

# Enfoque para el análisis estructural y protección sísmica de edificaciones patrimoniales, a partir de la caracterización de sus particularidades técnicas

## Approach to the Structural Analysis and Seismic Protection of Heritage Buildings based on the Characterization of their Distinctive Technical Features

A. Chica <sup>1\*</sup>, A. Fuertes \*

\* Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 27/09/2017  
Fecha de Aceptación: 11/03/2018  
PAG 314-228

### Abstract

*The structural behavior of heritage buildings is now a priority for restoration architects and structural engineers, because of the loss of human lives and the damages in the constructions caused by earthquakes. The conventional intervention, which applies the Colombian code for earthquake-resistant constructions (NSR 10), affects the conservation of their heritage values. This is a proposal for a structural analysis applying traditional methods, but including the integral knowledge of the building, as well as the structural principles that their behavior and the development of intervention proposals based on their own structural principles. A group of doctrinal churches in the high lands of Boyacá and Cundinamarca in Colombia (1579-1616) were selected as cases of study, using a basic architectural church model, which maintains the constant geometry, but modifies its constructive technique, with the purpose of understanding the differences and result interpretations for this type of constructions. The evidence shows the importance of involving the comprehension of distinctive technical features, as a way to achieve seismic protection solutions for human life, in the same way as historical construction values.*

**Keywords:** Heritage buildings, structural reinforcement, seismic protection, traditional structures, traditional construction

### Resumen

El comportamiento estructural de las edificaciones patrimoniales, es prioridad para arquitectos restauradores e ingenieros estructurales debido a los efectos de los sismos en pérdida de vidas humanas y daños materiales. Las intervenciones convencionales para alcanzar el nivel de exigencia estructural aplicando el Reglamento colombiano de construcción sismorresistentes- NSR/10 suelen afectar los valores patrimoniales. Se plantea aquí un análisis estructural usando métodos tradicionales, pero cuyo enfoque incorpora el conocimiento integral de la edificación, incluye los principios estructurales de su concepción y sus particularidades técnicas. Esto permite comprender su comportamiento y formular propuestas de intervención basadas en sus propios principios estructurales. Se estudió con este enfoque un grupo de iglesias de doctrina del Altiplano Cundiboyacense colombiano (1579-1616), tomando un modelo arquitectónico básico, manteniendo constante la geometría pero modificando la técnica constructiva, para comprender la variación de su desempeño en función de su materialidad. Se propuso una metodología de análisis e interpretación de resultados para este tipo de edificaciones coloniales, abriendo posibilidades de intervenirlas respetando sus valores patrimoniales, poniendo en evidencia la necesidad de involucrar la comprensión de las particularidades técnicas como alternativa para lograr soluciones de protección sísmica a la vida humana y al patrimonio construido y sus valores.

**Palabras clave:** Patrimonio inmueble, refuerzo estructural, protección sísmica, estructuras tradicionales, construcción tradicional

## 1. Introducción

Conservar un Bien de Interés Cultural- BIC es preservar los valores patrimoniales que lo convierten en pieza clave para la construcción de identidad de la sociedad, herencia y testimonio de generaciones pasadas y memoria para las futuras. Sus particularidades impiden la generalización de estudio e intervención; siendo necesaria una correcta aproximación teniendo presentes sus necesidades y posibilidades, evitando alterar su materialidad y perder aquello que lo hace relevante.

Entre los ingenieros estructurales suele pasarse por alto el valor patrimonial y desconocerse el comportamiento estructural de las técnicas no contemporáneas. Algo similar sucede con los arquitectos y restauradores respecto a la sismorresistencia y las solicitaciones estructurales particulares, pues olvidan la relevancia de esta dimensión técnica estrechamente ligada a la conservación. Una brecha entre los dos campos de conocimiento impide un trabajo

integral que alcance los objetivos de la NSR/10: la protección de la vida humana y de los bienes materiales, teniendo en cuenta que en ella se acepta algún nivel de daño en las edificaciones. Aplicar esta norma a los BIC usualmente afecta su conservación y no logra conciliar los objetivos mencionados con el que es fundamental para el patrimonio, es decir la conservación de la edificación misma.

Bajo esa óptica con frecuencia las propuestas de los proyectos de intervención estructural, son producto de tratar de obligar a los BIC a comportarse de una manera específica, a ser analizadas y a cumplir una normatividad formulada para las edificaciones contemporáneas. Se somete su estudio e interpretación a principios estructurales con los cuales fueron creados los softwares de análisis y diseño, pero estos se encuentran fundamentados en las propiedades mecánicas del material en condiciones isotrópicas, junto con teorías elásticas sobre las cuales son aplicables constantes para cada material, como los módulos de Young y de Poisson. Una gran parte de los BIC es incompatible con estas, y aunque son valores empleados actualmente en el análisis de estas estructuras, deberían ser aplicados como órdenes de

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, COLOMBIA  
E-mail: achicas@unal.edu.co

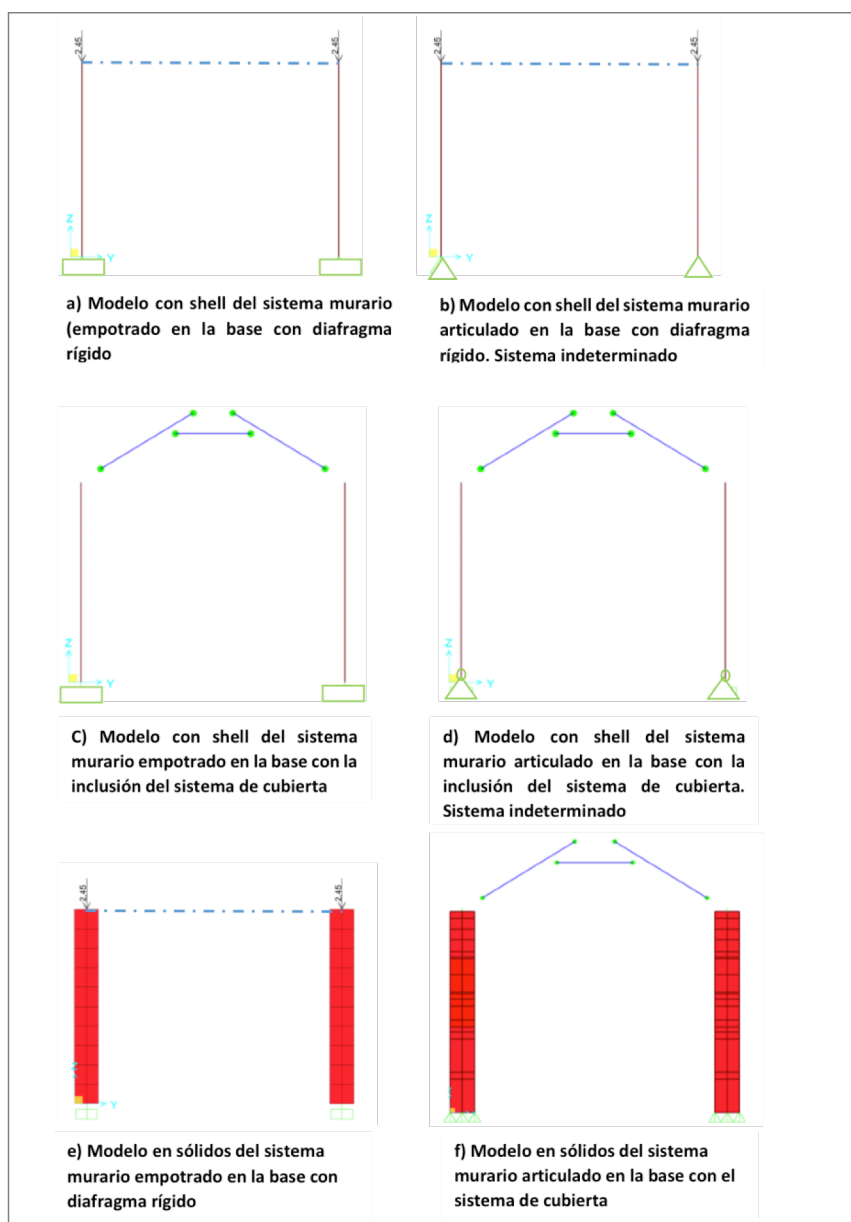


magnitud y no como valores absolutos de su comportamiento.

Algunos tipos de técnicas en tierra (adobe y tapia) y mamposterías de ladrillo y piedra simple o mixta presentes en estas edificaciones, se caracterizan por la naturaleza frágil de sus materiales, la ausencia de uniones rígidas, las discontinuidades del sistema y la fuerza de fricción entre sus componentes, como determinantes del desempeño estructural, siendo ésta última una de las más relevantes. De esta manera el análisis estructural contemporáneo, incluso haciendo uso de los métodos de análisis por elementos finitos, puede suponer errores en la interpretación de los resultados de los modelos matemáticos formulados para estas técnicas. Por una parte se simplifica y desconoce el trabajo integral del sistema estructural con todos sus componentes, y por otra se emplean hipótesis y elementos de análisis que no corresponden con la naturaleza del mismo. Estos son por ejemplo los empotramientos, las uniones rígidas, la inclusión

de diafragmas rígidos, falsos porticos y la modelación con shells para el caso de muros con gran espesor. También el hablar de derivas o deformaciones resultado del análisis computacional, cuando definitivamente ya se han generado fracturas en el sistema murario antes de llegar a esa deformación, además de asumir como ciertos los esfuerzos en los elementos estructurales, aunque en la realidad existen importantes discontinuidades en la materialidad y en el sistema.

Lo anterior indica que el uso de los softwares de análisis tiene éxito si el modelo se asemeja lo suficiente a la realidad de la edificación, de lo contrario puede inducir a conclusiones erróneas. Un ejemplo de esto es lo que puede apreciarse en la figura 1 que plantea los cortes transversales de una iglesia de planta basilical, con diferentes modelos de interpretación para una misma estructura, obviamente con resultados diferentes.



**Figura 1.** Evolución de modelos estructurales simulando la naturaleza discontinua, sin empotramientos y sin uniones rígidas de la edificación patrimonial

Se parte desde una condición simplista en el literal a) suponiendo un diafragma rígido en la cubierta, introduciendo sus cargas directamente a los muros y asumiendo un empotramiento en su base, condición que difiere de la naturaleza misma de la estructura. Los numerales b) al e) son modelos intermedios que tampoco corresponden a la realidad, a diferencia del literal f), un modelo con sólidos que permite articular la base de los muros y de la estructura de cubierta, sin entrar en una indeterminación en el modelo matemático, además de asemejar la unión por fricción de la solera de cubierta al muro mediante el uso de resortes. Con ello se logra un mayor acercamiento al comportamiento de la edificación, con la posibilidad de proponer intervenciones más aproximadas a las necesidades de los BIC.

Tanto los proyectistas anteriores al surgimiento de la teoría clásica de análisis estructural (Romero Martínez 2005)

como los contemporáneos, promueven edificaciones seguras, funcionales y económicas, fundamentados en los principios estructurales de resistencia, estabilidad y rigidez. La gran diferencia entre ellos está dada por la jerarquía que dan a cada uno de los principios en su aproximación al edificio. El proyectista contemporáneo basa su análisis en la resistencia del material, buscando un equilibrio indiferente de la estructura para solicitaciones determinadas. Los proyectistas anteriores a la teoría clásica de análisis estructural se centraron en la búsqueda del equilibrio, manejando las dimensiones y garantizando que las líneas de empuje se mantuvieran dentro de la sección solicitada estructuralmente, gracias a los trazos geométricos que empíricamente fueron construyendo y plasmando en las proporciones arquitectónicas. Los principios estructurales de cada uno se muestran en la Tabla 1.

Proyectistas anteriores a la teoría clásica de análisis estructural	Proyectistas contemporáneos
<b>Procurar una edificación:</b>	
Segura, funcional y económica	Segura, funcional y económica
<b>Orden de prioridades de la configuración de la estructura:</b>	
Estabilidad, rigidez y Resistencia.	Resistencia, estabilidad y rigidez
<b>Structural proposal of the building based on:</b>	
Un prototipo ya construido y en ocasiones ya probado.	Un proyecto arquitectónico preestablecido.
<b>Dimensionado:</b>	
De elementos estructurales y sistema murario a partir de las proporciones establecidas en tratados y ajustadas según experiencias anteriores y / o similares en dimensiones y materialidad (observación y experimentación).	De la estructura teniendo en cuenta los efectos del sitio, mediante la aplicación de una formulación matemática (análisis matricial), reuniendo estándares y normativas en función de un uso determinado, para lograr un desempeño estructural específico.
<b>Metodología de diseño:</b>	
Uso de la geometría para el dimensionamiento manteniendo las trayectorias de empujes dentro del sistema murario, logrando un equilibrio estable.	Uso de ordenadores que facilita el modelado matemático y permite establecer las tensiones y tensiones en cada punto de la estructura ante diferentes solicitaciones, product de unas cargas mayiradas para comparar estos valores con los de la resistencia y deformación del material logrados en el laboratorio y afectados. Por ciertos coeficientes de reducción.
<b>Se obtiene una estructura que:</b>	
Para cierto nivel de solicitaciones basa su equilibrio en la estabilidad (equilibrio estable), es dw falla frágil y disipa la energía mediante fractura.	Ante las solicitaciones específicas, basa su equilibrio en la resistencia del material incluyendo en el sistema la capacidad de deformarse, de resistir los ciclos de carga y descarga sin colapsar, logrando un equilibrio indiferente; Es dúctil y disipa energía por el movimiento relativo de las partes y al comportamiento de los materiales en el rango inelástico.
<b>La falla de la estructura es:</b>	
Súbita y progresiva, generada cuando la trayectoria de empuje está fuera de la sección, con una concentración de esfuerzoa tensión (no resiste la tensión) lo que degrada el material reduciendo la capacidad de compresión por pérdida de sección. Elementos esbeltos como espadañas, torres y campanarios son los que inicialmente colapsan; posteriormente, se siguen conformando mecanismos de falla, y en solicitaciones que superan los estados de equilibrio límite, caen las entructuras de cubierta y los muros de soporte. Por ser súbita la falla, no hay tiempo suficiente para evacuar el sitio, con la posible pérdida de vidas humanas y daños irreparables.	Dúctil y progresivo, la redundancia del sistema permite la formación progresiva de rótulas plásticas en elementos estructurales, admite ciclos de carga / descarga. La falla se produce cuando se superan las solicitaciones generando la cedencia en los materiales y la pérdida de capacidad en el sistema estructural, sin que necesariamente se colapsen, lo que permite la salida oportuna del usuario y la posterior rehabilitación estructural.

Tabla 1. Principios estructurales de los proyectistas antes y después de la teoría clásica de análisis estructural



Según lo anterior es posible analizar este tipo de edificaciones usando métodos contemporáneos como los elementos finitos, con modelos que se asemejen las condiciones de la estructura, interpretando los resultados como tendencias de comportamiento y de daño en el sistema murario, sin perder de vista los principios estructurales con que fueron proyectados como determinantes al proponer su intervención. Una modelación errónea del sistema sin tener en cuenta las discontinuidades o las condiciones de apoyo, genera resultados poco confiables; en realidad los modelos deben calibrarse analizándolos mediante la interpretación de sus mecanismos de falla para estados límite de estabilidad, incluyendo los daños existentes en la edificación, como pudo comprobarse durante el estudio realizado, con el análisis de la degradación sucesiva del sistema por la separación de sus partes hasta llegar al colapso. En la actualidad ya existen softwares como 3MURI, 3DMACRO y EXTREME LOADING STRUCTURES, que modelan la discontinuidad de las piezas de mampostería basados en modelos de Coulomb, y permiten analizar la estabilidad de las partes durante un sismo; aunque se encuentran en desarrollo y son de menor difusión que los convencionales, constituyen una alternativa a la modelación tradicional que supone los inconvenientes mencionados.

A la problemática del modelo matemático se suma la heterogeneidad del sistema murario, lo que complica aún más el análisis (incluso conociendo esas particularidades de los BIC), debido a condiciones de la materialidad que no pueden modelarse hasta el momento tales como los aparejos, la disposición de las piezas, su forma y la combinación de materiales constitutivos (los mampuestos) y auxiliares (los morteros). Aunque es posible establecer las propiedades mecánicas del material, la capacidad del sistema en general está relacionada no solo con estas sino además con su tamaño, labrado, disposición, calidad, etc.

Tampoco se puede desconocer que estas construcciones fueron el producto del conocimiento de periodos específicos de la historia, surgido a partir de la experiencia muchas veces empírica, basado en principios geométricos, matemáticos y en el ensayo y error. Esto permitió corregir, afinar y establecer principios estructurales para las edificaciones, y más tarde se incorporarían a través de diferentes tratados de construcción u oralmente, de donde surgen diferentes propuestas formales y técnicas, con soluciones diversas que no pueden analizarse homogéneamente, pues cada una de ellas, aunque obedece a un tipo arquitectónico, se desarrolla técnicamente de manera particular.

De tal manera es fundamental el buen criterio del ingeniero estructural basado en el conocimiento detallado de la configuración de la estructura, la materialidad, su estado de conservación y evolución constructiva. Igualmente el desarrollo de una adecuada modelación de las particularidades identificadas, un planteamiento acertado de los mecanismos de falla y una correcta interpretación de los resultados del análisis estructural realizado, buscando propuestas de intervención basadas en la estabilidad del sistema, y no pretendiendo mejorar o modificar únicamente su resistencia o su capacidad. Resulta imprescindible aplicar hipótesis de diseño específicas para estructuras de mampostería simple como sugiere (Heyman 1995, 17), sobre las cuales podría afirmarse que no existe resistencia a la tracción en el material constitutivo y la capacidad de resistencia a compresión podría considerarse teóricamente infinita debido al espesor considerable del sistema murario. También que por la disposición de las piezas y su aparejo no se presentan fallas por deslizamiento de las mismas, y sin duda la estabilidad local está supeditada a la estabilidad global de la edificación, evaluada mediante los mecanismos de falla según los estados límites establecidos para el análisis. Por último que la sismoresistencia de la edificación no depende solo del tipo de material, sino de la disposición de los elementos y su proporción.

## 2. Metodología y procedimiento de análisis

Para reconocer la incidencia de las particularidades en el desempeño estructural en términos de las soluciones constructivas del patrimonio colombiano, se desarrolló un proyecto de investigación aplicando este enfoque al análisis las iglesias de pueblos de indios del Altiplano Cundiboyacense, construidas entre 1579 y 1616, a partir de los hallazgos sobre la diversidad técnica realizados en la tesis doctoral de (Chica Segovia 2015). Allí se deducen seis modelos arquitectónicos construidos con las técnicas de base introducidas durante la conquista del territorio americano, de donde se derivaron las que actualmente están presentes en la mayor parte de los BIC nacionales de origen colonial. Para el análisis de la vulnerabilidad estructural y el efecto mencionado, inicialmente se seleccionaron entre varias decenas de casos, las iglesias que se enuncian en la tabla 2, y se modelaron bajo los parámetros descritos anteriormente.

**Tabla 2.** Edificaciones estudiadas

<b>Iglesia</b>	<b>Técnica</b>
Chía-Pasca-Saque (Cundimarca) 1579 Demolida	Tapia, rafas y verdugadas de ladrillo Cubierta: par y nudillo
San Pedro de Iguaque (Bocayá) Siglo XVI Ruinas	Tapia, rafas y verdugadas de adobe Cubierta: no existe
Turmequé (Bocayá) 1579 Intervenida	Tapia, rafas y verdugadas de ladrillo Cubierta: par y nudillo
Chivatá (Bocayá) 1579 Intervenida	Piedra labrada, rafas y verdugadas de ladrillo Cubierta: par y nudillo
Monquirá (Bocayá) Siglo XVII Ruinas	Piedra labrada tosca Cubierta: no existe
Oicatá (Bocayá) 1602 Intervenida	Tapia, rafas y verdugadas de ladrillo y piedra Cubierta: par y nudillo

Inicialmente el análisis específico de esas iglesias resultaba insuficiente dada la incertidumbre generada por la particularidad formal de cada una de ellas, por lo cual se tomó el modelo arquitectónico básico introducido al

Nuevo Reino de Granada por los artesanos constructores, albañiles y carpinteros españoles en 1579, según se observa en la figura 2.



**Figura 2.** Iglesia de Chía-Pasca-Saque, según la descripción del contrato de obra (AGNC.s.Colonia.f.Fl.t.21.r.45.f.850r y v [1579]), confrontada in situ

Este buscaba eliminar los problemas asociados a la diversidad constructiva, incluyendo mejoras estructurales sustanciales, tratando de responder a condiciones locales tales como sismos, clima, suelos, materiales, entre otros, poniendo en evidencia las deficiencias estructurales de los modelos homogéneos inicialmente aplicados (Chica Segovia 2015). Tal diversidad es a su vez uno de sus más importantes valores dados los retos de su construcción y la disponibilidad

de materiales, tratando de adaptar modelos foráneos para nuevas condiciones geográficas, y sin saberlo, de mayor sollicitación sísmica, a pesar de lo cual aún permanecen en pie formando parte del patrimonio local, lo que supuso un gran interés para este proyecto.

La particularidad de este modelo con respecto a otras soluciones de iglesias del mismo periodo, es que involucra la propuesta de los constructores españoles basados en la

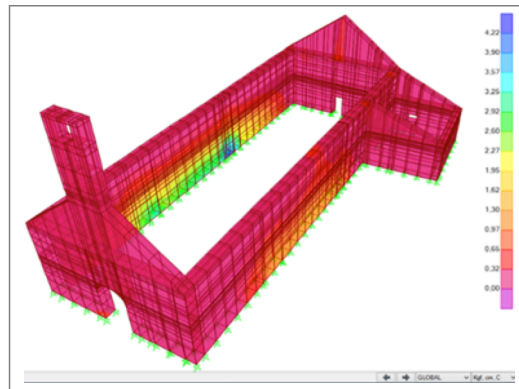


experiencia y conocimiento previo (Proporción en planta 1:4, muros  $h=5$  varas castellanas (vc) en la nave y 6 en la capilla mayor,  $e=1$  vc. Cimientos ciclópeos con sobrecimiento en piedra  $h=0.5$  vc. Los muros en la nave tendrían cajones de tapia, con verdugadas de ladrillo entre ellas, y 4 rafas en el mismo material. En la capilla mayor por cuestiones simbólicas, los muros construidos en mampostería de piedra y cal con 7 rafas de ladrillo. Los únicos vanos que tendría serían una ventana en la capilla mayor y otra en la nave, y la puerta principal. En el frente tendría el soportal con dos muros laterales a la fachada de 8 pies castellanos (pc), y sobre la fachada un campanario en mampostería acaballado en la cubierta. Su estructura de cubierta en par y nudillo con soleras y cuadrales en la cabeza del muro y tirantes pareadas y separadas entre sí 10 (pc), con varazón en madera rolliza. Un arco toral en ladrillo separaría la nave del presbiterio, permitiendo la sobrelevación de la cubierta de la capilla. En principio solo se adosaría una construcción lateral para la sacristía a la altura de la capilla mayor de similar materialidad, así como dos altares colaterales que generarían una planta en cruz latina.

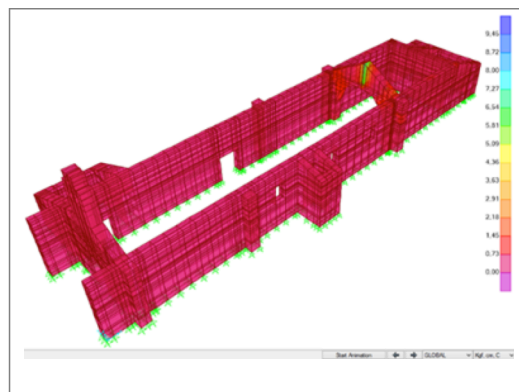
El modelo de análisis involucró los componentes mencionados, incluida la cubierta, el sistema mural compuesto por los cajones, las verdugadas y las rafas; con el fin de poder determinar la incidencia de cada uno de ellos,

usando el programa SAP V.17.3.0., con elementos discretos tipo sólido de acuerdo con las condiciones actuales de la edificación, que permiten tener en cuenta la incidencia del espesor de los muros y su aporte en la dirección perpendicular a estos. La resistencia mecánica de los materiales, se tomó a partir de los trabajos de L.E. Yamín (2007) (2003) y J.C. Rivera (2005), entre otros. Se tuvieron en cuenta las variaciones de carga de la cubierta, un perfil de suelo tipo D (NSR/10), y una variación de coeficiente de aceleración sísmica  $A_e$  desde 0.10 hasta 0.30. Se midió el aporte de la cubierta al sistema estructural con madera de diversos tipos y grupos 1, 3 y 5. Se fijaron puntos de control en los modelos con el objeto de medir deformaciones y estados de esfuerzos, entendidos como magnitud de daño y zonas de concentración de los mismos. Posteriormente las zonas que presentaban tensión fueron degradadas continuando el análisis hasta modelar la pérdida de capacidad total del elemento, asemejado con el colapso del mismo. El modelo se verificó para las diferentes técnicas y combinaciones materiales de la tabla 2.

Una vez obtenidos los resultados de capacidad de cada una de ellas, en el análisis no era posible establecer puntos de control y patrones de comparación entre los mismos, debido a la diversidad excesiva de variables entre ellas.



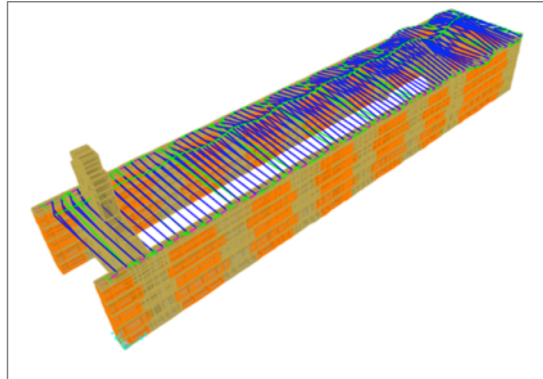
**Figura 3.** Modelo en SAP de la iglesia de San Pedro de Iguaque, análisis de esfuerzos por sismo en la dirección corta



**Figura 4.** Modelo en SAP de la iglesia de Oicatá, análisis para el estado de esfuerzos por sismo en la dirección larga

Esto permitió demostrar que cada una de ellas, y en general todas las edificaciones patrimoniales, son únicas e irrepetibles debido al gran número de particularidades que poseen (ver figuras 3 y 4). Por lo anterior se procedió a disminuir la cantidad de variables y a modelar la unidad

básica de iglesia sobre la cual se varió únicamente la materialidad para diferentes intensidades de sismo, lo que permitió establecer la curva de capacidad para el sistema propuesto con diferente materialidad (ver figura 5).



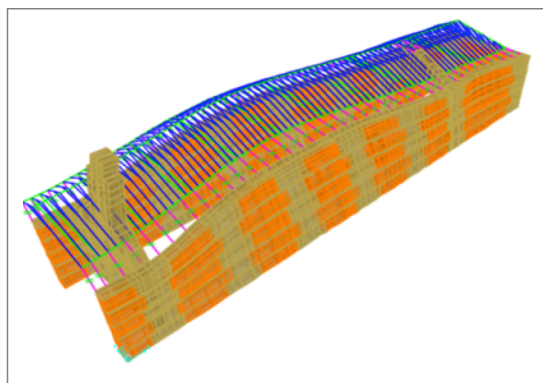
**Figura 5.** Modelo para el análisis del prototipo de tapia con rafas y verdugadas de adobe

### 3. Resultados y discusión

Los primeros análisis se hicieron respecto al aporte sísmico de la cubierta con el fin de verificar la necesidad de disminuir las cargas como solución frecuentemente aplicada. En primera instancia asumir los entrepisos y cubiertas como diafragmas rígidos para omitir la modelación de estos, no refleja el comportamiento de estas edificaciones. También es lógico pensar que la reducción de cargas de cubierta (chusque, morteros de cal y teja de barro) mediante su remplazo (fibrocemento y teja de barro), alcanza en muchos casos hasta en un 50%, disminuyendo también el cortante basal y aminorando la masa del sistema pero solo en un 6%. Por el contrario la función y la incidencia del peso considerable de la estructura de cubierta, constituye un aporte a la estabilidad del sistema murario, al incrementar la fricción entre las piezas de mampostería. Esto garantiza la continuidad del sistema, igualando las deformaciones entre los muros formeros y contribuyendo a conectar los elementos

que conforman la cabeza de los muros, especialmente cuando están contruidos en técnicas mixtas mediante el uso de rafas y cajones de diferente materialidad. Finalmente el peso del tablero de cubierta contribuye a mantener unidas las piezas de madera cuando hay ausencia de uniones rígidas.

La modelación de la cubierta se realizó implementado resortes bajo la viga solera, asemejando la fuerza de fricción generada entre esta y los muros. Cuando la intensidad del sismo en la dirección corta de la iglesia hace que las fuerzas inerciales superen las fuerzas de fricción entre las piezas, la cubierta se libera y probablemente ya para ese instante existen daños considerables en los muros formeros (ver figura 6). Al analizar la edificación para las sollicitaciones de sismo en la dirección larga de la iglesia, se nota un aporte desfavorable de la cubierta al sistema, debido a los empujes horizontales generados perpendicularmente al muro testero, de fachada y arco toral. Es de resaltar que cuando no se modeló la cubierta fue fácil advertir en estos elementos las zonas con mayor concentración de esfuerzos.



**Figura 6.** Modelo para el análisis de la iglesia prototipo de tapia rafas y verdugadas de adobe, con deformación ampliada de los muros formeros por efecto del sismo en la dirección corta de la iglesia.



En cuanto a la estructura mural, se tuvo en cuenta la evolución constructiva local de las técnicas simples y mixtas documentada por (Chica 2015), que obedeció a la búsqueda de un adecuado desempeño estructural de las edificaciones, atendiendo las características de sitio para cada una de ellas. En los diferentes movimientos telúricos registrados en el periodo estudiado (1594, 1598, 1600, 1616, 1617, 1629, 1644, 1645, 1646 y 1649), se produjeron daños importantes en especial en los presbiterios generalmente sobrelevados, en los muros formeros de las naves, los campanarios y las cubiertas incluso hasta el colapso; siendo más graves cuando

factores locales como los suelos o la mala calidad de obra hicieron más vulnerables las edificaciones.

La vulnerabilidad estructural más alta la registran las técnicas en tierra (tapia, adobe y tapia rafada con adobe). La tracción generada degrada la sección del muro disminuyendo la resistencia a la compresión, lo que se hace más evidente ante pequeñas sollicitación sísmicas, con valores de Ae por debajo de 0.10; se supera la capacidad del material y se elevan los índices de sobreesfuerzo, tal como se observa en las tablas 3 y 4.

**Tabla 3.** Índices de sobreesfuerzo- técnicas simples

Material	Tapia (6 kg/cm)	Adobe (12 kg/cm)	Ladrillo (24 kg/cm)	Piedra escantillonada (30 kg/cm)
Ae	Indice	Indice	Indice	Indice
	Tapia	Adobe	Ladrillo	Ladrillo
0.10	11.34	6.95	0.59	0.47
0.15	16.92	10.40	0.86	0.69
0.20	22.47	13.81	1.14	0.91
0.25	28.10	17.27	1.41	1.12
0.30	33.66	20.68	1.68	1.34

**Tabla 4.** Índices de sobreesfuerzo- técnicas mixtas

Material	Tapia reforzada con adobe (12 kg/cm)		Tapia reforzada con ladrillo (24 kg/cm)		Piedra reforzada con ladrillo (24 kg/cm)	
	Indice	Indice	Indice	Indice	Indice	Rate Indice
	Tapia	Adobe	Tapia	Ladrillo	Piedra	Ladrillo
0.10	2.73	1.84	0.11	0.31	0.21	0.18
0.15	4.08	2.75	0.16	0.45	0.30	0.26
0.20	5.42	3.65	0.22	0.59	0.4	0.35
0.25	6.77	4.56	0.27	0.74	0.50	0.43
0.30	8.12	5.46	0.32	0.88	0.59	0.51





ENGLISH VERSION.....

En la gráfica de la figura 7 se observa la curva de capacidad para cada uno de los materiales y sus combinaciones, donde se destaca primero la baja capacidad de las técnicas en tierra, en las cuales prácticamente se superponen las curvas; segundo el buen desempeño de las técnicas mixtas comparado con los materiales de mayor capacidad como el ladrillo y la piedra escantillonada. No por ello se podría descalificar las técnicas en tierra, al contrario se evidencia que la capacidad de la edificación no se logra solo con su materialidad, sino con la disposición de sus partes en el sistema, la estabilidad se alcanza con la solución

del sistema constructivo y la configuración geométrica de todo el conjunto. De ahí la importancia de obtener el conocimiento profundo del sistema estructural de la edificación para proponer alternativas de intervención compatibles con este; no resulta coherente para los principios de conservación proponer estructuras externas o exoesqueletos, en aras de mejorar la capacidad del material y pretender cierta ductilidad, las cuales en muchas ocasiones no son compatibles con el sistema murario, por las diferencias de rigidez y capacidad de deformación.

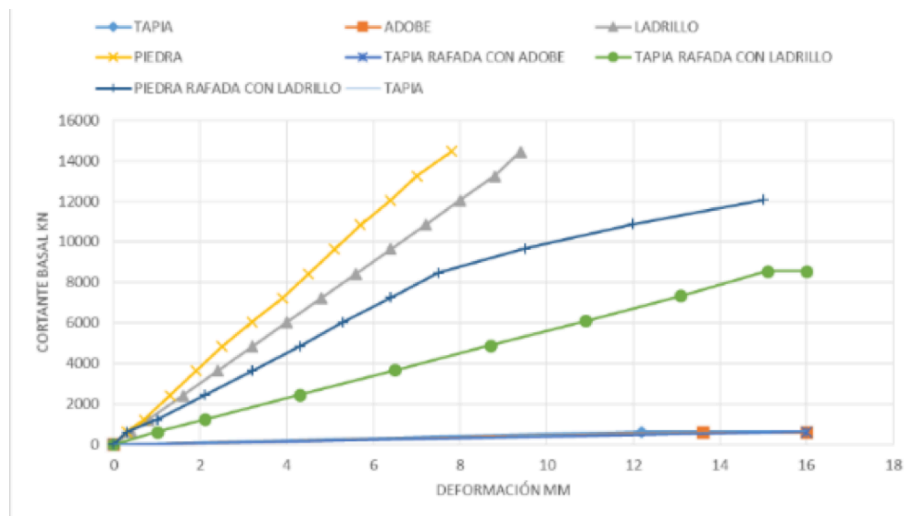


Figure 7. Capacity curve for each analyzed technique

Controlar las deformaciones garantizando la estabilidad del sistema estructural y a la vez atender puntualmente las zonas de concentración de esfuerzos de tensión, puede resultar más eficiente y menos invasivo al proyectar una intervención estructural. Además no se debe tener temor con la aparición de grietas o fisuras en los muros, pues no todas implican necesariamente el colapso de la estructura sino la disipación de energía sísmica; lo importante es que no esté relacionado con la estabilidad de sus partes, y que pueda ser previsto en el modelo matemático mediante un análisis progresivo que involucre la degradación del material en ciertas zonas de la estructura, producto de una identificación clara de los mecanismos de falla en el sistema cuando las líneas de empujes se salen de los muros de soporte.

Por otra parte, los sistemas estructurales de muros construidos con mamposterías de arcilla y piedra

escantillonada reflejan un mejor desempeño, pero para la época eran altamente costosas, por lo que se ordenaron pocas de ellas. El punto intermedio entre las técnicas en tierra y las de mampostería en arcilla y piedra escantillonada, son las técnicas mixtas (tapia rafada con ladrillo y piedra tosca rafada con ladrillo) como sistemas de buen desempeño estructural a un menor costo. La función de las verdugadas, además de nivelar las tareas de tapia, entrelazan a manera de cadenas las rafas, igualando las deformaciones del muro por las diferencias mecánicas entre cada material. El sobrecimiento evidencia una concentración importante de esfuerzos de tensión y compresión, pues además de cumplir funciones constructivas y de durabilidad en el sistema, es una parte fundamental en la estabilidad del mismo, al igual que las hiladas de remate y el enrase del muro sobre el cual se dispone la viga solera, soporte de la estructura de cubierta.



Todos estos en conjunto mantienen la continuidad del sistema combinado del muro.

El resumen de resultados puede observarse en la tabla 5, indicando los índices de sobreesfuerzo y la magnitud de

daño, representada con un valor de desplazamiento relativo del muro formero. En Turmequé, Chivatá y Oicatá, aunque se encuentran intervenidas, no se tuvo en cuenta esta condición, ni tampoco los contrafuertes de la segunda

**Tabla 5.** Comparativo geométrico de las Iglesias analizadas y su índice de sobreesfuerzo

IGLESIA	TURMEQUE	CHIPASAQUE	CHIVATA	OICATA	MONQUIRA	SAN PEDRO DE IGUAQUE
Area total (m)	823	604	432	371	352	339
Relación ancho/Largo	1: 4.5	1 : 4.0	1 : 3.0	1 : 5.3	1 : 4.0	1 : 4.0
Sistema de cubierta	Tijeras	Par y nudillo	Par y nudillo	Par y nudillo	Par y nudillo	Par y nudillo
Luz de cercha (m)	10.5	9.6	9.14	6.6	8.0	8.8
Altura del muro Formero (m)	9.3 Esbeltez 6.2	6.38 Esbeltez 6.9	6.5 Esbeltez 5.90	5.63 Esbeltez 7.7	5.45 Esbeltez 6.05	6.0 Esbeltez 7.6
Area total muros (m)	221.18	109.8	102.4	82.2	83.3	69.4
Índice de muros X	0.9	0.86	0.82	0.86	0.79	0.71
Índice de muros Y	0.31	0.51	0.26	0.41	0.24	0.35
Zona de riesgo sísmico	Intermedia Ae=0.13	Alta Ae=0.16	Alta Ae=0.14	Intermedia Ae=0.13	Intermedia Ae=0.09	Intermedia Ae=0.10
Peso (ton)	4740	1850	1277	970	923	848
Volumen de muros m <sup>3</sup>	2464	856	687	450	445	394
Cortante basal (V)	V=616 ton, esfuerzo cortante 0.27 kg/cm	V=296 ton, esfuerzo cortante 0.27 kg/cm	V=178 ton, esfuerzo cortante 0.17 kg/cm	V=127 ton, esfuerzo cortante 0.15 kg/cm	V=93.1 ton, esfuerzo cortante 0.10 kg/cm	V=84.7 ton, esfuerzo cortante 0.12 kg/cm
Índice de sobreesfuerzo muro formero	4.5	6.9	5.8	5.1	4.0	4.5
Tipo de daño	severo	colapso	severo	severo	medio	severo

## 4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

- Las edificaciones patrimoniales son particulares, únicas e irrepetibles, lo que dificulta comparar su desempeño estructural o analizarlas a partir de una materialidad única.
- En estas técnicas constructivas, las solicitaciones sísmicas se oponen a las fuerzas de fricción de los elementos que componen el sistema estructural.
- La permanencia de las iglesias de pueblos de indios analizadas, en la mayoría de los casos obedece a su ubicación en zonas de amenaza sísmica intermedia, y a que el modelo básico implantado por los españoles fue modificado, evolucionando en materialidad y elementos estructurales como los contrafuertes, que contribuyen actualmente con la estabilidad del sistema.
- Los modelos matemáticos resultan útiles cuando representan una condición idealizada de la estructura real, a través de un modelo teórico factible de ser analizado por los procedimientos disponibles, que refleje la geometría, la materialidad, las cargas, la conexión entre elementos y los tipos de apoyo reales.
- El análisis estructural usando elementos finitos, debe ir acompañado por la calibración del modelo respecto a los daños presentados y los mecanismos de daño formulados.
- El criterio del ingeniero se ve reflejado en el conocimiento profundo de la edificación, sus particularidades, la patología, la evolución constructiva, los mecanismos de falla, entre otros aspectos determinantes en el análisis de la edificación.
- La total discontinuidad de la materialidad y del sistema estructural que caracteriza estas edificaciones, hace que las magnitudes obtenidas en el ordenador, producto de los modelos analizados,

correspondan a tendencias de comportamiento y magnitud probable de daño en la estructura.

- En el análisis de los índices de sobreesfuerzo en la edificación, se deben interpretar los mecanismos de falla del sistema, y establecer los que realmente impliquen el colapso de la estructura o riesgo para los usuarios.
- Los daños inicialmente se generan por la fractura y caída de las espadañas y torres de los campanarios, posteriormente se presenta la pérdida de estabilidad de los muros formeros en la parte superior y la fractura del tímpano en el muro testero y de fachada, generado por el empuje longitudinal de la estructura de cubierta.
- No siempre la presencia de grietas o fisuras en la edificación patrimonial contruida con estas técnicas, representa necesariamente el colapso de la misma.
- La configuración de la estructura patrimonial estudiada se basa en el siguiente orden de prioridades: estabilidad, rigidez y resistencia; siendo la estabilidad la condición predominante en el análisis, y la dirección en que se deben encaminar las intervenciones de consolidación estructural, acompañada de la intervención puntual de las zonas de concentración de esfuerzos de tensión que impliquen pérdida del equilibrio del sistema.
- Los modelos básicos analizados con diferentes materialidades, permitieron establecer la importancia de las rafas, las verdugadas, la cubierta y en general la interacción de todo el sistema.
- Los sistemas de tierra (tapia, adobe y sus combinaciones) resultan ser los menos favorecidos ante las solicitaciones sísmicas, debido a la degradación súbita del material, por los esfuerzos de tensión y la disminución del área en compresión en la misma sección de muro.
- La búsqueda infructuosa de dar ductilidad al sistema mediante la inclusión de elementos de refuerzo que aumenten la capacidad mecánica del material resultan invasivos, alteran la naturaleza del sistema y sobre todo atentan contra los valores patrimoniales del bien, que son en últimas el objeto de la conservación.

## 5. References

- Condiciones y traza para la construcción de las iglesias de Chía-Pasca-Saque y Cajicá. De AGNC.s.Colonia.f.Fl.t.21.r.45.f.850r y v. Auto emitido por el licenciado Andrés Egas de Guzmán ordenando se aderece y dote la iglesia de Iguaque luego de su visita al lugar. De AGNC.s.Colonia.f.VB.t.12..r.7.f.793r-794r.
- Traza y condiciones para las obras de finalización de la iglesia de Chivatá. De AGNC.s.Colonia.f.VBol.t.3.r.4.f.591r-593v.
- Concierto con el cantero Rodrigo de Albear para la construcción de seis iglesias. De AGNC.s.Colonia.f.VC.t.5.r.5.f.861r-864r.
- Chica Segovia, A. (2015)**, Aspectos histórico-tecnológicos de las iglesias de pueblos de indios del siglo XVII del Altiplano Cundiboyacense, como insumo para su valoración y conservación (no publicado PhD. Tesis). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Heyman, J. (1995)**, El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica, Madrid: CEHOPU.
- Rivera Torres, J.C, y Muñoz Díaz, E.E. (2005)**, Caracterización estructural de materiales de sistemas constructivos en tierra: el adobe. Revista Internacional de Desastres naturales, accidentes e infraestructura civil, 5 (2): 135-148.
- Romero Martínez, A. (2005)**, Evolución de los métodos de cálculo en las estructuras diseñadas con pórticos de concreto armado para edificios en el área norte de Latinoamérica. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 20 (2): 27-39.
- Yamín Lacouture, I. E. (2003)**, Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada, con base en modelos a escala reducida, ensayados en mesa vibratoria. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Los Andes, 18. 175-190.



**Yamín Lacouture, L. E., Phillips Bernal, C., Reyes Ortíz, J.C. y Ruíz Valencia, D. (2007),** Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. Revista de ingeniería, 18: 175-192.

