</b>
B14	0.423	1.6	0.68	1015.2	9,959.11	9.96	<b>0.199</b>

Fig. 3.18 Tabla con los pesos de las secciones de la bóveda.

Los lunetos se consideraron realizando secciones perpendiculares a las generatrices de cada luneto, es decir paralelos a los arcos formeros a manera de arcos. De estas secciones se tomaron en cuenta las cargas verticales que transmiten simplificando el problema, ya que las fuerzas horizontales se anulan entre sí al estar presentes en ambos lados de la sección analizada. Por lo anterior las cargas de los lunetos son transmitidas a las divisiones de la bóveda (B1 a B5 y B9-B14) antes de llegar al primer tercio del relleno. Los muros son considerados en tres bloques. El muro norte se considera en el primer cálculo sin el contrafuerte, y en el segundo cálculo con el contrafuerte.

Una vez definidos los bloques, se organizan sus datos y se obtienen los pesos como se muestra la tabla de la figura 3.18 que corresponde a la división en bloques de la geometría de la sección B-B' de la bóveda. Después se procede a trazar la línea de empujes como se describió en el apartado 3.1 de este capítulo. En este análisis la línea de empujes que se buscó fue la de empuje mínimo (ver fig 3.19), la importancia de esta línea de empuje mínimo es explicada por Heyman de la siguiente manera *“si los estribos de un arco de fábrica tienden a moverse, su apertura irá acompañada de una reducción automática del empuje que tiende hacia su valor mínimo”*.<sup>76</sup> Esta afirmación permite comprender que, en cuanto existe un cedimiento en los apoyos, es decir una apertura en el claro, la línea de empujes será muy cercana a su valor mínimo. Dado que el común denominador de estas estructuras es la presencia de rótulas, el empuje mínimo está garantizado.

En la figura 3.19 la línea de empujes generada por la bóveda es de  $H=194\text{kN}$ . Podemos constatar que el primer tercio del relleno, que corresponde al enjarje, recibe a la línea de empujes que pasa a través de éste alejándose de la forma de circunferencia hasta llegar a los muros y bajar a través de los mismos. Esto sucede ya que los antiguos constructores no realizaron formas catenarias, sino formas geométricas de sencillo control, como es la circunferencia. Constatamos que la función de las pilastras con relación a la bóveda es constructiva y simplemente evita un deslizamiento vertical, ya que no se transmite empuje alguno de la bóveda a las pilastras.

Se analiza al arco fajón y pilastras utilizando el mismo procedimiento antes descrito, se comprueba que su peso es menor al 10% de la bóveda y los muros, y como vimos en el segundo capítulo se encuentran unidos a estos solo parcialmente. Entonces surge la pregunta ¿qué función desempeña el arco fajón?. Al obtener su línea de empujes mínimo con un valor de  $H=31.5\text{kN}$ , como muestra la figura 3.20, podemos observar que solo pasa a través de la zona superior de la pilastra. Después de éste análisis podemos asegurar que los arcos fajones no “refuerzan” a la bóveda, y solo tienen una función constructiva como tapajuntas de la bóveda y una función estética al interior del templo, el peso de  $106.5\text{kN}$  de cada arco fajón

76

Jaques Heyman, Teoría historia ..... Vol.1. op. cit. p.142

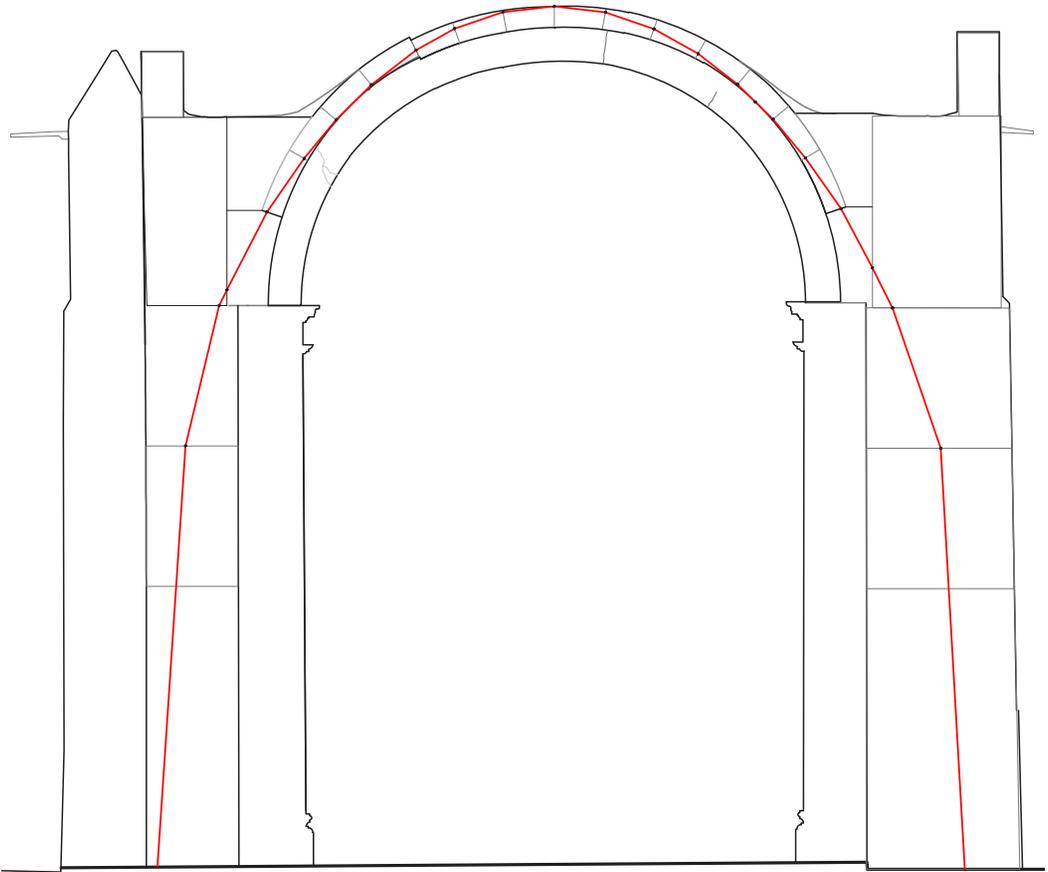


Fig. 3.19 Equilibrio global de las bóvedas y contrafuertes, cálculo resumido con la trayectoria de las cargas a través de la línea de empujes mínimo. Cálculo y esquema de elaboración propia.

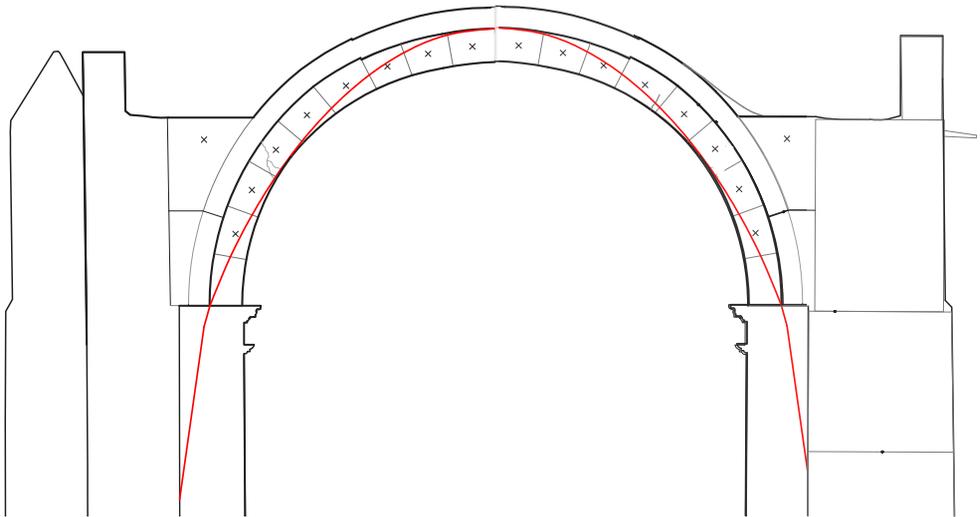


Fig. 3.20 Análisis de arco fajón con pilastras, cálculo resumido con la trayectoria de las cargas a través de la línea de empujes mínimo. Cálculo y esquema de elaboración propia.

y de los arcos formeros es la única carga que reciben las pilastras que después es derivada al muro (al tener una componente horizontal).

En el análisis en dos dimensiones de la bóveda de lunetos (fig. 3.19) a manera de un arco, la línea de empujes prueba ser una herramienta certera para describir y predecir la ubicación de las rótulas en tres dimensiones en forma de grietas longitudinales de la bóveda. Las grietas reales presentes aproximadamente a  $46^\circ$  por el trasdós en la zona de riñones coinciden con gran exactitud con las grietas predichas con la línea de empujes, como ilustra la figura 3.22 que sobrepone la sección transversal del cálculo con el isométrico de la bóveda. Esta imagen ilustra también el agrietamiento vertical de los lunetos que típicamente tiene forma de grieta de Sabouret<sup>77</sup> separando el luneto en dos partes, la parte superior continua adherida a la bóveda de cañón rotando junto con ésta, mientras que la otra parte del luneto se queda fijo en el muro. El cedimiento de los apoyos no es suficiente para que estas grietas dejen ver el interior del templo pero son visibles. Éste mismo comportamiento sucede en toda la bóveda (ver anexo B) a excepción de la zona sobre el coro, confinada por el volumen de la torre y el muro de la portada del templo. Sin embargo, la presencia de la rótula en la zona de la clave no es tan clara en toda la bóveda, debido a que debió ser rellenada y recubierta por el intradós poco tiempo después de aparecer. En suma el análisis límite en dos dimensiones permite entender el comportamiento de la bóveda en 3 dimensiones. Las grietas descritas se encuentran presentes previas al sismo, aunque ahora son claramente visibles y la apertura de otras grietas las ha puesto de manifiesto, sin embargo las rotulas representan el comportamiento natural de ésta bóveda.

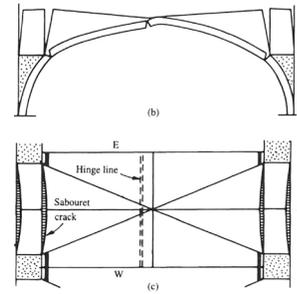


Fig. 3.21 Patrón de grietas de una bóveda cuadripartita, indicando grietas de Sabouret, Heyman, *El esqueleto de peidra* pag.69

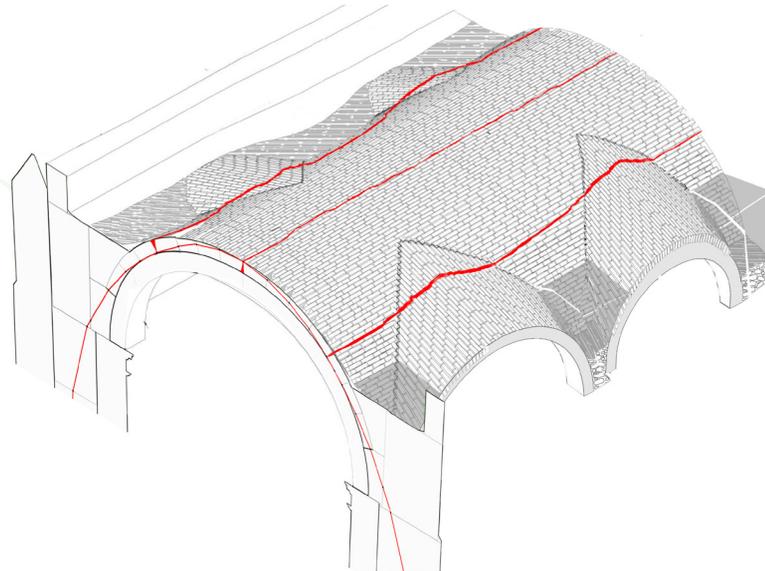


Fig. 3.22 Isométrico que muestra bóvedas de lunetos y sección transversal con análisis ilustrando las rótulas en 3 dimensiones. Esquema de elaboración propia, Inspirado en Holzer (2011).

77 Distribución de grietas que permite la formación de bloques monolíticos de la bóveda al aumentar el claro, típicamente paralelas a los arcos formeros pero a cierta distancia de ellos. Reciben dicho nombre ya que Sabouret (1928) estableció una clasificación de las grietas en las bóvedas (Heyman 1999) ver figura 3.21.

### 3.3 Cúpula octogonal y semicúpula de Santiago Apóstol.

#### Análisis de la cúpula y zona del presbiterio

En el segundo capítulo se analizó el trazo y la geometría de la cúpula octogonal, en el presente analizaremos las cargas que son transmitidas por ella. Su peso total sin considerar la linternilla ni su brocal es de 1027.84kN. Para conocer el peso que corresponde a cada sector de la cúpula octagonal se utiliza la misma técnica antes descrita para un arco de dovelas y para el análisis de la bóveda. La diferencia en la cúpula es que el ancho disminuye al aproximarse a la clave hasta desaparecer. Es por ello que el peso no se encuentra distribuido de manera uniforme, aumentando conforme se desciende y las áreas tributarias toman la forma de triángulos.

Se realizó un primer análisis mostrado en la figura 3.23 a) y b) tomando la geometría deformada y considerando una sección de la cúpula colineal a las nervaduras o pliegues entre sus gajos. De esta manera se toman en cuenta áreas tributarias asumiendo que las nervaduras transmiten las cargas (ver figura 3.22 a). El análisis proporciona resultados interesantes, como la coincidencia del punto donde la línea de empujes toca el intradós de la cúpula con la grieta horizontal. Ésta grieta se encuentra presente en toda la cúpula a los 43° de apertura a una altura de 3.4m desde la zona inferior del basamento. Sin embargo, se consideró que esta distribución de cargas no es la que representa de mejor forma la estabilidad de la cúpula, ya que las grietas meridianas se encuentran en esta zona impidiendo la unión entre un gajo adyacente a otro.

Recordando que no existe una única solución de equilibrio, y estas soluciones cambiarán a lo largo de la vida de la estructura, se debe explorar siempre la solución mas lógica acorde al

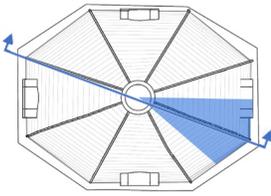
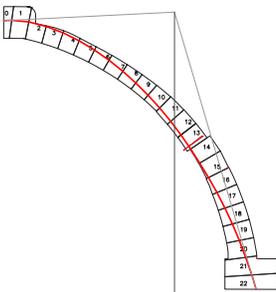


Fig. 3.23 a) Planta de cúpula, área tributaria considerada en color azul.



b) Primer ensayo de línea de empujes por nervadura.

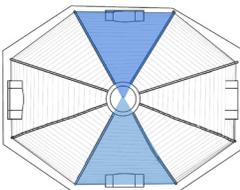


Fig. 3.24 Planta de cúpula, área tributaria considerada.

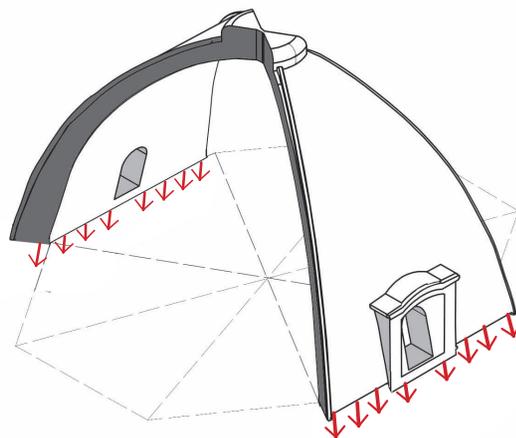


Fig. 3.25 Sectores de la cúpula (Gajos) para analizar equilibrio de cúpula, esquema propio.

problema. Se buscó otra solución de equilibrio tomando en cuenta los gajos de la cúpula como sectores independientes que solo se apoyan en la zona de la clave equilibrándose con el gajo opuesto, (ver figuras 3.24 y 3.25). Esta afirmación es consecuente con la necesidad de que el empuje (H) en la clave sea ejercido por un empuje igual y contrario en el segmento diametralmente opuesto.

Con este nuevo enfoque se realizó el análisis límite, sumando también el peso de la linternilla, cuya geometría y dimensiones se recrearon a través de la comparación de fotografías dando como resultado un peso total aproximado de 22.81kN de la linternilla el cual se dividió en 8 partes una para cada gajo. Esta solución de equilibrio es aplicable a cualquier par de gajos contrapuestos. El primer gajo analizado pertenece a la sección y-y' de la figura 3.26, donde se observa que posee la mayor área de todos los gajos, resultando en un peso total de 150kN que corresponde a la figura 3.27. Se traza su línea de empujes mínimo con un coceo  $H=19\text{kN}$  que descarga sobre el basamento y el arco testero. El siguiente gajo analizado es el la sección x-x' perpendicular a la anterior ilustrado en la figura 3.28, con un peso total de 120.78kN. Su línea de empujes mínima resulta en un coceo  $H=23.8\text{kN}$ , y cuya resultante atraviesa al basamento y posteriormente al arco formero y al muro del presbiterio.

La línea de empujes mínima en ambos gajos toca los bordes de la fábrica en dos puntos, sobre el trasdós en la parte superior y sobre el intradós en la parte baja. La línea de empujes mínima junto con las articulaciones del resto de la cúpula quedan contenidas dentro de la fábrica.

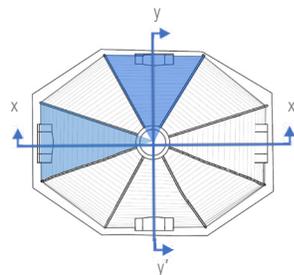


Fig. 3.26 Planta de cúpula con cortes, y áreas tributarias consideradas.

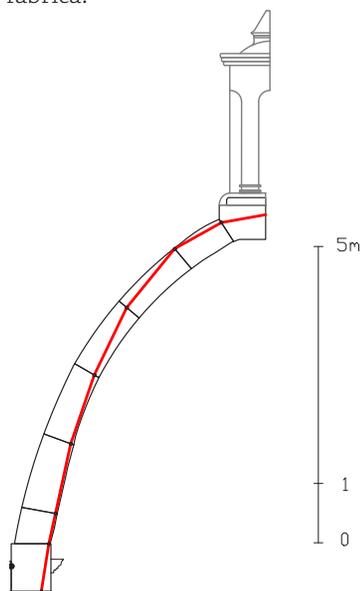


Fig. 3.27 Sección Y-Y' Gajo corto con empuje mínimo  $H= 19\text{kN}$ .

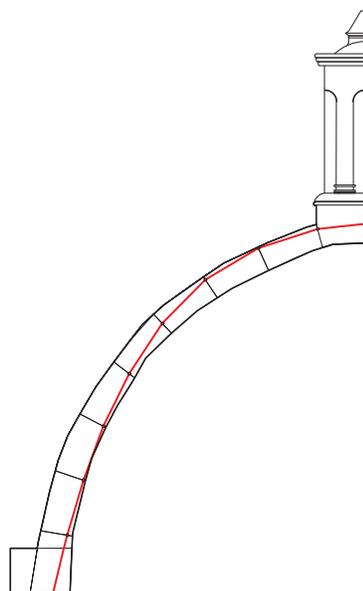


Fig. 3.28 Sección X-X' Gajo largo con empuje mínimo de  $H= 23.8\text{kN}$ .

Para comprobar el rango de seguridad de la cúpula, ambos gajos tanto de la sección x-x' como de la y-y', vuelven a ser evaluados con los mismos pesos que en el análisis anterior, variando H en busca de la posición límite correcta de la línea de empujes para cada gajo, como planteó Heyman<sup>78</sup> en 1977. Gracias a la línea de empujes se puede determinar el espesor de gajo mínimo y así conocer su factor geométrico de seguridad.

Al evaluar el gajo de la sección x-x', como ilustra la figura 3.29, se ensayaron líneas de empujes hasta conocer el gajo de espesor límite que resulto en 25cm (achurado en el esquema) con un H= 25.6kN. Comparando dicho espesor límite con los bordes de la geometría real se obtiene el coeficiente geométrico de seguridad (C.G.S)<sup>79</sup> para esta sección. El resultado es de 2.25 para la parte baja y 1.65 en la parte alta.

Para la sección y-y' ilustrada en la figura 3.30, utilizando una línea de empujes con H=21.8kN, se encontró el gajo de espesor mínimo de 26cm, con un C.G.S de 2.25 en la parte baja y 1.7 en la parte alta, mostrando un rango de seguridad muy similar a la dirección x-x'.

Después de analizar las diferentes líneas de empuje dentro de los gajos de la cúpula octogonal, queda demostrado que poseen un espesor mayor a uno límite, con un margen de seguridad en su geometría en ambas direcciones. En ambos casos, la parte baja del gajo tiene un coeficiente de seguridad mayor al de la parte superior debido a que su sección es variable. Sin embargo, como se mencionó al inicio del capítulo, la parte superior de las cúpulas tienen un trabajo garantizado a compresión pese a que las grietas meridianas se aproximan a la base de la linterna, por lo que resulta una condición geométrica natural la disminución de la sección conforme se aproxima a la clave, al ser innecesario mayor espesor.

No solo se analizan las líneas de empujes en la cúpula, a continuación se procede a estudiar la zona del presbiterio con mayor daño registrado, que corresponde a la sección y-y' de la cúpula octogonal y su sistema de apoyo en la zona de la clave del arco testero. Por lo anterior es necesario explicar su interacción con la semicúpula y la trayectoria de la resultante a través de los muros hasta llegar a la base de los mismos.

Para el análisis de la semicúpula se consideró una sección paralela al eje longitudinal del Templo como se ve en la figura 3.31, analizando las áreas tributarias correspondientes. La semicúpula se apoya sobre el arco testero y descarga sobre los muros diagonales del presbiterio. Su geometría fue registrada tomando 12 coordenadas del trasdós. Su espesor fue medido de forma directa a través de las grietas, obteniendo un grosor promedio de 32cm.

---

78 Jaques Heyman, Teoría historia..... Vol.1. op. cit. p.42  
79 Santiago Huerta. op.cit, p. 451.

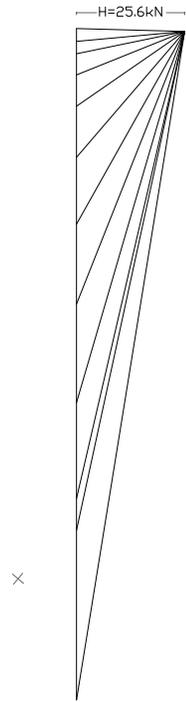
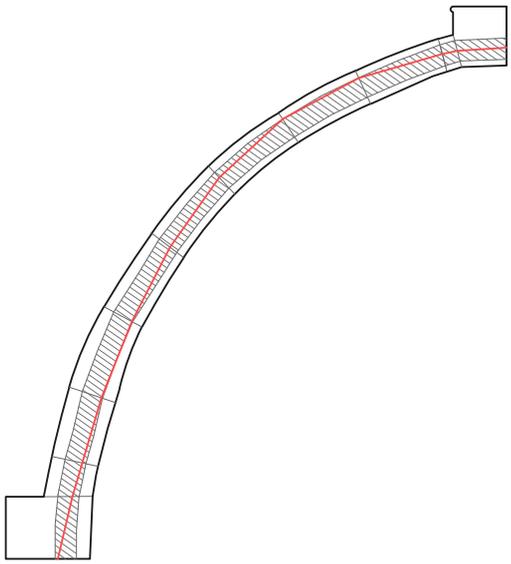
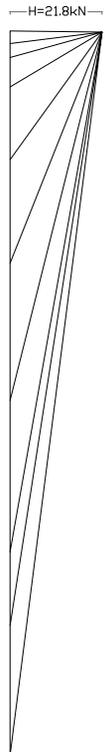
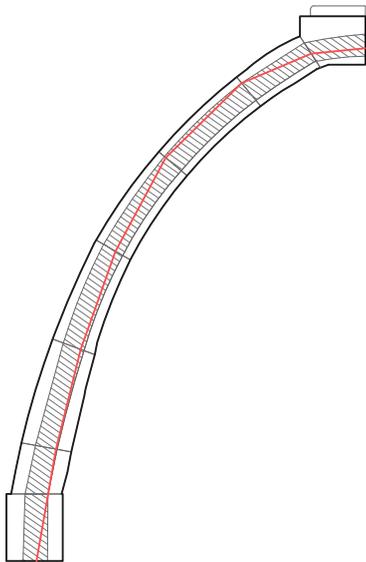
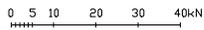


Fig. 3.29 Gajo x-x', línea de empujes que muestra gajo de espesor mínimo (achurado). La parte la parte baja tiene un CGS de 2.25 y en la parte alta 1.65.



3.30 Gajo y-y' de espesor mínimo, en la parte baja tiene un CGS de 2.25 y en la parte alta 1.7



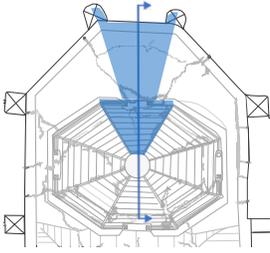
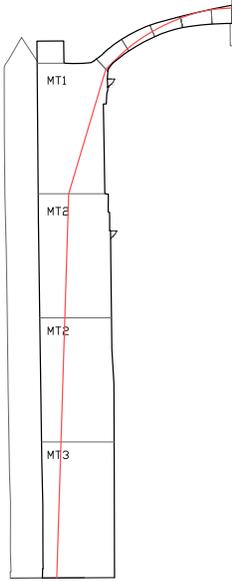


Fig. 3.31 a) Planta de conjunto zona del presbiterio, área tributaria considerada en el primer análisis.



b) Primer ensayo de línea de empujes en todo el sistema.

En el primer análisis de la semicúpula se obtiene un coceo de  $H=64.7\text{kN}$ . Al analizar su trayectoria sobre el muro, se obtiene una resultante con un factor de seguridad poco adecuado al aproximarse al límite del muro (ver fig. 3.31 b).

Por lo anterior se exploró otra forma de equilibrio disminuyendo el empuje de la semicúpula. Se consideró la sección a través del muro y del contrafuerte como bloque ya que fueron construidos de forma conjunta (ver figura 3.32). Dicho bloque de muro y contrafuerte se divide en 4 partes de sección variable según su altura como ilustra la figura 3.33. En la figura 3.34 observamos el resultado de este análisis, consiguiendo una solución de equilibrio mas favorable disminuyendo la fuerza horizontal de la porción de semicúpula a  $H=39.5\text{kN}$ . La nueva línea de empujes de la semicúpula parte del arco testero y sube hasta el trasdós de la semicúpula y desciende en el muro y contrafuerte.

El arco testero recibe la resultante del gajo de la cúpula octagonal más pesado con un  $R=172\text{kN}$  y la resultante de la semicúpula  $R=43\text{kN}$ . Sumando ambas fuerzas se forma una resultante final ( $R_f$ ) próxima a la vertical de  $188.4\text{kN}$  que recibe el arco testero, como ilustra la figura 3.34 donde se representa a  $R_f$  como línea punteada.

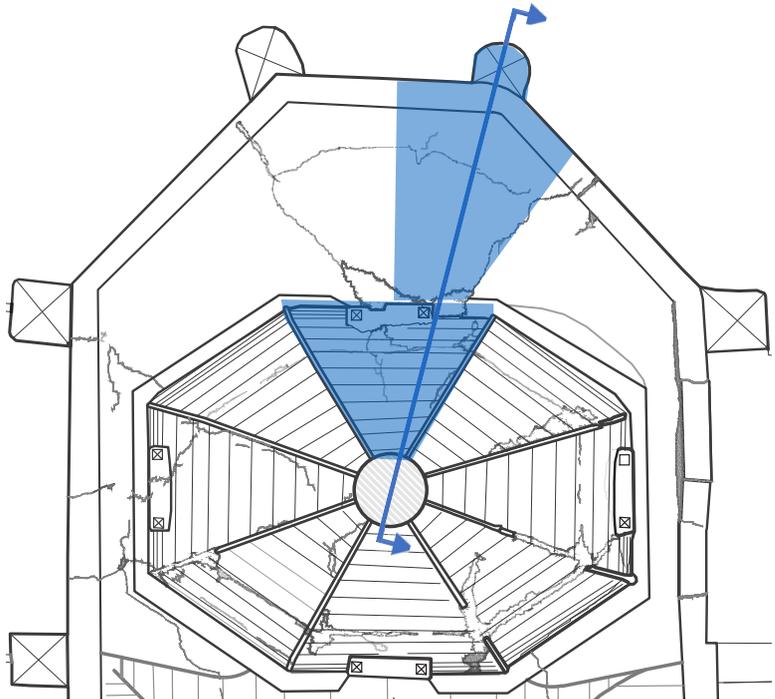


Fig. 3.32 Planta de conjunto sobre el presbiterio con área tributaria considerada en el segundo análisis.

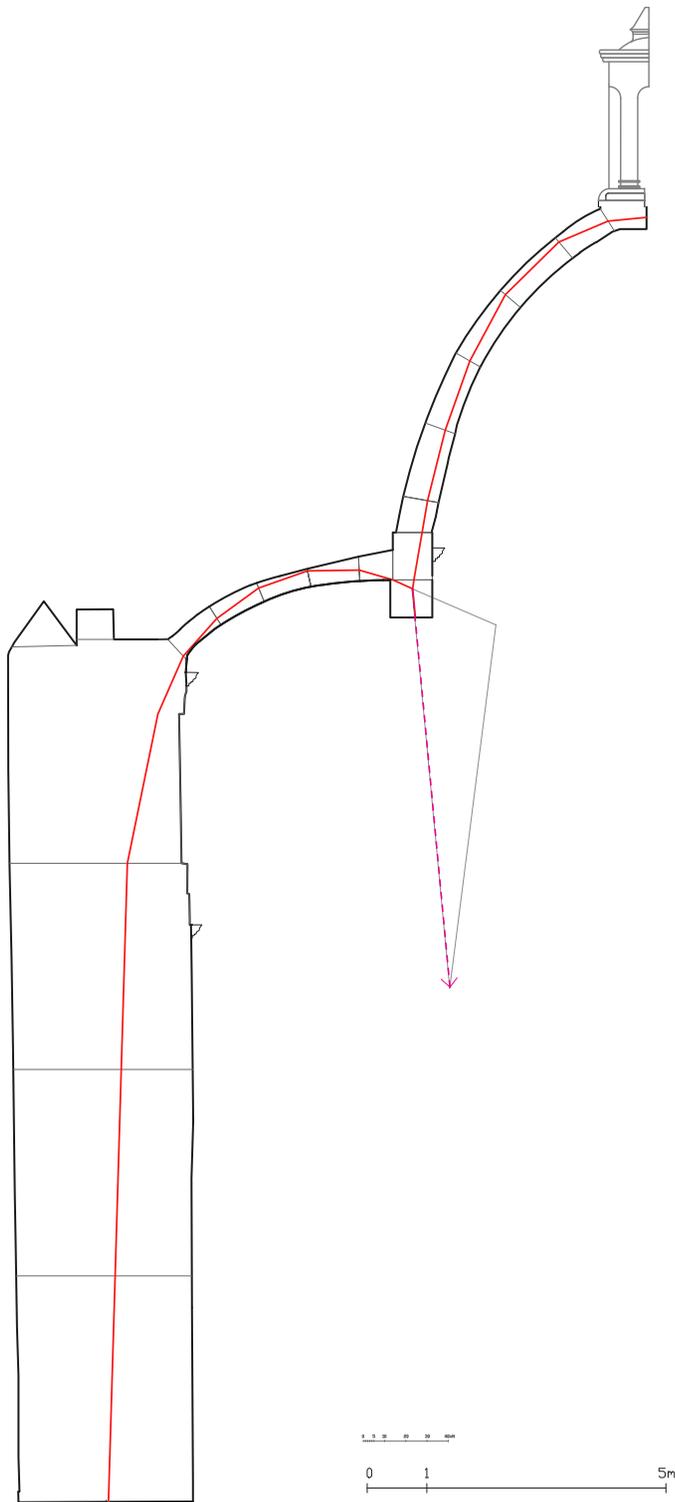


Fig. 3.34 Resumen del segundo ensayo de línea de empujes mínima en todo el sistema de semicúpula y contrafuertes.

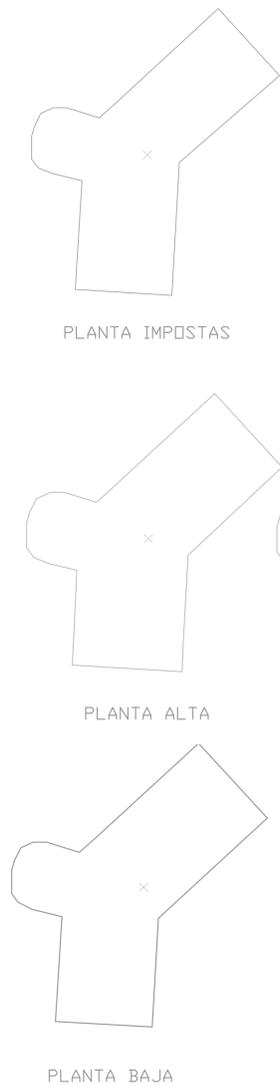


Fig.3.33 Análisis de la variación de las secciones de contrafuerte según su altura consideradas en el cálculo, elaboración propia.

### 3.4 Seguridad de los muros y contrafuertes

En este apartado se analiza la posición de la línea de empujes, generada por la bóveda de lunetos y la semicúpula con respecto a la base de los muros y contrafuertes.

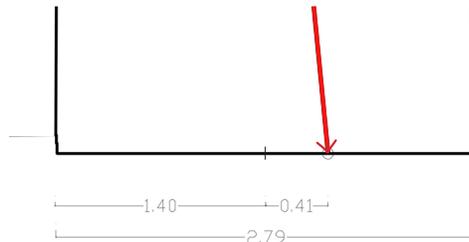
Como se describió al final del apartado 3.1, el factor geométrico de seguridad en los contrafuertes es el más delicado ya que de él depende de forma determinante que la estructura ceda y colapse.

Para la bóveda de lunetos se analiza la posición de su línea de empujes en la parte inferior del muro del lado del convento de la figura 3.19. Tomando sus dimensiones como muestra la figura 3.35. Utilizando la ecuación del coeficiente geométrico de seguridad:

$$c.g.s. = \frac{d/2}{x}$$

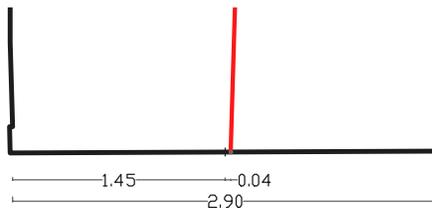
Donde  $x$  = distancia del centro a la línea de empujes y  $d/2$  = la mitad de la distancia de la sección. Se comprueba que el muro del lado del convento tiene un factor geométrico de seguridad de **3.41**.

Fig. 3.35 Base del muro sur del templo obtenido de la fig. 3.19, con un c.g.s de **3.41**.



Para la semicúpula sobre la zona del presbiterio se repite el mismo procedimiento. En la sección baja del muro y contrafuerte de la figura 3.36, obteniendo un factor de seguridad mayor a 3, debido a que de la línea de empujes termina en la zona central de la sección analizada.

Fig. 3.36 Base del muro y contrafuerte del presbiterio de la fig. 3.26.



Por lo tanto, las dimensiones tanto de los muros como de los contrafuertes constituyen una solución segura para la estructura, garantizando que la resultante pasa por dentro de la base del apoyo. Después de realizar este análisis límite se comprueba la razón por la cual se mantiene en pie la estructura incluso con los graves daños que sufrió. Posee una geometría estable.

## Capítulo 4 La sismicidad regional y el comportamiento sísmico de bóvedas de mampostería.

En este capítulo se exponen los componentes básicos que influyen en el análisis sísmico exponiendo su gran complejidad. La primera parte se centra en realizar un breve repaso del fenómeno sísmico, sus causas, características y clasificación. Todo lo anterior con información proporcionada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Así como los riesgos y vulnerabilidades típicas en edificaciones durante un sismo. También se enuncian las fallas características que ocurren en la mampostería y las limitaciones en la normatividad existente para analizar este fenómeno en edificaciones previas al siglo XX en México.

También se realiza una evaluación de los sismos que ha resistido la estructura del templo y exconvento de Santiago Apóstol desde sus inicios hasta el año 2017, recabando los registros históricos de los sismos. De esta forma se realiza una evaluación del riesgo sísmico al cual se encuentra expuesto el templo. Finalmente por medio de modelos de experimentación física se realizaron pruebas de inclinación como símil de la aceleración horizontal necesaria para que el templo colapse. Siendo ésta última una estimación de la capacidad sismo-resistente de la estructura, tanto de la bóveda como de la cúpula octogonal.

## 4.1 El fenómeno sísmico generalidades.

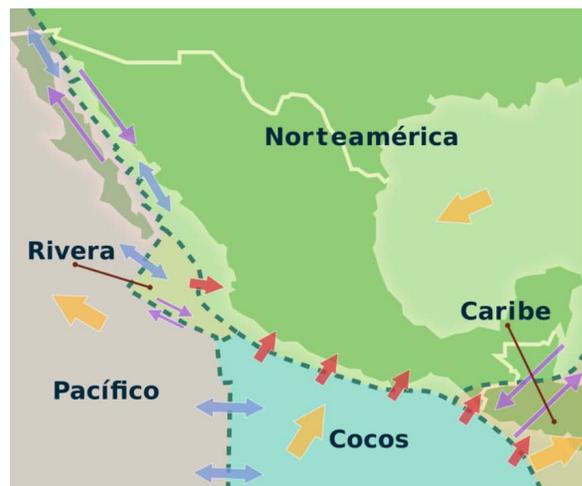
El planeta tierra está compuesto por distintas capas, la más superficial se denomina corteza, es sólida y esta dividida en placas tectónicas. La capa inferior denominada manto es líquida y se encuentra en un movimiento continuo por convección, que se refleja en la corteza terrestre con el desplazamiento de sus placas.

La geometría de las placas tectónicas determina el área que puede romperse y el fenómeno de convección determinará el sentido del movimiento de la corteza. Los bordes entre placas son de tres tipos, divergentes (donde se separa una de otra, originando nueva corteza principalmente oceánica), convergentes (donde colisionan y ocurre la subducción) y transformantes (donde se desplazan en sentidos opuestos de forma paralela), cada placa interactúa con otras dos.

El movimiento continuo causa esfuerzos de compresión y extensión sobre el terreno, su comportamiento mecánico puede ser rígido o plástico. Cuando se sobrepasa el límite plástico del terreno, se romperá y como resultado se genera una falla. Pueden ser de distinto tipo. Las fallas normales ocurren donde se presentan esfuerzos extensivos (de tensión) y un lado baja, normalmente ocurre en las dorsales oceánicas donde el límite entre las placas es divergente. En cambio, la falla inversa ocurre cuando el movimiento entre bloques es contrario al de las fallas normales. Éstas se producen donde los esfuerzos son compresivos, como en las zonas de subducción y donde el límite entre placas es convergente. Por último las fallas laterales ocurren cuando los bloques se mueven horizontalmente y en sentidos opuestos.

El rozamiento entre placas acumula energía que eventualmente se libera de forma súbita. Esta liberación de energía se refleja como una sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre a la que se denomina temblor de tierra, movimiento telúrico o sismo. Las distintas fallas geológicas son la causa más común de los sismos.

Fig. 4.1 Placas tectónicas de México, fuente: SSN. Aplicación móvil.



El territorio mexicano se encuentra sobre cinco placas tectónicas: la Norteamericana y la del Pacífico que interactúan de forma divergente y transformante. La interacción entre las placas Pacífico y Cocos también es divergente y transformante. El límite entre las placas Norteamericana y del Caribe también es divergente y transformante. (ver figura 4.1)

### Tipos de sismos

Los sismos pueden identificarse por su posición con respecto a la placa, también si son someros o profundos. Se denomina **hipocentro** al punto al interior de la tierra en el que se liberó la energía y **epicentro** a la proyección del punto sobre la superficie terrestre. La profundidad está en función de la zona de contacto, normalmente menor a 40km. Pueden llegar a ser de gran magnitud dependiendo de la zona de ruptura. Los sismos **intraplaca** ocurren por el fenómeno de subducción, cuando una parte de la placa subducida se rompe, generalmente ocurre a mayor profundidad, de 40 a 200km. También existen sismos de tipo **cortical**, son de origen intraplaca y muy superficiales ya que no rebasan los 35km de profundidad. Su magnitud es pequeña en comparación con los sismos de subducción, pero puede ocasionar daños grandes por la cercanía con la superficie.

Existen diversas regiones que están expuestas a un riesgo constante de este fenómeno, especialmente en las zonas de fallas geológicas, donde se concentran los sismos que se denominan zonas

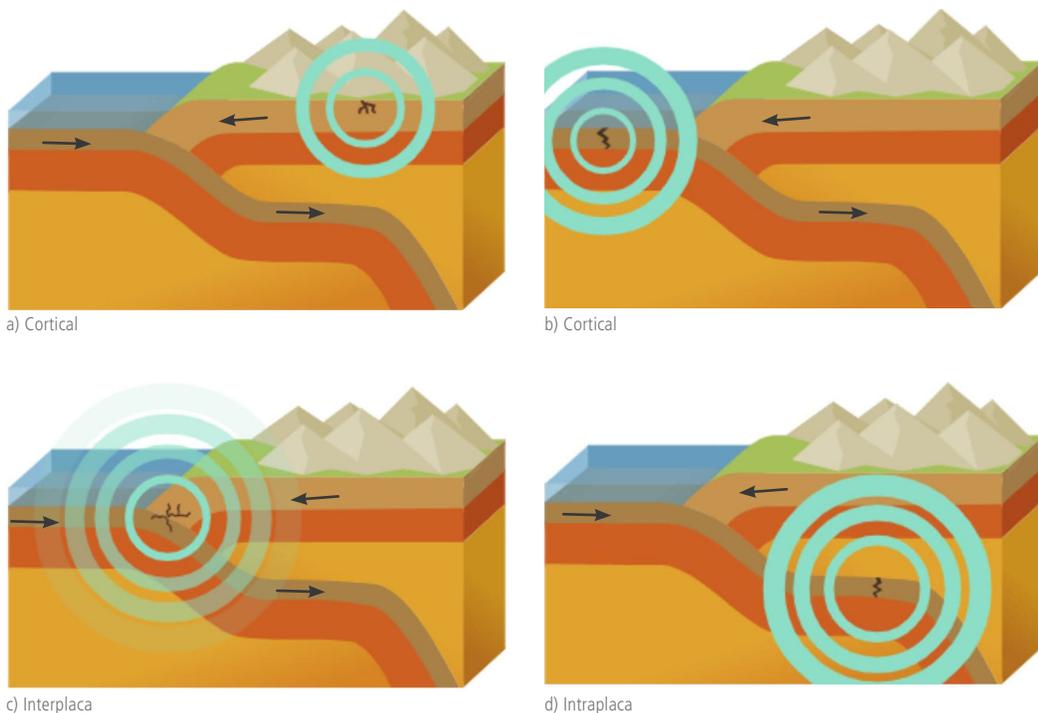


Fig. 4.2 Tipos de sismos por su ubicación, fuente: SSN. Aplicación móvil.

sismicamente activas y también existen regiones donde ocurre de forma más esporádica. Aunque conocemos las causas y regiones donde ocurren de forma más frecuente, como sucede en los bordes de las placas que interactúan, es imposible predecirlos con una fecha, magnitud, lugar y hora determinada. Las réplicas deben ser menores en magnitud a un evento principal más fuerte y deben tener epicentro cercano a la misma línea de falla para poder considerarse como tales. Una aclaración importante es que no existen sismos trepilatorios ni oscilatorios. Ambos fenómenos ocurren en todo sismo, lo que cambia es la sensación con respecto al lugar en el que se registra o percibe el sismo.

### Ondas sísmicas

La energía liberada se manifiesta por medio de ondas, la cual solo representa el 1 por ciento de la energía total del sismo y existen de distintos tipos. A las ondas que viajan por el interior de la tierra se les denomina ondas de cuerpo, mientras que las que van por las capas más superficiales se les denomina ondas de superficie. Dentro de las ondas de cuerpo se encuentran las ondas “P” o primarias de tipo longitudinal, las cuales son más rápidas; y las ondas “S” o secundarias que son de tipo transversal, estas últimas son las que afectan considerablemente a las edificaciones. Las ondas sísmicas se transmiten a través de un medio, es decir un material. Lo anterior constituye un problema de propagación de energía ya que cada material la transmite de forma diferente, dependiendo de la onda (si es tipo S o P). Otra característica de las ondas S es que no se pueden transmitir a través de un fluido. De esta forma la velocidad con la que atraviesan un material varía dependiendo de sus características que también determinarán su ángulo de reflexión (cuando una onda regresa a la dirección de partida), refracción (cambio de dirección de las ondas al cambiar de medio, cambiando también su velocidad, sin embargo la frecuencia es la misma) y dispersión (separación de una onda en diferentes frecuencias). Las ondas superficiales se generan por la interacción de las ondas P y S, y solo afectan las primeras capas de la litosfera pues solo viajan en la superficie. Se clasifican en ondas Rayleigh y ondas Love. Estas ondas son más lentas que las de cuerpo, y suelen ser destructivas.

Con respecto a los efectos que pueden causar las ondas, depende del tipo de suelo, ya que reaccionan de forma diferente, a lo que se le conoce como efectos de sitio. Que pueden causar atenuación, resonancia e inclusive licuefacción. Entre estos, la resonancia es un fenómeno muy relevante que afecta a las edificaciones, la cual ocurre cuando la vibración natural de los edificios se sintoniza con la vibración natural de los suelos. Este fenómeno puede amplificar la onda sísmica teniendo efectos muy destructivos.

## Magnitud

La magnitud es el cálculo objetivo de la energía de las ondas sísmicas con base en los parámetros físicos de la falla y se calculan midiendo la amplitud de la señal sísmica. La amplitud es una medida escalar positiva y negativa de las oscilaciones de la onda.

Existen muchos tipos de escalas de magnitudes sísmicas y es común la confusión entre ellas, sin embargo las dos más usadas son, la magnitud de momento y la magnitud local o Richter. En México se utiliza la magnitud de momento ( $M_w$ ) para sismos de magnitud mayor a 4.5. Para los menores a 4.5 se utiliza magnitud de coda ( $M_c$ )<sup>80</sup>. La magnitud de un sismo es logarítmica. Un ejemplo es el sismo del 7 de septiembre de 2017 de magnitud 8.2 $M_w$ , que liberó 30 veces más energía que el del 19S<sup>81</sup> del mismo año que tuvo magnitud de 7.1 $M_w$ . Se utiliza una escala donde se relaciona la velocidad con la intensidad. De esta forma funciona la Magnitud de ondas internas ( $m_b$ ), así como la magnitud de ondas superficiales ( $M_s$ ). La magnitud de momento ( $M_w$ ) es de lo más usual, ya que se relaciona con el tamaño de la falla.

Existe un límite donde los sismos no pueden rebasar un rango de magnitud de alrededor de 9.5, que corresponde a la longitud de la ruptura total de la placa tectónica. Su profundidad máxima puede ser de 30 a 100 km de profundidad en la corteza terrestre. Entre mayor sea la magnitud de los sismos menor será su recurrencia, respondiendo a la ley de Gutenberg Richter. De nuevo tomando de ejemplo el año 2017 en México, ilustrado en la figura 4.3 se observan los sismos registrados ese año con su ubicación y magnitud. Hubo una gran cantidad de sismos de diferentes magnitudes, sin embargo, podemos observar que solo unos cuantos tuvieron una magnitud mayor a 6 y solo uno mayor a 8.

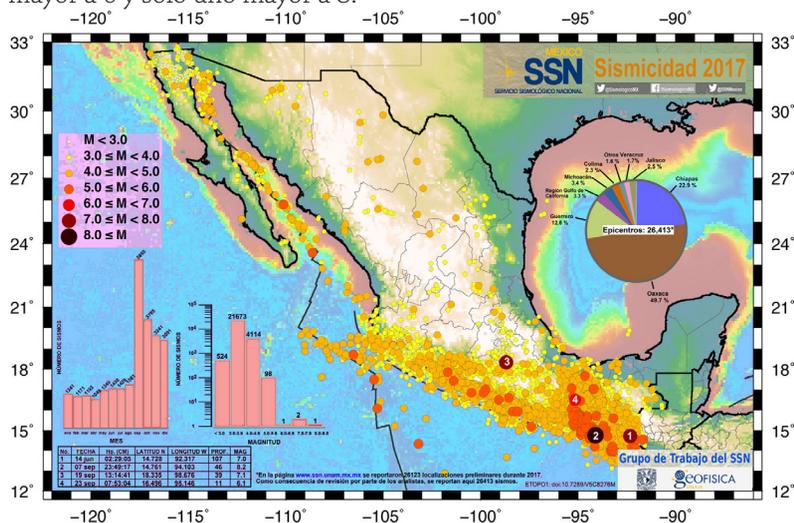


Fig. 4.3 Mapa de sismicidad anual, 2017 SSNM.

80

Idem

81 Según el Servicio Sismológico Nacional, el reporte de las distintas estaciones sismológicas el sismo liberó mas de 30 veces de energía que el del 19S.

## Intensidad

Inicialmente la intensidad se refería a la percepción del sismo en determinado lugar donde se sintió, por lo que puede considerarse hasta cierto punto subjetiva ya que cada persona la percibe de forma distinta. En cambio la intensidad instrumental se obtiene directamente del registro de las aceleraciones en el lugar donde se encuentre la estación sísmica. Ambas dependen de los fenómenos de amplificación y atenuación, que es la manera en que la energía se disipa al propagarse y no puede conocerse simplemente al saber la magnitud de un sismo, ya que la intensidad disminuye en función de la distancia y depende de la magnitud. De igual forma los factores anteriores determinan la duración de un sismo, que puede referirse a la percepción humana o a la duración medida con los sismómetros. La medición instrumental siempre será mayor a la de la percepción humana. Actualmente el SSN no lo reporta, al considerar que no es un parámetro relevante para clasificar y describir sismos.

Con respecto al registro de la aceleración realizado por el SSN, se realiza en las unidades denominadas **Gal**,  $1\text{gal} = 0.01 \text{ cm/s}^2$ . Sin embargo, existen otras unidades de aceleración como los **g**, que corresponde a la aceleración de la gravedad  $9.8\text{m/s}^2$  (N/kg). Esta unidad resulta conveniente para medir un sismo como un porcentaje de gravedad o porcentaje **g**.

Los daños a edificaciones dependerán también de la cercanía y profundidad del sismo (su hipocentro), ya que la energía que fue liberada por un sismo de gran magnitud lejano y profundo puede haber causado menos daños y haberse sentido menos que uno de menor magnitud pero de poca profundidad y más cercanía a la zona de estudio. Una convención de parámetros para medir la intensidad son el tipo de daños y efectos que tiene un sismo sobre una zona en específico. Se utiliza la escala modificada de Mercalli que correlaciona los daños percibidos en un lugar con las intensidades instrumentales. Se puede poner como VI fuerte VII muy fuerte VIII Grave IX violento X + Extremo.

Fig. 4.4 Tabla 1.1 Escala de Intensidad de Mercalli Modificada, con su correspondiente aceleración en g, según el USGS (Servicio Geológico de los EE.UU.).

Escala de Mercalli	Aceleración sísmica (g)	Velocidad sísmica (cm/s)
I	<0.0017	<0.1
II-III	0.0017-0.014	0.1-1.1
IV	0.014-0.039	1.1-3.4
V	0.039-0.092	3.4-8.1
VI	0.092-0.18	8.1-16
VII	0.18-0.34	16-31
VIII	0.34-0.65	31-60
IX	0.65-1.24	60-116
X+	>1.24	>116

**Tabla 1.1 Escala de Intensidad de Mercalli Modificada Abreviada**

I	No sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido sólo por muy pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos suspendidos pueden oscilar delicadamente.
III	Sentido muy claramente en interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, pero mucha gente no lo reconoce como un terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable.
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos, al aire libre por algunos. Por la noche algunos despiertan. Platos, ventanas y puertas agitados; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. Daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente; considerable en edificios corrientes sólidos con colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Paredes separadas de la estructura. Caída de chimeneas, rimeros de fábricas, columnas, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Conductores de automóviles entorpecidos.
IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas pierden la vertical; grande en edificios sólidos con colapso parcial. Los edificios se desplazan de los cimientos. Grietas visibles en el suelo. Tuberías subterráneas rotas.
X	Algunos edificios bien construidos en madera, destruidos; la mayoría de las obras de estructura de ladrillo, destruidas junto con los cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Corrimientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI	Pocas o ninguna obra de albañilería quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcidos.
XII	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel, deformadas. Objetos lanzados al aire.

Fig. 4.5 Tabla 1.2 Escala de Intensidad de Mercalli Modificada Abreviada. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgos, p.16

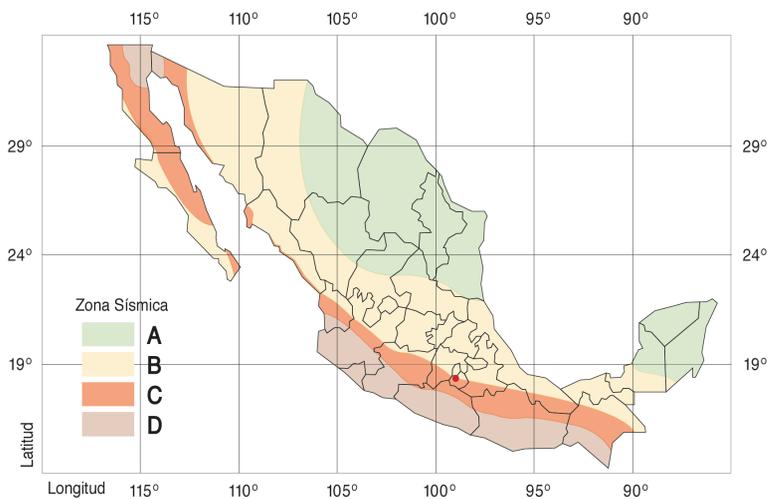
## 4.2 Registro histórico de sismicidad y riesgo sísmico en la región

Estimar el peligro sísmico, requiere saber dónde ocurren los temblores potencialmente dañinos, con que frecuencia aproximada ocurren, cuál es su distribución y magnitudes conocidas. Caracterizar los suelos de la región y lo posibles efectos de sitio.

### La sismicidad regional

La sismicidad en México está dividida en su territorio, por medio de zonas (A, B, C, D) según la CFE donde clasifica el riesgo sísmico de menor a mayor como se muestra en la figura 4.5. La zona de mayor riesgo sísmico se encuentra en el sureste mexicano (D). Donde convergen 3 placas tectónicas.

Fig. 4.6 Mapa de regionalización sísmica, CFE. 2010



### Sismicidad local

Jiutepec se encuentra ubicado entre los paralelos 18° 53' de latitud norte y 99° 10' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich, a una altura de 1350 metros sobre el nivel del mar. Pertenecer a la Sierra madre del Sur y al Eje Neovolcánico. En esta zona subyaciendo a las rocas intermedias afloran rocas sedimentarias clásticas (areniscas-conglomerado), así como un complejo volcánico constituido por diferentes tipos de rocas ígneas, como son: riolitas, tobas, brechas volcánicas y basaltos. Estos últimos tienen una extensión que cubre toda la provincia y corresponden al Cuaternario. Por su parte, los rellenos de los valles están formados por depósitos aluviales de este mismo período con estructuras geológicas formadas por las rocas volcánicas.

Los sismos son un fenómeno geológico que ocurre en periodos muy largos de tiempo que se miden en miles o millones de años. Sin embargo la actividad sísmica comenzó a ser registrada con instrumentos diseñados para ese fin a principios del siglo XX en

México. Antes de esa fecha solo se tienen informes, reportes y crónicas civiles y eclesiásticas sobre los daños causados por los sismos.

Es importante conocer los sismos del pasado, no solo los fenómenos recientes, ya que si solo usamos el registro instrumental no tendríamos una visión realista del fenómeno sísmico y solo se percibiría de forma parcial. Los efectos de los sismos en el análisis de registro de temblores fuertes, así como el número de registros históricos ayuda a muestrear las características de los sismos que pueden afectar al sitio de estudio. Podemos identificar la historia de los fenómenos sísmicos más relevantes que ha soportado y padecido la estructura de Santiago Apóstol. Como hemos identificado, es una región sísmica y desde sus inicios ha sufrido daños <sup>82</sup>.

Gracias a la recopilación de *Gerardo Suárez Reynoso* y su equipo del instituto de geofísica de la UNAM publicado digitalmente<sup>83</sup>, podemos completar la historia sísmica de la región. El catálogo proporciona la fecha, el nombre del sismo (en caso de tenerlo), la zona macrosísmica, con el número de localidades donde se registró el sismo, la intensidad máxima que pudo tener según la escala modificada de Mercalli, y un cálculo aproximado de la magnitud obtenida a partir de los lugares donde fue registrado el evento. Lo anterior gracias a las leyes de atenuación en función de la distancia y según la magnitud. En la mencionada base de datos se procedió a identificar los sismos mayores a una intensidad de 4, que fueron registrados en el estado de Morelos, particularmente lugares cercanos al templo del Santiago Apóstol, como es el caso de Cuernavaca, que se encuentra a solo 4km de Jiutepec, ya que con mayor seguridad los sismos se habrían sentido en ambos lugares.

Con la creación del servicio sismológico nacional en 1910 comienza el registro de este fenómeno<sup>84</sup> con mayor regularidad, precisión y objetividad, hasta nuestros días, los datos a partir de esa fecha fueron obtenidos del registro instrumental. En estas descripciones de principios del siglo XX, se toma importancia de si es un sismo trepidatorio u oscilatorio, característica que como ya describimos, solo ayuda a determinar la distancia al epicentro.

A continuación se reproduce la información con la misma estructura que ofrece el catálogo, ordenada por fecha, así como las descripciones recopiladas relevantes a esta investigación.

- 1582. Se registró en 4 localidades, con una intensidad máxima de **8**, Intraplaca. Podemos suponer que este sismo fue al que se refiere el Padre Ponce relatando que destruyó el convento .
- 1711. Magnitud estimada 6.9 Dorsal de pacífico, se sintió con una intensidad de 9 en Chietla y una de 8 en Izúcar.

82 Antonio de Ciudad Real. *Op. cit.* p.124.

83 <http://www.sismohistoricos.org>

84 Nota: En 1904 se reunieron dieciocho países, con el fin de crear la Asociación Sismológica Internacional, el gobierno mexicano decretó la fundación del Servicio Sismológico Nacional (SSN) el

- 1795. Intensidad de 7 en Chiautla de la Sal, Puebla. Se sintió en esta cabecera municipal y sus contornos un furioso temblor de más de tres minutos de duración, y entre los varios destrozos que hizo lastimó dos iglesias y las casas reales con otras varias que cuarteó, no siendo tan fácil su reparo por la grande actividad con que han comenzado las aguas del día quince del mismo. GM, 20 Jun.1795:298(H).
- 1837. Cuernavaca y Cuautla con una intensidad de 6. Fue registrado en 16 localidades, la magnitud estimada fue de 7.8 , y la intensidad máxima fue de 9 en Acapulco. EU, 12 Dic. 1852: 3(H); MR, 11 Dic.1852:4(H);SDN, 11 Dic. 1852: 4(H); Orozco 1887:387-388(B).
- 1845 Cuernavaca, **7**, con mas de 61 Localidades donde se registró, con una intensidad máxima de 13 en la Ciudad de México. DO, 21 Abr.1845:442(H)
- 1852 Intensidad registrada en Cuernavaca: 5. Magnitud estimada 7.8 en la subducción Jalisco Michoacán.
- El sismo de 1882 afectó al menos 110 localidades del país, con afectaciones en Cuernavaca donde duró al menos 15 segundos (a pocos km de Jiutepec), con una intensidad de entre 4 y 6 grados de Intensidad. SDN, 20 Jul.1882:2(H);VE, 20 Jul.1882:3(H)
- 1854 Magnitud 7.2, 22 localidades donde se registró.
- 1857 Cuernavaca 4, máxima de 7. Yautepec, Mor. A las once y veinte minutos se sintió en la villa de Yautepec. Repitió pocos momentos con muy pocas oscilaciones, y al fin hubo una violenta trepidación que echó abajo la cúpula de la torre del templo principal. El resto del edificio, la casa cural y las escuelas han quedado amenazando ruina. Fueron 13 localidades donde se registró. SDN, 24 Ago.1857:3(H).
- El sismo de 1887 pudo haber sido de una intensidad de alrededor de 4 en la zona de Morelos.
- En 1889 fue de **4** En Cuernavaca: a 3 horas 50 minutos p.m., temblor oscilatorio de N. a S.; duración 5 segundos. MR, 10 Sept.1889:2(H);SDN, 9 Sept.1889:2(H).
- El de 1894 pudo haber sido de intensidad 4 en Morelos. Afecto a diversas regiones en el país.
- El temblor de 1896 también se sintió de **4** en Cuernavaca, teniendo una intensidad máxima de 6 en otras partes. El Observatorio Meteorológico Central [...] a 8h. 30m., temblor. MR, 24 Mar.1896:3(H).

---

5 de septiembre de 1910. El SSN quedó bajo el cargo del Instituto Geológico Nacional dependiente de la Secretaría de Minería y Fomento. Entre 1910 y 1923 se instalaron 9 estacines sismológicas mecánicas autónomas.

- 1902 Pudo haberse sentido en Morelos con intensidad alrededor menor a 4.
- 1912 Cuernavaca: Cancani: III; oscilatorio Instituto, 1914:342-344(B).
- 1957-07-28 Magnitud: 7.8 Localización: 47 km al NORESTE de SAN MARCOS, GRO Profundidad: 33 km
- 1973-01-30 Magnitud: 7.6 Localización: 43 km al Sureste de Coalcoman, Mich. Profundidad: 24km
- 1985-09-19 Magnitud: 8.1 Localización: 45 km al NOROESTE de LA MIRA, MICH Profundidad: 15 km
- 1999-06-15 Magnitud 7.0 Localización: 29km al suroeste de S. Gabriel Chilac, Puebla. Hubo 800 inmuebles catalogados como patrimonio afectados sobre todo el estado de Puebla.
- 2017-09-19 magnitud **7.1** intraplaca, localizado en el límite estatal entre los estados Puebla y Morelos, con hipocentro a 12 km al sureste de Axochiapan, Morelos y a 120 km de la Ciudad de México.

Después de analizar la historia sísmica podemos entender que la zona tiene una actividad sísmica importante. La faja volcánica mexicana, tiene fallas geológicas con periodos de recurrencia muy largos, es decir los sismos son muy esporádicos. Los fenómenos más destructivos en Morelos suelen ser provocados por sismos profundos vinculados al proceso de subducción de la placa de cocos bajo la placa norteamericana, es difícil asociarlos a un periodo de retorno, sin embargo en Jiuatetpec se identifica un periodo de retorno de aproximadamente 317 años<sup>85</sup> para una aceleración de 0.15g o mayor.

Como pudimos constatar, el templo y ex-convento de Santiago Apóstol ha soportado una gran cantidad de episodios sísmicos desde sus inicios.

Para realizar un análisis sísmico no debemos considerar unicamente un espectro de un sismo que ya ocurrió, ya que nunca se repetirá exactamente de la misma forma o magnitud. Por lo que en este trabajo se opta por calcular la aceleración máxima del terreno que podría soportar el edificio antes de colapsar, cubriendo un rango mas grande de posibles eventos sísmicos.

En la siguiente sección analizaremos particularmente las características del último sismo fuerte registrado y sus efectos.

---

85 2014. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO  
<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/55.pdf> p.111

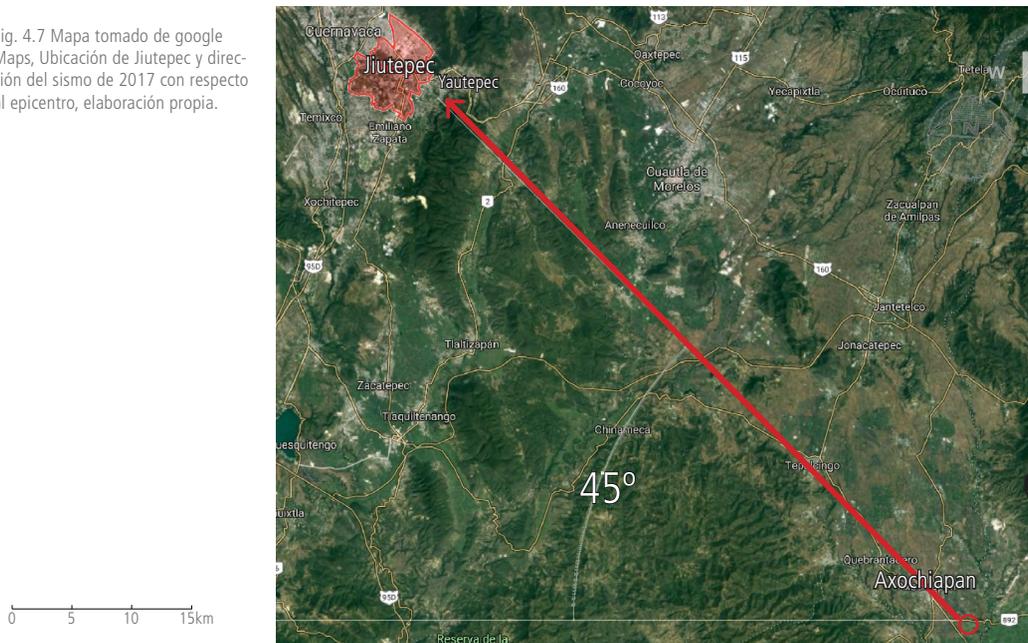
## El sismo del 19 de Septiembre 2017

Este sismo fue muy destructivo y se encuentra bien registrado, ocasionó daños considerables en toda la región de Morelos con más de 1000 templos afectados. Buena parte del estado de Puebla, el sur del Estado de México y la CDMX también sufrieron daños. Fue un sismo intraplaca causado por una falla de tipo normal, con una magnitud  $M_w$  7.1 con hipocentro cerca de Axochiapan, Morelos, a 57 Km de profundidad<sup>86</sup>. El epicentro fue a 72 Km de Jiutepec.

El ángulo y la dirección con la que recibió el impacto fue aproximadamente a los 45 grados con respecto al epicentro, como se observa en la figura 4.7. El registro de datos mas cercano es la Estación Sismológica Yautepec, Mor (SSN)<sup>87</sup> a 14km de Jiutepec.

El sismograma obtenido de la estación YAIG revela aspectos relevantes. Se pueden observar las amplitudes, que corresponden a la aceleración en gals o g, la mayor de estas fue de 225 gals (0.229g) en dirección norte-sur como se aprecia en la figura 4.8. A partir de los datos pueden obtenerse también las frecuencias<sup>88</sup> fundamentales del sismo.

Fig. 4.7 Mapa tomado de google Maps, Ubicación de Jiutepec y dirección del sismo de 2017 con respecto al epicentro, elaboración propia.



86 Servicio Sismológico Nacional. México: SSN, (2017). Disponible en: <http://www.ssn.unam.mx/>

87 Estación YAIG a cargo del SSN, con una Latitud 18.862517 y Longitud de -99.066987

88 La frecuencia es el número completo de longitudes de onda que pasan por un punto, puede ser calculada conociendo la velocidad de propagación y la longitud de onda, las unidades en que se mide son los Hertcios (Hz).

En la siguiente sección analizaremos los daños que éste sismo causó al inmueble analizado, solo mencionaremos en general los daños sufridos por el templo y exconvento de Santiago Apóstol. La torre no resistió el sismo, colapsando el cuerpo superior y quedando solo la mitad del inferior. Sin embargo, el resto de la estructura del templo resistió. Las bóvedas solo presentaron colapsos parciales de los arcos fajones, así como agrietamientos considerables. También hubo colapsos de elementos como la linternilla, una sección de la semicúpula sobre el presbiterio, así como parte del arco triunfal que la soportaba, también una parte de la cúpula octagonal. Pese a la violencia de dicho sismo, la estructura global permaneció. Estos colapsos parciales de elementos pudieron representar una gran pérdida en vidas humanas de haber ocurrido en horario de servicio de la parroquia. Afortunadamente no ocurrió así.

Para comprender los mecanismos de falla que se produjeron se expondrán algunas consideraciones generales sobre el comportamiento de la mampostería durante un sismo, así como el

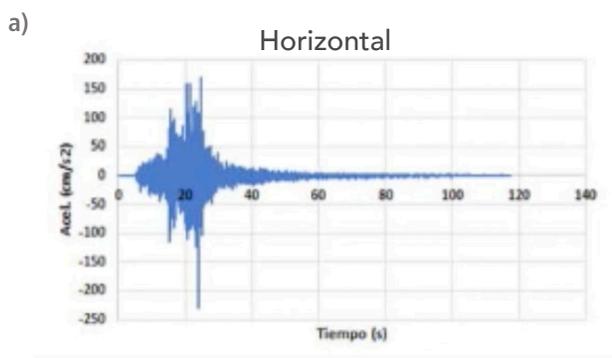
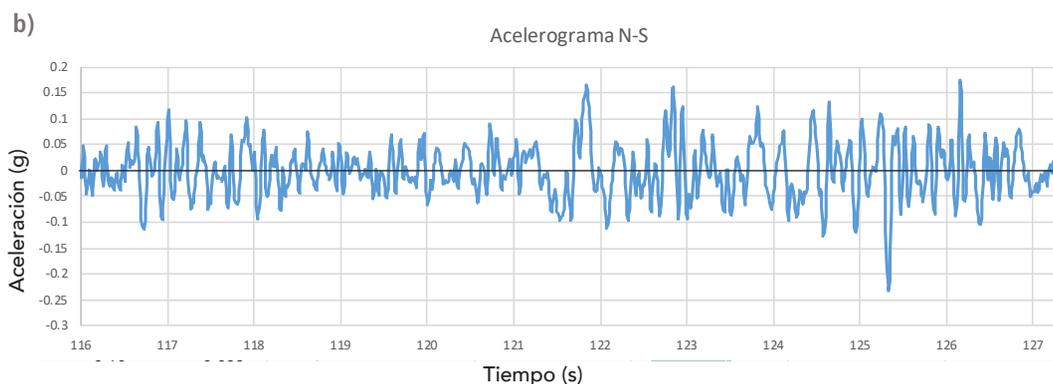


Fig. 4.8 Acelerogramas Norte-Sur del sismo del 19 de septiembre 2017 obtenido de la estación Yai, Yauatepec, Servicio Sismológico Nacional.

- a) En unidades Gal con 140s graficados
- b) En unidades **g** con los principales 11s graficados.



desafío que representa su análisis.

### 4.3 El comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería.

En México se han identificado las condiciones de vulnerabilidad de las edificaciones en caso de sismos, el CENAPRED<sup>89</sup> las identifica de la misma forma que se ha hecho en otros países. Entre estas vulnerabilidades se encuentran las siguientes:

Planta baja débil asociada a una planta libre, discontinuidades de los elementos estructurales, muros trabes y columnas, asimetrías en pesos, voladizos y formas irregulares, cantidad de vanos con respecto a muros, entre otros.

En cuanto a la mampostería, el reglamento de construcciones del Distrito Federal las aborda con una clasificación de confinada y no confinada. Como parte de las normas técnicas complementarias de mampostería se suscriben las distancias y los lugares donde deben tener el confinamiento de concreto armado (castillos y cerramientos) a manera de diafragmas rígidos.

Hemos de notar que estas características son aplicables a edificaciones modernas y contemporáneas con amplio uso del acero y el concreto armado. No obstante, todas las edificaciones anteriores no responden a estas características, ya que son esencialmente diferentes y las rigen otras premisas de diseño y seguridad al poseer formas y propiedades muy distintas. Por lo que estas consideraciones del reglamento de construcciones y las del CENAPRED resultan de poca o nula utilidad para el análisis de los edificios de mampostería previos al siglo XX.

Entre otros fenómenos identificados que pueden causar el colapso de las estructuras se encuentra la resonancia, que ha sido estudiada desde 1960 por George W. Housner<sup>90</sup>. Este fenómeno sucede cuando la vibración natural de los edificios y la vibración natural del suelo se encuentran en sintonía, es decir, cuando la frecuencia de resonancia del suelo y la del edificio donde se encuentra son idénticas. Como resultado se produce una amplificación de la onda sísmica que conduce al colapso de la estructura. Estas edificaciones pueden ser simplificadas y modeladas como péndulos invertidos, y dependiendo las ondas propagadas por el sismo, la ubicación de este, así como su periodo natural. De esta forma serán más afectadas unas estructuras de mayor o menor altura dependiendo las características del suelo, la aceleración y la altura de la estructura.

Sin embargo, de nuevo estas consideraciones no pueden realizarse del mismo modo a edificaciones históricas de mampostería RNT<sup>91</sup> (materiales rígidos sin resistencia a la tracción). La dinámica de la

89 Centro Nacional de Prevención de Desastres, <https://www.gob.mx/cenapred>.

90 En 1963 publica The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes

91 Angelillo, 2014. Mechanics of masonry structures. p. 118. Por sus siglas en ingles: RNT (rigid non tensional material) This model requires no material parameters since strength and stiffness in compression are assumed to be infinite whilst they are completely neglected in tension.

edificación está regida por su masa y geometría y su articulación como bloques rígidos. La respuesta inicialmente elástica no es duradera, y cuando el movimiento es suficientemente fuerte, la estructura se rompe en partes articuladas formando un mecanismo. No existe un fenómeno de amplificación, pues en el momento en que existe suficiente aceleración y movimiento horizontal, se desencadena ese mecanismo de colapso. Dicho movimiento no es armónico y no está caracterizado por la amplificación por el efecto de la acción periódica debido a frecuencias similares (resonancia).

Sin embargo, las estructuras esbeltas de mampostería (como torres u obeliscos huecos) el efecto elástico resulta más relevante, 30% elástico 70% RNT (M. Angelillo 2019)<sup>92</sup>. Sin embargo, tampoco ocurre la amplificación por resonancia característica de la oscilación elástica, ya que en una estructura RNT como un arco, la apertura inicial de rótulas inmediatamente cambia la frecuencia de resonancia<sup>93</sup>. Lo anterior debe considerarse aunado a los efectos del sitio, ya que el subsuelo en si mismo puede amplificar las ondas. El caso más conocido es el de la CDMX, ubicada en suelo lacustre que registra un fenómeno de amplificación de las ondas. Como ilustra M. Angelillo, al descartar el efecto elástico se puede asumir que la edificación se mueve a la misma velocidad del suelo, y que las ondas sísmicas al ser a distancias generalmente de kilómetros, puede considerarse esencialmente que el suelo se mueve como un cuerpo rígido.

Existen otros fenómenos que no se estudian en el presente trabajo ya que no son relevantes para la zona de estudio, como la interacción suelo-estructura, o la subsidencia que es cuando el nivel del terreno desciende debido a la extracción de agua del subsuelo durante el fenómeno sísmico. Otras lesiones debidas a los hundimientos diferenciales de los cimientos se deben a las características del suelo. Este tipo de agrietamientos se producen de manera progresiva, y la forma de las fisuras depende de si el movimiento es descendente o de desplazamiento. Por ello es importante monitorear la estructura, ver los desplomos y diferencias de nivel y si esos asentamientos son considerables. Este no es el caso del templo de Santiago Apóstol donde son mínimos y no existe evidencia de dichas lesiones.

En los siguientes subtemas se abordarán los distintos tipos de falla que se producen en el sismo y cuales se encuentran presentes el templo de Santiago Apóstol a través de modelos simplificados<sup>94</sup> unilaterales.

---

92 Maurizio Angelillo, profesor de Mecánica estructural en la Universidad de Salerno. Se especializa en mampostería y dinámica. Comenta que "La imposibilidad de los modelos elásticos para definir correctamente el estado inicial de la estructura, debido a las incertidumbres de las condiciones de contorno y su historia previa."

93 DeJong, M. J. 2009. Seismic assessment strategies for masonry structures. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology. p. 95

94 Angelillo, M. Ed. 2014. Mechanics of masonry structures. London, UK: Springer. p. 2

## Modos de falla locales y por carga sísmica en mampostería.

Existen fallas locales del material, que sucede cuando se parte un elemento pequeño de la mampostería como un sillar o parte del mortero. De esta manera quedan dos elementos separados, usualmente ocurre en sillares individuales. Estas fallas no comprometen la estabilidad de la estructura.

Otro tipo de falla es debido al cortante del elemento en su propio plano, se presenta en un muro sujeto a grandes cargas compresivas y a cortante. Típicamente se manifiestan en grietas diagonales (de desplazamiento y de fractura en el muro). Sucede cuando la carga es crítica o cercana al colapso, pueden suceder en elementos adecuadamente diseñados cuando la fuerza excesiva del sismo lo provoca.

El otro modo de falla es por aplastamiento, donde ciertos elementos, típicamente columnas o muros esbeltos son sometidos a una carga excesiva a compresión, causando desplazamiento de material. Este tipo de falla suele ser repentina y ocasiona la separación en partes del elemento y no es tan común en edificaciones históricas al tener en general dimensiones muy considerables.

El mecanismo de colapso más típico durante un sismo es el volteo fuera del plano. Este mecanismo puede ocurrir bajo el peso propio del elemento, típicamente un muro, también puede ser favorecido por el golpeteo de una techumbre pesada. Este fenómeno ocurre por un diseño erróneo o por modificaciones inadecuadas, como retirar muros transversales o cambiar la techumbre. Este mecanismo fue descrito por Antonino Giuffré y se muestra en la figura 4.5. Dicho mecanismo también puede ocurrir en arcos, ya que solamente resisten cargas en un solo sentido y las cargas fuera de su plano suelen ocasionar su colapso.

Cap. 2 tav. 2

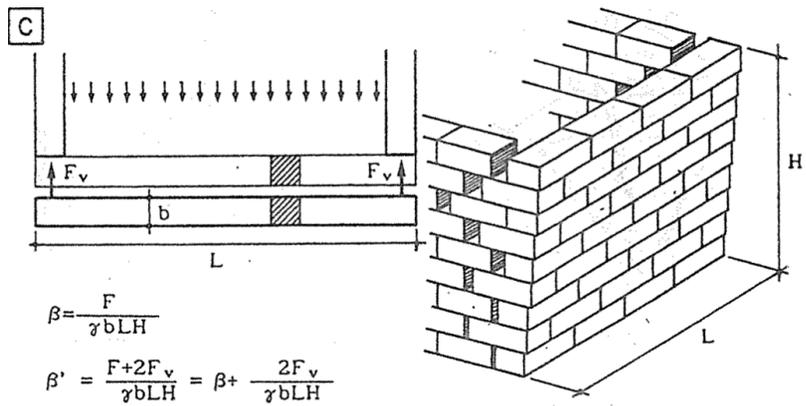
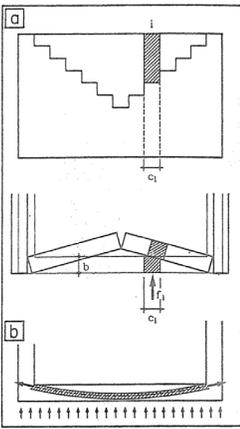


Fig. 4.9 Esquemas de Antonino Giuffré publicados en 1988 para explicar el volteo fuera de plano.

## Daños ocasionados durante el 19S a Santiago Apóstol

Analizando los conceptos anteriores y el conocimiento de la geometría y la mecánica del inmueble en cuestión, se pueden interpretar los daños ocurridos en el sismo del 19 de Septiembre 2017. Volviendo al fenómeno sísmico, la dirección de las ondas sísmicas fue de  $45^\circ$  como se observa en la figura .. la aceleración horizontal máxima registrada fue de 225 Gals. Los movimientos desencadenaron el colapso fuera de plano de múltiples elementos del claustro alto, como el muro sur este del convento, así como ambas arcadas casi perpendiculares a la dirección del sismo.

En la parte trasera del convento (fachada sur este), el colapso del muro fue favorecido por las múltiples modificaciones que sufrió el claustro alto. Particularmente la colocación de una techumbre de concreto armado, que con una mayor rigidez que los propios muros en gran medida precipitó su colapso. El sistema constructivo que se conservaba intacto en la planta baja (muros y bóvedas) no sufrió daños mayores en esta zona.

En el templo, los daños se concentraron principalmente en la zona del presbiterio y sobre el coro con el colapso de la torre. Los daños por el sismo en la cúpula hexagonal sobre el presbiterio son significativos ya que presenta grietas a lo largo de todas las nervaduras, y también presenta grietas horizontales. La estabilidad de la misma quedó en un estado delicado, al haber colapsado la zona de la clave del arco testero y parte de los arcos formeros que funcionaban como sus apoyos. Como se estudió en el capítulo anterior, el arco testero es el

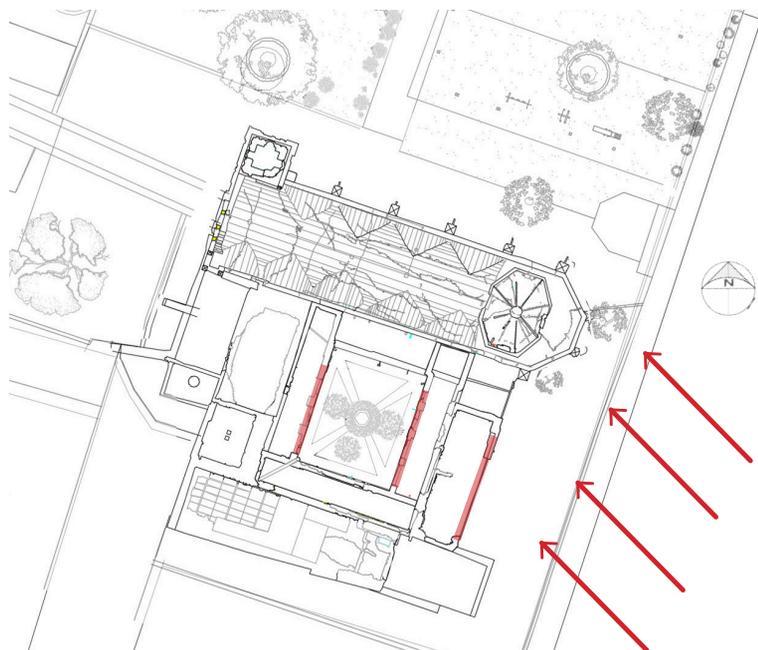


Fig. 4.10 Planta de conjunto de Santiago Apóstol, en rojo elementos colapsados por volteo fuera de plano. Flechas indican dirección de la fuerza sísmica.



Fig.4.11 Grietas diagonales debido al cortante, presentes en muros debajo de ventanas, zona del presbiterio.



Fig.4.12 Colapso de sección de cúpula octagonal y semicúpula.

receptor de cargas de la cúpula octagonal y el coceo de la semicúpula. Aunque su resultante es considerablemente vertical, la aceleración sísmica horizontal ocasionó un mecanismo semejante al volteo fuera de plano, que a diferencia de las bóvedas o cúpulas el arco solo trabaja en su plano. Al fallar este elemento causó el colapso de porciones de la cúpula y semicúpula. Sin embargo, la cúpula no colapsó en su totalidad, ni siquiera en todo el gajo, ya que la línea de empujes encontró una trayectoria alterna, típicamente desplazándose por encima del material colapsado. Esta migración de la línea de empujes puede ilustrarse con la figura 4.13 extraída de Bessonov, 1989. Se observa que al colapsar los arcos que sostienen la cúpula, las pechinas siguen transmitiendo la carga a los pilares, y la línea de empujes migra más arriba, evitando así el colapso total.

El muro sur oeste del templo se separó parcialmente de la cúpula, causando fracturas en muros de hasta 25cm en el presbiterio, que corren verticalmente pasando por el medio de cada muro y atravesando los vanos en dichos muros. La mayoría de estas grietas diagonales son producidas a cortante de los elementos en su propio plano, reflejándose particularmente en el gajo sur-oeste de la cúpula, y en los muros y vanos, sobretodo presentes en la zona del presbiterio. La diferencia entre los arcos formeros de la nave del templo y los arcos del presbiterio es que los del presbiterio soportan a la cúpula, influyendo de forma directa en su estabilidad. En cambio los arcos formeros de la nave pueden colapsar individualmente, como sucedió en algunos casos. Pese a lo cual la bóveda siendo autoportante no se encuentra en un estado inestable, ya que como quedó demostrado, su geometría y espesor es suficiente para alojar cómodamente a la línea de empujes. Puede observarse también que el patrón de grietas de los arcos fajones no corresponde a la misma ubicación, por lo que fueron ocasionadas por otro mecanismo. En la sección siguiente se abordarán los mecanismos que se forman en la bóveda.

Fig.4.13 Esquema de Bessonov 1989, figura 2.27 de su libro *Análisis y consolidación de sistemas abovedados*.

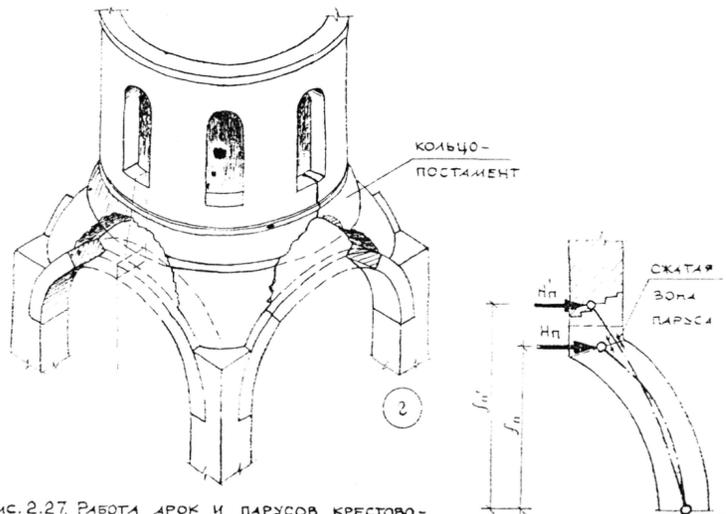


Рис.2.27. РАБОТА АРКОВ И ПАРУСОВ КРЕСТОВО-



Fig.4.14 Colapso fuera del plano de segundo nivel del convento.



Fig.4.15 Techumbre de concreto armado que favoreció el colapso fuera de plano del muro del segundo nivel.



Fig.4.16 Colapso fuera de plano de arcada en claustro alto del convento.



Fig.4.17 Techumbre de concreto armado sobre los muros de tezontle.

También existen grietas transversales en la zona sur del coro y bóvedas que indican una separación de la fachada principal, pero el movimiento fue insuficiente para ocasionar un volteo fuera de plano.

#### 4.4 Modelos de análisis y experimentación física.

El concepto de seguridad estructural es relativamente reciente y se incluye en los reglamentos de construcciones. Se debe garantizar la seguridad de los usuarios de un inmueble que debe resistir las solicitaciones que pueda llegar a tener. El objetivo en una edificación histórica es evitar las pérdidas humanas y mantener el carácter de estos monumentos, para lo cual es necesario comprender sus mecanismos característicos y evaluar su respuesta ante un evento sísmico con un modelo apropiado.

Una forma de analizar a la mampostería es por medio de modelos físicos. Como vimos en la sección anterior, se opta por el análisis límite y la utilización de modelos tipo RNT, “materiales rígidos que no resisten tracción”, ya que son los modelos más adecuados para interpretar el comportamiento real de la estructura. Heyman aclara que el análisis límite con enfoque del equilibrio funciona para edificaciones bajo estado estático, donde la línea de empujes se utiliza para visualizar la trayectoria de las fuerzas dentro de la estructura considerando su comportamiento característico a compresión, prediciendo en que momento los mecanismos de colapso sucederán. Utilizando los modelos inclinados podemos encontrar los mecanismos de colapso desencadenados durante el sismo, por medio de una combinación de métodos analíticos y experimentales.

Fig. 4.18 Modelo de yeso escala 1:30 con geometría simplificada de la bóveda.



Con un modelo en yeso de 54x58cm, correspondiente a la sección de la nave del templo de Santiago Apóstol escala 1:30 simplificando su bóveda de lunetos a una de cañón corrido, se puede analizar su comportamiento durante el sismo. Se subdivide en 3 bloques, cuyas divisiones corresponden a las fracturas registradas posterior al sismo del 19s. Primero se lleva hasta el colapso el modelo por medio de aceleraciones bruscas en la base. Este movimiento es meramente ilustrativo para entender el mecanismo de disipación de energía que se forma con la interacción de las diferentes partes en movimiento, ver figura 4.18.

Uno de los problemas que tienen este tipo de modelos es el deslizamiento que ocurre entre las piezas, al no poder escalar la fricción real de la estructura (que es muy alta). En este trabajo este problema se subsana por medio de hilos débiles, atando algunas piezas entre sí, implementando papel de lija en la base, permitiendo el movimiento pero restringiendo su deslizamiento.

De la misma forma que para la bóveda, se realizó un modelo de la cúpula octagonal de Santiago Apóstol, escala 1:30 en yeso de 38x29cm. Siguiendo fielmente su geometría, se subdividió en 18 bloques que corresponden a las principales grietas y fracturas que sufrió, separando cada gajo de forma independiente. Se omite la linterna, y se simplifican las ventanas, dejando solamente el vano de cada gajo. No se ataron las piezas entre sí.

Con este modelo se probó la hipótesis de estabilidad en gajos independientes y opuestos, así como la hipótesis de su construcción sin cimbra, evidenciando que cada gajo se equilibra con su contrario y con sus adyacentes, inclusive no estando unidos.

Fig. 4.19 Modelo de yeso escala 1:30 de la cúpula octagonal,



a) Dos gajos de la cúpula octagonal equilibrándose.



a) Cúpula octagonal completa

## Modelo de inclinación

La idea de realizar experimentos de inclinación fue sugerida por Otto Frei<sup>95</sup> en 1986, utilizando los conceptos de estabilidad contra la inclinación para simular el viento y los sismos. Según Otto Frei, los antiguos constructores pensaban diversas hipótesis que corroboraban por medio de modelos para tener un conocimiento práctico aplicado a un modelo a escala de geometría similar, para conocer la estabilidad general del edificio antes de ser construido.

Actualmente es un procedimiento que puede ser utilizado con relativa facilidad para el análisis de estructuras de mampostería, de forma afín al análisis límite. Aunque no captura totalmente la dinámica que ocurre durante el sismo, los mecanismos desencadenados son muy similares y se utiliza para resolver un problema exclusivamente de estabilidad. Una capacidad grande de resistir la inclinación indica una estabilidad grande y por tanto seguridad.

Para poder obtener valores límite de colapso a partir del modelo, se opta por realizar ésta prueba de inclinación. Consiste en inclinar el modelo paulatinamente hasta ocasionar su colapso registrando el ángulo preciso en el cual ocurrió. Dicha experimentación busca obtener cual es la aceleración mínima del suelo necesaria para ocasionar el colapso. Esto relacionando el valor de la inclinación con un valor de fuerza horizontal constante necesaria para desencadenar el mecanismo de colapso.

DeJong describe<sup>96</sup> la relación de la siguiente forma. La equivalencia estática de la inclinación a la aceleración horizontal tiene dos componentes que se aplican sobre la estructura, una horizontal ( $\ddot{u}_h$ ) y una vertical ( $\ddot{u}_v$ ). La proporción de ambas aceleraciones con respecto al ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) resultan en la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{\ddot{u}_h}{\ddot{u}_v} = \tan \alpha$$

$\ddot{u}_h =$  *aceleración horizontal*  
 $\ddot{u}_v =$  *aceleración vertical*  
 $\gamma =$  *Aceleración mínima que ocasiona el colapso (g)*

Para ejemplificar esta idea se utiliza un solo bloque como se observa en la figura.. describiendo lo que sucede al realizar este experimento. En la figura a) se observa el bloque perfectamente estable, experimentando únicamente una aceleración vertical debido a la gravedad (g). En cambio en b) cuando se inclina el bloque existe un ángulo límite donde el centro de gravedad (c.g) y la bisagra (o) se encuentran alineados, por consiguiente la carga del bloque sigue esta trayectoria, más allá de este ángulo el vuelco sucederá. El ángulo  $\alpha$  crítico permite la equivalencia a una aceleración horizontal del suelo ( $\ddot{u}_g$ ) que puede causar el vuelco del bloque sin inclinar.

95 Otto Frei 1986. Geschichtedes Konstruierens revista Arcus p. 35/46.

96 DeJong, M.J (2009). Seismic Assessment Strategies for Masonry Structures. Ph.D. thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. p. 39.

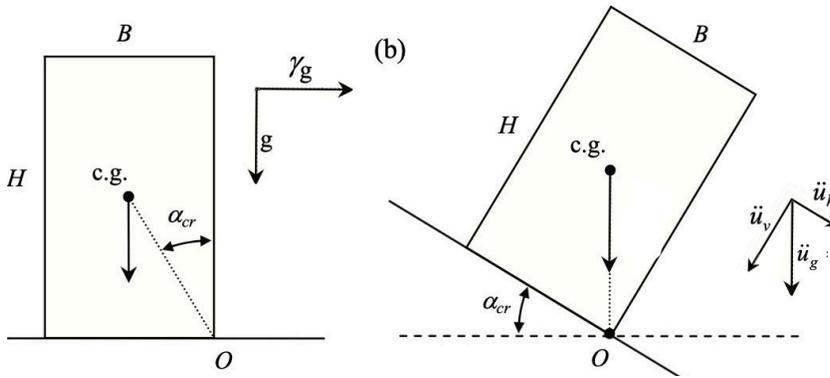


Figura. 4.20. Basado en DeJong (2009), Tilting thrust line analysis of a single block. Inspirado en Housner.

$$\ddot{u}_g = \gamma; \text{ donde } \gamma = \tan \alpha = B / H$$

Utilizando este mismo principio se pueden analizar distintas estructuras.

### Análisis de la bóveda

Se comienza por la bóveda, gracias al modelo de yeso escala 1:30, se coloca sobre una superficie horizontal que se inclina paulatinamente hasta conducirlo al colapso. Grabando todo el proceso y repitiendo el procedimiento 4 veces. En una de las pruebas se cambió la posición de las rótulas según la variación real observada a lo largo de la nave, esta variación no tuvo consecuencias significativas en el ángulo crítico obtenido. El resultado fue un ángulo de colapso en promedio de  $13.4^\circ$  como se muestra en la figura 4.21. Siguiendo el procedimiento antes descrito, se realizó la equivalencia de dicho ángulo siendo de  $0.238g$ . Lo anterior nos indica que se requeriría una aceleración de al menos esa magnitud para ocasionar un mecanismo de colapso del sistema de muros y bóvedas en la nave del templo.

Como se observa en la figura 4.22, utilizando el procedimiento y los mismos pesos indicados en el capítulo anterior para el análisis de la nave del templo, se traza la línea de empujes de la misma sección con una inclinación próxima a  $14^\circ$ , que fue el valor máximo alcanzado. La trayectoria de la nueva línea de empujes explica y valida el experimento al comprobar que en el modelo, con el ángulo de inclinación máximo logrado, la línea de empujes es tangente a los bordes formando un mecanismo de 4 rótulas que para una estructura estática indica un colapso. Lo anterior constituye una evaluación cuasi-dinámica de la estructura. Las nuevas rótulas formadas en la bóveda son explicadas con el mismo marco de análisis límite, ambas por debajo del nivel de la clave y por encima del nivel del relleno, abriéndose una hacia el trasdós y otra hacia el intradós, intercalándose dependiendo de la dirección del movimiento. Dichas rótulas coinciden con las grietas y dislocamientos presentes en secciones de la bóveda.

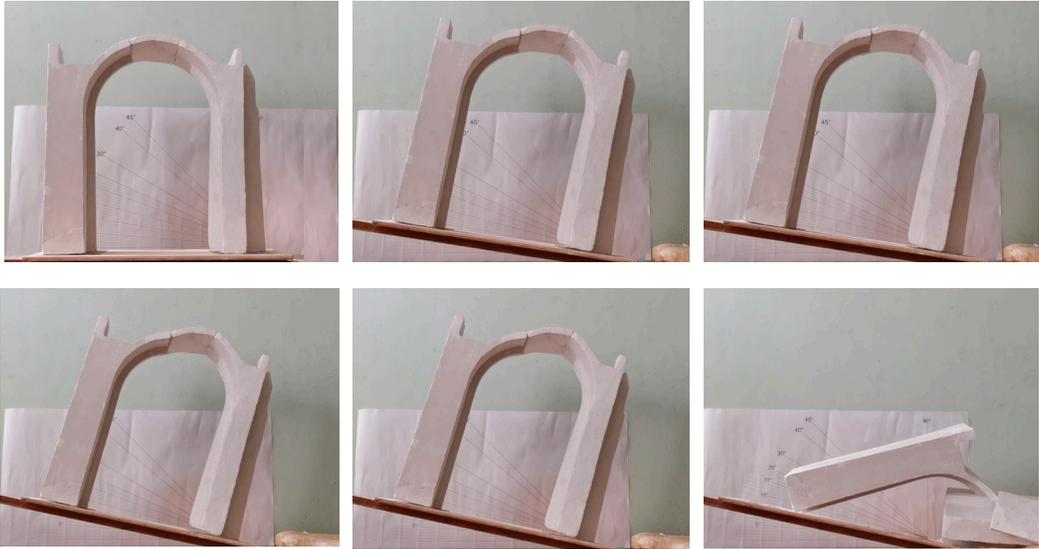


Fig. 4.21 Secuencia fotográfica durante la inclinación modelo de yeso para sección transversal del templo esc.1:30 prueba No 2. elaboración propia.

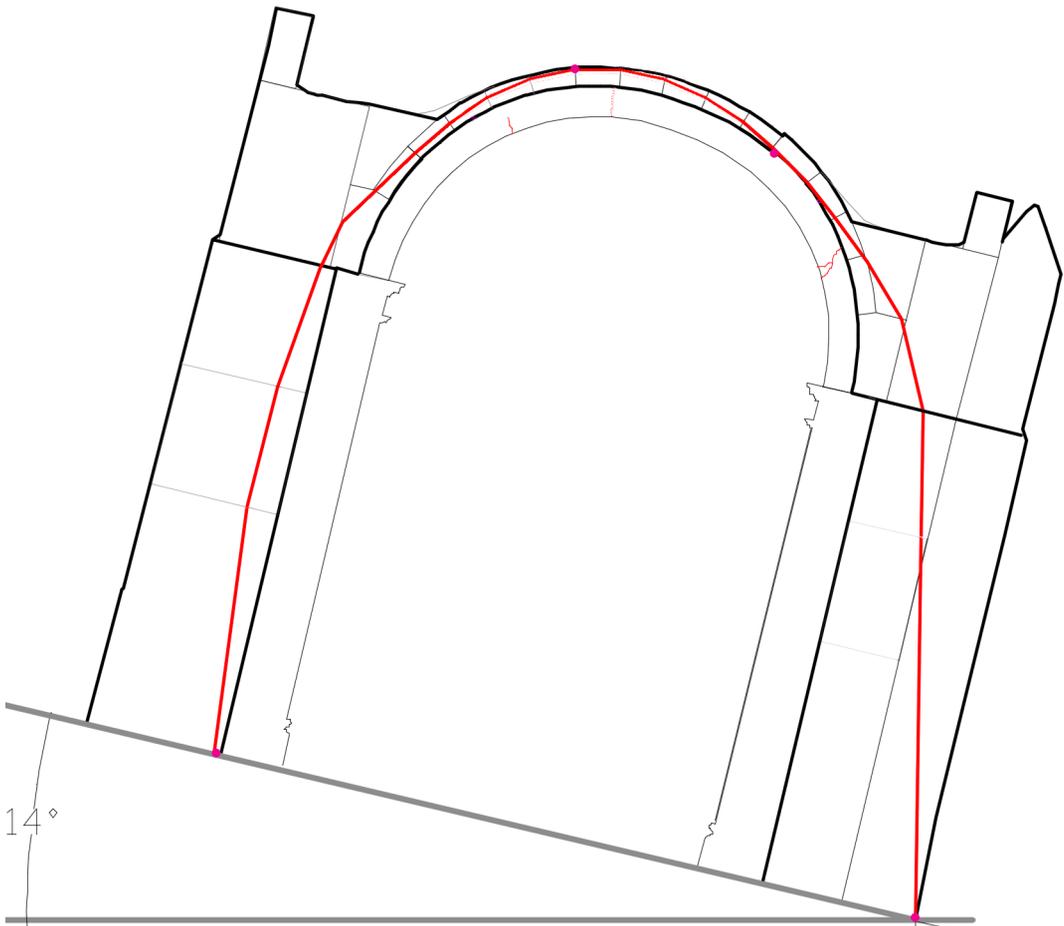


Fig. 4.22 Ultima línea de empujes admisible en la sección transversal del templo inclinada, formando el mecanismo de colapso. Elaboración propia.

Para explorar los límites de la estabilidad de la bóveda ante los sismos, es necesario comparar los valores obtenidos en las pruebas de inclinación con los valores registrados en sismos reales. La aceleración horizontal máxima del terreno durante el sismo del 19S 2017 registrada cerca de Jiutepec, fue de 225 Gal (0.229g). Sin embargo, la geometría de la estructura puede sostener mayores aceleraciones antes de colapsar, como se demostró con la prueba de inclinación que arrojó un resultado mínimo de 0.238g. De esta forma se estima la capacidad sísmica de ésta estructura abovedada, no obstante su rango de seguridad dependerá de más factores, no solo de ambos valores antes comparados. Incluso se podría considerar una pequeña contribución del arco fajón para aumentar la capacidad horizontal. El análisis anterior permite comprender que las grietas presentes en la bóveda no representan de forma indiscriminada un riesgo, son la forma en que la estructura pudo evitar el colapso liberando la energía. Esta forma de liberar energía permite a la estructura soportar grandes aceleraciones inclusive al límite de la carga sísmica .

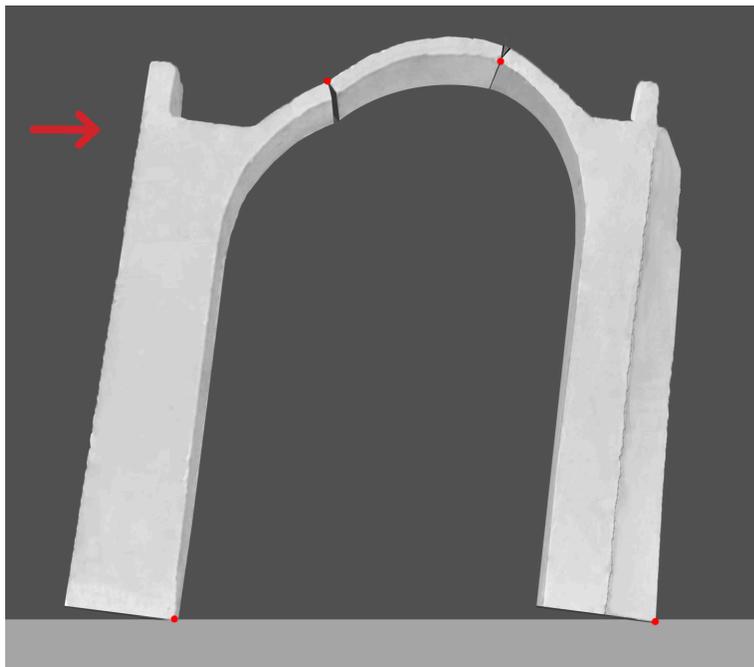


Fig. 4.23 Esquema para indicar el movimiento horizontal y la formación de las 4 rótulas en la bóveda.

### Análisis de la cúpula

Las pruebas de inclinación se realizaron en el lado mas vulnerable al sismo, es decir el transversal. Se registró el angulo de la primera prueba en 26°, de la segunda en 25° y conforme se realizaron más pruebas se redujo el primer ángulo alcanzado debido al desgaste de las piezas en cada colapso y la perdida de entrelazado entre los gajos al redondearse los bordes de las mismas.

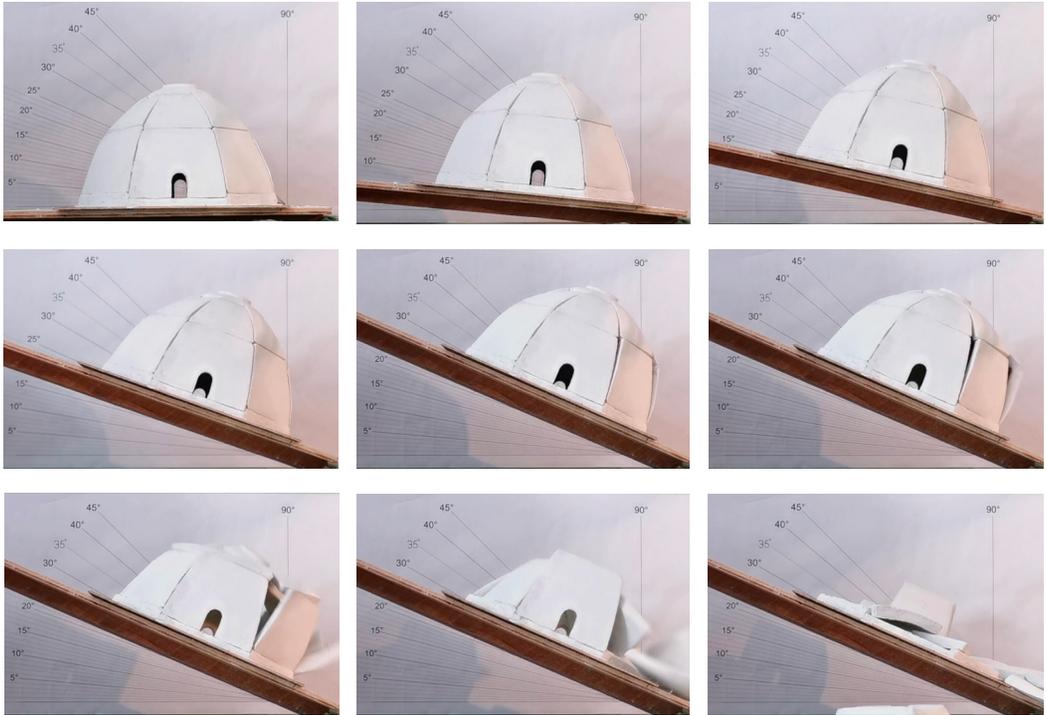


Fig. 4.24 Secuencia fotográfica durante la inclinación modelo de yeso de la cúpula octogonal esc.1:30 prueba No 2. Angulo obtenido de 25°.

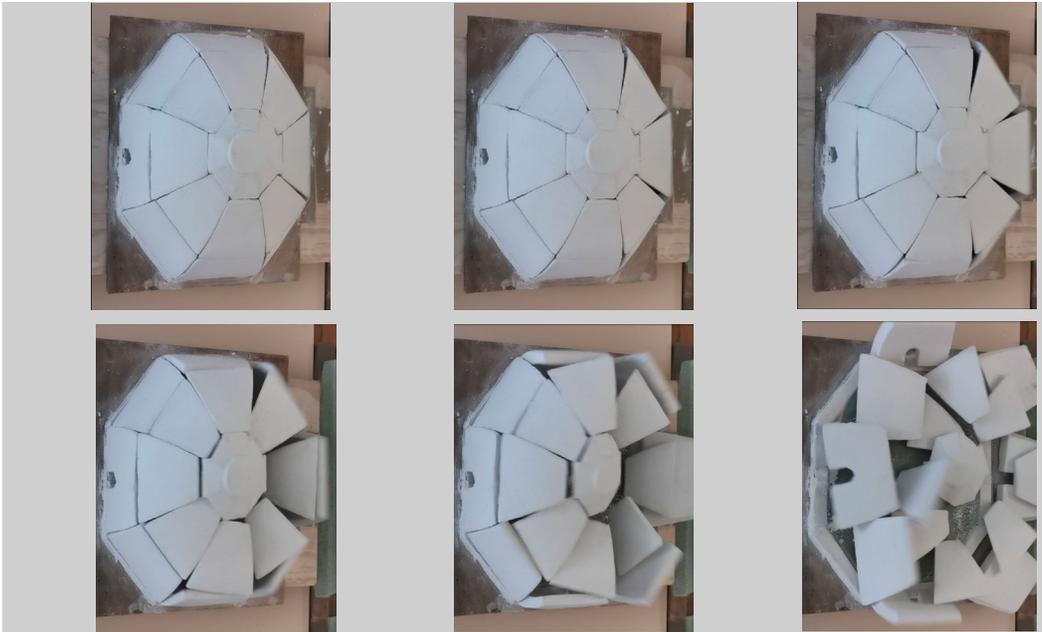


Fig. 4.25 Secuencia fotográfica desde arriba durante la inclinación modelo de yeso de la cúpula octogonal esc.1:30 prueba No 4. elaboración propia.

Como se muestra en la figura 4.24 y 4.27, también se registró el mecanismo de colapso desde una vista superior, con la clave y sin la clave. Se observa la apertura de los gajos y el descenso de la clave y el subsecuente colapso de todos los gajos. Existe una significativa diferencia al retirar la clave repitiendo la inclinación, la separación de los gajos y el hundimiento ocurre de un solo lado, formando el mecanismo casi de forma independiente a su lado contrario, colapsando en un ángulo de  $20^\circ$ , menor al logrado con la clave.

Los resultados demuestran una gran estabilidad ante el sismo, resistiendo una aceleración en la base de al menos a  $0.35g$  por lo que es claro que su geometría es muy estable. No existe un registro de la velocidad a la que se movió la base de la cúpula durante el sismo, sin embargo podemos comprobar que su fallo principal fue de su sistema de apoyo. Inclusive con el colapso o daño de dos gajos, su configuración geométrica le permite continuar en pie, estabilizándose entre sí gajo con gajo.

Como se muestra en la figura 4.26, a partir de la sección transversal a una inclinación de  $18^\circ$  donde se puede hallar una línea de empujes cercana del límite de la fábrica ocasionando la formación de rótulas, que coinciden por el intradós con una de las fracturas horizontales más grandes. A diferencia de la bóveda, en la cúpula intervienen más factores en su estabilidad como las fuerzas anulares, sin embargo en este análisis no se consideran por lo que la línea de empujes solo se ilustra en la mitad de la cúpula con el mismo procedimiento antes descrito.

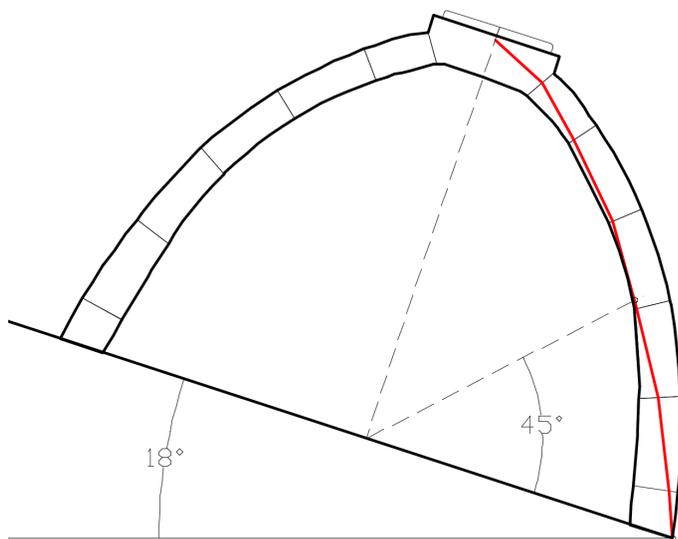


Fig. 4.26 Línea de empujes sobre sección de cúpula con inclinación de  $18^\circ$ . Elaboración propia.

Fig. 4.27 Secuencia fotográfica de vista superior de inclinación del modelo sin zona de clave.



El análisis sísmico es de gran complejidad y existen más factores que inciden directamente en la estabilidad de la estructura, como el periodo del sismo. Entre mas largo, menor la frecuencia, y mayor riesgo para éstas estructuras con un grado de libertad, en la realidad el deslizamiento entre los bloques es mucho menor que el de los modelos, prácticamente inexistente debido a la fricción. El sismo no es una fuerza horizontal continua, existen oscilaciones que permiten a la estructura ir y venir formando las rótulas y liberar energía, para un sismo de periodo corto de frecuencia 3 Htz o mayor la estructura colapsara a mas de 3 veces su valor estático de colapso (estimado por medio de la inclinación). La geometría sigue siendo el elemento más esencial. En relación a ella la capacidad de resistir la aceleración del suelo disminuye a mayor altura sobre los muros.

Después de haber realizado el análisis del caso de Santiago Apóstol, Jiutepec, se puede afirmar que el inmueble ha soportado gran cantidad de episodios sísmicos y pese a los colapsos parciales ha subsistido. Las alteraciones y reconstrucciones con sistemas constructivos distintos a los que fue concebido han precipitado la pérdida de mayores porciones del conjunto. El sismo de 2017 lo dañó particularmente, fue el sismo más fuerte en la región en más de un siglo. Los episodios sísmicos no se repetirán de la misma forma, e inclusive podemos esperar un sismo de mayor intensidad en esta zona y no por ello necesariamente colapsará la estructura, que es capaz de soportar gran cantidad de sismos.

Sin embargo, existe la posibilidad de que vuelva a ocurrir un evento de gran magnitud con una aceleración mayor a 0.15g, cuyo periodo de retorno se estima en al menos 300 años.

## Capítulo 5. Relevancia de la metodología de análisis límite para la Restauración y conservación.

Los capítulos anteriores buscaron exponer los elementos esenciales que en su conjunto constituyen un proceso que permite entender y evaluar los daños presentes en el templo de Santiago Apóstol, así como su rango de seguridad, es decir un diagnóstico. Su elemento más esencial es el registro de su geometría y su historia constructiva, lograda a través de inspecciones visuales, calas. Plasmando la información obtenida en un modelo que representa fielmente su comportamiento mecánico a través del análisis límite y que finalmente permite tomar decisiones racionales para garantizar su conservación. En el presente capítulo se explorará la importancia de seguir dicho proceso para lograr ese objetivo y las consecuencias que pueden suceder cuando no se considera el proceso.

A partir de la metodología se proponen trabajos para la conservación de las bóvedas y cúpulas del templo de Santiago Apóstol. También se emite un juicio sobre la intervención que actualmente se realiza al inmueble. Se concluye el trabajo y este capítulo con una generalización del proceso de análisis a manera de propuesta metodológica que contiene los elementos y la secuencia que puede ser aplicable a cualquier inmueble de esta naturaleza, tomando como referencia los capítulos de este trabajo.

## 5.1 Criterios errados utilizados en refuerzos de bóvedas y cúpulas.

### Intervenciones en bóvedas

Muchas de las intervenciones a bóvedas en inmuebles eclesiásticos desde los años 70s y hasta los años 2000 realizadas en México buscaron mejorarlas para alargar su duración y resistencia. Sin embargo, lo anterior se planteó a través de refuerzos de concreto armado, sustituyendo los elementos dañados por elementos de concreto armado o añadiendo elementos sobre la geometría original.

En algunos casos se llegó al extremo de recubrir todo el trasdós de la bóveda por medio de una losa de concreto armado curva, anclada a los sillares, en ocasiones de gran espesor agregando también trabes sobre las bóvedas. Inclusive se llegó a prescribir esta solución simultáneamente por el trasdós e intradós. Las consecuencias de estas intervenciones son muchas. No permite la transpiración adecuada de la bóveda, acarreando problemas de condensación al interior. Lo anterior constituye una intervención invasiva para la bóveda que aumenta el peso y su rigidez que al ser sometida a movimientos sísmicos, altera su comportamiento típico, evitando los mecanismos de disipación de energía a través de rótulas, lo cual puede tener consecuencias mayores conduciendo a fallas repentinas y el riesgo de un colapso total.

Lo anterior fue posible ya que el entrenamiento de los profesionales de la construcción que intervinieron el patrimonio se encontraba limitado a una bibliografía donde se recomienda ampliamente el uso del concreto armado como refuerzo, así como un conocimiento limitado de las estructuras basado en los principios del concreto armado. Lo anterior constituye una problemática a nivel internacional, por lo que actualmente en muchos países reconociendo este problema se han destinado cuantiosos recursos para retirar estos elementos de "refuerzo".

Afortunadamente este tipo de intervenciones en México es cada vez menos común y las intervenciones de concreto armado cuentan con menos aprobación hoy en día. Sin embargo, la propuesta de nuevos materiales con características variadas son comunes. Teniendo el problema que se proponen como solución y protección a estas edificaciones cuando su vida útil es reducida en comparación al propio inmueble. Aún siendo poco comprobada su compatibilidad e interacción con estas estructuras.

### Intervenciones en cúpulas

Con respecto a las cúpulas ha sucedido un fenómeno similar. Para estos casos se encuentra generalizada la prescripción de zunchos o tensores en las cúpulas.

Sin embargo, en ocasiones son colocadas en lugares poco adecuados, que incluso pueden ser dañinos. Eso ocurre debido a una falta de análisis de su geometría particular, resultando en una concepción de que todas las cúpulas requieren zunchos, ignorando que las cúpulas se encuentran agrietadas naturalmente por sus meridianos, e intentar evitarlo sin verificar con precisión su línea de empujes y su rango de seguridad resulta en intervenciones de coste elevado que no son necesarias. También se requiere el análisis de su sistema de apoyos, a partir de la trayectoria de la línea de empujes dentro de la fábrica.

### **Razones por las cuales ocurren y han sido permitidas éstas intervenciones**

Usualmente las decisiones que conciernen la estabilidad y seguridad de un edificio suelen ser realizadas por un estructurista especializado. Sin embargo, para estructuras históricas previas al siglo XX no es extraño encontrar un desconocimiento de factores básicos del monumento como su comportamiento estructural característico, precipitando un diagnóstico errado, o el uso de una teoría inadecuada para este tipo de problemáticas.

Los criterios de las intervenciones de reforzamiento que las normas proponen nacen de la respuesta sísmica de las estructuras modernas, que como vimos en el capítulo anterior, es totalmente diferente a la mampostería no confinada. En México existe una carencia de una normatividad aplicable a edificios históricos, esto permite gran cantidad de criterios, variaciones y discrepancias entre las intervenciones. Las cartas y normativas internacionales funcionan como recomendaciones generales, que en muchos casos se siguen vagamente o no se respetan. Recae en el INAH suplir esta falta de normativa, que hace a través de sus *Lineamientos generales en materia de conservación del patrimonio cultural*<sup>97</sup> de los cuales el primer punto establece:

1. Toda acción de conservación deberá respetar la integridad del patrimonio cultural, basándose en la comprensión y el respeto de su materia, factura, sistema constructivo, aspecto o imagen, valores, significados, usos, asociaciones y contexto, así como considerar a los actores sociales vinculados con dicho patrimonio.

Después de analizar los proyectos de intervención la junta de monumentos del INAH emite un dictamen. El director dará su autorización o negativa basado en dicho dictamen. Sin embargo, en la práctica, muchas acciones dependen del supervisor del INAH de la zona donde se localiza la obra, por lo que se depende de su conocimiento y experiencia para verificar los trabajos de restauración aprobados.

---

97 LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES GENERALES EN MATERIA DE CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL 2014 disponible en <https://www.normateca.inah.gob.mx/pdf/01472572392.PDF>

Actualmente, en la búsqueda de seguridad estructural y sobretodo posterior a un evento sísmico destructivo, suelen permitirse drásticas alteraciones con grandes refuerzos que en ocasiones no son necesarios. Para hacer una evaluación y un diagnóstico de un edificio, se busca un modelo matemático que represente a la estructura y está en boga el uso de programas computarizados de elementos finitos, en los cuales se introducen las propiedades de los materiales, obteniendo simulaciones de la respuesta de la estructura a las sollicitaciones externas. Sin embargo su registro de la geometría suele ser muy limitado y se realizan simplificaciones burdas de la misma. Los estudios experimentales en laboratorio con muestras obtenidas del inmueble para evaluar la respuesta de sus materiales se realizan de forma estándar. Sin embargo, pocas veces estos análisis reflejan la realidad y aproximarse a este tipo de estructuras como un problema de resistencia de materiales conlleva una visión sesgada que puede conducir a un diagnóstico errado y a intervenciones drásticas como las antes comentadas.

Resulta increíblemente complejo unificar criterios y tampoco se pretende hacerlo. Pero se debe comprender al edificio en su conjunto y en sus partes individuales, así como reconocer sus características fundamentales. Por ejemplo, los constructores que hicieron estos edificios no tenían la premisa de continuidad estructural como la conocemos hoy en día, por lo que realizar el análisis estructural de un edificio de esta naturaleza no puede entenderse como un continuo (ni en su disposición ni en sus materiales). Esta diferencia básica lleva hoy día a una incomprensión de la estructura por parte de los arquitectos e ingenieros, ya que ésta estructura está compuesta de diferentes materiales con distintos arreglos y frecuentemente sin una unión entre sus elementos estructurales. Esto no fue necesariamente un error de los constructores, sino que responde a las diferentes etapas constructivas y a un reciclamiento constante de materiales. La concepción de que todo debe estar unido para asemejar un monolito tiene diversos problemas, ya que viola la esencia de estos edificios al intentar convertirlos en un sistema rígido único. Cada inmueble y cada problema debe analizarse con sumo cuidado evitando generalizaciones, pero teniendo claras las premisas anteriores.

Tanto para cúpulas como para bóvedas la falta de identificación de sus deformaciones intrínsecas es lo que conduce a reacciones poco adecuadas como son las intervenciones invasivas.

## 5.2 Trabajos propuestos para la conservación de las bóvedas y cúpulas de Santiago Apóstol.

El concepto de conservación utilizado se refiere en el mismo sentido que el acuñado por el INAH.

Conservación: Acciones realizadas para salvaguardar el patrimonio cultural, respetando sus valores y significados, y garantizando su acceso y disfrute para generaciones presentes y futuras. El término “conservación” es genérico e incluye la conservación preventiva, las acciones de conservación directa y la restauración.<sup>98</sup>

El trabajo de restauración de un inmueble debe ser realizado por un equipo interdisciplinario. Aquí solo se comentarán los aspectos más relevantes encaminados a recuperar la integridad estructural de las bóvedas y cúpulas del templo de Santiago Apóstol. El concepto de mínima intervención es relevante ya que se deben priorizar ciertas intervenciones sobre otras, sobretodo cuando los recursos son limitados y deben optimizarse al máximo, buscando garantizar la permanencia del inmueble. Si el diagnóstico es errado puede llevar a intervenciones de mayor costo y en ocasiones innecesarias. Actualmente se reconoce que el diagnóstico y la solución a un problema se debe adecuar en la obra, ya que siempre surgen imprevistos y la mano de obra especializada es finalmente quien ejecuta las soluciones dispuestas.

### Propuesta para las bóvedas:

Después de comprobar que su estabilidad general se mantiene, podemos suscribir lo siguiente.

La dimensión de los muros y contrafuertes es suficiente para contener los empujes de la bóveda de forma segura y se encuentran en buen estado, por lo que resulta innecesaria cualquier intervención con tensores.

Las pilastras mantuvieron su integridad y se comportaron como cuerpos rígidos, separándose de los muros en algunos casos. Es el único elemento que debe ser unido directamente a los muros, solo en los casos donde la separación representa un riesgo de volteo al interior del templo.

Las perforaciones sufridas en la bóveda por el colapso de la torre pueden reintegrarse siguiendo la misma estereotomía de los sillarejos de tezontle. Con respecto a las grietas, por el trasdós de la bóveda es necesario sellarlas para evitar la filtración de agua, sin embargo hay que recalcar que las grietas longitudinales no representan un riesgo en si mismas ya que describen su comportamiento mecánico. Por el intradós, también pueden rellenarse, buscando mantener la continuidad visual de la bóveda, en cuanto al dislocamiento, puede rebajarse uno de los lados al interior para que asemeje la misma

98

*Idem.*

curvatura, recordando que estas grietas volverán a aparecer en cuanto ocurra otro movimiento considerable del suelo, ya que como analizamos son su forma de disipar la energía. Si se utiliza un material con mayor rigidez y resistencia que la mampostería original tratando de forzar su unión, lo que sucederá es que la grieta aparecerá en otro lugar cercano de forma paralela, es decir donde exista mampostería de menor resistencia.

La humedad relativa en Jiutepec es alta, siendo en promedio 57%, pudiendo llegar hasta 80% en temporada de lluvias. Por lo anterior es esencial retirar las capas de impermeabilizante asfáltico y plástico sobre el trasdós de la bóveda, así como la pintura vinílica sobre el intradós, ya que afecta directamente su transpiración (capacidad de perder agua). Por lo que retiene la humedad, evitando que la bóveda transpire, lo que ha ocasionado humedades visible por el crecimiento de moho y la proliferación de vegetación parásita. También existe una pérdida de resistencia del material estructural por la constante humedad que llega a reblandecer los sillarejos. Al garantizar una buena capacidad de evaporación, por medio de recubrimientos con materiales permeables a base de cal aérea y el uso de impermeabilizantes como el jabón y alumbre, pueden evitarse los problemas antes mencionados aunados a una ventilación correcta del interior del templo.

### **Propuesta para cúpula octogonal y semicúpula**

La restitución del material y la geometría original o lo más próximo a ella es esencial para dotarla de su estabilidad característica, que como se comprobó en el capítulo 3, es satisfactoria para la cúpula y semicúpula. Para lo cual es necesaria la reconstrucción del arco testero y la reintegración de los arcos formeros. Al verificarse la posición de la línea de empujes dentro de la fábrica se comprueba que no es necesario incorporar zunchos alrededor de la cúpula octogonal, ya que el empuje se encuentra dentro de la fabrica con la seguridad suficiente. Debido a los dislocamientos que sufrió durante el sismo, particularmente en los gajos sur-este, puede considerarse una reconstrucción de todo el gajo, recuperando su geometría original, o en su defecto consolidando los gajos con los dislocamientos presentes.

Con respecto a los muros y contrafuertes del presbiterio, se comprobó que alojan con suficiente seguridad a las líneas de empujes, por lo que su dimensión es correcta y puede consolidarse, utilizando un material igual o semejante al tezontle, cosiendo las grietas presentes sobretodo a nivel de impostas que sufrió durante el sismo.

Con respecto al mortero de junta utilizado para restituir los elementos colapsados, debe permitir la permeabilidad al vapor de agua y transmisión de sales solubles, tener alta plasticidad y que tenga una resistencia semejante al resto de la mampostería. Por lo que lo más idóneo es la utilización de cal en pasta, con arena volcánica de tezontle,

los áridos pueden ser grava de tezontle y sillarejos semejantes a los presentes en la estructura. Se debe utilizar los mismos compuestos y agregados, que se utilizaron en su construcción para garantizar su compatibilidad. Evitando totalmente al cemento portland que no es permeable, propiciando las condensaciones y la proliferación de sales.

### **Mantenimiento, conservación preventiva**

En el inmueble analizado y en gran cantidad de inmuebles eclesiásticos de propiedad federal, existe una falta de mantenimiento alarmante, con intervenciones erradas que se siguen realizando para satisfacer las necesidades actuales de cada comunidad religiosa, que ya sea por falta de supervisión, o la pérdida del conocimiento de las técnicas constructivas tradicionales, se han realizado adiciones inadecuadas que precipitan el deterioro de la fábrica. Sin embargo, el deterioro constante que han sufrido es en muchos casos ignorado hasta que sucede una catástrofe como el sismo del 19S 2017.

Es indispensable implementar un programa de mantenimiento preventivo a nivel nacional, para evitar la acumulación de daños, que de forma periódica debe actualizarse. Así como hacer un registro de cada intervención realizada, permitiendo un seguimiento a sus transformaciones, ya que en muchos casos las comunidades religiosas que utilizan los inmuebles los intervienen poco a poco sin dar cuenta ninguna a las autoridades correspondientes. Es imprescindible involucrar a la comunidad para el correcto cuidado del inmueble, que bajo la guía adecuada puede garantizar su permanencia, evitando que realicen “mejoras” con materiales actuales que sean incompatibles y causen un mayor daño.

Por las razones anteriores debe crearse un programa permanente de capacitación de la mano de obra, donde se explique la historia de la construcción, es decir los procedimientos y materiales utilizados según la zona y temporalidad del inmueble, explicando su comportamiento característico; Indicando las incompatibilidades químicas y físicas con los materiales actuales. Aunque existen publicaciones como la *Guía de conservación preventiva para todos*<sup>99</sup> del INAH, que abarca de forma general muchos aspectos, se requieren guías claras y breves sobre que materiales no utilizar y cuales son sus alternativas, que intervenciones no hacer y cuales pueden ser las consecuencias de sus acciones.

El programa permanente de mantenimiento estará formado por miembros de la comunidad con una previa capacitación, designados como encargados de supervisar y realizar acciones de mantenimiento tan esenciales como:

---

99 Disponible en <https://restauracionpatrimonio.cultura.gob.mx/assets/uploads/publicaciones/conservacion-preventiva.pdf>

Los trabajos de retiro de basura y hojarasca, la identificación de humedades y la formación de flora macroparásita, incluyendo su retiro y poda. Limpieza de bajadas de agua. Y una supervisión constante para evitar el adosamiento de estructuras de diferentes materiales sobretodo actuales al inmueble histórico. Se debe llevar un registro escrito y fotográfico de las actividades de mantenimiento e intervenciones que se hagan en el inmueble.

Finalmente, es imprescindible definir las rutas de evacuación, que deberán permanecer despejadas en todo momento, con señalizaciones claras y visibles que permitan desalojar el inmueble en caso de una emergencia, así como limitar el aforo máximo para que nunca obstaculice las rutas de evacuación. Durante las fiestas patronales las ceremonias religiosas deberán celebrarse en el atrio, conservando un aforo limitado dentro del templo.

### **5.3. Evaluación de criterios en la intervención realizada para bóvedas y cúpulas del templo.**

Actualmente la empresa ESCODAS.A de C.V realiza las intervenciones de restauración, en general siguiendo un criterio de restauración típico. Restituyendo los elementos colapsados por medio de una reintegración con el mismo tipo de materiales. Sin embargo la empresa utiliza actualmente un mortero de cal hidráulica con algunos aditivos y arena de mina. Afortunadamente no utiliza cemento portland.

En la bóveda de cañón con lunetos su primera acción fue sellar las grietas por el trasdós para evitar la entrada de agua de lluvia, y comenzar el apuntalamiento. Tomaron la decisión de integrar con el mismo material (tezontle) los huecos de las perforaciones presentes sobre la zona del coro. Sin embargo no se sigue la estereotomía fielmente de los sillarejos de tezontle. Donde se ha seguido con mayor fidelidad la estereotomía ha sido en la reintegración de los arcos fajones y formeros, cuestión indispensable para garantizar la estabilidad de los arcos.

Un análisis limite en su diagnóstico hubiera ayudado a que se comprendiera que la bóveda en si misma es estable, pese a los dislocamientos y grietas presentes, ya que su espesor es aceptable para alojar a la línea de empujes, por lo que no era necesario un apuntalamiento tan generalizado y masivo como el utilizado. Solo la zona de los arcos fajones requiere de un mayor apuntalamiento. El resto de la bóveda solo un andamiaje para subir material y sostener una plataforma sobre el nivel de impostas para los trabajos. Tomaron la decisión de inyectar toda la bóveda por medio de lechadas en el intradós con un tratamiento similar por el trasdós. Hasta finales de 2019 planeaban rebajar los sillares en las rótulas y dislocamientos buscando asemejar una sola curvatura por el intradós.

Su aproximación a la cúpula ocatagonal y trabajos son similares al los de la bóveda. La zona del presbiterio siendo la más delicada está siendo reintegrada de forma satisfactoria la semicúpula, así como el arco triunfal. La cúpula octogonal puede ser reconstruida con la seguridad de que su geometría es estable. Para finales de 2019 aun no se terminaba de definir si la conservarían en su totalidad o si se harían demoliciones parciales para su posterior reconstrucción.

El criterio al exterior del muro fue la inyección y rejunteo de toda la mampostería en las fachadas. Sin embargo, estos muros originalmente no eran aparentes y la mampostería requiere de una protección para con el exterior. Perdieron paulatinamente sus recubrimientos, como atestigua la fachada principal que aun conserva parte de dichos recubrimientos. De ahí que lo más idóneo para la conservación general de los muros es volver a aplanar las paredes con mortero de cal y arena, utilizando pintura a la cal con pigmentos naturales como protección final.

La siguiente serie de fotografías muestran algunos de los criterios y procedimientos implementados en el inmueble.



Fig. 5.1 a ) Perforaciones en bóveda sobre el coro . foto 2018.



b ) Reintegración de la bóveda con tezontle irregular. Foto 2019.



Fig. 5.2 a) Zona este de la cúpula octagonal, foto 2018.



b) Zona este de la cúpula octagonal reintegrada foto 2019.



Fig. 5.3 a) Zona de la clave en arco trinfual colapsado, foto 2017.



b) Arco trinfual reintegrado, foto 2019.



Fig. 5.4 a) Agrietamiento en bóveda y arco fajón colapsado. foto 2018.



b) Apuntalamiento y andamios para bóveda y arco fajón, foto 2019.



Fig. 5.5 a) Dislocamiento de en gajo este . foto 2018.



b) Gajo, Este, consolidación con fracturas. Foto 2019.

## 5.4. Proceso metodológico.

Hasta este momento este trabajo se ha enfocado en el templo de Santiago Apóstol, a partir de esta experiencia se genera una propuesta metodológica ilustrada por medio de dos diagramas que permita una generalización de los elementos de análisis a estructuras similares. Con el objetivo de restituir la integridad estructural del inmueble para asegurar su conservación y prepararlo para el ineludible riesgo sísmico, a través de la protección de su tipología estructural así como de sus técnicas constructivas tradicionales.

Para elaborar la propuesta metodológica en zona sísmica los planteamientos de Giuffré<sup>100</sup> son muy útiles en el análisis de estructuras de mampostería histórica que considera los siguientes requisitos antes de proceder a una intervención:

1. **El conocimiento de la historia sísmica del lugar.** Una lista con los eventos sísmicos superiores a 5 grados Mercalli, contabilizándolos con todo y su intensidad, su duración y aceleración.
2. **El conocimiento del edificio,** la geometría, la arquitectura, el material y las técnicas constructiva. Es necesario para lo anterior una buena precisión en la correcta medición de su geometría y de los patrones de agrietamiento, excluyendo algunas de menor importancia.
3. **Conocer las vicisitudes pasadas del edificio.** Se debe realizar una investigación histórica, lo anterior permite también ver el compromiso asumido para la preservación del inmueble. Debe ser un trabajo de historiadores y arquitectos.
4. **Emitir un juicio sobre la capacidad sismo resistente de la estructura original.** Posterior al análisis cinemático de la estructura.
5. **Proponer trabajos complementarios y posibles adiciones,** siempre utilizando el mismo lenguaje constructivo.

Los puntos anteriores encierran un análisis profundo, expresados de forma sencilla y clara. Coinciden con la perspectiva utilizada en este trabajo, buscando un entendimiento integral que permita tener las bases para la resolución óptima de problemas complejos.

A manera de recapitulación, a continuación se revisarán algunos conceptos que se abordaron durante el proceso de este trabajo.

El primer paso debe ser la comprensión del objeto de estudio, cual es su geometría y como fue construido. Con respecto al registro de la geometría, actualmente existe la tecnología para hacerlo de forma precisa y fiel, por medio de estación total, fotogrametría digital, o incluso escaneo 3D. Estas tecnologías permiten obtener observaciones cualitativas y cuantitativas mejores. Constituyendo un cúmulo de

---

100 Giuffre Antonino. 1988 RESTAURO E SICUREZZA IN ZONA SISMICA La Cattedrale di Sant' Angelo dei Lombardi Revista Palladio.

datos directos que con un procesamiento adecuado proporcionan la información necesaria para su análisis e interpretación. Inclusive permite la posibilidad de hacer un seguimiento a los cambios que puedan ocurrir al inmueble.

Se caracterizaron las tipologías constructivas, a nivel global y local. El análisis detallado de la mampostería hace latente una característica particular, más allá de sus propiedades locales, debe ser una estructura bien balanceada y ensamblada con piedras y mortero, en un equilibrio mecánico entre sus partes. Aunque la mampostería en muros es muy irregular, la mampostería en las cubiertas (bóveda y cúpulas) es considerablemente mejor. Dicha caracterización acompañada de un análisis histórico, permitió descubrir los posibles procedimientos empleados en su trazo y construcción, así como una aproximación a la temporalidad de las diferentes etapas constructivas del inmueble.

A partir de los puntos anteriores se pudo realizar un análisis límite estático siguiendo el enfoque del equilibrio descrito por Heyman, revisando la geometría a partir de la trayectoria de la línea de empujes del sistema, verificando así su rango de seguridad. En el segundo capítulo vimos como estas edificaciones se proporcionaron geoméricamente y solo así deben entenderse, ya que los esfuerzos (tensiones) a los cuales están sometidos no representan un peligro puesto que trabajan muy por debajo de la resistencia última del material.

Se reconoció que aunque existen patrones de daños comunes a los templos, así como de sus modos de falla. No es conveniente emitir juicios a priori, sin antes haber realizado un análisis límite basado en un riguroso entendimiento de su geometría particular, que también permite distinguir las deformaciones “naturales” que no comprometen la estabilidad general de la construcción, con las lesiones ocasionadas durante los sismos.

Gran parte de los daños producidos por el terremoto no se debieron a la debilidad de la estructura original, sino a las adiciones y transformaciones que ha sufrido, así como a la falta de mantenimiento. También se analizó la historia sísmica que ha soportado desde sus inicios hasta el presente, ya que en ocasiones las principales vicisitudes de la edificación están ligadas a los sismos que han tenido que soportar. Algunas conexiones entre los elementos constructivos no son las mejores desde el punto de vista de la seguridad sísmica. Sin embargo, esto no compromete de forma sustancial la seguridad de la estructura, ya que en ocasiones las conexiones pueden tener un efecto negativo, por la forma en la que algunos elementos estructurales interactúan durante la vida del inmueble, como los hundimientos diferenciales, que conllevan ajustes y arreglos entre las diferentes partes. Como ya advertía Giuffré, la estructura entera no responde como un todo, el efecto sísmico puede tener mayores

consecuencias en algunas zonas del edificio, por lo que hay que estudiar sus diferentes partes. Los mecanismos de colapso pueden ser estudiados por la cinemática de cuerpos rígidos que es el estudio de la geometría del movimiento. Es la forma ideal de analizarlo, sin embargo conlleva una gran complejidad, por lo que se puede optar por un análisis cuasi dinámico por medio de modelos y pruebas de inclinación, como se describen en el capítulo 4 de este trabajo, obteniendo así un acercamiento razonable al fenómeno sísmico explorando los límites de su estabilidad ante un sismo.

Finalmente se realizó una propuesta de trabajos para su conservación basada en el diagnóstico realizado de las bóvedas y cúpulas. Resulta esencial también resaltar y proponer acciones de conservación preventiva y mantenimiento permanente.

Otro aspecto que aún carece de implementación, es que posterior a un sismo, donde hubo colapso de una edificación o parte de ésta, no se altere de inmediato y se realice un mapeo del inmueble y de los escombros, distinguiendo los diferentes elementos colapsados y su posición final, lo cual ayudaría mucho a interpretar y deducir los mecanismos de colapso particulares que fueron ocasionados durante el sismo. Lo anterior permitiría un reconocimiento de las piezas colapsadas y a que elementos correspondían. Esto es sencillo de hacer cuando el sismo no fue de una intensidad tan grande. Sin embargo, posterior a un sismo de gran intensidad, puede implementarse este procedimiento siempre y cuando no existan personas atrapadas bajo los mismos. Y será posterior a las labores de rescate que se pueda realizar dicho registro.

### Síntesis de la metodología

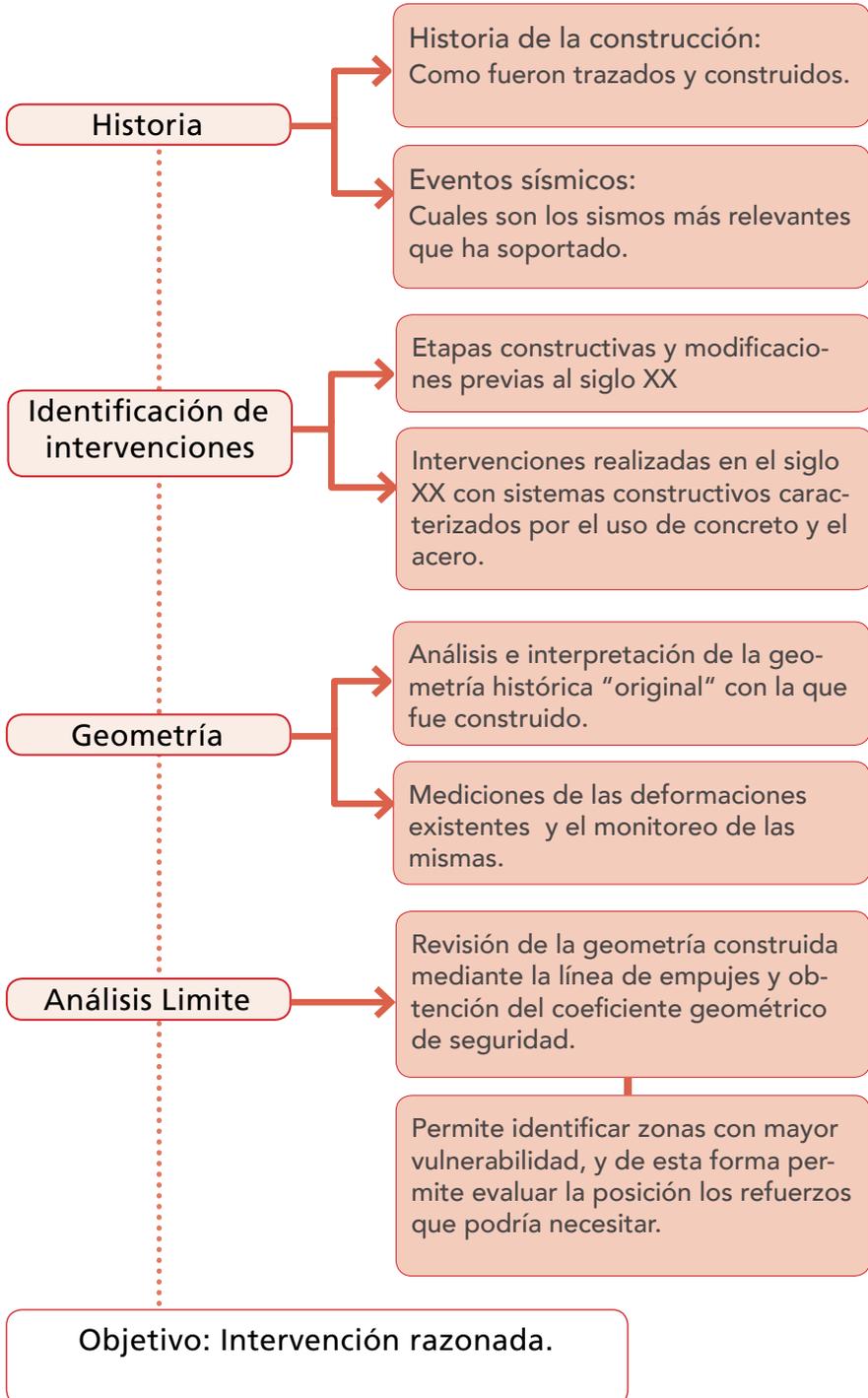
En las siguientes páginas se resume el proceso metodológico en dos diagramas, el primero corresponde a los conceptos esenciales para realizar un análisis a una estructura de mampostería, sea una bóveda, una cúpula o un conjunto de estas, el análisis debe comprender un conocimiento integral del inmueble. Los conceptos esenciales tienen gran cantidad de interacciones entre sí, por lo que los límites entre uno y otro concepto en ocasiones desaparece, pese a ello lo clasificamos en cuatro bloques generales que los engloban.

El segundo diagrama está enfocado al análisis en zona sísmica, en él se añaden los conceptos de Giuffré a los primeros. Pueden entenderse como un desglose pero se individuaron para resaltar su relevancia, como es el caso de la *Identificación de sistemas constructivos distintos y dañinos a la estructura*. Debido a que en México las intervenciones más dañinas suelen hacerse de forma paulatina, insertando o completando partes del edificio con materiales y técnicas inadecuadas. En el lado derecho del segundo diagrama, se identifica cada aspecto con el caso del Templo de Santiago Apóstol, colocando los capítulos

correspondientes a cada punto en una columna del lado derecho, haciendo referencia a algunos de los aspectos básicos mencionados en dichos capítulos.

Es importante advertir que estos pasos no necesariamente deben seguirse en el orden propuesto. Son complementarios entre sí y deben ser valorados para cada caso en particular. Esta metodología plasmada en ambos diagramas reduce la incertidumbre en la toma de decisiones de un problema tan complejo como es la conservación de estos inmuebles ante los sismos.

# Metodología



# Proceso Metodológico para el análisis sísmico

## Pasos metodológicos

## Santiago Apóstol Jiutepec

1. El conocimiento de la historia sísmica del lugar. Así como sus características geológicas.

Capítulo 4. Jiutepec es una zona con riesgo sísmico moderado, y ha soportado sismos importantes en al menos 3 ocasiones. Con una recurrencia esporádica.

2.- Un monitoreo de la geometría y de los patrones de comportamiento de la estructura.

Capítulo 2. El templo presenta deformaciones intrínsecas que no comprometen su estabilidad.

3.- Investigación histórica: En que época fue construido, sus intervenciones, la historia de la construcción, y sus vicisitudes.

Capítulo 1,2. Fue construido en diversas etapas, y con distintas técnicas, desde el SXVI hasta el SXVIII, con sistemas constructivos similares.

4. Características constructivas y estructurales:  
Caracterización de las tipologías constructivas, a nivel global y local, así como las técnicas de construcción empleadas.

Capítulo 2,3 Su mampostería está compuesta por tezontle con mortero de cal y arcilla, labrado burdamente en muros y de mejor estereotomía para las cubiertas del templo.

5.- Emitir un juicio sobre el efecto sismo resistente de la estructura original.

Capítulo 4. La estructura resistió el sismo de 2017, con una aceleración máxima de hasta .23 g. Provocando colapsos parciales.

6.- Identificación de sistemas constructivos distintos y dañinos a la estructura.

Capítulo 2,4. Los sistemas de techumbres de concreto armado en el convento precipitaron el colapso de los muros en el claustro alto.

7. -Proponer trabajos complementarios, posibles adiciones y trabajos de mantenimiento, siguiendo el mismo lenguaje constructivo, materiales y técnicas compatibles con las originales, en una intervención reversible.

Capítulo 5. Comprobada su estabilidad general y capacidad sísmica, se puede afirmar que los trabajos de consolidación y reintegración son los indicados.

# Conclusiones

El templo de Santiago Apóstol ha sido adecuado a las diferentes necesidades de cada momento histórico con múltiples modificaciones e intervenciones, las bóvedas y cúpulas han sido cubiertas añadidas dispuestas y proporcionadas adecuadamente, que han logrado subsistir durante siglos mediante su geometría, la cual les ha permitido inclusive soportar sismos, causando solamente algunos colapsos parciales. Se pudo comprobar que su estabilidad general aun se mantiene, continuando con una intervención adecuada que devuelva su integridad estructural, el templo podrá ser abierto al público, buscando siempre mayor seguridad de los usuarios mediante un programa permanente de mantenimiento y protección civil.

Para la restauración resulta necesario implementar una metodología en el marco del análisis límite. Actualmente en México predominan criterios empíricos y en caso de realizarse un análisis se utilizan elementos finitos, inadecuados para la comprensión de los problemas esenciales de estas estructuras. Es necesario integrar estos temas en la formación de los profesionales de la conservación, no resulta difícil pero si esencial un entendimiento de estas estructuras, que fueron diseñadas con geometría, por lo que la formación de arquitectos puede ser ventajosa al entender conceptos de proporción y geometría. Sin embargo, es necesario complementar los estudios con historia de la construcción, mecánica y química para poder proponer adecuadas intervenciones sobre el patrimonio arquitectónico, abordando desde un enfoque global estas estructuras. El análisis estructural es un tema que por considerarse complejo u oscuro se aborda poco y por lo tanto se le considera como una cuestión independiente de la restauración, cuando debe ser un eje rector que permita jerarquizar las intervenciones. Siendo el principal objetivo, garantizar y verificar su estabilidad, sobretodo si el inmueble se encuentra en uso.

Las pruebas de inclinación a partir de modelos han probado que las bóvedas y cúpulas poseen una capacidad sismo-resistente considerable que no debe subestimarse. Validando su geometría a través del análisis límite y asegurando su estabilidad puede validarse dicha afirmación, como es en el caso de estudio presente. La visualización de la línea de empujes presenta un vínculo directo que permite comprender los mecanismos de colapso, así como los límites de su estabilidad.

# Anexos

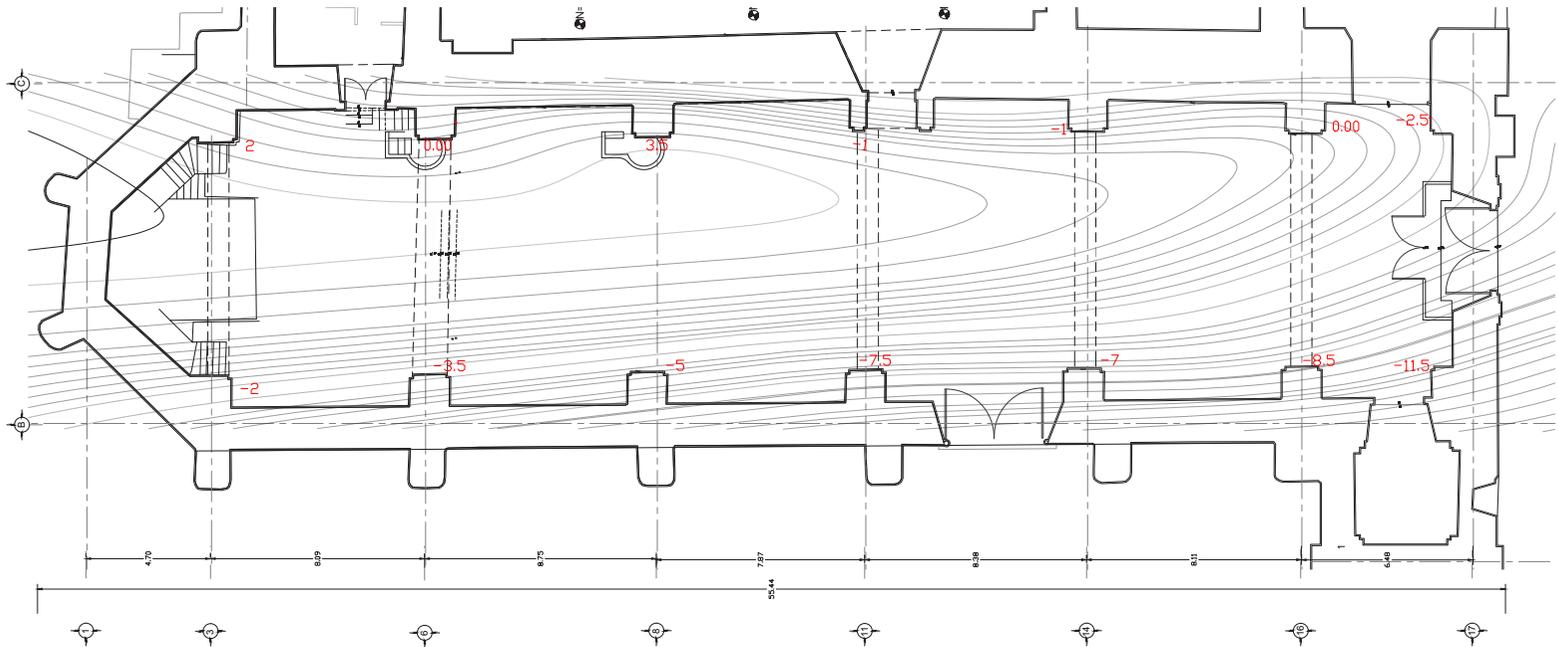
## Niveles

En primera instancia se intentaron medir niveles por el exterior del templo a nivel del desplante de los contrafuertes, sin embargo el desnivel obtenido fue poco claro. Por lo anterior se tomó la decisión de medir por dentro del templo a nivel de plintos con un nivel laser marca BOSCH, las curvas de nivel mostradas en el plano se obtuvieron con los puntos obtenidos. El banco de nivel tomado como 0.00 se localizó a 67cm por encima del N.P.T. del templo en el eje 16-C a nivel del plinto de la pilastra.

Interpretación de las curvas de nivel indican una asentamiento hacia el nor-este con un desnivel de hasta de 12cm. Las mediciones realizadas solo permiten dar una interpretación de los hundimientos aproximados que ha sufrido el templo. La zona mas hundida coincide con la zona de la torre, y el presbiterio pese a contar con un peso considerable no se encuentra particularmente hundido.

## Desplomos

La medición de los desplomos nos ayuda a comprender el comportamiento de la estructura, fueron medidos en dos direcciones (x, y) con una niveleta de 1.20m a nivel de 1.70m de altura. Se realizó un plano con ambas componentes, y otro plano unicamente con las resultantes. Aquí solo se muestra el plano con las resultantes. El promedio de las resultantes en la parte sur (entre el eje 1 y 6) del inmueble es de 1.92% en dirección sur-este, siendo la mas grande. También se midieron los desplomos de los muros del presbiterio, cuyo desplomo rondaba el 2.5%. Analizando estos datos y los anteriores de los niveles, se concluye que se descarta que el inmueble tenga problemas de hundimientos o desplomos que sean considerables. Lo que indica que la geometría en muros y contrafuertes no se encuentra deformada considerablemente y dichos desplomos no contribuyeron de forma significativa en el colapso de algunos elementos.

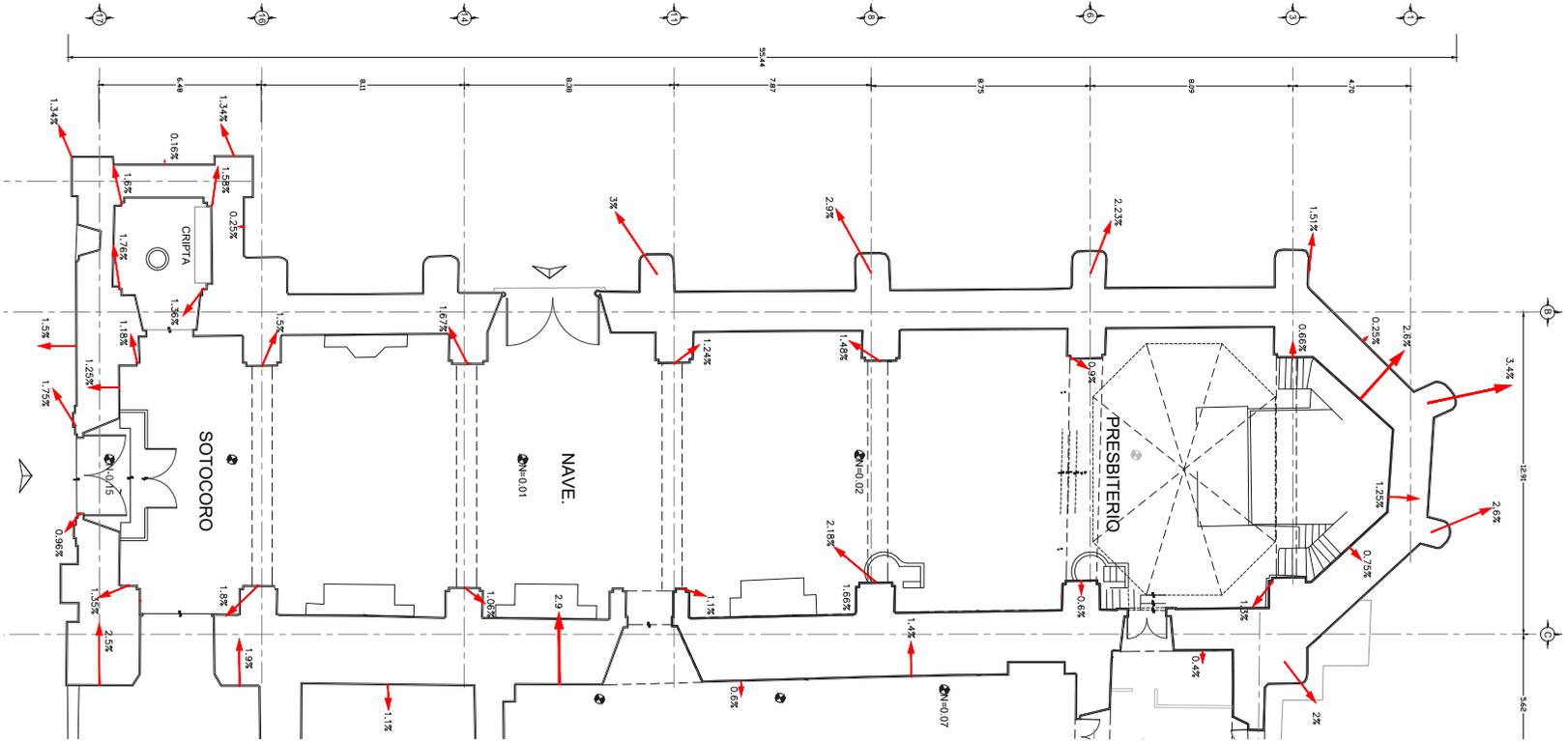


Notas:  
 0.00 relativo en punto "C-16".  
 Equidistancia a cada 1 cm.

Obtención de niveles al nivel de plintos en pilastras al interior del templo, medidos el 21 de Febrero 2019



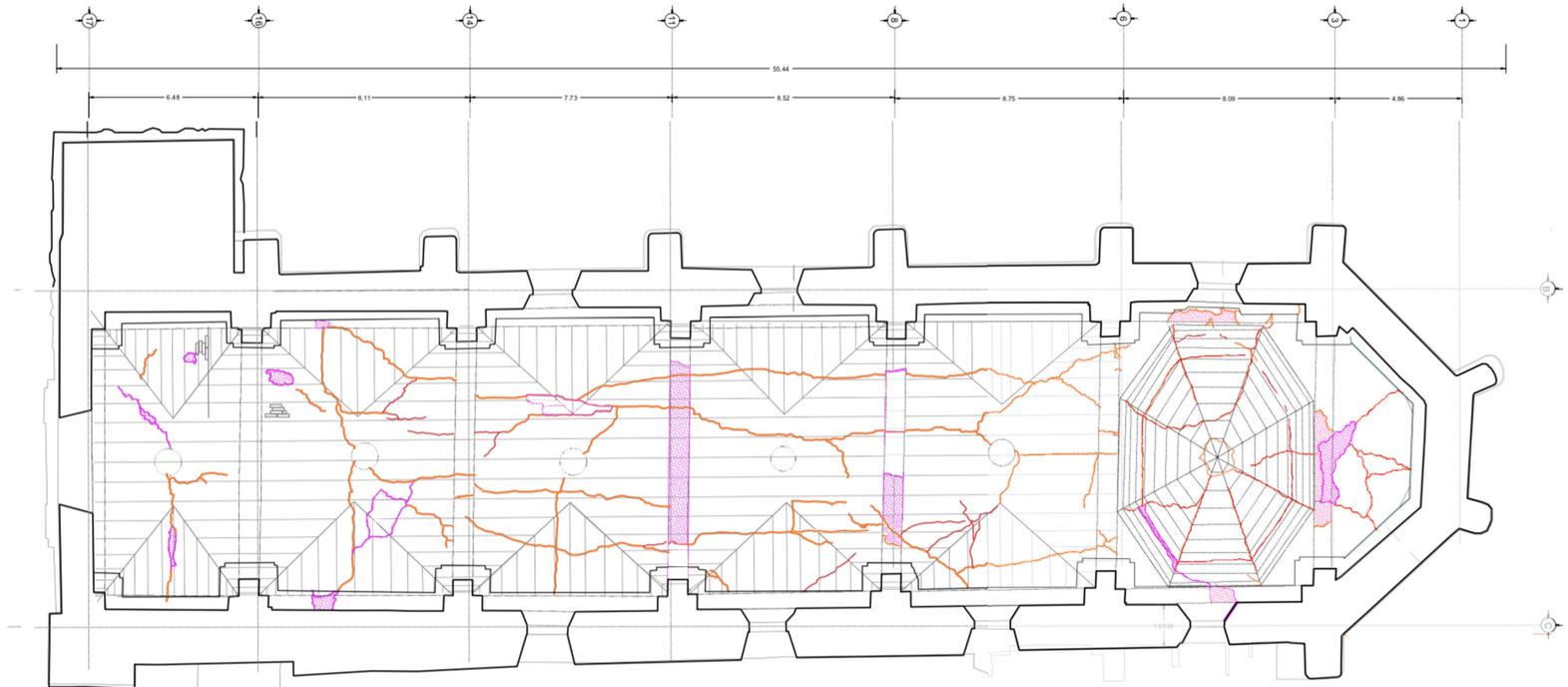
	DEPENDENCIA POSGRADO UNAM ARQUITECTURA	DESCRIPCIÓN <b>DAÑOS Y DETERIOROS</b>	No. de plan <b>D-02</b>
	PROYECTO ARQ. FABIAN BERNAL OROZCO BARRERA		
	PROYECTO PARROQUIA DE SANTIAGO APOSTOL	FECHA MAYO 2019	
	UBICACIÓN MUNICIPIO DE JUITEPEC, ESTADO DE MORELOS	COTAS METROS	
		ESCALA ESC. 1:150	



RESUMEN DE DESPLOMOS, RESULTANTES MEDIDOS EL 21 FEBRERO 2019



	DEPENDENCIA	POSGRADO UNAM ARQUITECTURA	DESCRIPCION	No. de plano	
	PROYECTO	ARQ. FABIAN BERNAL OROZCO BARRERA			DAÑOS Y DETERIOROS
	PROBLEMA	PARROQUIA DE SANTIAGO APÓSTOL			DESPLOMOS
	UBICACION	MUNICIPIO DE JIUTEPEC, ESTADO DE MORELOS	FECHA:	MAYO 2019	
			COTAS:	METROS	
			ESCALA:	ESC. 1:150	
				<b>D-01</b>	



PLANTA A NIVEL DE IMPOSTAS

COLAPSO DE ARCO FAJON EN LA NAVE



BÓVEDA VISTA DESDE PRESBITERIO.



DAÑOS POR SISMO 19S	
	FRACTURAS C/DESPLAZAMIENTO DE
	GRIETAS
	PÉRDIDA DE MATERIAL CONSTITUTIVO



DEPENDENCIA  
**POSGRADO UNAM ARQUITECTURA**  
 PROYECTO:  
**ARQ. FABIAN BERNAL OROZCO BARRERA**  
 PROYECTO:  
**PARROQUIA DE SANTIAGO APOSTOL**  
 UBICACION:  
**MUNICIPIO DE RUTEPEC, ESTADO DE MORELOS**

DESCRIPCION:  
**LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO**  
 CONTENIDO:  
**ARCOS POR INTRADÓS**  
 FECHA:  
**MAYO 2019**  
 COTAS:  
**METROS**  
 ESCALA:  
**ESC. 1:200**

No. de plano

**D-05**

# Bibliografía

- Angelillo, M. Ed. 2014. *Mechanics of masonry structures*. London, UK: Springer.
- Antonio de Ciudad Real, Farreras, V. M. C., & Quintana, J. G. (1976). *Tratado curioso y docto de las grandezas de la Nueva España: Relación breve y verdadera de algunas cosas de las muchas que sucedieron al padre fray Alonso Ponce en las provincias de la Nueva España, siendo comisario general de aquellas partes*. Tomo 1 y 2. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de investigaciones históricas.
- Arnal, L. 1999 *Journal: Formación del profesionalista y el investigador de la restauración de monumentos*. Estudios de arte y estética Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura, México, Distrito Federal. México P...
- Artigas, Juan B, (2013) México, *Arquitectura del siglo XVI* ISBN:978-607-11-0565-3 Taurus, México.
- Aréchiga, L. (2017). *El patrimonio cultural: los santuarios temporales, centro de devoción y esparcimiento*. TOPOFILIA. Número Especial 7°. Coloquio Internacional Ciudades del Turismo 2017.
- Barbero Barrera, M.M. (2012). *España, Mejora del comportamiento térmico de morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles*. Tesis Doctoral UPM
- Calderón B. y Calderón J. L. 1977. *Reparación y Conservación de Edificios históricos* Publicaciones Churubusco, México.
- Bessonov G.B. 1989. URSS, *Análisis y consolidación de sistemas abovedados*. Ministerio de Cultura de la RSFSR Asociación Especializada de Investigación y Restauración "ROSRESTAVRATSIYA".
- Carmona, F. L., Urbiola, X. G., Hernández, A., & San Martín, I. (2008). *Fernando López Carmona arquitecto: 50 años de enseñanzas*. FA. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.
- Conferencia del Episcopado Mexicano (CEM). (2017). *Informe de templos católicos dañados en septiembre de 2017*. Observatorio Nacional de la Conferencia del Episcopado Mexicano.

- Cortés, X. R. 2019 *Arquitectura Mecánica, La profesión y el oficio*. Facultad de Arquitectura. Instituto de investigaciones bibliográficas, UNAM, PÓRRUA. México.
- Cortés, X. R. 2007 *El clasicismo en la arquitectura mexicana 1524-1784*. FA. UNAM, PÓRRUA. México.
- Consejería Jurídica del Poder Ejecutivo del Estado de Morelos (2016). *Declaratoria del Patrimonio Histórico, Cultural Material e Inmaterial del municipio de Jiutepec, Morelos*.
- Chanfón Olmos, Carlos, 2010 *Fundamentos Teóricos de la Restauración*. Facultad de Arquitectura. UNAM. Cuarta Edición. México.
- Chanfón Olmos, Carlos. 1991. Simón García y la proporción geométrica (1979). In Simón García, *Compendio de Arquitectura y Simetría de los Templos*, 31–42. Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos en Valladolid.
- Cusano, C., Cennamo, C., & Angelillo, M. (2019). Seismic vulnerability of domes: a case study. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 13(5), 679-689.
- DeJong, M.J (2009). *Seismic Assessment Strategies for Masonry Structures*. Ph.D. thesis, Department of Architecture, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Fernández Federico, Christileb' Pedro Sergio Urquijo Torres 2005 "Los espacios del pueblo de indios tras el proceso de Congregación, 1550-1625" *Boletín del instituto de Geografía*. UNAM.
- García, G. N., 2007 *Funcionamiento y seguridad estructural en los templos conventuales del siglo XVI en México*, tesis doctoral, UNAM, México.
- García, Joaquín. 1889. *Códice Franciscano, siglo XVI*. México: Imprenta de Francisco Díaz de León.
- Gutiérrez, Y. y Chanfón O. 1999, *Conventos coloniales de Morelos*, instituto de cultura de Morelos, grupo financiero GBM atlántico, México, Grupo editorial Miguel Ángel Porrúa.
- Gerhard, P. (1986), *Geografía histórica de la Nueva España 1519-1821*, Universidad Nacional Autónoma de México. México
- Giuffré A. 1988 *RESTAURO E SICUREZZA IN ZONA SISMICA La Cattedrale di Sant' Angelo dei Lombardi* *Revista Palladio*.
- Hernández, A. y López, C. 2017 *Proyecto de corrección geométrica Catedral y Sagrario Metropolitanos México* Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Arquitectura.

- Heyman, J. 1997 *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*, University of Cambridge July.
- Heyman, J. 2015. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Colección de ensayos. 2 Vols. Editado por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Holzer, S. M. (2013). Numerical arch and vault analysis. *Wiadomości Konserwatorskie*, (34), 7-17
- Huerta, S. Arcos, 2004. *Bóvedas y cúpulas Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Escuela Superior de Arquitectura Madrid.
- Huerta, S. (2002). The medieval 'scientia' of structures: the rules of Rodrigo Gil de Hontañón. <http://oa.upm.es/540/>
- INAH Morelos, 1999. *Libros Blancos*. Programa para la rehabilitación de inmuebles históricos de daños por el sismo del 15 de junio de 1999.
- INAH, 2014. *Guía de conservación preventiva para todos*, <https://restauracionpatrimonio.cultura.gob.mx/assets/uploads/publicaciones/conservacion-preventiva.pdf>
- Irani A. 2017. *Static Stability and Seismic Behavior of the Dome of the Hagia Sophia*. S. Architecture B.S. Civil and Environmental Engineering Massachusetts Institute of Technology.
- Kubler, G. 1993. "Arquitectura mexicana del siglo XVI". México, D.F. Segunda edición. Fondo de Cultura Económica.
- Ledesma, Gallegos (2012), *Génesis de la arquitectura mendicante del siglo XVI en el plan de las Amilpas y las Cañadas de Morelos*. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Ledesma, Gallegos (2011), "Materiales y sistemas constructivos en dos fundaciones mendicantes de las faldas del Popocatepetl" *Monumentos Históricas*, no.23 p. 7-18
- Mejía Tejeda, Cristina 2016 *Trazo del claustro y ejes de orientación del conjunto conventual de Santiago Apóstol, de Jiutepec UAEM*. México. Tesis de maestría.
- Meli, R. 2000. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. Fundación ICA.
- Meli, R. 2011. *Los conventos mexicanos del siglo XVI: construcción, ingeniería estructural y conservación: MIGUEL ANGEL PORRUA Instituto de Ingeniería*. UNAM, México.
- Otto Frei 1986. *Geschichtedes Konstruierens* revista *Arcus* pag. 35/46.

- Ricard Robert (1986) *La conquista espiritual de México*, Fondo de cultura Económica, México.
- Guerra Pestonit, R. A. (2012). Tesis Doctoral. *Bóvedas y contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos: geometría, construcción y mecánica*. Departamento de Estructuras de Edificación Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Servicio Sismológico Nacional [sitio en internet]. México: SSN, (2017). Disponible en: <http://www.ssn.unam.mx/> Consultado en 2019-20
- Sanabria, L. 1982. "The mechanization of design in the 16th century: structural formulae of R. Gil de Hontañón". *J. Soc. of Architectural Historians*.
- Siller C.,J., A. *Restauración UNAM 50 años. La conservación del patrimonio arquitectónico de morelos* Compiladora Mónica Cejudo Collera. 2017 UNAM Ciudad Universitaria.
- Viollet-le-Duc, E. E. (1866). 1996 *La construcción medieval: el artículo "Construcción" del Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Revert, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

Paginas Web:

<http://www2.ssn.unam.mx:8080/sismos-fuertes/>

[www.sismohistoricos.org](http://www.sismohistoricos.org).

<https://www.normateca.inah.gob.mx/pdf/01472572392.PDF>

<https://earthquake.usgs.gov/data/shakemap/background.php>

Tratado completo Biblioteca nacional de españa <http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000042291&page=1>