



Revisión tratadística de las proporciones empleadas en la construcción de la estructura de la iglesia de San Juan bautista en Tiripetío, Michoacán, México. Comentarios a los resultados del análisis estructural a botareles de contrafuertes y su restauración.

J. A. Bedolla Arroyo¹, W. Martínez Molina², E. M. Alonso Guzmán^{1,2}, J. L. Briansó Penalva³

¹Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

³Departamento de Cristalografía, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, Catalunya, España, 08202.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i2.32>

Artículo recibido el 03 de Marzo de 2012, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 12 de Mayo de 2012. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el primer número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2012

RESUMEN

El edificio en estudio es emblemático. Se encuentra desplantado sobre un suelo arcilloso. Ha sufrido modificaciones por motivos estructurales, arquitectónicos, estéticos y funcionales. La construcción de este templo data del siglo XVI. Se construyó con mampostería de piedra natural juntada con arcilla y techumbre de madera. Su planta está conformada por una sola nave rectangular de 12 m de ancho x 50 m de largo, la cual contempla 5 contrafuertes laterales, que presentan falla estructural en sus extremos superiores e inferiores. Al analizar las causas del origen de las fracturas presentes, se comprueba que el edificio se construyó de acuerdo a la geometría propuesta en diversos tratados antiguos, lo que supondría un adecuado comportamiento mecánico. Se presentan las principales conclusiones obtenidas del análisis estructural realizado a los botareles de los contrafuertes, así como del estudio de Mecánica de Suelos realizado, concluyéndose que las fracturas presentes en los botareles de los contrafuertes se deben a la inadecuada selección de la mampostería natural empleada y a un inadecuado procedimiento constructivo.

Palabras clave: fábrica; tratados; edificios históricos; contrafuertes; botareles.

ABSTRACT

The Tiripetío building is emblematic. It is founded on a clay soil. It has undergone modifications due to structural, architectural, aesthetic and functional reasons. The construction of this temple dates back from the 16th century. It was built with stone masonry natural binder with clay and wood roof. The plant consists of a single rectangular bay of 12 m wide x 50 m in length, which includes 5 lateral buttresses, showing structural failure in the upper and lower ends. To analyze the root causes of the fractures, it was checked that the building was built according to the geometry described in various former treaties which would have a proper mechanical behavior. The main conclusions obtained from the structural analysis at botareles buttresses, as well as the study of soil mechanics, were that fractures present at the botareles of the buttresses are due to improper selection of the used natural masonry as well as an inappropriate construction procedure.

Keywords: factory; treaties; historic buildings; buttresses; flying buttresses.

Autor de contacto: Elia Mercedes Alonso Guzmán (eliamercedesalonso@gmail.com)

© 2012 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 2, No. 2, Mayo - Agosto 2012, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de Mayo de 2012.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN.

La edificación de las iglesias durante el siglo XVI y XVII, en México, fue bajo la dirección de los frailes evangelizadores, los cuales traían consigo los conocimientos de una gran variedad de tratados de construcción arquitectónicos europeos, los cuales, se asume, utilizaron para la construcción de estos edificios tres aspectos fundamentales: el uso de materiales y sistemas constructivos, la distribución espacial, y los aspectos conceptuales y estilísticos de la arquitectura.

El presente trabajo aborda la problemática constructiva de un inmueble en particular, la actual Parroquia de San Juan Bautista, ubicada en la localidad de Tiripetío, Michoacán, México, en la cual se presentan fallas constructivas en los contrafuertes, que son elementos estructurales necesarios para mantener la adecuada estabilidad del edificio, ya sea reaccionando ante cargas muertas, asentamientos por falla del terreno de cimentación ó por cargas accidentales, como sismos (principalmente) o viento. Ante esta problemática, para mantener funcionando en forma segura la edificación, se consideró realizar una adecuada restauración a los contrafuertes, por lo que se procedió a analizar en forma teórica las posibles causas, efectos y soluciones, comparándolas con los tratados en boga en la época, con la finalidad de proceder a la reparación y restauración del edificio.

Para explicar los daños a los contrafuertes se plantearon dos hipótesis: La primera considera que, debido al desconocimiento constructivo se utilizaron materiales inapropiados en la edificación. En la segunda, se le atribuyen los daños a fuerzas accidentales tales como sismos, hundimientos diferenciales en el terreno o viento; también a la acción de cargas concentradas o la posible mala intervención del hombre en alguna etapa posterior de reparaciones.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL INMUEBLE.

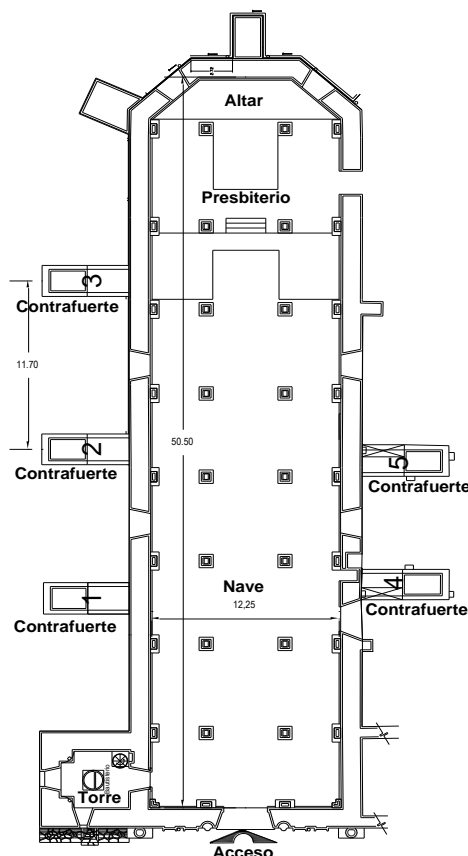


Figura 1. Planta Arquitectónica del Templo de Tiripetío, Michoacán, México

En mayo de 1537, los religiosos agustinos decidieron iniciar la evangelización de la Tierra Caliente, una de las siete regiones geo-económicas que actualmente conforman parte de los estados de Guerrero y Michoacán, en el Occidente de la República Mexicana, situación que aprovechó el conquistador Juan de Alvarado para pedir, por medio del Virrey Antonio de Mendoza, que los misioneros agustinos pasaran a evangelizar los territorios de su encomienda de Tiripetío, pues llegaban cerca de la Tierra Caliente y él les ayudaría en la edificación de la iglesia y el convento. Para esta misión evangelizadora fueron nombrados los padres fray Juan de San Román y fray Diego de Chávez y Alvarado, sobrino del encomendero. De esta manera salieron los religiosos de México el 22 de mayo y arribaron al pueblo el 12 de junio de 1537.

Los padres San Román y Chávez comenzaron su labor trazando, construyendo y planeando el pueblo y la construcción de un convento que les sirviera de centro doctrinal. Su primera edificación fue una choza de adobe a manera de iglesia donde se guardaba el Santísimo Sacramento, y tras la construcción de esta obra, se dieron a la tarea de enseñar la doctrina a la vez que ellos aprendían el

idioma de los naturales.

Igual que muchos de los pueblos fundados o reorganizados por frailes, la planeación del nuevo pueblo de Tiripetío corrió a cargo de los religiosos, pero como caso poco común, los frailes fueron auxiliados por un grupo de oficiales españoles que residían en México y que habían sido traídos por el encomendero. Éstos llegaron al pueblo el mismo año de 1537, y adiestraron a los indígenas y los mismos frailes en los trabajos de cantería y herrería para las grandes construcciones que ahí se realizaban.

A partir del año 1543, el padre Diego de Chávez comenzó a edificar un nuevo convento más grande, cómodo y a su entero gusto, pues el primero lo había edificado el padre San Román. El convento representa una completa innovación en cuanto a la tradición constructiva que a conventos se refiere, no sólo entre la orden Agustina, sino también en toda la Nueva España, pues el carecer de un patio central generaba un modelo arquitectónico completamente nuevo que no respetaba los patrones tradicionales

El templo de Tiripetío comenzó a edificarse a mediados de 1538, casi un año después de que los frailes llegaron al pueblo y se terminó hacia 1548. Este edificio fue construido con una planta sencilla, de una sola nave con el ábside en forma trapezoidal. Las crónicas mencionan que la fachada del templo era una de las más hermosas que se habían construido no sólo en el obispado de Michoacán, sino en la Nueva España entera. La techumbre, de media tijera, era a base de madera sobre la que descansaba una cubierta de teja a dos aguas. Un techo aparente lo constituía una elaborada y bien trabajada cubierta de madera, toda una forma de delicados y coloridos artesones, que hacían de este templo algo único. En el interior de la iglesia se levantan dos corredores de arcos torales que servían como división para los fieles tratando de dar una apariencia basilical, quizá con la idea de imitar las basílicas de los primeros siglos del cristianismo. Este templo no sobrevivió al tiempo, pues en el año de 1640, cuando uno de los indios iba a llamar a maitines, la antorcha con que se iluminaba incendió la estructura de madera del coro, destruyéndose para siempre la referida grandeza. Con este siniestro el fastuoso templo de Tiripetío perdió su decoración, su fachada y hasta sus dimensiones re-edificándose con más austeridad, tal como lo vemos en la actualidad. Esta reconstrucción terminó hacia 1650.

En el mes de noviembre de 1540 se realizó el capítulo provincial de los agustinos en la ciudad de México, y dentro de las resoluciones tomadas allí, se decidió crear un centro de estudios mayores de Artes y Tecnología. Por esos años, Tiripetío tenía fama dentro de la orden por ser un modelo a seguir en lo que se refería a la fundación de un pueblo y la evangelización de los naturales, sin contar con lo rápido que había sido la edificación completa del convento. Como el pueblo y la comunidad de Tiripetío resultaban un magnífico ejemplo de la labor que deberían desarrollar los frailes, se eligió a este lugar como sede del primer Centro de Estudios Agustinos en el Nuevo Mundo. Los estudios que se impartieron en Tiripetío a partir de 1540-1541 poseían las características de la enseñanza que se impartía en las universidades españolas.

La labor de los frailes agustinos no se limitaba al aspecto meramente espiritual, pues apoyados por el encomendero, también se preocuparon por llevar a los indios de Tiripetío el conocimiento de técnicas artesanales, para que trabajaran todos los materiales existentes localmente a las maneras española e indígena.

Como se puede observar en esta reseña histórica del pueblo de Tiripetío, los conocimientos técnico constructivos de la edificación europea fueron impartidos y divulgados en este centro de enseñanza, lo que indica que los contenidos sobre edificación contenidos en los antiguos tratados europeos estuvieron presentes durante la edificación de este edificio, razón por la cual el planteamiento hipotético de una mala ejecución constructiva, podría tener pocas posibilidades de ser la causa de la falla estructural del sistema de contrafuertes existente en el inmueble.

3. EL CASO DE ESTUDIO.

3.1 Descripción arquitectónica.

El templo de la Parroquia de San Juan Bautista de Tiripetío consta de una sola planta a manera de nave basilical. Sus dimensiones son de 53.50 m de longitud por 15.30 m de ancho en medidas exteriores. Actualmente en su interior se encuentran 16 columnas de madera de 30 cm x 50 cm de sección transversal, por 10.50 m de altura; éstas se encuentran apoyadas sobre bases de cantería labrada. Las columnas son los apoyos centrales de la cubierta del edificio, ver Figura 1.

Los muros son de mampostería de piedra volcánica asentada con arcilla y morteros de cal, su espesor es de 1.54 m en promedio y 1.72 m incluyendo la pilastra, con una altura de 10.50 m. Su cubierta es a base de estructura de madera de media tijera y caballete, con cubierta de teja de barro rojo recocido.



Figura 2. Fachada principal del templo de Tiripetío, Michoacán, México.

La fachada de estilo barroco está compuesta de un acceso central de arco de medio punto y en el cuerpo superior un óculo que sirve como iluminación al coro de la iglesia y a la nave propia, ver fotografía en Figura 2. Sobre sus fachadas laterales se desplantan los elementos de los contrafuertes en cuestión; en la fachada sur, tres de ellos y dos sobre la fachada norte, esto debido a que en el lugar del tercer contrafuerte de esta fachada se encuentra la casa cural, motivo por el cual no ejecutó su construcción.

3.2 Patología: Alteraciones y deterioros.

El inmueble ha presentado, en términos generales, alteraciones y deterioros comunes por la falta de mantenimiento y la poca conservación, deterioros como la disgregación de juntas, la exfoliación o decapamiento de la piedra, pátinas o suciedad, manchas por escurrimiento y pérdidas de aplanados a causa de los agentes físico-biológico-naturales, deterioros comunes que se encuentran en la gran mayoría de nuestros inmuebles patrimonio de la humanidad, los cuales no presentan mayor complejidad en su restauración.

Sin embargo existía un deterioro preocupante en el momento de abordar la restauración de este templo: la fractura de los cinco contrafuertes en áreas críticas de su trabajo estructural, localizados en las aristas de los brazos superiores y en los arranques del arco en el cuerpo inferior.

El diseño de los contrafuertes se puede considerar como austero; están compuestos por dos cuerpos de fábrica sencilla, un cuerpo inferior compuesto de un macizo rectangular de secciones 2.15 m de ancho por 2.51 m de largo y una altura de 4.60 m, el cual se conecta con la estructura de los muros por medio de un arco rebajado de 2.75 m de longitud. El segundo cuerpo corresponde al brazo de secciones 1.60 m de ancho con un peralte de 1.20 m y un largo de 7.20 m, medida superior, que se encuentra de manera diagonal apoyado sobre un macizo en la parte inferior y sobre el muro en la parte superior, Figura 3.

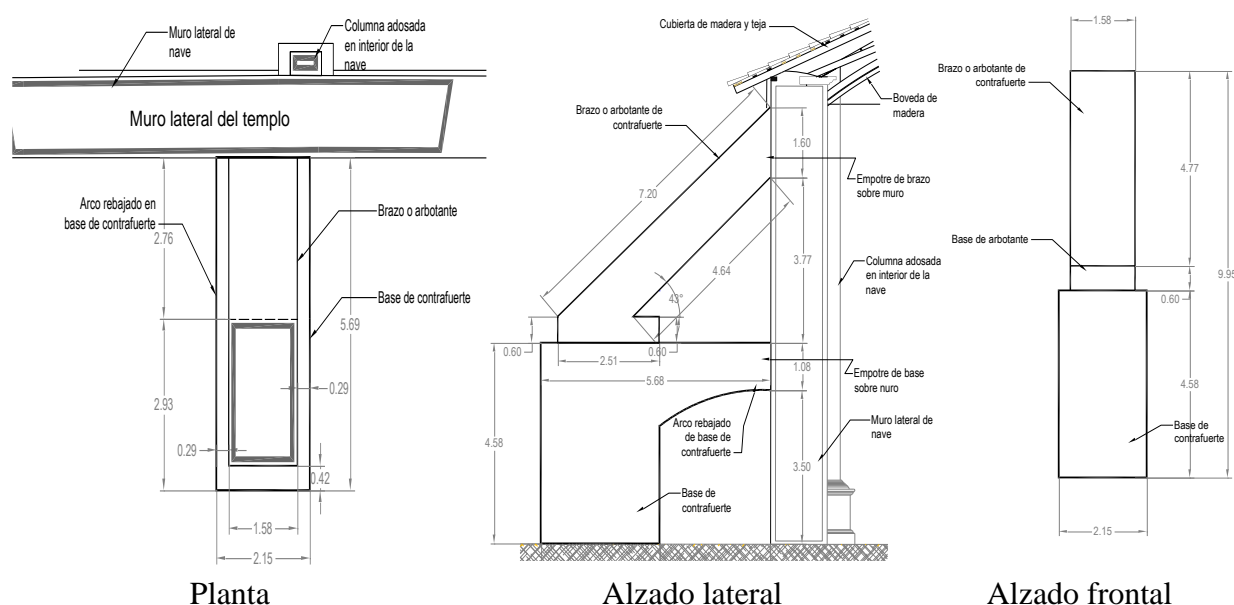


Figura 3. Levantamiento arquitectónico del diseño actual de los contrafuertes de la estructura del Templo de Tiripetío, Michoacán, México.

Los deterioros que se presentaban en estos cinco elementos consistían en fracturas en el área de cortante crítico de ambos elementos, Figura 4, todos en la misma posición, por lo que su intervención resultaba imperante en las acciones de intervención. No se conocen las causas ni fechas en las que se presentaron estos deterioros y en la memoria de la comunidad no tienen referencias de en qué tiempo se suscitó este deterioro.

Es común y de costumbre que en nuestras comunidades étnicas michoacanas, el mantenimiento y la conservación de estos inmuebles estén a cargo de los denominados “semaneros”, personas, grupos o comités de la propia comunidad que se encargan del templo por el lapso de tiempo de un año, tiempo en que este personal realiza las actividades de mantenimiento e intervenciones necesarias para su conservación. En este caso en particular la comunidad implementó dos acciones: la primera, al observar las fracturas de los contrafuertes y por el temor de que estos colapsaran, se rellenaron los vanos interiores con mampostería de piedra volcánica; la segunda acción fue realizada en la cubierta del templo en la cual con la finalidad de disminuir costos, material y mano de obra en su mantenimiento, la estructura de madera fue sustituida por un estructura metálica.

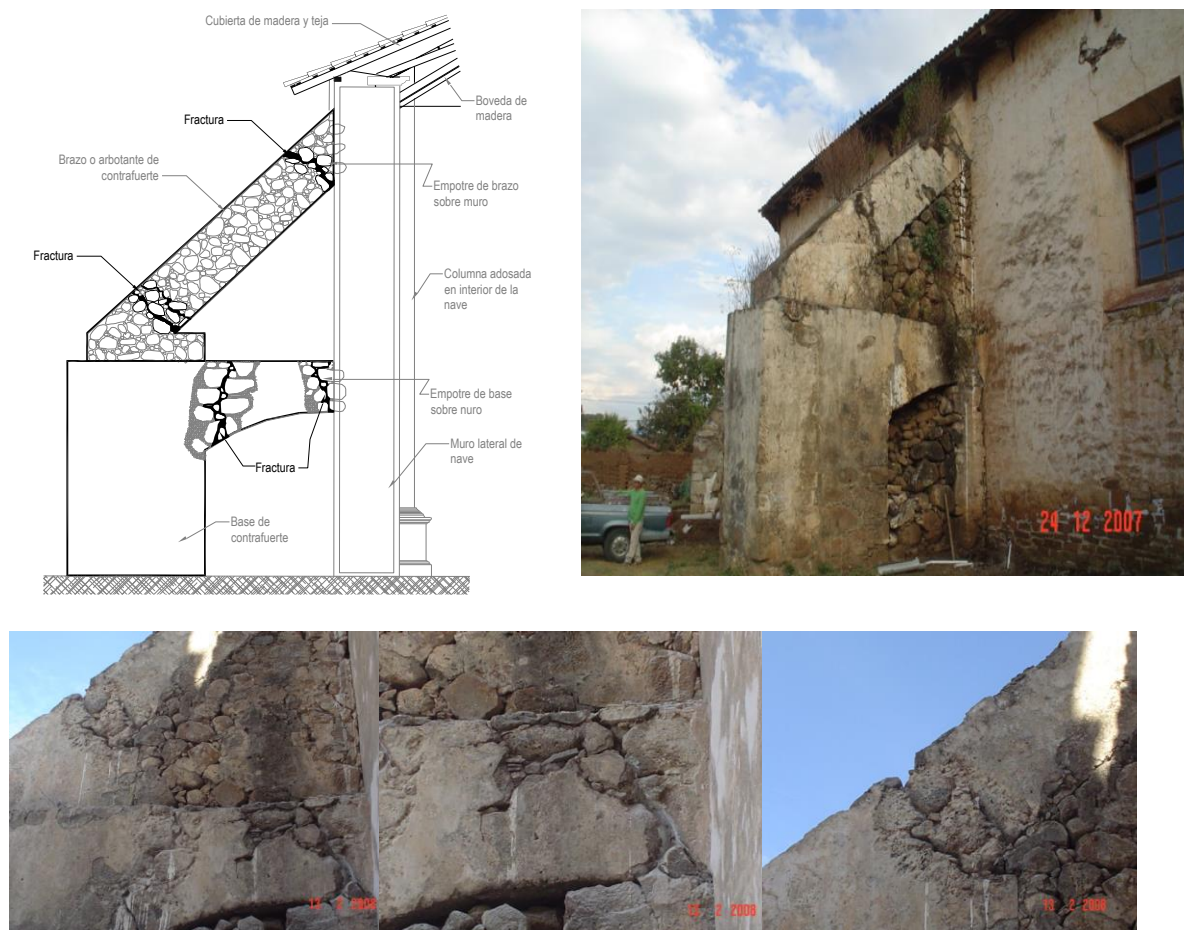


Figura 4. Levantamiento de daños y deterioros de los contrafuertes de la estructura del templo de Tiripetío, Michoacán, México.

3.3 Revisión del problema.

Revisión tratadística. El problema se abordó por dos vertientes: la revisión tratadística por cuestiones de diseño, secciones y construcción, así como la revisión estructural, incluyendo cargas accidentales; ambos aspectos con la finalidad de complementarse una con otra y encontrar la causa de origen del problema, para proponer una restauración de los elementos.

En primera instancia, haciendo uso de los tratados de construcción relacionados con estos inmuebles, se realizó la revisión constructiva espacial y conceptual arquitectónica con la finalidad de comprobar si lo establecido en los tratados se había aplicado en la construcción de este templo, ya que como se dijo este es uno de los inmuebles más representativos en el ámbito académico durante el siglo XVI.

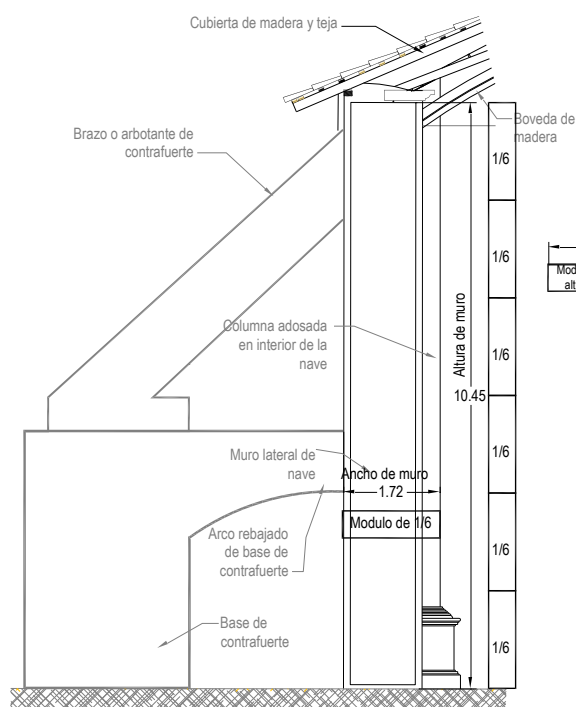
Aunque es difícil de comprobar la aplicación directa de los tratados en este tipo de edificaciones, está comprobado que los elementos estructurales como: los muros, las columnas, las pilastras, los pilares, los contrafuertes, los arcos y las cubiertas, según se organicen estructuralmente, guardan un sistema de relaciones con características propias, que ha permitido que estas estructuras sean estables. Por esta razón es necesario el analizar y confrontar cada elemento del inmueble para corroborar su trazo y proporción en relación con los demás elementos que constituyen al templo, ya que todos estos elementos son establecidos en diseño y construcción en los tratados de la época.

En el caso de los muros se manifiestan dentro de los tratados como uno de los elementos principales en las estructuras de las iglesias conventuales. Algunos autores de tratados, para

establecer el espesor que debe de contemplar un muro cualquiera dentro de estos edificios, dicen que se debe de considerar y tomar como base una parte proporcional del claro interno total de la nave; por otro lado, otros autores de tratados lo relacionan con la altura de la imposta o con elementos portantes, es decir la altura en donde se desplanta el arco o bóveda, o en su caso, la altura de las columnas de apoyo portantes de bóvedas, cúpulas o viguerías, para esta situación podemos citar lo que establecen Vitruvio, Alberti y Fray Lorenzo de San Nicolás, autores europeos y otros como Fray Andrés de San Miguel, también autor europeo que escribe su tratado en la nueva España.

En general, lo establecido por los autores de tratados de construcción en cuanto al equilibrio de altura esbeltez de los muros, no son más que relaciones sobre el ancho que han de tener en proporción con su altura. Fray Lorenzo de San Nicolás, hace referencia al grueso que han de tener los muros de los templos, los cuales, dice, tendrán la tercera parte (1/3) del ancho del templo, teniendo como cubierta bóveda de piedra. Pero si llevan estribos (contrafuertes) los muros, bastará con la sexta parte (1/6) (San Nicolás, 1639). Él escribe también que cualquier pieza o sala que lleve bóveda de piedra, guarda dicha proporción; para las que no lleven bóvedas, se debe de tener diferente grueso de muro, no excediendo la sexta parte (1/6) del ancho del espacio y no rebasando la altura del inmueble en tres niveles; si sobrepasa a más niveles, se indica que será el grueso que le pareciere al constructor (San Nicolás, 1639).

En el mismo tenor, Fray Andrés de San Miguel (San Nicolás, 1639), comenta que según Vitruvio y otros, el espesor de las paredes se toma del grueso de la columna toscana, que es la sexta (1/6) parte de su alto (Béaz Macías, 1969). Fray Andrés, comprende que es correcto sacar el ancho de las paredes de acuerdo al sexto de su altura, como con la columna toscana y no con el ancho del templo, pues la proporción debe ser acorde ancho con alto del muro (Béaz Macías, 1969). Pero para nuestros cuartos, explica Fray Andrés, el grueso de las paredes, debe ser la sexta (1/6) parte del ancho del espacio arquitectónico a edificar, como si se tiene dieciocho pies de ancho, se da de grueso a la pared tres pies. Cuando por alguna razón se quiera dar más grueso a las paredes, se puede exceder en un octavo del grueso del muro y cuando soporten bóvedas en un sexto (Béaz Macías, 1969) (Figura 5).



Según la proporción que indican Vitruvio y Fray Andrés de San Miguel, el ancho del muro deberá ser 1/6 parte de la altura del muro o la altura hasta donde se desplante la bóveda o arcos, en este caso particular tenemos lo siguiente:

Altura de muro: 10.45 m

Ancho de muro, incluyendo columna adosada: 1.74 m

Proporción: $10.45 \text{ m} / 6 = 1.74 \text{ m}$

$1/6$ de la altura = 1.74 m.

(Se cumple).

Figura 5. Proporcionamiento según tratados de Vitruvio para la obtención del ancho de los muros.

León Baptista Alberti, en su libro 7, capítulo 10, recomendaba con base a lo que autores más antiguos determinaban en tratados y a la práctica constructiva que ejercía, que el grosor del muro se determinaba dividiendo la luz total, es decir, el claro total de la nave en nueve partes (1/9) iguales, dándole una de estas proporciones al espesor del muro (León Baptista, 1582) (Figura 6).

Para el caso de estudio, tomando en cuenta lo que Alberti determinaba para la obtención del espesor del muro, se consideraron los siguientes datos para la obtención de la medida que debería de tener el muro, si estuviera bajo estos principios, por lo que se tiene:

Claro (ancho) total de la nave: 12.50 m
Espesor de muro: 1.40 m
Proporción según Alberti: $12.50 \text{ m} / 9 = 1.39 \text{ m}$
1/9 del claro = 1.388 mts.

Por lo anterior, la proporción de este tratado de construcción también podría cumplir con la edificación analizada, por lo que se considera que su construcción si contempló un conocimiento técnico, de esa época, para su edificación.

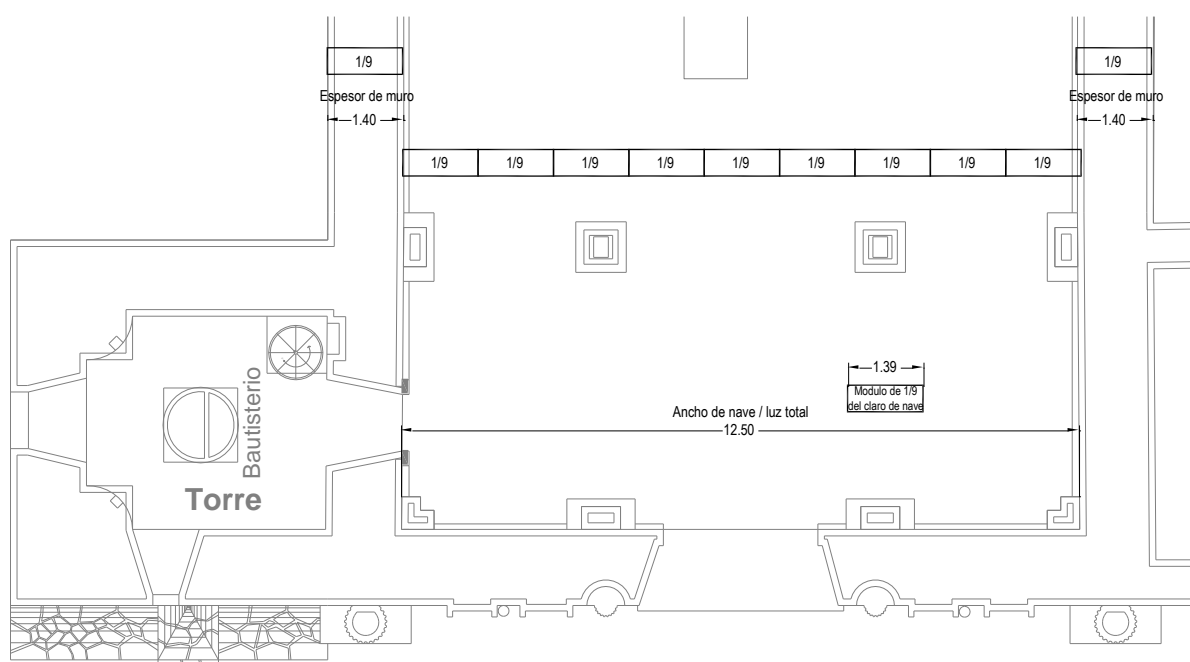


Figura 6. Proporcionamiento según tratado de Alberti para obtención del ancho de los muros

En el mismo tenor de verificar el espesor de los muros, se encuentra cómo varios autores de tratados de construcción de la época, proporcionan conceptos muy similares a los expuestos anteriormente, la mayoría teniendo como base alguna proporción de los elementos que integran el inmueble, y considerando las características particulares de los diversos edificios que compone el género arquitectónico religioso, tal es el Caso de Simón García (Bonet Correa, 1979). quien considera el caso de las iglesias de tres naves, para la cual dictamina que debe de considerarse el claro total de la nave y proporcionarla en ocho partes (1/8), dando dos (2/8) a la nave mayor, dos (2/8) a los dos pilares y dos y medio (2.5/8) a las dos naves colaterales, y en el caso de no llevar capillas laterales, asignar sólo una parte (1/8) para las paredes y pilares de los lados.

Gil de Hontañón, otro autor de tratados de construcción del siglo XVIII, considera el grosor del muro como un cuarto (1/4) del claro de la nave (Kubler, 1982), que de manera muy similar se asemeja a lo que establece Fray Andrés de San Miguel, haciendo referencia a lo que consideran otros tratadistas; menciona que partiendo del ancho total propuesto para la iglesia, el grueso de los muros que no lleven estribos ocupará tanto como la mitad del área (Báez

Macías, 1969). Lorenzo de San Nicolás, con respecto a las bóvedas de piedra, considera que los muros sin apoyo o contrafuertes, deben totalizar $1/3$ del espacio interior de la bóveda (San Nicolás, 1989).

Otros tratadistas definen la profundidad del contrafuerte o estribo como una parte proporcional del ancho total del templo. Esta viene a ser una parte proporcional de la luz (claro total de la nave)¹ como dice Fray Andrés de San Miguel, retomando a otros tratadistas, al referirse al grosor de muros, estribos y pilastras, y establece que el ancho total de la iglesia se divida en once partes, dando al grueso de la pared dos partes (incluye pilastra y estribo) y como segunda opción se puede considerar dividir ésta en cuatro o cinco partes, dando una parte al grueso de la pared, siempre y cuando lo demás se parta entre pilastra y estribo; en el caso de que el material de las mezclas sea pobre o por otra razón se le deba dar más grueso a las paredes, se debe exceder de una octava parte del grueso de la pared, y añadiendo a los bajos de la bóveda una sexta parte (Báez Mecías, 1969).

Lorenzo de San Nicolás, con respecto a las naves que se construyan con estribos, establece que la longitud de éstos será de $1/6$ de la luz, dando otro sexto al grosor del muro, haciendo un total de $1/3$ de la luz y su grueso será de $2/3$ del grueso de la pared. Así mismo la distancia que ha de haber entre uno y otro ha de ser la mitad del ancho de la iglesia, quitando de este espacio los gruesos de ellos mismos. En el caso de que la nave tuviera capillas laterales, los estribos tendrán de longitud el fondo de ésta. En el caso de estudio, el inmueble no presenta estribos en su edificación, sino contrafuertes botareles, por lo que esta acción es más apegada al proporcionamiento de los muros ya establecidos (San Nicolás, 1989).

Los pilares y las columnas de la iglesia están relacionados con las normas que se establecen para los templos que no tienen capillas laterales o las de tres naves. El orden usado para las columnas según observaciones, es el Toscano. Para determinar su sección, Simón García los establece proporcionalmente a la medida total del templo, lo que se relaciona directamente con la luz o claro, como se mencionó para la determinación del espesor de los muros para iglesias de tres naves. Vitrubio, para la altura de las columnas, dice que debe de ser de seis partes para el fuste y una séptima parte para la basa y el capitel. Con respecto a la altura de las pilastras, Fray Lorenzo de San Nicolás establece que éstas deben de tener las mismas proporciones que las columnas y su relieve, por regla general, ha de ser la doceava parte de su ancho. También menciona que si la pilastra estuviera acompañada con contrapilastra y traspilastra, podrá adelgazar más su espesor y aumentar en estos casos la altura de la columna de ocho a nueve o diez partes (San Nicolás, 1989).

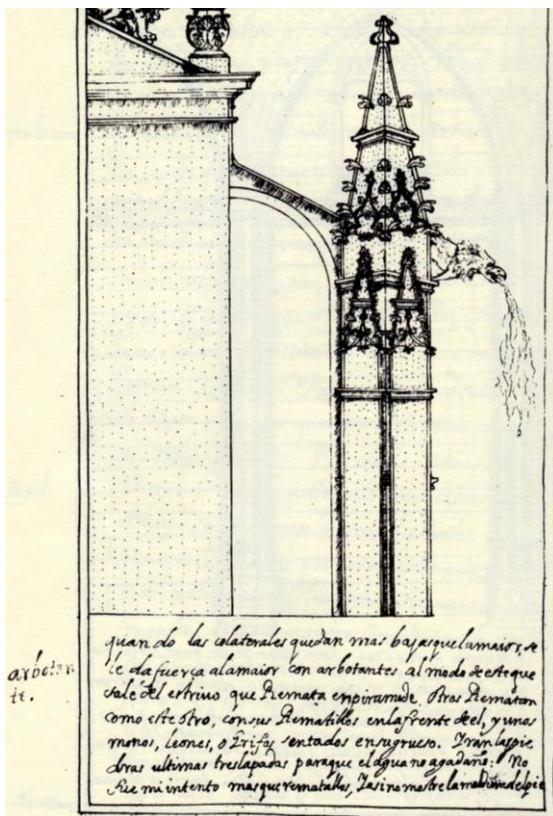
Analizado lo anterior, se puede corroborar que según lo establecido en diferentes tratados de construcción, el espesor del muro de la Iglesia de Tiripetío, se ajusta a los proporcionamientos establecidos en ellos, contemplando pequeñas variaciones que no ponen en duda la aplicación de un conocimiento constructivo de la época de su edificación, obtenida a través del conocimiento de estas obras literarias.

En la mayoría de los tratados consultados, las disposiciones son considerando edificios con cubiertas de bóveda; sin embargo, aplicando estas normas tratadistas en caso de estudio se observa que, en términos generales, el espesor del muro se acerca a lo establecido en varios tratados, obteniendo como resultado que, conforme lo determina Alberti, una novena parte del claro corresponde a 1.39 m, mientras que el espesor real que contemplan los muros es de 1.40 m, obteniendo así una aproximación a una novena ($1/9$) parte del claro de la nave. De la misma manera Vitruvio y Fray Andrés de San Miguel, coinciden que el espesor debe de estar proporcionado con la relación de altura esbeltez, obteniéndose como resultado que, en este

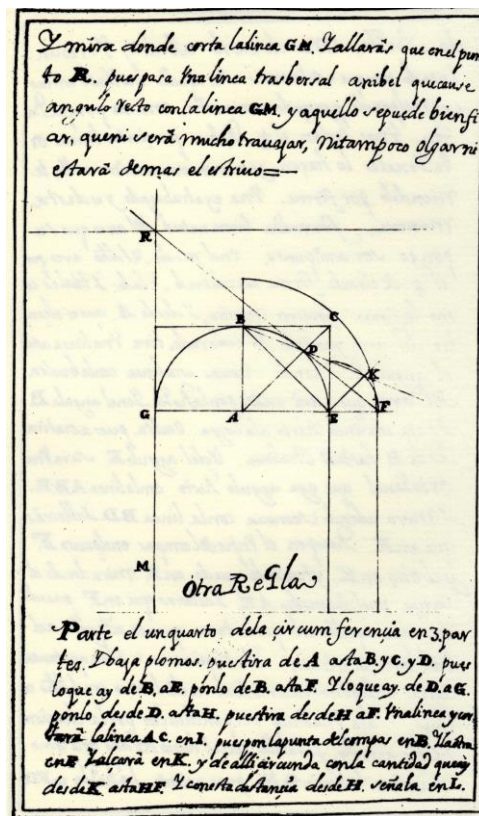
¹ Simón García (1681), considera que de sus propuestas para definir el estribo en el corte de un templo en todos los casos "...el ancho del estribo queda marcado en la horizontal que representa al plano teórico de arranque de la bóveda, lo define la intersección con la diagonal trazada desde el punto más alto del estradós hasta uno de los vértices que forma el muro con el suelo. El ancho definido del interior del templo se transporta con el compás hasta el exterior por medio de un semicírculo que tiene como radio el ancho del estribo, y como centro, el punto de intersección entre muro y el plano de arranque de la bóveda." También propone que se puede calcular el estribo para una altura mayor de bóveda o de muro por regla de tres.

caso, la sexta parte (1/6) de la altura del muro corresponde a la proporción de 1.74 m y el espesor real del muro, considerando las columnas adosadas, es de 1.72 m, disposición que en el caso de la parroquia de Tiripetío, se cumple con una mínima diferencia. (Figura 5)

En relación a los contrafuertes, al igual que en el espesor de los muros y el claro de la nave, se realizaron las diversas revisiones de los contenidos de los tratados, encontrando diferentes recomendaciones y maneras de proporcionar el ancho que debía contemplar estos elementos estructurales. Simón García, por su parte, establece que para los casos de las iglesias de una nave con capillas laterales, se toma el ancho total del sitio, partiéndolo en cuatro partes, dando dos al ancho de la nave y dos a los dos lados de pilares y contrafuertes, haciendo, entre pilar y pilar, capillas (Bonet Correa, 1979). También él relaciona el alto total de la nave, incluyendo el espesor de la bóveda, y la altura de la imposta con respecto al claro; en otras palabras, la altura a partir de la cual se desplanta la bóveda o arco con respecto al claro total del inmueble. Antonio Bonet Correa y Carlos Chanfón Olmos, explican el trazo a partir del radio de la bóveda de cañón corrido con arcos fajones de medio punto. También lo definen considerando el espesor de la bóveda y la altura de la imposta, siendo importante la flecha de la bóveda con respecto al claro.



Regla para el trazo de un arbotante en una iglesia de una sola nave, Folio 21r



Regla y trazo geométrico para el diseño de un estribo en los muros de una iglesia, folio 59r

Figura 7. Folios extraídos del manuscrito de Simón García, Compendio de arquitectura y simetría de los templos, 1681

De igual manera explican la definición de los estribos considerando la altura del templo, incluyendo el espesor de la bóveda, que se calcula de acuerdo al ancho del claro de la misma, (Figura 7) (Bonet Correa, 1979). Por lo anterior, se debe de entender que las dimensiones del contrafuerte deben obtenerse por medio de trazos geométricos y proporciones, tomando como base el claro total de la nave así como la altura de sus apoyos estructurales.

En este caso de estudio se encuentra que, en general, la especificación de la geometría de los estribos o contrafuertes está más relacionada con aquellos de los conventos tradicionales del siglo XVI; sin embargo, esta construcción sufrió muchas modificaciones en su esquema espacial y por ende en su sistema constructivo, lo que se observa en el dimensionamiento de la iglesia y de los contrafuertes, donde seguramente se retomó lo dicho por Simón García dividiendo el ancho total del inmueble en cuatro (4) y dando dos partes a la nave y una a cada contrafuerte (Figura 8).

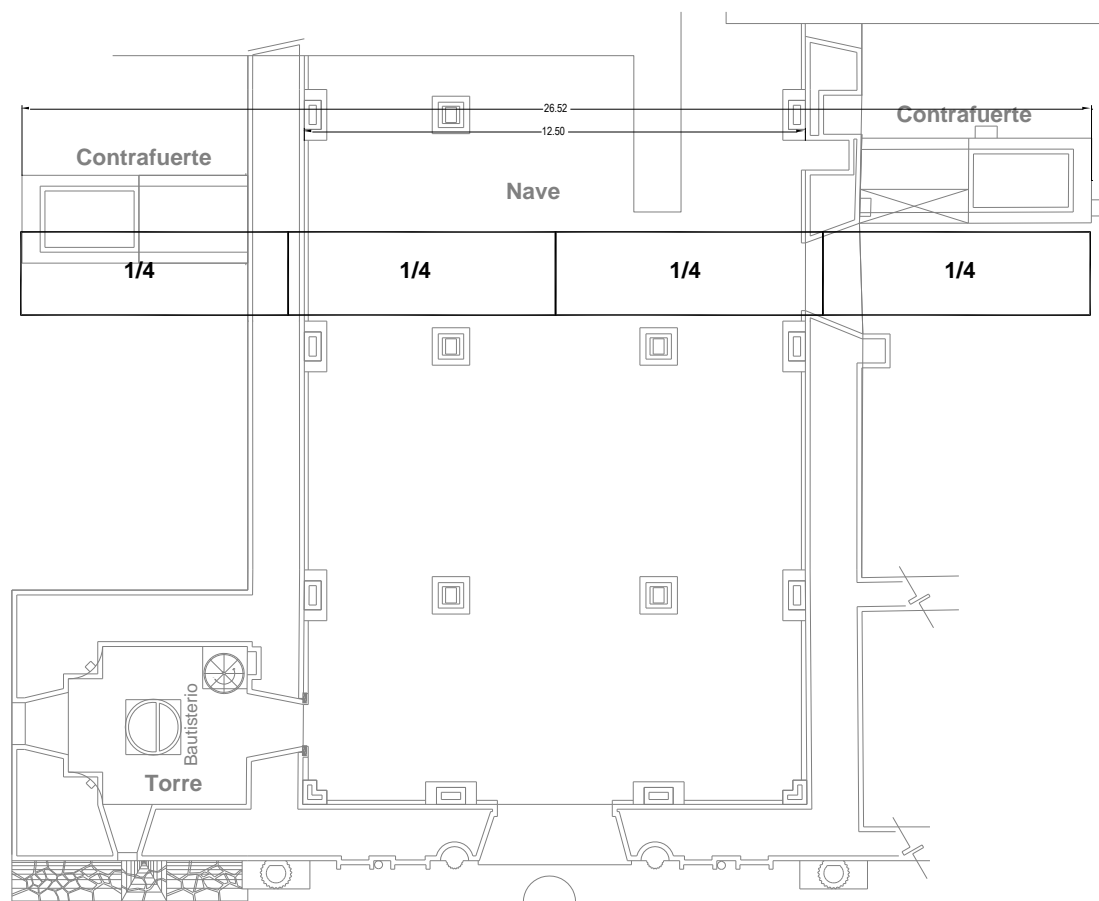
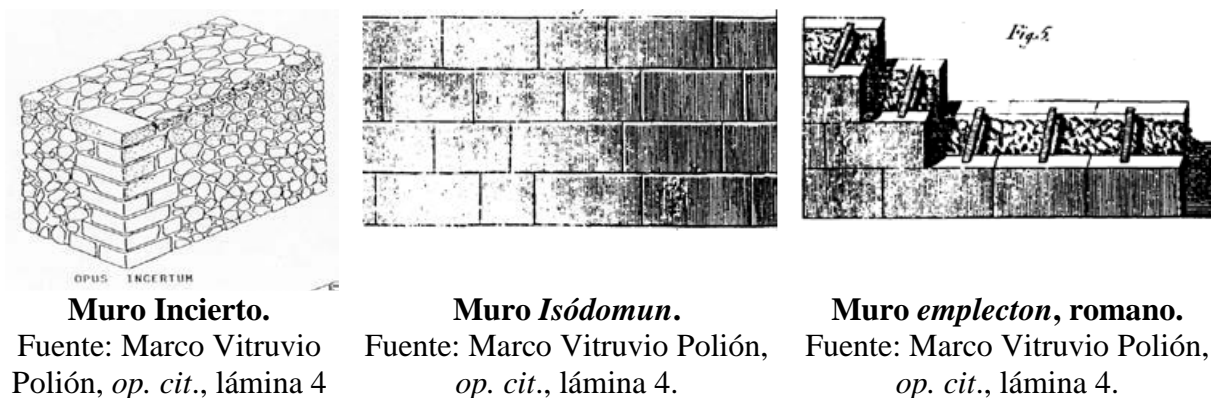


Figura 8. Proporcionamiento según tratado de Simón García para la obtención del ancho de los muros.

Para el caso del sistema constructivo utilizado para la edificación de los contrafuertes, que en este caso son de mampostería irregular a base de piedra volcánica y juntas de mortero de cal-arena, los tratados analizados ilustran diferentes tipos de mamposterías; el texto de Marco Vitruvio Polión, contiene varios sistemas constructivos concernientes, como el *reticulado*, el *incierto*, el *isódomum*, el *pseudo-isódomum* y el *emplecton* (Vitruvio Polión, 1787). Teniendo al incierto, como base constructiva para la mampostería de nuestro caso de estudio, Vitruvio, señala a la mampostería incierta (*incertum*), como un muro de dos paramentos hechos con piedras, es decir buscando que las caras del elemento contemplen un careo que permitan un aparejo, con un vacío en el medio de la pared entre las piedras de las caras, que se llenará con piedra irregulares ordinarias de buen tamaño, recomendando que las piedras de relleno sean arregladas (cuatrapeadas), no perdidas, y que éstas generen el menor espacio posible entre cada una (Vitruvio Polión, 1787) (Figura 9).



Muro Incierto.

Fuente: Marco Vitruvio Polión, *op. cit.*, lámina 4

Muro Isódomun.

Fuente: Marco Vitruvio Polión, *op. cit.*, lámina 4.

Muro emplecton, romano.

Fuente: Marco Vitruvio Polión, *op. cit.*, lámina 4.

Figura 9. Tipos de muros especificados en el tratado de Marco Vitruvio Polion “Los Diez Libros de la Arquitectura”

Continuando con otro tratadista de arquitectura y construcción, Alberti León Baptista, él no se adentra demasiado en la descripción de los géneros para mamposterías de muros, enfocándose a tres: el reticulado, el ordinario y el incierto, siendo el último el que se apega a lo construido en el inmueble de estudio; se describe al muro incierto como el elaborado con piedras irregulares, apegándose cada uno de sus lados, cuando sus líneas o vértices lo permitan, a los lados de las piedras continuas (León Baptista, 1582). Esta descripción que se apega a lo que debería ser el sistema constructivo de la mampostería del caso en estudio.

Para la edificación de mamposterías, Fray Lorenzo de San Nicolás comenta que pueden ser de cuatro formas: de cantería, de mampostería con pilares de ladrillo, o todo de ladrillo, o de pilares de ladrillo con tapias de tierra. Si el inmueble es con muros de cantería, como es el caso del inmueble en estudio, la mampostería será un cuerpo. Atendiendo no sólo a los paramentos interiores y exteriores, se harán de tres cuerpos: los dos paramentos y el núcleo. A esto Vitruvio, lo llama “de tres costros”, que en este tipo de mamposterías para que sean seguras, se pueden colocar piedras que abracen a los dos paramentos, que los griegos llamaron *diatonus*, que son lo que se llaman tizones, los cuales se deben de colocar tanto en la obra de sillería como en la de mampostería de cantería, para que su espesor atravesase o encaje en los dos paramentos y den firmeza al muro. El restante de en medio del muro, se llenará con ripios y mortero de cal, teniendo especial cuidado en generar la menor cantidad de juntas y cuidar el entrelazado de cada piedra (San Nicolás, 1639). La obra de Benito Bails, ya del siglo XIX, sobre la mampostería, comenta que todo inmueble hay tres tipos de mamposterías para muros y otros elementos, las de las fachadas, las divisorias que separan los principales aposentos del edificio y las medianeras que están entre dos edificaciones. Para las partes principales de toda pared, tipos de mamposterías y su construcción, los rellenos entre los dos paramentos, la colocación de piezas a tizón y de elementos que hacen ángulo con el muro, Bails, cita textualmente al pie de la letra, las descripciones y recomendaciones constructivas de tratadistas ya relatados en los párrafos anteriores como Vitruvio, Alberti, Fray Lorenzo y Palladio (Bails, 1796)

De los tratados revisados en cuanto a sistemas constructivos para mamposterías, se muestran elementos que hacen referencia al elemento en estudio, en cuanto a los que conforman la base y el brazo o botarel de piedra irregular de piedra volcánica.

La disposición de la mampostería de piedra irregular, se ve reflejada desde el tratado de Vitruvio, conformada con dos paramentos y núcleo de relleno, teniendo poca evolución sus sistemas constructivos en referencia con los demás autores analizados, todos describen en forma muy similar las recomendaciones prácticas para el desplante de los paramentos, el tipo de relleno y la inserción de piedras de enlace o unión: es más bien una interpretación o adaptación de cada autor de lo descrito por Vitruvio en su tratado. Por otra parte la obra de

Bails, abarca una descripción, más puntual sobre el procedimiento constructivo para la construcción de mamposterías, ya sea en muros u otros elementos.

Con base en lo anterior, y analizando los elementos de estudio, se observa que durante la edificación de los contrafuertes, no se cuidaron las recomendaciones emitidas por los tratados, ya que una vez expuesta la mampostería se observa que en grandes secciones no existen los cuatrapeos correspondientes, también es notorio como el relleno utilizado en sus cuerpos, son de mampuestos de pequeña dimensión y en algunos caso incluso de canto rodado.

4. RESULTADOS DE LA REVISIÓN ESTRUCTURAL CONTEMPORÁNEA.

Para la segunda vertiente en la revisión de este caso de estudio, haciendo uso de los métodos actuales de cálculo estructural, se realizó una revisión del inmueble, con base en el planteamiento de tres posibles hipótesis de la causa de las fallas en los contrafuertes. La primera, centraba la causa de origen de la falla en un posible asentamiento diferencial en el inmueble ya que además de los contrafuertes, las fachadas norte y sur presentaban fracturas en el núcleo de la mampostería, por lo que la posibilidad de hundimiento diferencial daba respuesta a estos deterioros, ya que ante los esfuerzos a tensión que pudieron haber tenido los elementos de mampostería, se habrían manifestado fracturas en sus juntas, en virtud de que ante esfuerzos de tensión la mampostería es inoperante.

Para la comprobación o descarte de esta hipótesis, se realizaron calas en el terreno de desplante para determinar los niveles de la cimentación, tanto de los muros como del elemento del contrafuerte. Así mismo se realizaron estudios de Mecánica de Suelos para la obtención de diversos parámetros característicos del suelo del lugar, entre ellos su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la fatiga del terreno de desplante a compresión. Los resultados descartaron la hipótesis de que las fracturas de los contrafuertes pudieran deberse a asentamientos diferenciales entre el cuerpo de la nave y estos elementos fracturados en estudio. La clasificación del suelo fue un CL (arcilla inorgánica de media compresibilidad). Los niveles de desplante de la cimentación se encontraban, en promedio a 2.60 m de profundidad y la capacidad de carga del terreno, a ese nivel, fue de 5.60 ton/m², determinado con un factor de seguridad de 3.00, según la teoría de Terzaghi, estando por arriba de la carga máxima real en la estructura de 2.20 ton/m².

En el caso del análisis estructural de los contrafuertes de la fachada norte del templo, se realizó bajo la consideración de que el núcleo que confina el botarel o brazo y el elemento inferior de arco rebajado, únicamente trabajarán cuando haya una falla en el sistema constructivo, por fuerza cortante. Bajo esta óptica, se partió de la apreciación de una falla constructiva de origen, donde a la mampostería que conforma el botarel o brazo, se le somete a un esfuerzo de tensión en sus extremos, situación de comportamiento mecánico inadecuado para el material de fábrica, ya que, generalmente, en los sistemas constructivos de mampostería, ésta presenta resistencia mínima a esfuerzos de flexión y de tensión. Se observó que la falla que se manifiesta en los extremos del elemento del botarel, que a su vez funciona como platabanda, se encuentra en los puntos críticos de mayor cortante, ante los esfuerzos que se ejercen en él; de la misma manera, es, en estos mismos puntos, donde el núcleo central proporciona el apoyo requerido para impedir la falla total del elemento.

Como parte de la revisión general en conjunto al inmueble, se analizó de manera particular el comportamiento estructural de diversos elementos del inmueble, como el caso de cubierta, muros, columnas, etc., y su trabajo en relación a los contrafuertes; se determinó que estos elementos reciben y contrarrestan, en forma estable, los esfuerzos producidos por la estructura de la cubierta. Para el desarrollo de esta revisión se tomaron en cuenta dos aspectos o alteraciones que se le habían hecho al inmueble: la primera, el cambio de la estructura de madera por estructura metálica con la cual se contemplaba la posibilidad de que al dejar de

tener articulaciones en cada elemento de madera que transmitía cargas a los muros, fueran estas rígidas y concentradas por la estructura metálica, lo que ocasionaría empujes diferenciales sobre los muros. Y la segunda, el relleno de mampostería en los vanos del contrafuerte, el cual por su propio peso ejercía un esfuerzo en los muros hacia el interior de la iglesia, lo que ocasionaría un empuje en sentido opuesto al ejercido por la cubierta.

Para poder confirmar o desechar estas hipótesis se realizaron revisiones por torsión, interacción de la estructura / muros de apoyo, revisión por giro o desplazamiento y revisión por flexión del botarel o brazo; análisis que permitirían ver el comportamiento estructural del inmueble y contrafuertes y obtener los resultados necesarios que permitieran encontrar la causa de origen de estas fallas. Concretamente se presentan de manera breve los resultados obtenidos en estos análisis:

Revisión por torsión del edificio.- En este caso se encontró, en la revisión de centroides, la relativa simetría en planta, donde la variación del Centro de Gravedad y el Centro de Rigidez es del orden del 2%, lo cual no incide para que el efecto de cargas dinámicas por torsión sean determinantes para afectar a los contrafuertes.

Interacción estructura/muros de apoyo.- En este caso se encontró en la nave una marcada relación de esbeltez 3:1, presentándose la singularidad de encontrarse al interior, columnas de madera, con una marcada relación de esbeltez, interactuando con la estructura de cubierta (9:1), donde se observa que la componente horizontal sobre el muro se acentúa por este factor de esbeltez. También se encontró que la componente horizontal resultante de la bóveda de madera sobre el muro es mínima, $W_c = 384 \text{ kg/m}^2$, por lo que el efecto de coceo no se considera influyente para la falla que se acusa en los contrafuertes.

Revisión por giro o torsión en los contrafuertes.- En esta revisión los resultados dieron negativos, no existe deslizamiento, giro o torsión en el elemento, por lo que se garantiza que la falla no es por esta causa. En esta revisión se observó que, en la mampostería que conforma a estos elementos no existen esfuerzos a tensión y que la falla presente se da por la presencia de una articulación, por cambio de dirección, con la hipótesis que no se presentan giros ni desplazamientos, es decir que es estable estructuralmente, por lo que la falla observada obedece a una nula resistencia a la flexión y a la concentración de cargas en las juntas de mortero ante un soporte estable.

5. ESTADO DEL EDIFICIO Y PROCESO DE RESTAURACIÓN DE LOS CONTRAFUERTE.

Se presentan fotografías del estado del edificio, antes de iniciar la restauración, así como del proceso de re-estructuración de los contrafuertes.



Figura 10. Contrafuertes fracturados.



Figura 11. Colocación de andamios para la

restauración de los botareles



Figura 12. Cimentación de contrafuerte.



13. Proceso de restauración de los contrafuertes



Figura 14. Restauración de botareles.



Figura 15. Contrafuertes restaurados

4. DISCUSIÓN.

En términos generales la revisión estructural de los elementos que integran el contrafuerte, para determinar su patología, arroja como resultado que la falla estructural existente en estos corresponde a dos aspectos:

En el primero, se presentan esfuerzos de flexión en el elemento que por la naturaleza y sistema constructivos de los materiales son totalmente inadecuados para resistir este esfuerzo. La mampostería junteada (adherida) con arcilla puede ser adecuada para trabajar a compresión, no así para otros esfuerzos como los de flexión a los cuales están sometidos los contrafuertes, en el caso que nos ocupa.

En el segundo, las cargas caen todas en el núcleo central del contrafuerte, no habiendo por este efecto esfuerzos que desestabilicen el sistema, es decir el partido estructural presente acusa por peso propio condiciones de estabilidad por giro y desplazamiento, condiciones de revisión que determinan que la falla del contrafuerte se debe a deficiencias constructivas y, en parte, a una inadecuada concepción estructural de su trabajo dentro del conjunto presente. Posiblemente los contrafuertes fueron adheridos al cuerpo del templo, en fecha posterior a la construcción de éste. Además, las características constructivas son de baja calidad. El material pétreo con el cual fueron construidos los contrafuertes no contempla las características óptimas para ser utilizados como mampostería, ya que en un 60% estas rocas miden menos de 30 cm de diámetro, es decir que son piezas muy pequeñas; por otro lado los cantos de este

material son boleados, se encontraron también cavidades en el núcleo del elemento y juntas muy anchas, debilitando el contrafuerte, al tener grandes proporciones de relleno de arcilla como elemento de unión.

Se considera que estos dos factores son, de manera primordial, los causantes de las fallas estructurales que se presentan de manera similar en cada uno de los contrafuertes.

Como se observa, con los resultados obtenidos en la revisión, se comprueba cómo el inmueble obedece, arquitectónicamente, a la intención de aplicación de las normas tratadísticas de la época de su construcción; por otro lado la revisión estructural con métodos contemporáneos confirma que se tiene una adecuada estabilidad estructural, por lo que los conocimientos constructivos de esta época pueden considerarse como aceptables y viables para su aplicación.

5. CONCLUSIÓN.

El tipo de terreno de desplante encontrado, arcilla de mediana compresibilidad, las calas realizadas en el terreno de desplante para verificar los niveles reales de la cimentación y nivelaciones diferenciales en el edificio y terreno, acusan y sugieren descartar la existencia de asentamientos diferenciales, que pudieran haber provocado las fracturas en los contrafuertes.

La conclusión para el caso de la falla por fractura en los puntos de cortante crítico de los contrafuertes, se estima, no es debido ni a un mal diseño, ni a una mala aplicación de los conocimientos vertidos en los tratados antiguos; más bien se deben, primordialmente, a la deficiencia de un criterio de selección en los materiales a utilizar en la construcción; esto debido seguramente a que muchas de las obras eran encargadas por los frailes, pero construidas por los lugareños indígenas, por lo cual los criterios para la selección de los materiales a utilizar en un sistema constructivo, nuevo para ellos, hacían que cometieran errores constructivos, refiriéndose a la utilización, como ya se mencionó, de rocas naturales de pequeñas dimensiones, de textura lisa y formas redondeadas, en el núcleo de los botareles y contrafuertes, así como la presencia consecuente de un gran volumen relativo de arcilla para empacar dicha mampostería natural.

Partiendo de lo anterior, la propuesta de restauración de estos elementos constructivos, se llevó a cabo empleando las actividades de re-mamposteo, en botareles y contrafuertes, sustituyendo la mampostería de pequeñas dimensiones, lisa y redondeada, por otra- basáltica, sana- de mayor dimensión, textura rugosa y forma irregular, así como reduciendo los espesores de juntas, utilizando para ello mortero de cal apagada y arena andesítica natural, en proporción volumétrica 1:3 en el núcleo, así como mortero terciado de cal apagada, ceniza volcánica y arena andesítica natural, proporción 1:2:1, en volumen. Todo esto según requerimientos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). A la fecha se ha estado monitoreando el comportamiento estructural del edificio y no se han presentado daños.

6. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo así como el soporte del Proyecto Programme “PEOPLE” – Call ID “FP7-PEOPLE-2010-IRSES” – Proposal N° 269227 – Acrónimo: STRAVAL: “Studies, Training, Socio-Economical Valorization and Management of Natural, Cultural and Monumental Property for the Promotion of the Local Societies of Latin America (Argentina, Brazil and Mexico)” y del Proyecto De REDES de Cuerpos Académicos de PROMEP-SEP, Red Temática Promep para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico.

7. REFERENCIAS.

- Báez Macías Eduardo (1969), *Obras de fray Andrés de san Miguel*, México, UNAM, p. 92, 109.
- Báez Macías E. (1969), *Obras de fray Andrés de San Miguel*, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Estéticas, p. 136, 138.
- Bails B. (1796), *Elementos de Matemática*. Por Benito Bails D., Tomo IX, Parte I, Que trata de la Arquitectura Civil, Segunda Edición corregida por el autor, Madrid, Imprenta de la viuda de D. Joaquín Ibarra. (Edición facs. Murcia: CO Aparejadores y Arquitectos de técnicos de Murcia, Artes Gráficas Soler, 1983.), p. 206-207
- Bonet Correa A. (1979), *Simón García, Tratadista de arquitectura en Compendio de arquitectura y simetría de los templos*, México, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel Castillo Negrete", Secretaría de Educación Pública-Instituto Nacional de Antropología e Historia, p. 62, 121, 151.
- Kubler G. (1982), *Arquitectura mexicana del siglo XVI*, México, Fondo de Cultura Económica, p. 110.
- León Baptista Alberti (1582), *Los Diez Libros de Architectura de León Baptista Alberto. Traducidos del Latín en Romance*. [Por Francisco Loçano] Madrid: Casa de Alfonso Gómez. (Ed. facs. Colegios Oficiales de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1975), pp. 63-64.
- San Nicolás Fr. Laurencio de (1639), *Arte y Uso de Architectura. Compuesto por Fr. Laurencio de S Nicolás, Agustino Descalço, Maestro de obras*. S. 1., s.f. (Edición facs. Valencia: Colección Juan de Herrera dirigida por Luis Cervera Vera, Albatros Ediciones, 1981.), p. 31, 33, 60, 61.
- San Nicolás L. de (1989), *Arte y Uso de Arquitectura*, Zaragoza, Edición facsímil de la de Plácido Bravo López de 1796, Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón (Colección Arquitecturas de los Precursores, 5), p. 232, 245, 247.
- Vitruvio Poliión Marco (1787), *Los Diez Libros de Arquitectura de M. Vitruvio Poliión. Traducidos del latín, y comentados por Don Joseph Ortíz y Sanz*. Madrid, Imprenta Real. (Edición facs. Barcelona: Serie Arte y Arquitectura, Editorial Alta Fulla, 1987), p. 42-45.