

Análisis tridimensional por premallado de la torre del templo Santa Lucía, por medio de macroelementos

Jorge O. Montoya

MSc. Universidad de Ibagué, Ibagué-Colombia

Ricardo A. Barrero

Ing. Universidad de Ibagué, Ibagué-Colombia

Abstract

This document describes the modelling and structural analysis process of the tower of the ancient temple of Santa Lucia in Ambalema, Colombia. Considerations used in the construction of a fully three-dimensional model are presented; the model was used to obtain an approximation of the state of stresses in the structure, produced by seismic and service loads. Seismic loads were obtained by using a linear dynamic analysis, in which maximum values of stresses are produced by an abrupt change in the rigidity of the structure, this could cause failure in the most critical points, under the occurrence of a higher magnitude earthquake than the one analyzed in this paper. Stresses produced by service loads do not exceed the strength of the materials; this condition does not represent any failure risk for the temple

Key words: Historical structures, patrimony, masonry, seismic analysis, modelling, finite elements.

Introducción

Las estructuras antiguas son un patrimonio inmueble de interés cultural, constituyen “elementos y símbolos tangibles, importantes de la historia de un pueblo, donde queda la huella de la serie de eventos que constituyen las memorias del nacimiento de una sociedad” [1]. Con la conservación de estas estructuras se puede generar un atractivo turístico, debido al significado histórico, cultural o religioso que tienen, lo que favorece el desarrollo socio-económico de la zona en donde se encuentran; sin embargo, no siempre se presentan las condiciones óptimas que permitan el uso de las estructuras, por lo que es necesario tomar medidas que garanticen “su permanencia en el tiempo, a través de la conservación de estas edificaciones, o por la restauración y rehabilitación cuando estén en estado de degeneración ya sea por falta de mantenimiento, o porque hayan subsistido a numerosos sismos ocurridos” [2].

Es necesario realizar una investigación sobre las técnicas constructivas, los materiales empleados y el comportamiento estructural antes de realizar cualquier intervención, las consecuencias de terremotos ocurridos en países europeos, han llevado a pensar que una de las causas del daño sísmico podría ser “una errada intervención de la mejora o adaptación que se les ha realizado. En la mayoría de los casos, este hecho es atribuible a las modificaciones realizadas sin tener los conocimientos necesarios sobre las normas constructivas de esa edificación” [3]. En los casos de intervención, lo ideal es lograr alternativas que no distorsionen la construcción original con diseños y sistemas constructivos que las alejan de su diseño primitivo [2].

Se han realizado investigaciones de distintos grados de complejidad en edificaciones históricas de uso religioso y civil en varios países: en Quito, Ecuador se realizó el análisis de la estructura de la Dirección Nacional de Fe y Alegría a partir de acelerogramas [4]; en San Cristóbal, Venezuela, se aplicó un análisis dinámico lineal al Palacio de Los Leones [2]; en la Catedral y el Sagrario de la ciudad de México se incluyeron los efectos de asentamientos diferenciales en un modelo tridimensional de elementos finitos sólidos [5]; y se realizaron estudios de vulnerabilidad luego de los daños causados por sismos en las iglesias de San Cristóbal de Lorca [6] y Sant' Agostino [3]. Todos los estudios mencionados anteriormente se realizaron utilizando modelos tridimensionales, algunos compuestos por elementos tipo área y otros por elementos sólidos.

El antiguo templo Santa Lucía de Ambalema fue construido en una época anterior al desarrollo de la normatividad aplicable a construcciones de mampostería. Sus dimensiones se basaron en reglas empíricas y experiencias con estructuras de características similares. Fue construido principalmente de mampostería de ladrillos macizos, aunque en algunas zonas se utilizó concreto reforzado y madera. La incertidumbre respecto a la resistencia y el comportamiento de la estructura hizo que fuera necesario evaluar la vulnerabilidad en la que se encuentra la estructura ante las cargas de servicio y su posible comportamiento ante eventos sísmicos, para poder, en una etapa posterior, realizar recomendaciones estructurales y arquitectónicas, que de ser ejecutadas permitirían conservar este patrimonio arquitectónico y cultural.

Una de las mayores motivaciones para suponer un comportamiento deficiente de la estructura ante la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitudes importantes es la presencia de grietas meridionales de gran tamaño (algunas alcanzan los 4 cm) las cuales generan un cambio en el estado resistente de la estructura.

Metodología

Se hizo una revisión bibliográfica de trabajos de características similares en estructuras históricas buscando identificar métodos de caracterización de materiales, modelado y análisis. A partir de las técnicas consultadas se seleccionaron las que fueran aplicables y que estuvieran al alcance, teniendo en cuenta los recursos disponibles para el proyecto, así como las limitaciones respecto al uso de métodos invasivos para la caracterización de los materiales

Debido al tamaño de la estructura y a la dificultad para realizar mediciones en cada ladrillo, se utilizó una técnica de homogenización para mampostería conocida como macromodelización, en la que “los ladrillos, mortero e interfase ladrillo-mortero están englobados por un mismo elemento” [7]. Las propiedades de los materiales se obtuvieron a partir de ensayos de laboratorio y correlaciones indicadas en el NSR-10 [8] y el Eurocódigo 6 [9].

El templo de Santa Lucía fue dividido en 3 macroelementos, como se muestra en la figura 1, correspondientes a la zona de la torre, la nave central y el presbiterio o ábside. Los macroelementos, en este tipo de estructuras se pueden definir como “la parte de una iglesia cuya respuesta sísmica puede ser evaluada en forma independiente del resto de la estructura” [10]. La estructura de madera que cubre la nave central es la parte más reciente de la estructura, está soportada por pedestales y no aporta cargas o rigidez a la torre o a la zona de la tarima, lo que permitió hacer la simplificación de los macroelementos.

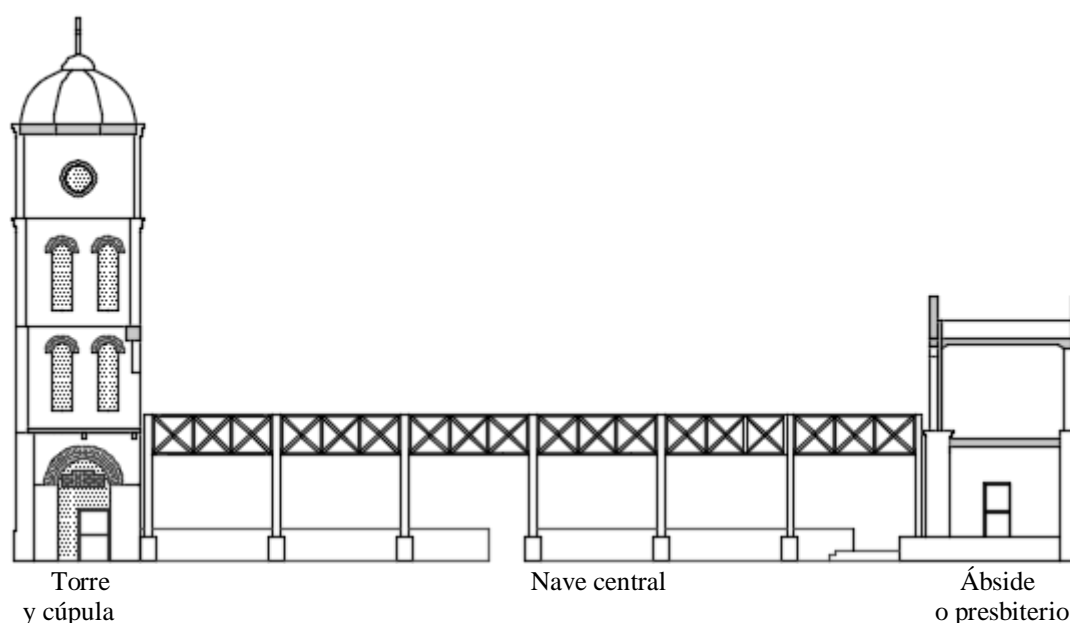


Figura 1. División en macroelementos del antiguo templo de Santa Lucía. Por efectos prácticos no se dibujó la cubierta en teja de barro.

En el caso de estudio se seleccionó la zona correspondiente a la cúpula, la torre, y los cuartos laterales que la rodean. Luego de una etapa de idealización de la estructura se realizó un modelo matemático de elementos tridimensionales con 6 grados de libertad, la distribución geométrica de los elementos se hizo según el método de premallado [11], en el que se utiliza un programa de dibujo para definir el tamaño de los elementos que se van a utilizar antes de empezar la construcción del modelo en un programa de análisis estructural.

Los modelos completamente tridimensionales usualmente consumen mucho tiempo respecto a la preparación del modelo la ejecución de los cálculos y el análisis de resultados [12], a pesar de esta desventaja se utilizó un modelo con un total de 15867 elementos sólidos, por tratarse de un modelo pequeño, comparado con el que hubiera sido necesario para la totalidad de la estructura, donde habría que aplicar simplificaciones, como el uso de elementos tipo línea o área.

Se realizó un análisis modal, para determinar los periodos de vibración y las formas modales, posteriormente se calculó el espectro elástico de aceleraciones de diseño del NSR-10, definido para un coeficiente de amortiguamiento del 5 por ciento del crítico [8], una vez definido el espectro se aplicó el análisis modal espectral en las direcciones principales x y y suponiendo la ocurrencia simultánea del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección y el 30% de las fuerzas sísmicas en la dirección perpendicular según lo indicado en la sección A.3.6.3.2 del NSR-10 [8]. No es aconsejable el empleo de un análisis estático ya que generalmente es usado para edificaciones de baja altura y configuración estructural regular, el análisis dinámico es más adecuado para una estructura elevada y de configuración estructural irregular [13].

Una vez realizado el análisis de la estructura, se identificaron las zonas críticas con mayores esfuerzos a tracción y compresión, y se evaluaron las posibles causas que llevaron a la obtención de estos valores.

Resultados

Cargas de servicio

La cubierta de los cuartos laterales está soportada por un conjunto de cerchas de madera que se apoyan sobre vigas de concreto, las reacciones de las cerchas se calcularon en un modelo bidimensional, en el que se consideró una carga muerta de 1KN/m^2 que corresponde al peso de la cubierta, y una carga viva de 0.5kN/m^2 por labores de mantenimiento. Este mismo valor de carga viva se asignó a la placa de concreto ubicada dentro del arco posterior. Las cargas provenientes de las cerchas se representaron puntualmente dentro del modelo tridimensional, distinguiendo las reacciones correspondientes a carga viva y muerta.

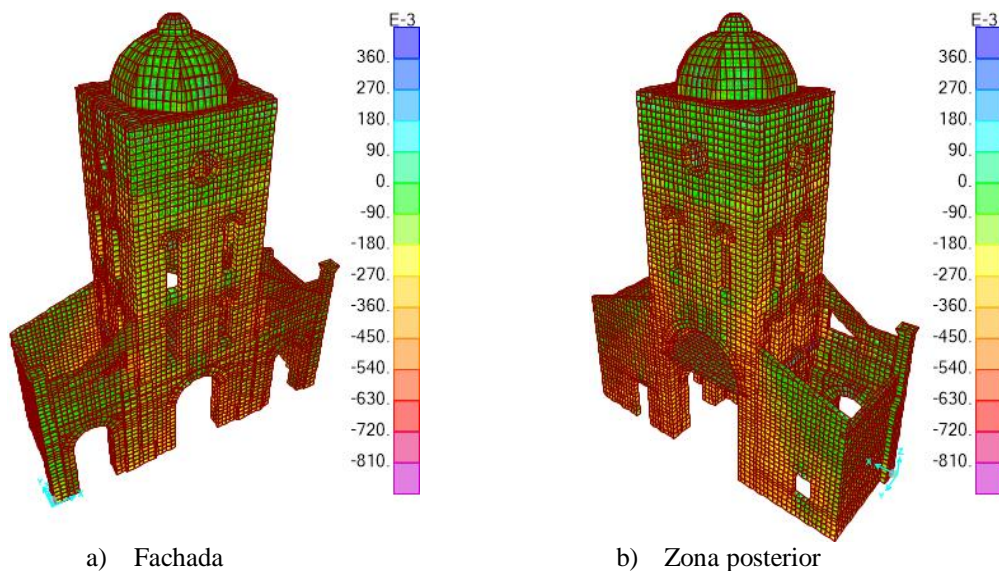


Figura 2. Resultados para cargas de servicio, esfuerzos normales verticales (σ_z), escala de color: 10^{-3}MPa .

El máximo valor del esfuerzo a compresión fue de 0.86 MPa y se localiza al final del arco de la zona posterior (Figura 2b). A tracción, los esfuerzos máximos se presentan en los elementos de concreto que soportan las cerchas y la cúpula y su valor está alrededor de los 0.5MPa .

Análisis modal

Se utilizaron nueve modos de vibración, con los que se obtuvo una masa participante del 93.6% en la dirección de análisis x y del 99% en la dirección y . El periodo de vibración del primer modo fue de 0.2184s . Se observa en todos los modos que los desplazamientos se presentan en la torre, o alrededor de ésta, lo que evidencia la concentración de masa y rigidez en esta zona, comparada con los cuartos laterales. En la figura 3 se presenta el comportamiento de la estructura en los tres primeros modos de vibración.

Análisis modal espectral

Al ser una estructura construida en mampostería no reforzada se considera sin capacidad de disipación de energía. Se tomó un valor de 1 para el coeficiente de disipación de energía R, es decir no se redujeron los efectos sísmicos calculados para el espectro elástico de aceleraciones. Fue necesario aplicar coeficientes de ajuste para que el cortante de basal obtenido con el análisis dinámico en cada dirección alcanzara el 90% del cortante de basal estático.

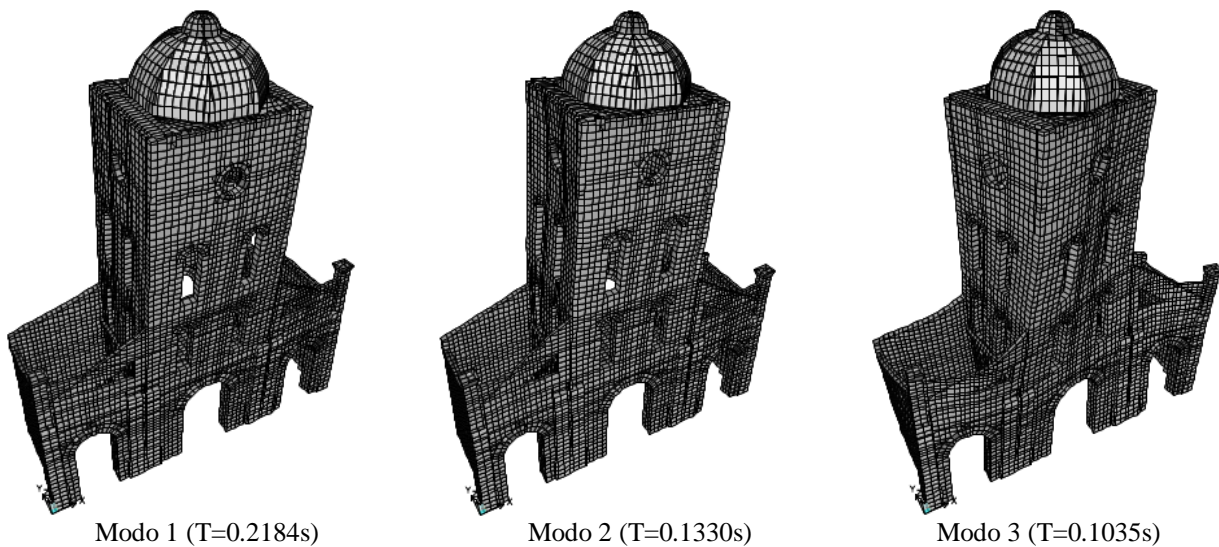


Figura 3. Deformaciones del modelo en los tres primeros modos de vibración.

Debido a la incertidumbre que se tiene respecto a la dirección en la que un sismo podría afectar la edificación se aplicó un sismo en cada dirección principal y un 30% del sismo en la dirección perpendicular

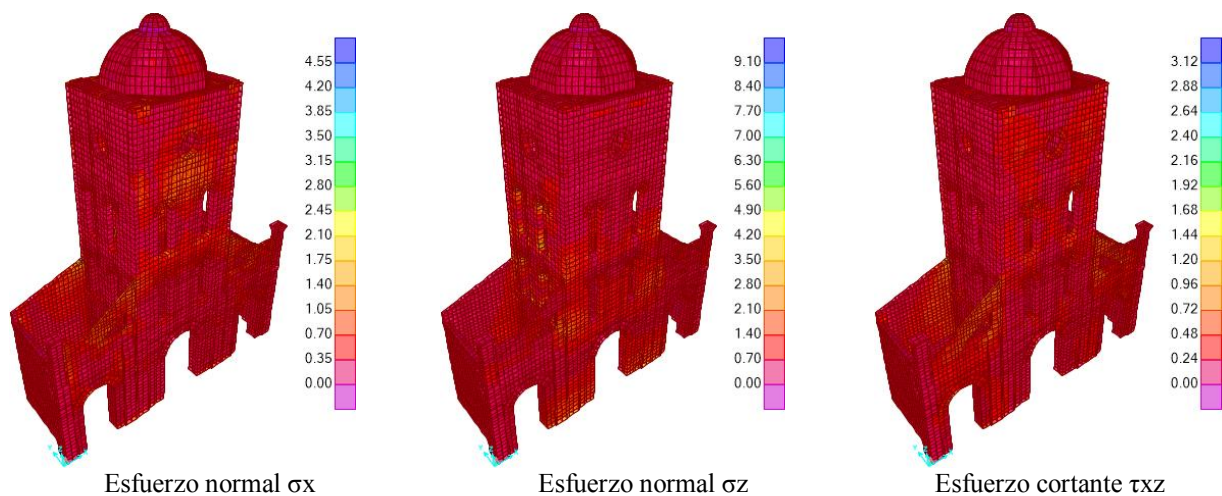


Figura 4. Esfuerzos normales y cortantes producidos por un 100% del sismo en y y un 30% del sismo en x.

Los mayores valores de esfuerzo, para todas las combinaciones de carga se presentaron alrededor de las ventanas de la torre, donde los esfuerzos normales de tracción alcanzaron valores superiores a los 9Mpa, y los esfuerzos de compresión alcanzaron los 6.22 MPa, en el resto de la estructura predominan valores de tracción inferiores a los 1.5 MPa, representados por los colores rojo y púrpura en la figura 4.

Discusión

Para determinar la resistencia a compresión de la interfase ladrillo-mortero se seleccionó un valor de 14 MPa para la resistencia a compresión de las unidades de mampostería (f'_{cu}), con este valor crítico se obtuvo una resistencia conjunta a la compresión de 5.7MPa, aunque este valor es excedido en algunos de los elementos, no implica la falla de éstos, ya que su resistencia podría ser mayor a la utilizada en el modelo. Como puede verse en la figura 5, algunas de las muestras, que contenían agregados pétreos, alcanzaron valores de f'_{cu} superiores a los 30 MPa, lo que daría como resultado una resistencia conjunta a la compresión de alrededor de los 12MPa.



Muestra P-134-11-1
 $f'_{cu} = 16.7\text{MPa}$



Muestra P-134-8-2
 $f'_{cu} = 40.83\text{MPa}$

Figura 5. Ensayo de resistencia a la compresión en dos unidades de mampostería.

El esfuerzo máximo a compresión producido por las cargas de servicio en la mampostería fue de 0.86 MPa, valor mucho menor que la resistencia a compresión considerada para el modelo. Los esfuerzos son relativamente bajos debido al gran tamaño de los elementos que componen la estructura.

El templo Santa Lucía es una edificación de tipo plaza y torre, ya que tiene una “base de grandes dimensiones y una torre elevada” [14], en este tipo de irregularidad se presenta un cambio drástico de rigidez producida por reducción del tamaño de la planta. Como se observa en las figuras 6a y 7a, en la zona donde termina el contacto entre los contrafuertes y la torre es donde se presentan los mayores valores de esfuerzo normal, tanto a tracción como a compresión, lo que evidencia la relación directa entre el cambio de rigidez y la concentración de esfuerzos.

En condiciones ideales la distribución de esfuerzo en un arco debería ser uniforme, sin embargo, como se evidencia en la figura 6b, el arco de la parte posterior de la torre presenta una concentración de esfuerzos en su zona inferior. Aunque los esfuerzos actuantes no representan riesgo para la estructura, son una muestra de que el arco no cumple su función de forma adecuada.

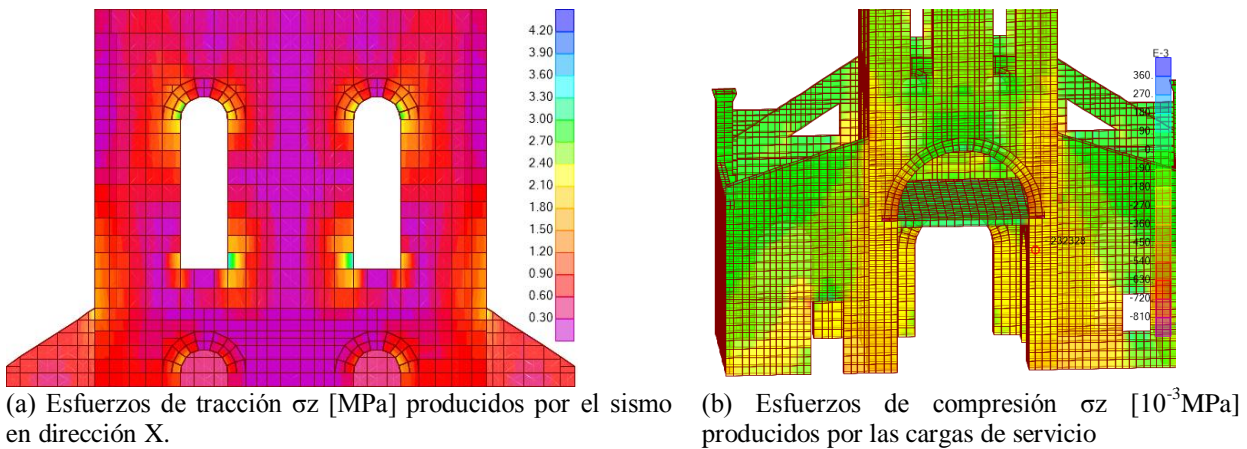


Figura 6. Zonas de concentración de esfuerzo

Según los resultados del modelo, al aplicar sismos en la dirección x se verifica que los contrafuertes cumplen la función de soportar cargas laterales, además de restringir el desplazamiento de la torre, como puede verse en la figura 7b. Por inspección visual pudo deducirse que los contrafuertes de la fachada fueron construidos en la misma época y con los mismos materiales de la torre, esto permite considerar que ambas secciones (torre y contrafuertes) trabajarían en conjunto durante un sismo, sin embargo no es posible afirmar lo mismo de los muros de la parte posterior, que fueron construidos con materiales distintos, y en una época diferente, lo que no garantiza una correcta interacción entre materiales.

7

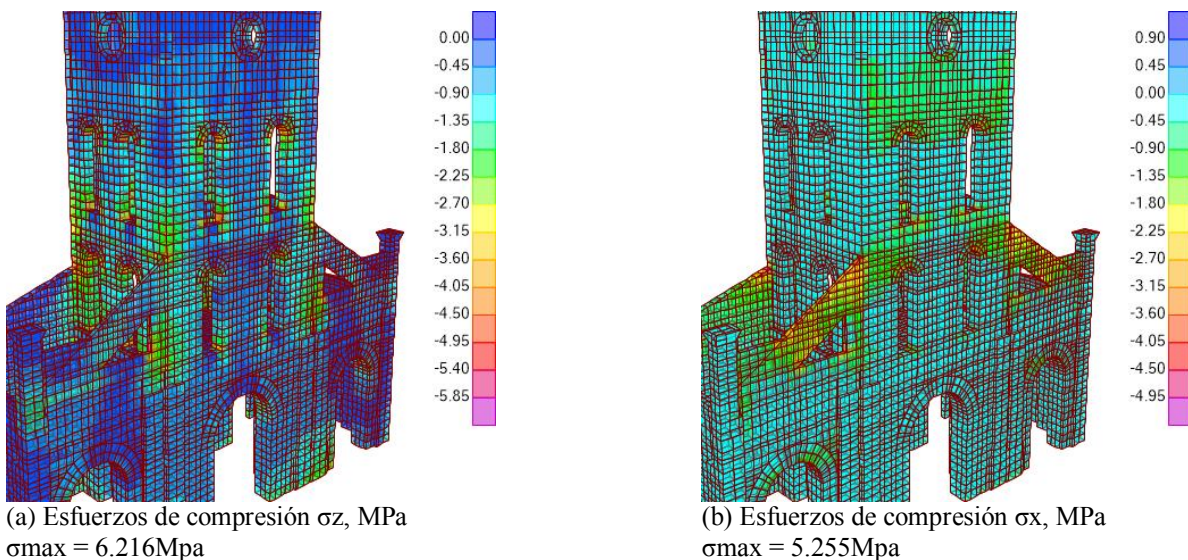


Figura 7. Esfuerzos de compresión producidos por un 100% del sismo en X y un 30% del sismo en Y.

Al realizar el modelado de la cúpula no se incluyeron las grietas existentes entre casquetes, es decir se hizo un modelo en condiciones ideales, donde los esfuerzos se transmiten adecuadamente. Este resultado difiere de la realidad, ya que al considerar los casquetes como elementos individuales se

obtendrían esfuerzos mayores; Se recomienda para estudios posteriores, un análisis considerando esta condición, así como el diseño del refuerzo estructural y las recomendaciones para las zonas críticas de la edificación.

Conclusiones

No es necesario hacer la modelación de todos los elementos que componen la estructura, ya que algunos, cuya función es arquitectónica o decorativa pueden considerarse como cargas equivalentes, lo que permite reducir el tiempo de cálculo sin que se presenten errores significativos.

Bajo condiciones de cargas de servicio no hay esfuerzos que representen un riesgo para la estructura, los esfuerzos actuantes no superan los valores admisibles de resistencia a la compresión y tracción de la mampostería y el concreto. La concentración de esfuerzos en la zona inferior del arco posterior se debe a la rigidización que produce una placa de concreto ubicada en este sector.

La aceleración por efectos sísmicos es mayor en las zonas superiores de una edificación, en los muros de la torre se utilizaron cuatro espesores distintos que disminuyen a medida que se incrementa la altura, esto constituye una medida adecuada, ya que al disminuir la masa de los niveles superiores, las fuerzas sísmicas se hacen menores. El comportamiento de la torre con esta configuración estructural es mejor que el que se tendría si se hubiera construido con un espesor uniforme.

Las cargas provenientes de las zonas superiores de la torre se distribuyen a lo largo de ésta sobre sus muros, cuya área en planta se ve reducida en los niveles donde hay aberturas, partiendo del concepto de esfuerzo, al haber una menor área hay un mayor esfuerzo, lo que explica la concentración que se presenta en las ventanas frontales y laterales de la torre.

Los muros laterales de la fachada son mucho más rígidos que los de la zona posterior, donde es posible que se presenten daños al producirse desplazamientos horizontales debido a los efectos sísmicos, porque además de la irregularidad en planta producida por la diferencia de rigidez entre los muros, el haberse construido de materiales distintos a los de la torre hace que no haya una adecuada transmisión de esfuerzos entre los materiales.

Aparte de los factores mencionados hasta el momento, una de las causas de las concentraciones de esfuerzo, posiblemente la más importante, es el cambio de rigidez que se presenta en la zona de contacto entre los contrafuertes y la torre, que pasa de tener una restricción lateral de sus desplazamientos a no tener ninguna restricción, los efectos producidos por esta condición se evidencian en todas las combinaciones de carga. En la estructura no hay macrofisuras que evidencien daños producidos por sismos. Las fisuras presentes en la cúpula obedecen a una deficiencia constructiva de la misma por ausencia del tambor, esto indica que en Ambalema no se ha presentado un sismo con las características de los sismos que se utilizaron en este estudio, al menos desde la época en la que se terminó la construcción de la torre.

Se realizó un análisis dinámico lineal a partir de un espectro elástico de aceleraciones al no tener elementos que permitieran la caracterización dinámica del suelo y las propiedades no lineales de la estructura. Debería hacerse una verificación de los resultados obtenidos en este estudio con análisis más avanzados, ya que en otras estructuras se ha demostrado que el análisis lineal “sobrestima fuerzas y esfuerzos, y subestima desplazamientos y deformaciones” [10], los resultados de resistencia y esfuerzos provenientes de análisis no lineales son más confiables para estructuras históricas, sin embargo, un análisis lineal sirve como una primera aproximación al comportamiento de la estructura y sus zonas críticas.

Referencias

- [1] M. Sánchez, “Vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile: aplicación a los torreones españoles de Valdivia,” 2013.
- [2] M. Nieto, P. Rivero, and W. Lobo, “Análisis dinámico lineal de una edificación histórica en San Cristóbal, Estado Táchira,” *Rev. Cienc. e Ing.*, vol. 30, no. 3, pp. 237–246, Aug. 2009.
- [3] C. Cennamo and M. Di Fiore, “Análisis estructural, sísmico y geotécnico de la iglesia de Sant’ Agostino en L’Aquila (Italia),” *Rev. Ing. Construcción*, vol. 28, no. 1, pp. 7–20, Apr. 2013.
- [4] C. Paredes, “Modelado y análisis de edificaciones históricas de tipo colonial con incorporación de aislamientos sísmicos; aplicación a las edificaciones de la Dirección Nacional de Fé y Alegría,” Universidad de las Fuerzas Armadas, Pichincha, 2012.
- [5] A. Sánchez, R. Meli, F. Peña, and G. Rodríguez, “El uso de modelos de elemento finito en el proyecto de rehabilitación de la Catedral y el Sagrario de la ciudad de México,” 1998.
- [6] F. Yuste, “Reducción de la vulnerabilidad y mejora sísmica de la iglesia de San Cristóbal de Lorca (Murcia) afectada por los terremotos de mayo de 2011,” *Alberca*, vol. 10, no. 8, pp. 173–194, 2012.
- [7] J. López, S. Oller, and E. Oñate, “Cálculo del Comportamiento de la Mampostería Mediante Elementos Finitos,” vol. 46, 1998.
- [8] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. 2012.
- [9] Comité Européen de Normalisation CEN, “Eurocode 6: Design of masonry structures.” Nov-2005.
- [10] F. Peña, “Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas,” *Rev. Ing. Sísmica*, no. 83, pp. 43–63, 2010.
- [11] F. Muñoz, “Una Contribución a la Modelización y Virtualización Numérica de Estructuras Arquitectónicas,” Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2000.
- [12] P. Lourenço and P. Roca, Eds., “Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations,” in *Historical constructions 2001: possibilities of numerical and experimental techniques: proceedings of the 3rd International seminar, Guimarães, Portugal, University of Minho, 7,8,9 November 2001*, Guimarães: University of Minho, 2001, pp. 91–116.
- [13] C. Triviño Vazquez, “Cálculo con SAP2000 de estructura laminar con arcos internos,” p. 43, 2014.
- [14] E. Bazán and R. Meli, *Diseño sísmico de edificios*. México: Limusa, 2000.