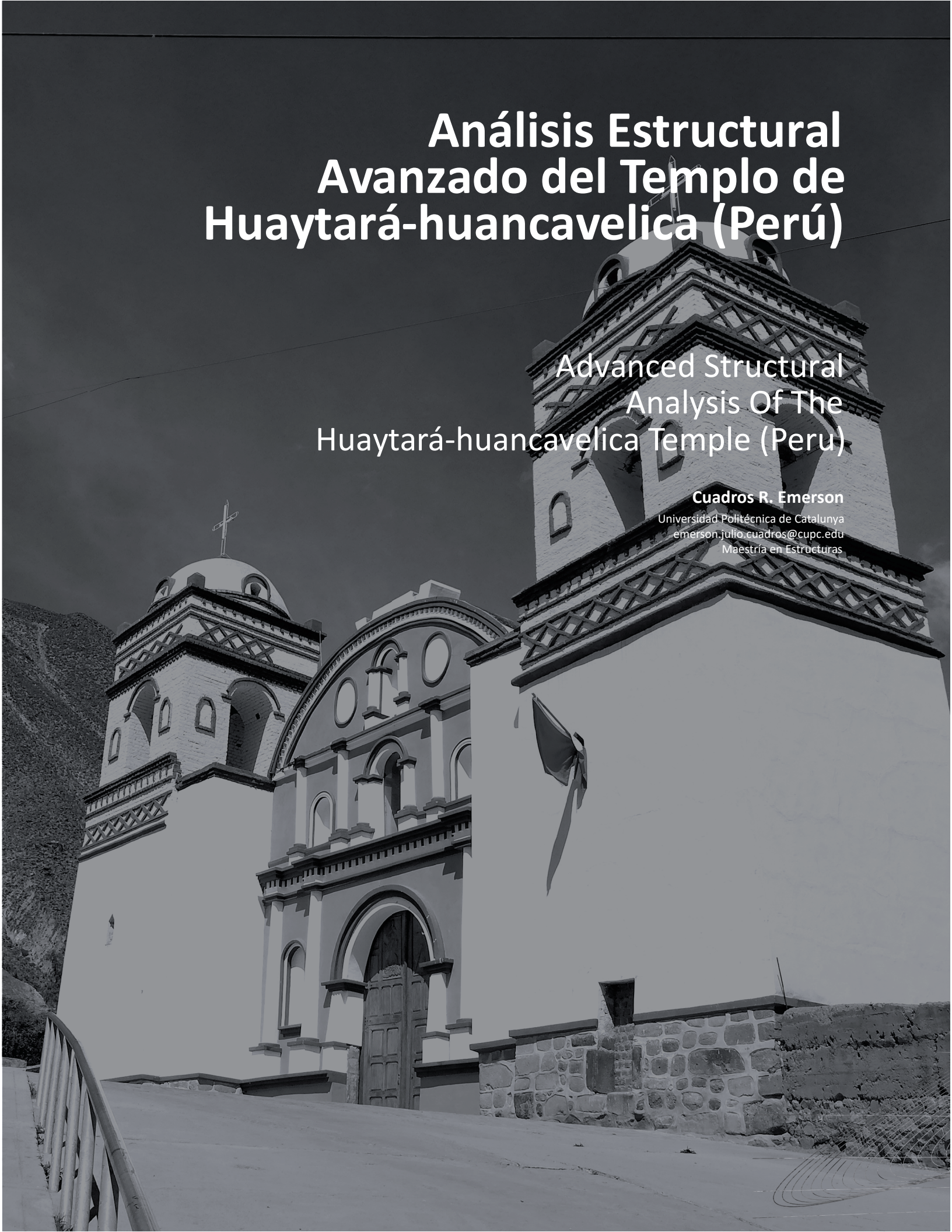


Análisis Estructural Avanzado del Templo de Huaytará-huancavelica (Perú)

Advanced Structural
Analysis Of The
Huaytará-huancavelica Temple (Peru)

Cuadros R. Emerson

Universidad Politécnica de Catalunya
emerson.julio.cuadros@cupc.edu
Maestría en Estructuras



Resumen

El templo San Juan Bautista de Huaytara (Perú) fue construido por orden del Inca Pachacutec en 1497 como parte de la expansión del imperio Inca. A lo largo de los años, ha sido testigo de diversos eventos históricos y ha sufrido alteraciones, lo que la hace única en cuanto a los materiales de construcción utilizados en Latinoamérica. Sin embargo, debido a la falta de conservación, presenta daños evidentes, especialmente en los muros de adobe, el muro Inca y las fachadas. El trabajo se centra en un análisis estructural no lineal del templo para evaluar su comportamiento ante acciones sísmicas. Comienza con una revisión del estado actual y una investigación histórica sobre las fases de construcción. Luego, se obtiene un modelo geométrico 3D utilizando técnicas fotogramétricas, seguido de una descripción detallada de los componentes estructurales y materiales encontrados durante los trabajos de campo. Se realizan ensayos de laboratorio en Lima y Barcelona para caracterizar mecánicamente los materiales. Finalmente, se desarrolla un modelo numérico 3D de elementos finitos para evaluar el comportamiento estructural ante cargas gravitatorias y sísmicas, utilizando el método estático no lineal (*Pushover*). Esto permite identificar las causas de los daños actuales y los elementos más vulnerables del templo.

Palabras clave: Ingeniería sísmica, Sismología.

Abstract

The San Juan Bautista church in Huaytara, Peru, was built by order of Inca Pachacutec in 1497 as part of the Inca Empire's expansion. Over the years, it has witnessed various historical events and undergone alterations, making it unique in terms of construction materials used in Latin America. However, due to a lack of conservation, it exhibits noticeable damage, particularly in the adobe walls, Inca wall, and facades. The focus of this work is a nonlinear structural analysis of the church to assess its behavior under seismic actions. It begins with a review of the current state and a historical investigation into the construction phases. Next, a 3D geometric model is generated using photogrammetric techniques, followed by a detailed description of the structural components and materials encountered during fieldwork. Mechanical characterization of the materials is conducted through laboratory tests in Lima and Barcelona. Finally, a 3D numerical model using finite element analysis is developed to evaluate the structural response to gravitational and seismic loads, employing the nonlinear static method (*Pushover*). This allows for the identification of the current damage causes and the most vulnerable elements of the church.

Keywords: Earthquake engineering, Seismology.

Para citar este artículo: Cuadros R., Emerson. "Análisis Estructural Avanzado del Templo de Huaytará-Huancavelica (Perú)". In *L'Esprit Ingenieux*. Vol. 13-1, pp. X-X.

1. INTRODUCCIÓN

El Templo de Huaytará-Huancavelica (Perú) es un monumento histórico ligado a eventos importantes en la historia peruana. Este edificio, ubicado cerca de la costa del Pacífico, está expuesto a movimientos sísmicos debido a su ubicación en el 'cinturón de fuego' de las placas de Nazca y América del Sur. Se destaca que en 2017 se registraron 397 sismos de magnitudes mayores a 3.0 en la zona. La estructura presentó aberturas, fisuras y otros daños, incluyendo erosión y colapso de la cúpula durante el terremoto de 2007. A pesar de su importancia histórica, ha habido pocas obras de conservación y ninguna investigación estructural previa.

Se propone una metodología para abordar el estudio desde una perspectiva estructural, con el objetivo de preservar y conservar el monumento. Esta metodología sigue las recomendaciones modernas de *ICOMOS / ISCARSAH* y consta de tres etapas: diagnóstico, evaluación de seguridad y definición de actuaciones necesarias. En cuanto a la metodología y técnicas empleadas durante los trabajos de campo, se destacó el uso de métodos no destructivos para la caracterización de materiales y mediciones detalladas para obtener información geométrica. Se menciona que se realizarán ensayos de laboratorio para obtener propiedades mecánicas de los materiales.

Los trabajos de gabinete se centran en la recopilación de datos históricos y arqueológicos, así como en la modelación estructural. Se destaca el uso de la fotogrametría y el método de elementos finitos para la modelación 3D y el análisis estructural. Los objetivos de la tesis incluyen la investigación histórica, inspecciones de campo, caracterización de materiales, obtención de modelos 3D y análisis estructural no lineal. El propósito final es identificar causas de daño estructural y elementos vulnerables para preservar este importante monumento histórico.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1 Levantamiento fotogramétrico

La fotogrametría es una técnica utilizada para digitalizar edificios históricos, que a menudo presentan geometrías complejas que acarrearán daños. Esta técnica proporciona datos precisos sobre la forma, las dimensiones y la posición en el espacio de un objeto a partir de fotografías. Hay dos tipos principales de fotogrametría: terrestre (desde superficie terrestre) y aérea (desde un avión) (Buill Pozuelo *et al.*, 2003).

Tradicionalmente, se han utilizado escáneres láser para construir modelos digitales de elevación (*DEM*) (Schaefer & Inkpen, 2010), pero esto requiere equipos costosos y experiencia especializada. En contraste, los métodos de movimiento (*SfM*) permiten la adquisición de datos tridimensionales a bajo costo y con una supervisión mínima del usuario.

Este método utiliza la superposición de imágenes tomadas desde diferentes ángulos para determinar la geometría interna y la posición de la cámara automáticamente. Para escalar el modelo y tomar medidas, se necesita al menos una distancia conocida entre dos puntos visibles. Cuantas más distancias conocidas tengamos, mejor será la validación del modelo en términos de precisión.



Figura 1: Vista de las fachadas del modelo fotogramétrico texturizado.

En el estudio, se corrigió el modelo inicial generado por el *software* utilizando marcadores. Estos consisten en puntos estratégicos comunes en muchas de las fotografías proporcionadas al *software*, y en este caso se utilizaron 69 marcadores. Este proceso de corrección puede realizarse en cualquier etapa del proceso, pero se recomienda hacerlo antes de crear la nube de puntos densa para optimizar los recursos computacionales.

Se menciona que la corrección implica reorientar las posiciones de las cámaras. Para validar el modelo fotogramétrico, se compararon las medidas entre los marcadores con las obtenidas durante la inspección en el campo. Los errores fueron inferiores al 2%, lo que indica que el modelo es aceptable.

2.2 Inspección.

El templo de San Juan Bautista se encuentra en Huaytará (Perú), junto a la carretera Los Libertadores. Originalmente construida sobre un templo inca, está dedicada a San Juan Bautista. El templo cristiano católico ha experimentado varias modificaciones a lo largo de los siglos.

La estructura incluye una nave principal, sacristía y dos torres. El muro sur es detallado arquitectónicamente y tiene nichos, ventanas y entradas. El muro norte cuenta con hornacinas y nichos. A su vez, el muro oeste tiene una entrada principal y ventanas. La fachada este tiene una entrada, ventana y nicho. Las torres tienen bases y columnas, y la torre norte cuenta con un corredor que conduce al campanario. Las torres tienen una estructura superior y cúpula.

En la Iglesia San Juan Bautista, la nave tiene una cubierta ligera de planchas de aluminio y armaduras de madera. Las cargas se transmiten a los muros de adobe a través de cerchas y correas. Los

muros de adobe se apoyan en un muro de roca tallada inca, que a su vez transmite las cargas al terreno de fundación. También hay arcos de mampostería de adobe en los muros laterales. En la fachada, hay un muro de adobe apoyado en un cimiento de roca y tierra, con una entrada principal en forma de arco, una ventana y un nicho. La sacristía tiene una cubierta que se apoya en vigas sobre las paredes frontal y lateral de la nave. Las torres tienen cúpulas de mampostería de ladrillo apoyadas en losas de hormigón, sostenidas por columnas huecas. La base de las torres se apoya en capas de ladrillo, hormigón y adobe, transmitiendo las cargas al terreno.

En cuanto a las conexiones, se utilizan diferentes tipos de mampostería, incluyendo ladrillo antiguo, contemporáneo, roca tipo inca, adobe y piedra desordenada. Estos materiales se disponen de manera específica para garantizar la estabilidad de la estructura. Se identifican interfaces entre los diferentes materiales y estructuras, donde las cargas se transmiten de un elemento a otro.

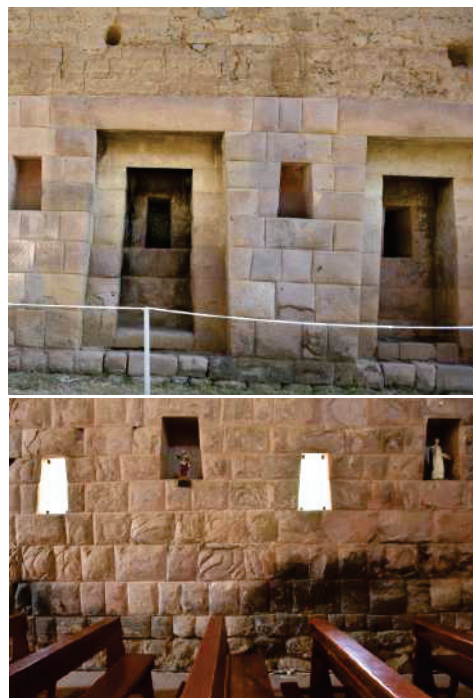


Figura 2: Huellas de los incendios en el muro interior Sur de la nave (izquierda) y huellas del incendio de las jambas en el muro

exterior Sur (derecha).

El templo de San Juan Bautista en Huaytará (Perú) ha experimentado diversas acciones a lo largo de su existencia, incluyendo construcción, uso y mantenimiento. Estas acciones, definidas como agentes o fenómenos que generan esfuerzos y tensiones en la estructura, han causado deterioro en el edificio histórico (Seiner Lizárraga, 2009; Oficina de Estadística y Telemática del INDECI, 2006). Se han considerado cargas muertas y vivas, así como la carga de la cobertura. Se ha calculado el peso total de la estructura, excluyendo la cobertura, como 3.397.05 toneladas.

Asimismo, se han identificado siete tipos de materiales con sus respectivas densidades. Además, se ha analizado la influencia del viento, determinando una velocidad de diseño de 61.37 Km/h para la altura de la nave. Se han calculado las presiones del viento en diferentes partes del edificio. Se mencionan alteraciones y restauraciones realizadas a lo largo del tiempo, desde la época Inca hasta la actualidad, con énfasis en modificaciones no técnicas. Se describen daños por erosión, incendios y cambios de temperatura, así como acciones de agua que han afectado los materiales.

Se abordan detalladamente los daños y alteraciones observados en los muros de roca tipo Inca, mampostería de adobe y mampostería de ladrillo. Se destacan grietas, pérdida de sección, erosión y presencia de musgos. También se mencionan acciones dinámicas, como sismos, y se resalta la importancia de considerarlos en la construcción Inca.

2.3. Ensayos de Laboratorio

El estudio de laboratorio se enfocó en materiales de un edificio histórico importante, con limitaciones en la obtención de muestras *in situ* debido a su valor patrimonial. La financiación

también es limitada para estudios no destructivos. Se obtuvo autorización del Consejo Departamental de Cultura de Huancavelica para investigar sin excavar en el sitio. Para caracterizar los materiales, se recolectaron muestras de demoliciones y otras intervenciones cercanas al sitio. Se realizaron ensayos en colaboración con laboratorios de estructuras antisísmicas de la PUCP y el laboratorio de Tecnología de Estructuras Luis Agulló de la UPC.



Figura 3: Extracción de probetas de roca de 5 cm de diámetro, mediante diamantina.

Se llevaron a cabo ensayos en ladrillos antiguos y contemporáneos siguiendo normas españolas y peruanas. Se utilizaron máquinas universales de compresión a diferentes velocidades. Los ladrillos mostraron un modo de falla cuasifrágil, con grietas verticales y colapso total. En cuanto a los adobes, se realizaron ensayos uniaxiales siguiendo la normativa peruana. Se obtuvieron muestras de unidades almacenadas para reparación y mantenimiento. El modo de falla común fue grietas verticales y colapso total, característico de materiales cuasifrágiles. Para las rocas, se siguieron normas estadounidenses y españolas. Se obtuvieron muestras de la cantera y alrededores del sitio histórico. Los ensayos de compresión uniaxial mostraron falla frágil con grietas verticales y colapso total.

Más aún, se realizaron ensayos de módulo de elasticidad en probetas de roca tipo Inca. Los resultados mostraron

un módulo de elasticidad de 25,653.41 MPa. Finalmente, se realizaron ensayos de doble penetración en morteros de ladrillo contemporáneo y antiguo. Los resultados arrojaron resistencias de 8.27 MPa y 4.76 MPa, respectivamente.

2.4. Análisis Estructural

El proceso habitual para analizar una estructura implica crear un modelo conceptual numérico, dividiéndolo en regiones (elementos) conectados en nodos, formando a su vez una malla. Para proyectos de estabilización sismorresistente en sitios históricos, es esencial comprender la física, elegir elementos apropiados y evaluar resultados con precisión. En la planificación del análisis, se deben establecer objetivos, criterios de evaluación, resultados deseados, alcance del modelado, condiciones y cargas. Decisiones clave incluyen el tipo de análisis, propiedades de materiales, detalles geométricos, tipos de elementos y aplicaciones de soportes y cargas.

En edificaciones históricas, la falta de información precisa y alta incertidumbre requiere simplificaciones geométricas que no comprometan las propiedades estructurales. Se utilizan diferentes tipos de elementos finitos (lineales, bidimensionales y tridimensionales) según la complejidad de la geometría. La elección del tipo de elemento y su orden (lineal o cuadrático) afecta la precisión de los resultados, especialmente en análisis no lineales.

El mallado (forma y tamaño de los elementos) es crucial para la precisión, evitando errores al elegir tamaños de malla adecuados, y realizando ejercicios de convergencia. Se deben considerar áreas de alta variabilidad de esfuerzos. Los ángulos pequeños pueden causar problemas en análisis no lineales. La selección de propiedades de materiales y condiciones de contorno debe basarse

en las cargas y restricciones reales. Se recomienda verificar y calibrar el modelo utilizando métodos específicos.

Para la selección de propiedades de materiales, se ha recurrido a datos experimentales y recomendaciones del *Getty Conservation Institute*, así como a la literatura y normas vigentes en estudios estructurales de iglesias en el Perú.

Concretamente, en el estudio del templo histórico de Huaytará, se ha construido un modelo 3D en *Autocad*, siguiendo recomendaciones previas. Se ha prestado especial atención a la validación y verificación de la geometría para evitar errores en la malla de elementos finitos. La cobertura no se incluye en el modelo final debido a su baja rigidez y la conexión débil con los muros.

El modelo consta de 38 sólidos, representando los siete tipos de materiales presentes en el edificio histórico. Se han empleado 746.472 elementos tetraédricos piramidales lineales para la malla, variando en tamaño según la parte de la estructura. Las cargas de la cobertura se han aplicado de manera uniforme sobre los muros laterales longitudinales.

Se ha asignado un soporte fijo en la base del modelo para restringir movimientos traslacionales en los tres ejes. El análisis de modos de vibración proporciona información sobre las conexiones entre nodos, y ayuda en la calibración de materiales. Se observa que las torres y las fachadas principales experimentan mayores desplazamientos.

Se realizará un análisis no lineal por peso propio para identificar zonas críticas y evaluar la estabilidad de la estructura. Se anticipa que las mayores tensiones se concentran en la base de las torres y la zona posterior (ábside).

Se detectan fisuras en áreas de alta concentración de esfuerzos, especialmente en la base de las torres y el corredor interno. Se estudia la curva de capacidad para determinar el punto de colapso de los corredores interiores.

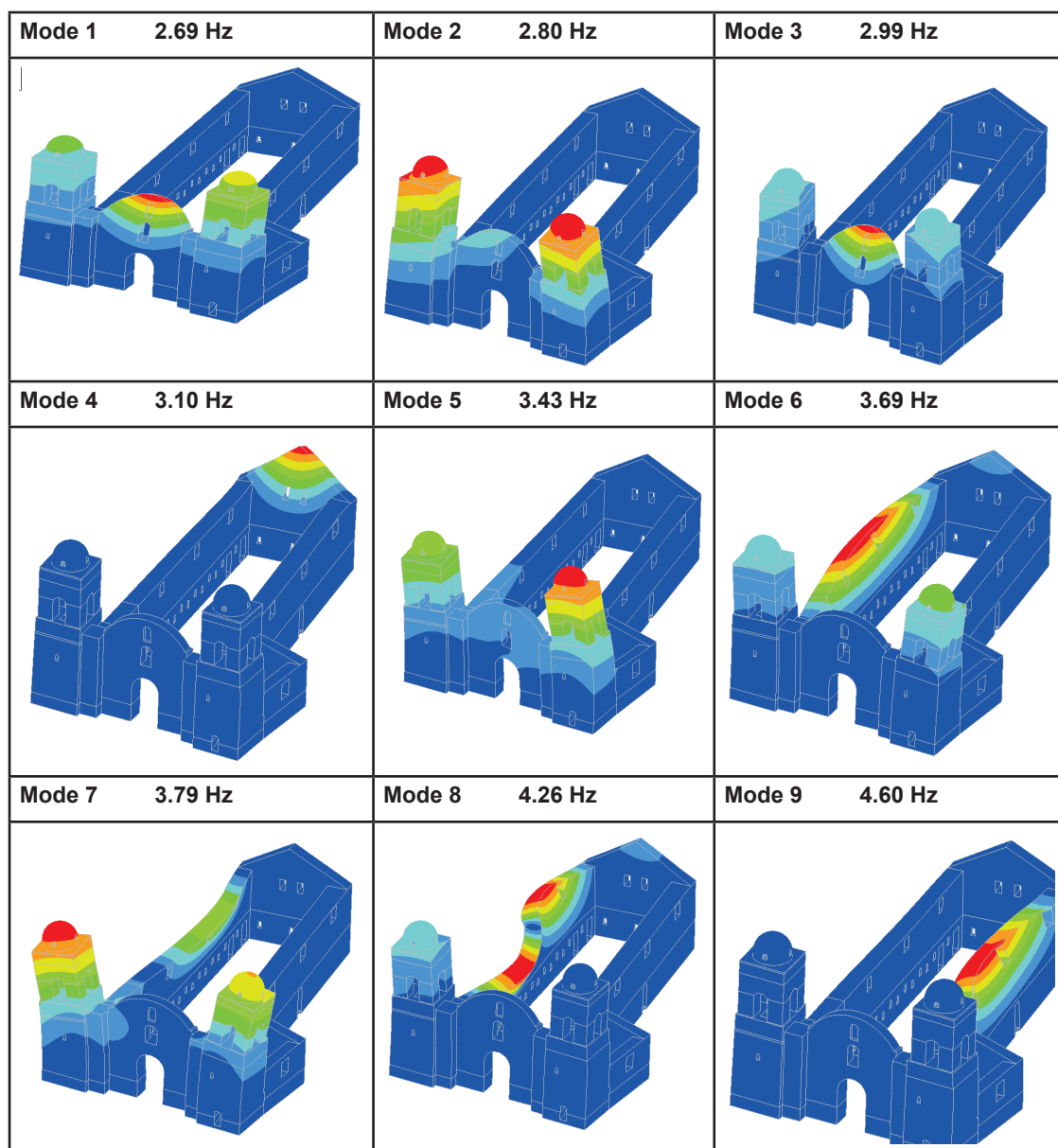


Figura 4: Modos de Vibración del modelo numérico del templo de san Juan Bautista de Huaytará.

Se realizaron análisis modales para comprender los comportamientos dinámicos, identificando áreas críticas como las torres y las fachadas principales, que mostraron desplazamientos significativos. Se evaluó el comportamiento bajo cargas gravitatorias, revelando zonas de posible daño, especialmente en las cúpulas de las torres.

El análisis *Pushover*, crucial para la evaluación sísmica, dividió este templo en tres sectores: Nave, Torre Norte y Torre Sur. Se llevaron a cabo análisis específicos para cada dirección de carga en estos sectores (Lourenço & Pereira, 2020). Este método es uno de los mejores para la evaluación sísmica en edificaciones históricas. Comparado con los tipos de análisis más avanzados, como el dinámico no lineal, el análisis Pushover ha demostrado ser un enfoque adecuado y práctico para la evaluación sísmica (Endo et

al., 2015; Lourenço *et al.*, 2011; Lourenço & Pereira, 2020). De todos los patrones de distribución de carga disponibles, el proporcional a la masa parecería ser el método *Pushover*, más confiable para las estructuras de mampostería (Endo *et al.*, 2017; Saloustros *et al.*, 2015; Lourenço & Pereira, 2020).

En la Nave se observó que el mecanismo de falla común era el volteo fuera del plano, con grietas notables en las conexiones de los muros. Asimismo, en las Torres Norte y Sur se detectaron mecanismos similares de volteo fuera del plano, con grietas horizontales en las uniones de los materiales de mampostería.

2.5. Análisis de daños

Se comparó el daño registrado en el modelo numérico con el mapa de daños de la inspección del edificio histórico. En la nave, se confirma un mecanismo de falla por volteo en el ábside, con grietas más pronunciadas en el muro sur debido a su mayor grosor. La fachada principal también muestra correspondencia entre el modelo y la inspección, con grietas en la unión de los muros laterales, dinteles y en el interior. Las grietas horizontales generadas por el volteo son más difíciles de detectar en campo. Las imágenes y comparaciones detallan estos hallazgos, validando la precisión del modelo.

3. CONCLUSIONES

El estudio multidisciplinario del templo de San Juan Bautista de Huaytará ha arrojado conclusiones significativas. La investigación histórica reveló cinco períodos de obras, destacando intervenciones en la época inca y colonial, así como reconstrucciones posteriores. La inspección *in situ* identificó patologías y asentamientos diferenciales en el muro sur, mientras que los ensayos de laboratorio caracterizaron propiedades mecánicas de materiales clave. A su vez, el levantamiento geométrico mediante

fotogrametría proporcionó un modelo 3D preciso.

En el análisis numérico, se evaluaron los efectos del sismo y se identificaron elementos vulnerables. Se obtuvo un valor de seguridad de 1.8g, indicando una capacidad adecuada ante cargas sísmicas. Los análisis *Pushover* revelaron que los corredores interiores de las torres son los puntos más débiles, propensos a grietas por la unión de mamposterías. También se identificaron zonas vulnerables en la unión de muros laterales y ábside.

Es importante destacar la robustez del muro inca en resistir cargas verticales y sísmicas, a pesar de múltiples aberturas. Sin embargo, se observó mayor daño en los muros de adobe. En conjunto, estos hallazgos proporcionan una base sólida para futuras intervenciones, asegurando la preservación y estabilidad del templo histórico de San Juan Bautista de Huaytará.

REFERENCIAS

- Buill Pozuelo, F.; Núñez Andrés, M. A. & Rodríguez, J. J. (2003). *Fotogrametría Analítica* <Edicions UPC (ed.)>. Upcommons. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.3/36694>
- Endo, Y.; Pelà, L. & Roca, P. (2017). "Review of Different Pushover Analysis Methods Applied to Masonry Buildings and Comparison with Nonlinear Dynamic Analysis". *Journal of Earthquake Engineering*, 21(8), 1234–1255. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1210055>
- Endo, Y.; Pelà, L.; Roca, P.; Da Porto, F. & Modena, C. (2015). "Comparison of seismic analysis methods applied to a historical church struck by 2009 L'Aquila earthquake". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(12), 3749–3778. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9796-0>

- Lourenço, P. B.; Mendes, N.; Ramos, L. F., & Oliveira, D. V. (2011). "Analysis of masonry structures without box behavior". *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4-5), 369-382. <https://doi.org/10.1080/15583058.2010.528824>
- Lourenço, P. B., & Pereira, J. M. (2020). Proyecto de Estabilización Sismorresistente: Recomendaciones para el modelado avanzado. Getty Conservation Institute.
- Oficina de Estadística y Telemática del IN-DECI. (2006). Sismos ocurridos en el Perú a través del tiempo (4ª ed.). Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Saloustros, S.; Pelà, L.; Roca, P. & Portal, J. (2015). "Numerical analysis of structural damage in the church of the Poblet Monastery". *Engineering Failure Analysis*, 48, 41-61. <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2014.10.015>
- Schaefer, M. & Inkpen, R. (2010). "Towards a protocol for laser scanning of rock surfaces". *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(4), 147-423. <https://doi.org/10.1002/esp.1938>
- Seiner Lizárraga, L. (2009). Historia de los sismos en el Perú. *Catálogo: Siglos XV-XVII* (F. Iditorial (ed.)).

