

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS SÍSMICO DE LA IGLESIA SAN
PEDRO APÓSTOL DE ANDAHUAYLILLAS**

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil que presenta

CAROLINA PAOLA BRICEÑO MELÉNDEZ

Dirigido por

DR. RAFAEL AGUILAR VÉLEZ

San Miguel, 2016

Resumen

Las construcciones históricas representan parte de la identidad de los pueblos y son fuente importante de ingresos por el turismo, por lo que son de gran relevancia para el desarrollo de un país. En el Perú, existe un gran número de edificios patrimoniales de adobe siendo la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, una de las construcciones más representativas de los Andes peruanos. Este templo, el cual está ubicado en la Plaza de Armas del pueblo de Andahuaylillas en Cusco, está conformado principalmente por una nave alargada, el presbiterio, la torre de campanario y varias capillas laterales. Su conservación y preservación son labores complicadas por la fragilidad del material que la compone y la debilidad de sus conexiones estructurales, siendo necesaria la ejecución de diagnósticos estructurales y evaluaciones sísmicas. En esta tesis se presenta la aplicación de termografía infrarroja pasiva como procedimiento de diagnóstico para la detección general de daño estructural y el estudio de la influencia de ciertos elementos estructurales en la capacidad sísmica del arco triunfal de la iglesia.

La termografía infrarroja pasiva es un ensayo no destructivo que permite medir y visualizar temperaturas en una superficie mediante la captación de la radiación infrarroja sin aplicar alguna estimulación externa. Esta técnica es recomendable para el diagnóstico de monumentos ya que no genera daño ni contacto directo con la superficie de estudio, encajando dentro de las filosofías modernas de conservación. En la presente evaluación, la aplicación de la termografía infrarroja pasiva permitió la identificación de elementos estructurales embebidos, cambio de material y grietas ocultas por intervenciones anteriores.

La evaluación sísmica de una estructura puede ser realizada aplicando diferentes tipos de análisis. En esta tesis se evalúa el comportamiento sísmico del arco triunfal de la iglesia de Andahuaylillas considerando la aplicación del análisis estático no lineal. La evaluación se ejecutó con la finalidad de determinar la influencia de los muros adyacentes de las capillas laterales y ventanas en la capacidad lateral y patrón de agrietamiento del arco triunfal, para lo cual construyeron modelos de elementos finitos bidimensionales. Los resultados indicaron que la inclusión de muros laterales al arco triunfal incrementa su capacidad lateral en 44% , mientras que la omisión de ventanas en estos muros

contribuye positivamente a la capacidad del arco en 13% respecto al modelo computacional que no las considera.



Abstract

Historical buildings represent part of the identity of the people and are an important economic source due to tourism, whereby they are relevant for the development of a country. In Peru, there are a high number of adobe heritage constructions, being “San Pedro Apóstol” church of Andahuaylillas, one of the most representative Peruvian Andes buildings. This temple, which is located at the main square of the town of Andahuaylillas in Cusco, is mainly made up of enlarged nave, the presbytery, the bell tower and several side chapels. Its conservation and preservation are difficult tasks due to the fragility of adobe and weak structural connections, thus structural diagnosis implementation and seismic assessments are required. In this thesis, in order to determine damage state of the church, passive infrared thermography was applied as diagnostic technique. In addition, aiming studying the influence of certain structural elements on the seismic capacity of the triumphal arch of the church, several numerical analysis were done.

Passive infrared thermography is a non-destructive test to measure and visualize temperature on an area by sensing infrared radiation without using any external stimulation. This technique is suitable for the diagnosis of monuments since it does not generate damage or direct contact with the surface of study, fitting within modern conservation philosophies. In the present study, the application of passive infrared thermography allowed the identification of embedded structural elements, material changes and cracks hidden by previous intervention works.

The seismic evaluation of a structure can be performed using different types of analysis. In this thesis, the seismic behavior of the triumphal arch of the church of Andahuaylillas was worked out considering the application of non-linear static analysis or pushover analysis. The assessment was performed in order to determine the influence in terms of capacity curves and crack patterns of triumphal arch by the adjacent walls of the side chapels and the side windows, for which two-dimensional finite element models were build. The results indicated that the inclusion of the walls increases the lateral capacity of the arch in 44%, while omitting windows on these walls contributes positively with 13% over the computer model does not consider.

Agradecimientos

Agradezco a Dios. A mis padres, a mi tía Lidia y a mis hermanos ya que sin su esfuerzo y apoyo no estaría cumpliendo mis metas. En especial a mi madre y padre, por haber estado en todo momento a mi lado y siempre creyendo en mí. Además agradezco a mis amigos y compañeros del laboratorio Engineering & Heritage.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación tecnológica (CONCYTEC) por la beca que me otorgaron para mis estudios de posgrado. Asimismo, agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Perú y a su oficina de financiamiento DGI-PUCP (proyecto 2015-171) por la provisión de fondos para el desarrollo del proyecto.

Agradezco a mi asesor de tesis, Dr. Rafael Aguilar, por su guía durante todo este proceso, y por todos sus comentarios y recomendaciones que contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

Asimismo, agradezco al Dr. Rui Marques, Dr. Renato Perucchio y al grupo de investigación de la Universidad de Rochester por la guía, discusiones constructivas y recomendaciones, sin las cuales no se hubiese podido concluir esta tesis. Además un agradecimiento especial al apoyo adicional proporcionado por el Programa de Arqueología, Tecnología y Estructuras Históricas de la Universidad de Rochester, Estados Unidos.

Esta tesis se la dedico a la memoria de mi mamita, María Díaz y a mi hermana, Lourdes Briceño que siempre estuvieron orgullosas de mí y tuvieron fe en que lograría lo que me propusiese.

Contenido

Resumen	i
Abstract	iii
Agradecimientos	iv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Esquema	3
1.4. Resultados	4
CAPÍTULO 2. DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DEL PATRIMONIO ARQUITECTONICO DE ADOBE UTILIZANDO TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	5
2.1. Introducción.....	6
2.2. San Pedro Apóstol de Andahuaylillas	7
2.2.1. Descripción arquitectónica y estructural	7
2.2.2. Inspección visual	8
2.3. Aplicación de la termografía infrarroja para el diagnóstico de la iglesia	9
2.3.1. Termografía infrarroja	9
2.3.2. Descripción del programa experimental.....	10
2.3.3. Discusión de resultados.....	13
2.4. Conclusiones.....	15
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS SÍSMICO DE IGLESIAS DE ADOBE: EL ARCO TRIUNFAL DE LA IGLESIA SAN PEDRO APÓSTOL DE ANDAHUAYLILLAS, PERU	16
3.1. Introducción.....	17
3.2. Iglesias San Pedro Apóstol de Andahuaylillas	20
3.3. Operational modal analysis and determination of elastic properties.....	22
3.4. Análisis estático no lineal.....	24
3.4.1. Descripción del modelo	27
3.4.2. Resultados	27
	v

3.5. Conclusiones.....	33
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	35
4.1. CONCLUSIONES.....	36
4.2. TRABAJO FUTURO.....	37
Referencias.....	39



Lista de figuras

Figura 2.1. Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas: (a) vista frontal, (b) esquema de planta adaptada de Castillo et al. (2012).....	8
Figura 2.2 Algunas de las patologías más resaltantes en la iglesia	9
Figura 2.3. Proceso de generación de un termograma de SilentSentinel (2015).....	9
Figura 2.4. Termogramas que evidencian grietas en albañilería de adobe	11
Figura 2.5. Termogramas que muestran las vigas de madera embebidas en las capillas laterales.....	11
Figura 2.6. Termogramas que presentan sobrecimientos de albañilería de piedra	12
Figura 2.7. Termogramas que muestran las zonas con resanes y nueva albañilería de adobe en los muros laterales del a nave.....	13
Figura 2.8. Patologías estructurales y modificaciones históricas identificadas a través de la termografía infrarroja localizada en las paredes (a) A y B y (b) C y D de la torre del campanario; (c) - (d) paredes interiores; y (e) - (g) exteriores de la nave; y (f) fachada posterior	14
Figura 3.1 Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas: (a) localización en la Ruta Barroco Andina y (b) fachada frontal.....	17
Figura 3.2: Representación arquitectónica: (a) Vista de planta de la iglesia (b) modelo tridimensional del arco triunfal.	21
Figura 3.3. Grietas encontradas en el tímpano de adobe del arco triunfal	21
Figura 3.4. Ensayos de identificación modal en la torre del campanario (a) Configuración general de la torre, (b) tres primeros modos de vibración	22
Figura 3.5: Resultados del análisis modal de la iglesia en Abaqus/CAE Explicit: (a-c) Tres primeros modos de vibración.....	23
Figura 3.6: Resultados del análisis modal de la iglesia en Abaqus/CAE Explicit: (a-c) Tres primeros modos de vibración.....	23
Figura 3.7. Leyes constitutivas de la albañilería de adobe a (a)tracción y (b)compresión consideradas en Abaqus/CAE Explicit.....	25
Figura 3.8. Leyes constitutivas de la albañilería de adobe a (a)tracción y (b)compresión consideradas en DIANA.....	26
Figura 3.9. Casos de estudio: (a) M1, (b) M2, and (c) M3.....	27
Figura 3.10. Modelo del arco (M1): (a) modelo en Abaqus CAE/Explicit, y (b) modelo en DIANA (c) Deformaciones plásticas en (a) y (d) estado de daño de los elementos en (b)	28

Figura 3.11 Análisis estático no lineal de M1: (a) curvas de energía resultante en Abaqus/CAE Explicit, and (b) curvas de capacidad en ambos programas	29
Figura 3.12. Modelo del arco con tímpano y paredes laterales (M2): (a) modelo en Abaqus CAE/Explicit, y (b) modelo en DIANA (c) Deformaciones plásticas en (a) y (d) estado de daño de los elementos en (b)	30
Figura 3.13. Análisis estático no lineal de M2: (a) curvas de energía resultante en Abaqus/CAE Explicit, and (b) curvas de capacidad en ambos programas	31
Figura 3.14. Modelo del arco con tímpano, paredes laterales y ventanas (M3): (a) modelo en ABAQUS CAE/Explicit, y (b) modelo en DIANA (c) Deformaciones plásticas en (a) y (d) estado de daño de los elementos en (b).....	32
Figura 3.15. Análisis estático no lineal de M3: (a) curvas de energía resultante en ABAQUS/CAE Explicit, and (b) curvas de capacidad en ambos programas	33



Lista de Tablas

Tabla 3.1: Propiedades elásticas de los materiales	24
Tabla 3.2 : Propiedades elásticas para la albañilería de adobe en ABAQUS/CAE and DIANA	25
Tabla 3.3: Propiedades plásticas para la albañilería de adobe en ABAQUS/CAE Explicit	25



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El Perú presenta un gran legado de construcciones patrimoniales de adobe, las cuales conforman parte de la identidad cultural del país y fuente de ingresos por el turismo. Por otro lado, dada la alta actividad sísmica que presenta el Perú, sumado a la fragilidad del adobe que generalmente compone este tipo de edificios y la debilidad de las conexiones estructurales, el patrimonio y sus ocupantes están en riesgo. Su conservación es de gran interés para la población, realizando con tal fin evaluaciones estructurales que permitan entender el comportamiento estructural del edificio mediante diagnósticos y análisis estructurales. El caso de estudio abordado en esta tesis fue la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, la cual debido a la colección de lienzos y pintura mural que alberga es conocida como la Capilla Sixtina de Latinoamérica. La iglesia puede ser considerada como representante de un gran número de iglesias localizadas en los Andes peruanos edificadas en épocas coloniales, ya que la configuración arquitectónica es similar entre estas. Además de su importancia cultural, este templo apoya a la economía de los ciudadanos del pueblo de Andahuaylillas, ya que muchos de ellos generan ingresos a partir del turismo.

El diagnóstico estructural mediante la aplicación de técnicas no destructivas es un procedimiento necesario para la evaluación estructural. El diagnóstico es necesario para definir el estado del monumento, mediante la determinación de las propiedades de sus materiales constituyentes, definición del sistema estructural y del estado de conservación del monumento, etc. Con tal fin en esta tesis se realizará la identificación de anomalías en la iglesia considerando la aplicación de la termografía infrarroja.

Por otro lado, el análisis computacional de este tipo de construcciones es un procedimiento de gran relevancia en el estudio estructural del monumento. La elección del tipo de análisis a realizar dependerá de los resultados procedentes de la aplicación de las técnicas de diagnóstico y del tipo de información que se desea obtener. Para el desarrollo de este procedimiento, el uso de herramientas numéricas para el análisis estructural es constantemente aplicado. Esto es debido ya que al contar con un modelo computacional representativo del caso de estudio, es posible predecir el comportamiento estructural y controlar el efecto de medidas de intervención propuestas sobre la estructura. En esta tesis, se ejecutará el análisis estático no lineal del arco triunfal de la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, evaluando varios modelos

computacionales con el fin de estudiar la influencia de elementos estructurales en su comportamiento sísmico y sugerir posibles medidas de intervención para el reforzamiento del arco. El presente estudio es un paso preliminar hacia el desarrollo de líneas guía para la evaluación e intervención de construcciones patrimoniales de adobe.

1.2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general la investigación de procedimientos para la evaluación sísmica de construcciones patrimoniales de adobe mediante la aplicación de la termografía infrarroja pasiva y el análisis estático no lineal de modelos de elementos finitos bidimensionales para el diagnóstico y análisis estructural, respectivamente.

Dentro de los objetivos específicos se tiene:

- Ejecutar y documentar la campaña de diagnóstico de la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas mediante la identificación de patologías y materiales mediante la inspección termográfica.
- Estudiar los procedimientos para el desarrollo y análisis de modelos de elementos finitos bidimensionales
- Evaluar la influencia de sub-elementos en el comportamiento estructural del arco triunfal de la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas mediante la aplicación del análisis estático no lineal.

1.3. Esquema

La presente tesis contiene cuatro capítulos, dentro los cuales el segundo y tercer capítulo presenta el desarrollo del diagnóstico estructural de la iglesia y el análisis del comportamiento estructural del arco triunfal. En el segundo capítulo se presentan los resultados de la identificación de materiales y patologías obtenidas en la campaña de termografía pasiva. El tercer capítulo describe el desarrollo y resultados del análisis sísmico, evaluando los resultados cuantitativa y cualitativamente. El contenido de cada capítulo se resume a continuación:

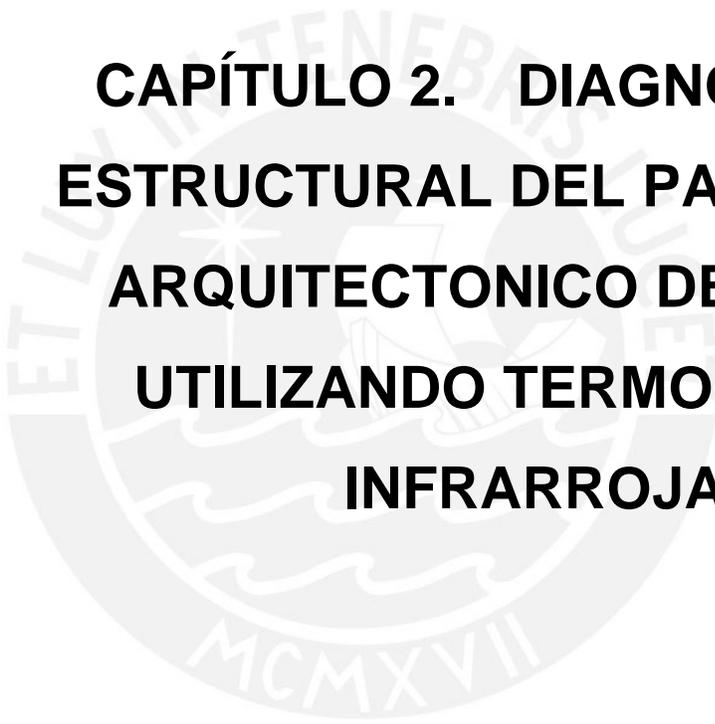
- El capítulo 1 es la introducción, en donde se incluye la motivación así como el objetivo general y los objetivos del presente trabajo. En este capítulo se esquematiza el contenido de la tesis resumiendo brevemente su contenido.

- El capítulo 2 presenta los resultados del diagnóstico estructural mediante la aplicación de la termografía pasiva de la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, mostrando los resultados de la campaña experimental indicando el tipo de anomalía encontrada y su ubicación.
- El capítulo 3 presenta el análisis sísmico del arco triunfal evaluando la influencia geometría en el comportamiento estructural del modelo computacional del arco, para lo cual se construyeron tres modelos de elementos finitos bidimensionales y se aplicó el análisis estático no lineal. Evaluándose la influencia de los muros de corte y las ventanas en la capacidad lateral y patrón de agrietamiento del arco triunfal.
- El capítulo 4 presenta las conclusiones de esta investigación así como algunas consideraciones para trabajos futuros referentes al estudio estructural de la iglesia.

1.4. Resultados

Como resultados de esta tesis se publicaron dos publicaciones científicas para conferencia, siendo las siguientes:

- Seismic Analysis of Earthen Churches: The Triumphal Arch at Andahuaylillas, Peru en “The Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing”.
- Structural diagnosis of heritage earthen buildings using IR thermography en “2016 Seoul International Conference on Engineering and Applied Science”.



**CAPÍTULO 2. DIAGNÓSTICO
ESTRUCTURAL DEL PATRIMONIO
ARQUITECTÓNICO DE ADOBE
UTILIZANDO TERMOGRAFÍA
INFRARROJA**

El diagnóstico estructural apropiado utilizando técnicas modernas es esencial para la preservación del patrimonio arquitectónico para identificar el estado y fuentes de daños. En este capítulo se presenta un resumen de los trabajos de diagnóstico estructurales que se realizaron en la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuayllillas, el cual es considerado como uno de los monumentos de tierra más representativos en América del Sur. La iglesia, la cual data de finales del siglo XVI o principios del siglo XVII, fue construida a base de albañilería de adobe y mortero de barro. Por su colección de lienzos y pintura mural es considerada como la Capilla Sixtina de Latinoamérica. Inicialmente en este capítulo se presenta las características arquitectónicas y estructurales de la iglesia. Asimismo se muestran las patologías estructurales identificadas mediante la inspección visual detectadas en la campaña del 2012, cuyos resultados motivaron la ejecución de campaña de diagnóstico exhaustivo mediante la aplicación de técnicas no destructivas. Como parte de la segunda campaña se aplicó la termografía infrarroja pasiva en el interior y exterior del templo para determinar anomalías estructurales ocultas por las capas de yeso y pintura mural. La aplicación de esta técnica permitió la identificación de sobrecimientos de piedra y elementos de reforzamiento de madera en las capillas laterales, resanes y nueva albañilería de adobe en la nave, así como grietas ocultas por intervenciones anteriores.

2.1. Introducción

La preocupación por la preservación de edificios históricos ha promovido su restauración y rehabilitación, por lo cual es necesario la ejecución de programas integrales de diagnóstico para evaluar el estado actual de conservación de los monumentos. Además, son necesarios estudios extensos orientados al estudio de las posibles efectos que pueda ocasionar la aplicación de trabajos de intervención, de tal forma que se eviten impactos negativos sobre las estructuras (Tolles et. al, 2003). Para el desarrollo de estos estudios se utilizan modelos numéricos, los cuales permiten analizar el comportamiento de los edificios, identificar posibles mecanismos de falla y evaluar la efectividad de las medidas de intervención propuestas. Sin embargo, a diferencia de estructuras metálicas o de concreto armado, el modelamiento y análisis de construcciones de albañilería existentes son labores más complicadas, ya que hipótesis referentes al material como la homogeneidad, el comportamiento elástico e isotropía, no son aceptables (Binda y Saisi, 2001). Para el diagnóstico estructural de un edificio histórico se requiere la recopilación de información referente al proceso constructivo y evolución del edificio desde un punto

de vista arquitectónico. Además, es necesaria la ejecución de pruebas in-situ para definir la geometría y materiales constituyentes, así como para determinar los sistemas estructurales y detectar patrones de agrietamiento y otras anomalías existentes.

En las últimas décadas, varios métodos y técnicas de investigación han sido implementadas en pruebas in-situ para el diagnóstico, enfocándose en los ensayos no destructivos. Dado que estos procesos encajan adecuadamente en las teorías modernas de conservación; métodos como la termografía, ensayos sínicos, pruebas de ultrasonido, georadar, etc. son utilizados constantemente. En este capítulo se presenta los resultados de la aplicación de la termografía infrarroja pasiva, detectando patrones de agrietamiento e identificando cambios de materiales en la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas en Cusco, Perú. La termografía infrarroja pasiva es un método no destructivo y sin contacto, el cual es aplicado para el diagnóstico estructural basándose en el principio de que el calor que fluye en un material es alterado por la presencia de anomalías (Spodek y Rosina, 2009).

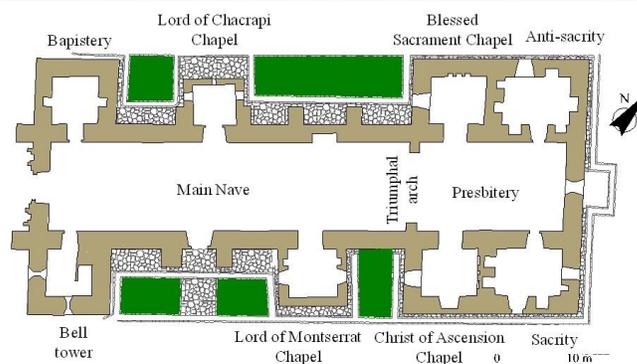
2.2. San Pedro Apóstol de Andahuaylillas

2.2.1. Descripción arquitectónica y estructural

La iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, la cual se muestra en la Figura 2.1a, está localizada en la Plaza de Armas del pueblo de Andahuaylillas, a 41km al sureste de la ciudad de Cusco. Debido a su impresionante colección de lienzos y pintura mural, esta iglesia es considerada con un monumento de tierra emblemático en el Perú, así como una importante fuente económica y cultural para la localidad de Andahuaylillas (Andahuaylillas, 2015; Castillo et al, 2012). El templo está compuesto por la nave alargada, el presbiterio, una torre de campanario y varias capillas laterales (Figura 2.1b). La nave está conectada al el baptisterio, la torre y las capillas de 'El Señor de Chacrapí' y 'Nuestra Señora de Montserrat'. Por otro lado, en el sector del presbiterio están ubicados el arco de triunfo y cuatro capillas laterales: "Santísimo Sacramento", 'Cristo de la Ascensión', Sacristía y Anti-sacristía. En el segundo nivel están el coro alto y la capilla abierta a modo de balcón en la fachada frontal de la iglesia.



(a)



(b)

Figura 2.1. Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas: (a) vista frontal, (b) esquema de planta adaptada de Castillo et al. (2012)

La iglesia se compone de muros de adobe de espesor promedio de 1.10m a 2.00m. En general, el espesor de los muros del cuerpo de la iglesia es 1.80m, a excepción de la fachada frontal: 2.00m; mientras que la altura de estos muros es 10m. Los muros laterales posiblemente estén conectados por vigas tirantes de madera y tensores de acero, distribuidos a lo largo de la nave. Además, existen contrafuertes situados en las fachadas laterales y frontal, los cuales poseen un núcleo de adobe, cubierto por albañilería de piedra. La estructura del techo está compuesta por dos subsistemas: “par y nudillo” y “sobre-par”.

2.2.2. Inspección visual

Desde su construcción, la iglesia ha pasado por una gran cantidad de trabajos de restauración especialmente en los últimos 50 años (Vargas et al., 2013); sin embargo, su mayoría han sido orientados al aspecto estético del templo. En el 2012 se realizó una inspección visual identificando grietas importantes en algunos muros de adobe, principalmente en la zona del presbiterio y capillas (Castillo et al., 2012). Entre las patologías más resaltantes encontradas (Figura 2.2) están una abertura en la pared del presbiterio, colindante con la nave, a la altura de 12.5 m y grietas diagonales de 2.5cm de espesor en el tímpano del arco triunfal. Además se detectaron deflexiones y evidencias de ataque de xilófagos en elementos de madera.



Figura 2.2 Algunas de las patologías más resaltantes en la iglesia

2.3. Aplicación de la termografía infrarroja para el diagnóstico de la iglesia

2.3.1. Termografía infrarroja

Mediante la aplicación de la termografía infrarroja es posible identificar las diferencias de temperatura en superficies ocasionadas por variaciones en el flujo de calor, indicando posiblemente un cambio de material, grietas, humedad, etc. Para detectar y registrar la energía infrarroja es necesaria una cámara de infrarrojos, la cual posea sensores especializados para detectar de la radiación infrarroja incidente obtenida a través de lentes capaces de transmitir ondas infrarrojas que afectan a la conductividad eléctrica de los sensores. Los datos resultantes son procesados para obtener una imagen de la superficie llamada termograma. El proceso de generación de un termograma se resume en la Figura 2.3. La luz visible no afectan los resultados ya que los sensores sólo capturan la radiación infrarroja emitida o reflejada por un objeto (Spodek y Rosina, 2009).

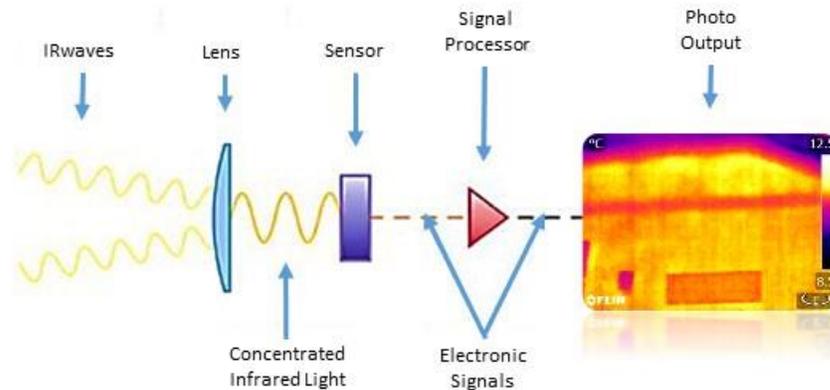
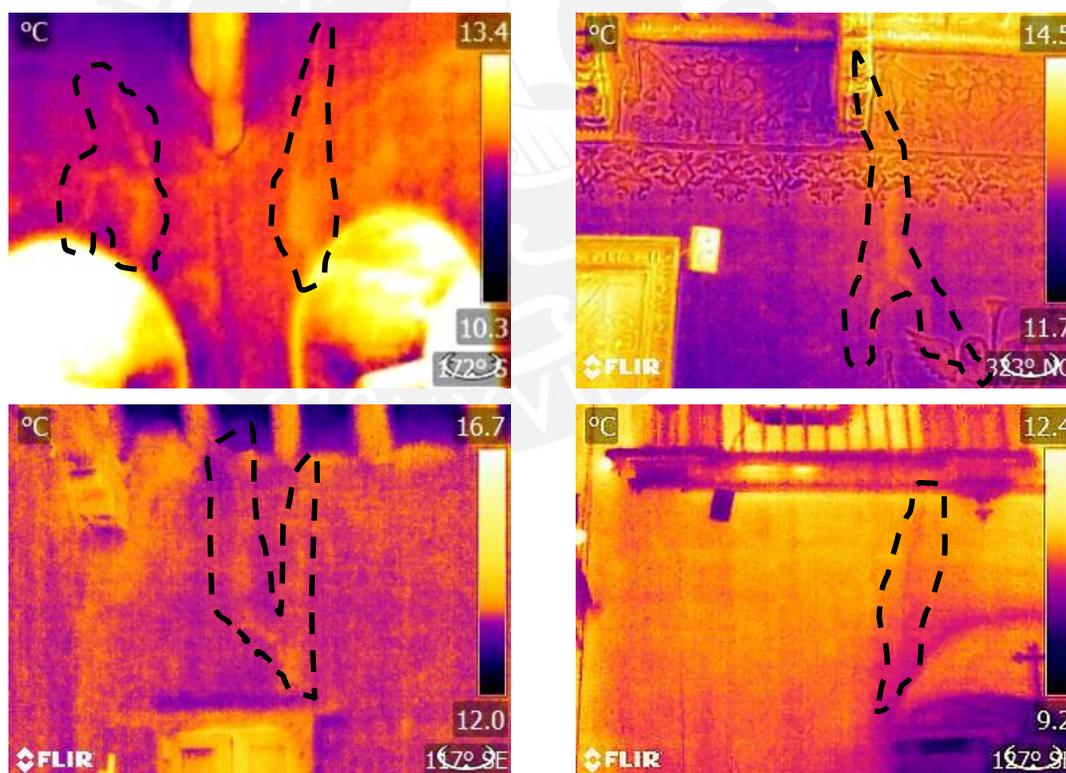


Figura 2.3. Proceso de generación de un termograma de SilentSentinel (2015)

2.3.2. Descripción del programa experimental

Para la campaña experimental realizada a principios de julio del 2015 se consideró un enfoque pasivo que implica la medición de la temperatura de la superficie, representando la condición de equilibrio entre la superficie y el aire ambiente, sin aplicar algún estimulación térmica (Spodek y Rosina, 2009). Cada termograma fue capturado mientras que la temperatura exterior era 8 °C más alta que la temperatura en el interior. Además se utilizó una Flir Systems ThermaCAM T440, la cual se basa en un detector no refrigerado microbolométrico de matriz de plano focal, con sensibilidad de 7.5 a 13m de rango espectral (FLIR, 2012).

Varios termogramas obtenidos son presentados, los cuales representan grietas en los muros (Figura 2.4) y adiciones/modificaciones históricas: vigas de madera embebidas (Figura 2.5), resanes o nueva mampostería de adobe (Figura 2.6) o sobrecimientos de albañilería de piedra (Figura 2.7).



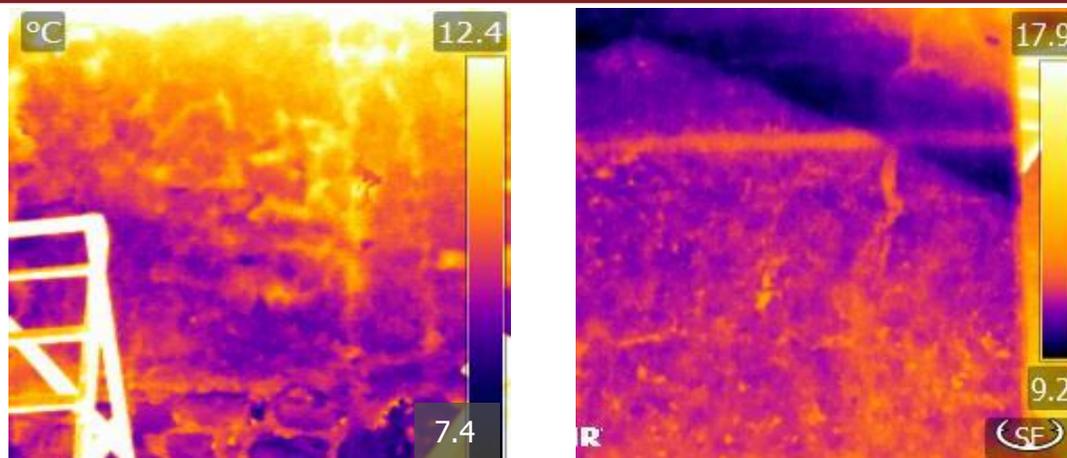


Figura 2.4. Termogramas que evidencian grietas en albañilería de adobe

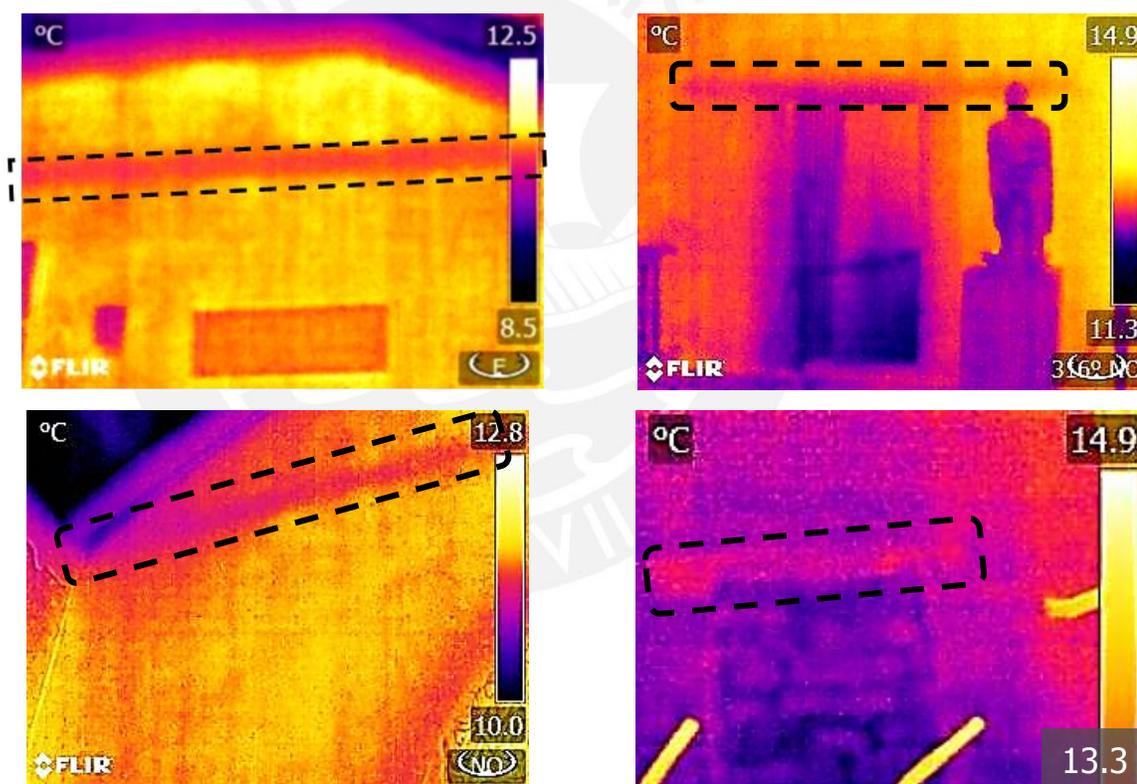


Figura 2.5. Termogramas que muestran las vigas de madera embebidas en las capillas laterales

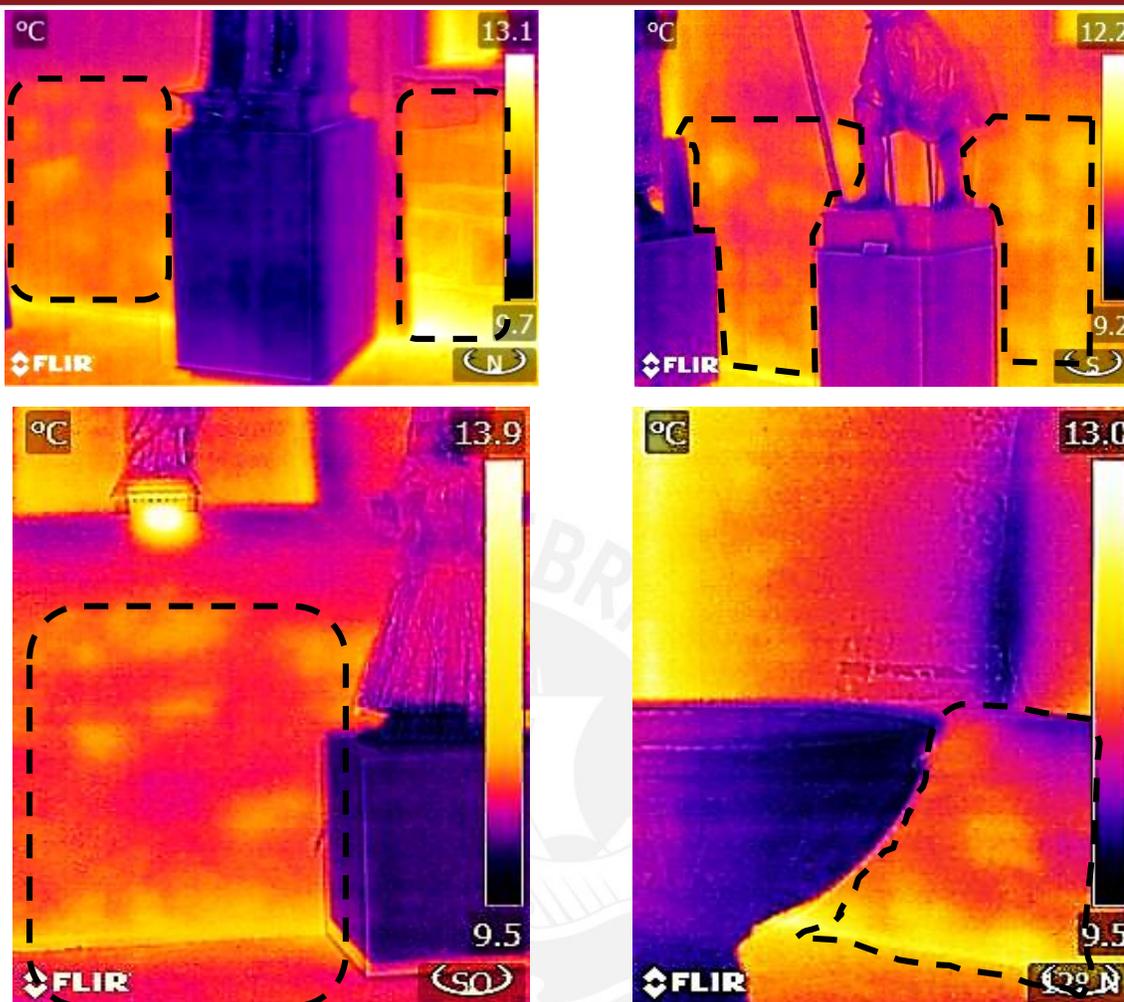
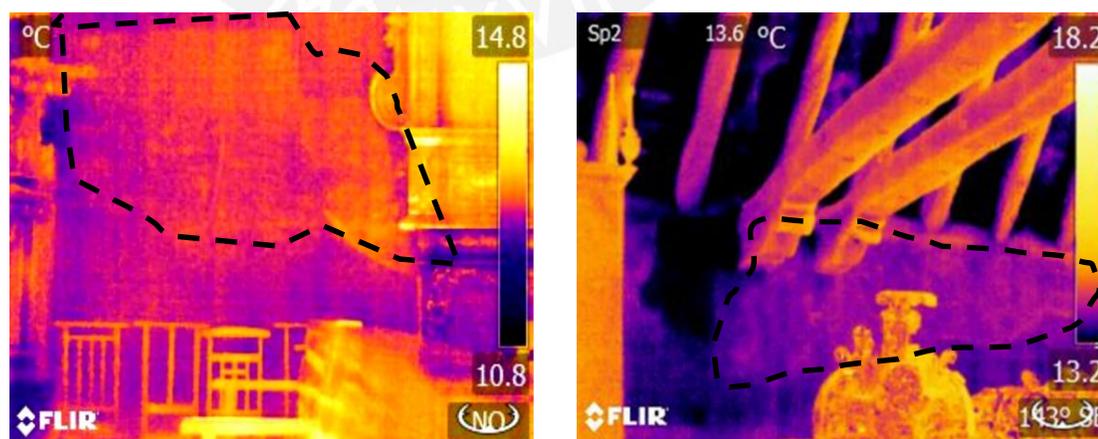


Figura 2.6. Termogramas que presentan sobrecimientos de albañilería de piedra



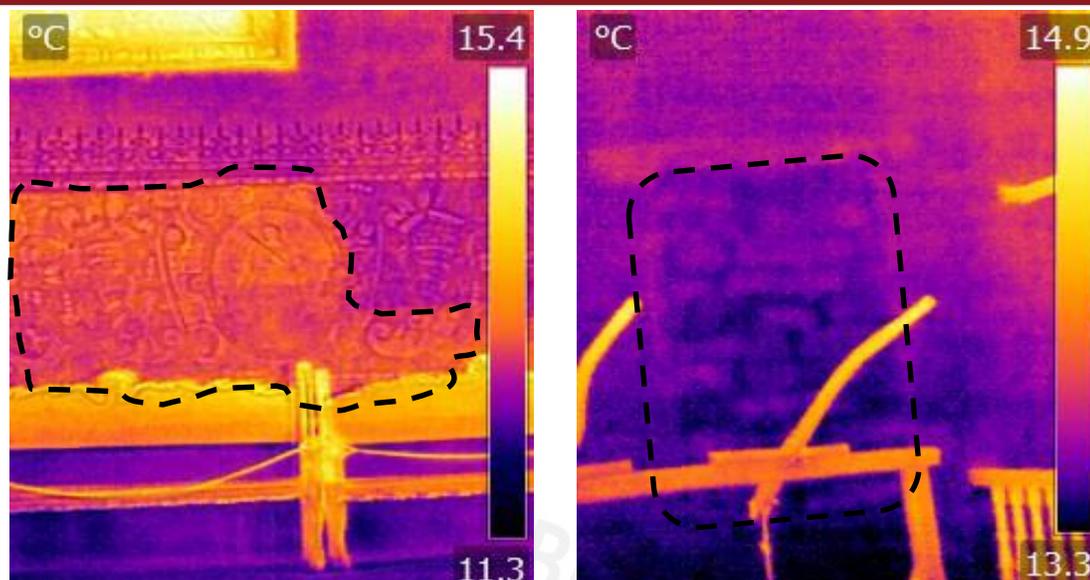


Figura 2.7. Termogramas que muestran las zonas con resanes y nueva albañilería de adobe en los muros laterales del a nave

2.3.3. *Discusión de resultados*

Se encontraron tres tipos de adiciones/modificaciones históricas: reparaciones de adobe, mampostería de piedra mayores de fundaciones y vigas de madera. En su mayoría, las zonas que muestran resanes o nueva albañilería de adobe corresponden a trabajos anteriores de intervención menores ejecutados en los muros longitudinales de la nave. Adicionalmente, se detectaron sobrecimientos de albañilería de piedra en las capillas laterales, lo cual apoyaría la teoría de que su construcción fue ejecutada en una segunda etapa a fin de reforzar la nave y el presbiterio. Asimismo, se encontraron vigas de madera embebidas en cada conexión entre las paredes y los tímpanos de las capillas, los cuales probablemente fueron incluidos como elementos de reforzamiento. Por otro lado, varios termogramas evidenciaron un alto número de grietas en las paredes cerca de elementos de madera como vigas o el sistema de techo, ocasionadas por la interacción de ambos materiales. Grietas con una distribución dispersa se encontraron en la fachada posterior, cuya justificación podría ser debida a un pésimo recubrimiento de yeso sobre el muro. Del mismo modo, se detectaron grietas diagonales cerca de aberturas en la torre del campanario y coro alto, lo cual es típico en adobe albañilería bajo acciones sísmicas. En la Figura 2.8 se muestra un resumen de los resultados de la inspección termográfica.

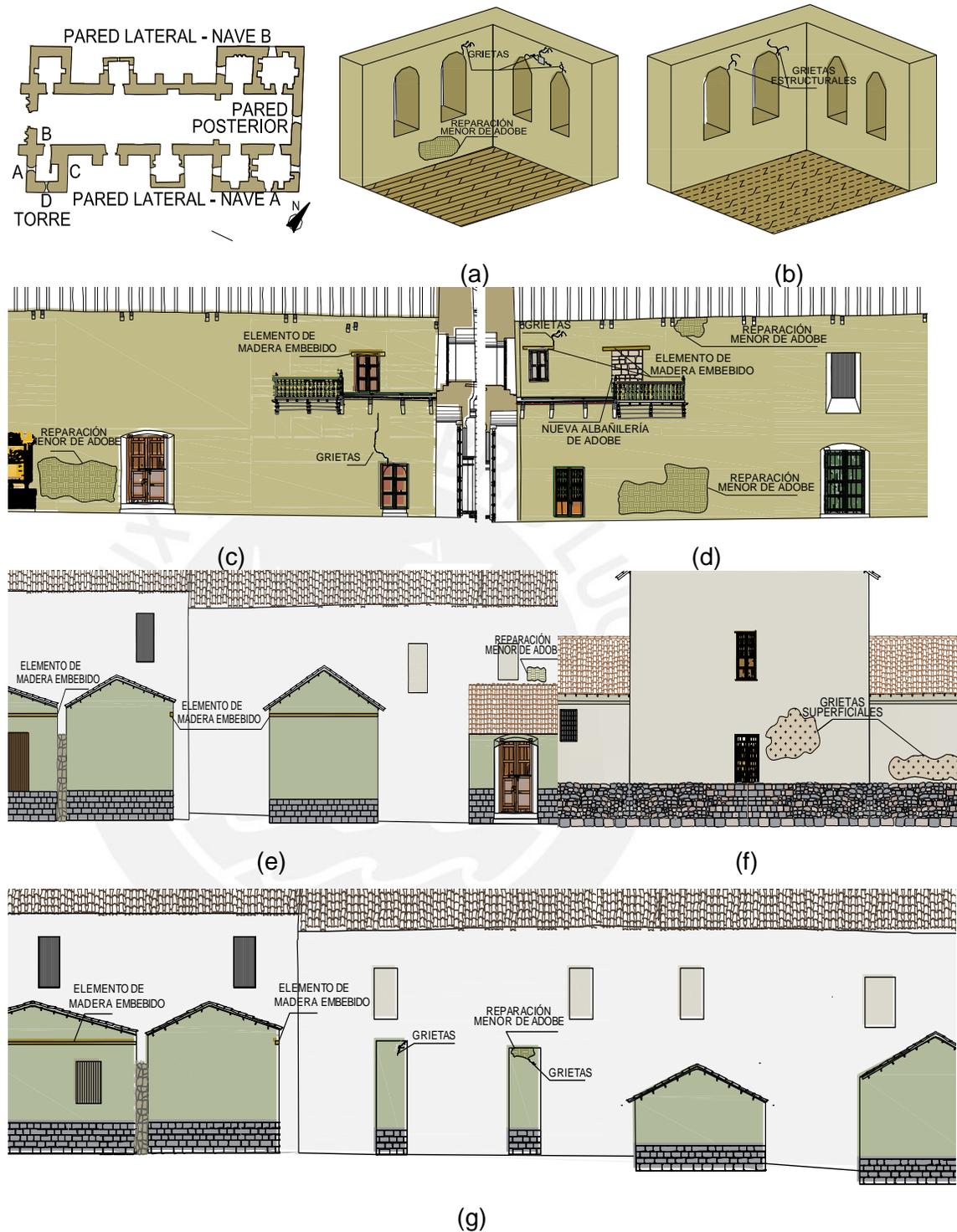
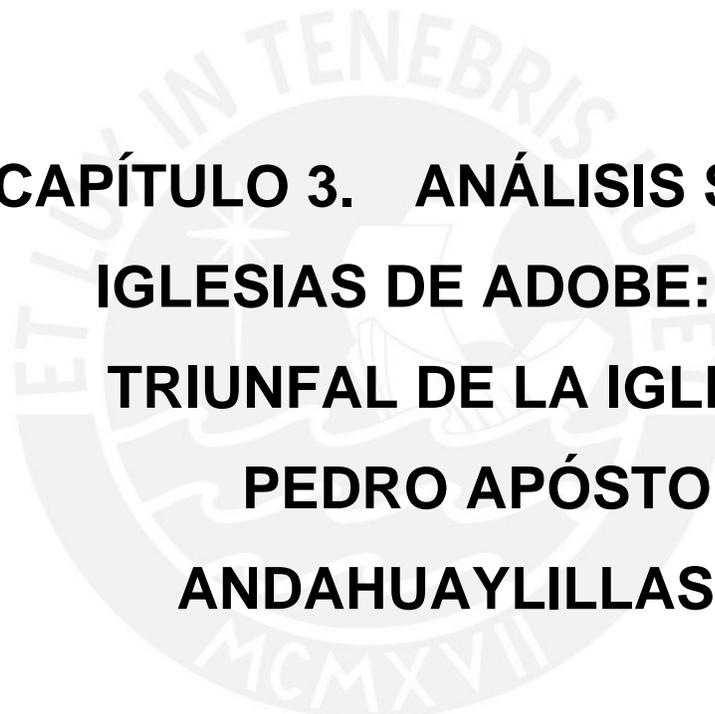


Figura 2.8. Patologías estructurales y modificaciones históricas identificadas a través de la termografía infrarroja localizada en las paredes (a) A y B y (b) C y D de la torre del campanario; (c) - (d) paredes interiores; y (e) - (g) exteriores de la nave; y (f) fachada posterior

2.4. Conclusiones

Los procedimientos para el diagnóstico, el análisis y la intervención de las construcciones históricas resultan ser más complicados en comparación a aquellos para edificios de concreto armado o estructuras metálicas. La identificación de patrones de agrietamiento, fallas estructurales y problemas de humedad no deben ser realizadas únicamente mediante inspección visual. Además, dado que las grietas identificadas se encontraban ocultas debido a intervenciones estéticas anteriores, es recomendable que cada intervención propuesta debería ser planeada considerando la composición del material constituyente, sistema estructural, el estado actual del daño, etc., centrándose en el aspecto estructural. De lo contrario, podrían generar efectos negativos en el edificio y dificultar la tarea de diagnóstico, lo cual ocurre en la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas. La campaña de diagnóstico mediante termografía infrarroja evidenció grietas, adiciones y modificaciones de material que no fueron detectados en las inspecciones visuales anteriores. Aunque el programa experimental se centró en el aspecto cualitativo, la información resultante es relevante para otras etapas de la evaluación estructural. Los resultados serán útiles para el desarrollo de modelos computacionales de la iglesia para su posterior análisis, lo que permite obtener un modelo más representativo.





**CAPÍTULO 3. ANÁLISIS SÍSMICO DE
IGLESIAS DE ADOBE: EL ARCO
TRIUNFAL DE LA IGLESIA SAN
PEDRO APÓSTOL DE
ANDAHUAYLILLAS, PERU**

En este capítulo se presenta un resumen del trabajo experimental preliminar y análisis numérico, los cuales fueron ejecutados para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del monumento. En primero lugar se discutió brevemente las patologías estructurales identificadas en la iglesia y los resultados de los ensayos de identificación modal realizados. Dado el estado actual de daño del arco triunfal de la iglesia, la segunda parte de este estudio se enfocó en la evaluación del comportamiento estructural del arco bajo aceleraciones horizontales en el plano, simulando acciones sísmicas. Modelos de elementos finitos bidimensionales del arco triunfal fueron desarrollados utilizando los programas computacionales, ABAQUS/CAE Explicit y DIANA, para identificar las aceleraciones críticas que inducen el colapso y patrones de daño, así como explorar el efecto de posibles modificaciones geométricas en la capacidad estructural del arco.

3.1. Introducción

El adobe ha sido empleado como material de construcción alrededor del mundo desde épocas remotas (Houben, 1994). En el Perú, la albañilería de adobe ha sido frecuentemente utilizada para la construcción de iglesias, principalmente durante el periodo barroco en los Andes peruanos. En el departamento de Cusco, a lo largo de la llamada Ruta Barroco Andina (Figura 3.1), existen varias iglesias pertenecientes al movimiento artístico barroco, siendo la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, la de mayor importancia. La Figura ofrece la vista de la fachada frontal del monumento.



Figura 3.1 Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas: (a) localización en la Ruta Barroco Andina y (b) fachada frontal

Durante los últimos 60 años, el interés por la conservación de edificios históricos de albañilería ha crecido (Giuffre y Carocci, 1996). Numerosos estudios e intervenciones han contribuido directa o indirectamente a la generación de información referente a los materiales que constituyen estos monumentos y los procesos constructivos seguidos para su edificación. Particularmente, las técnicas de diagnóstico no destructivas han sido desarrolladas con el fin de determinar el estado actual de una estructura de alto valor arquitectónico y cultural sin afectar su integridad. El diagnóstico es una etapa previa necesaria para cualquier intervención, puesto que en cierta medida se procura predecir y controlar el impacto de estos trabajos en la estructura.

El modelamiento y análisis de construcciones de albañilería son labores de gran dificultad y su complejidad es mayor en el caso particular de construcciones históricas. Asimismo, para realizar una evaluación estructural es necesaria información detallada relacionada a la historia y evolución arquitectónica del edificio, así como la geometría, patrones de agrietamiento y otras patologías presentes en la estructura. Adicionalmente, el conocimiento de los materiales que constituyen al edificio y sus propiedades mecánicas es esencial para el desarrollo y ejecución del estudio (Binda y Saisi, 2001). La información requerida puede ser obtenida aplicando procedimientos de investigación cualitativos y cuantitativos, los cuales impliquen la recolección de información obtenida en los estudios preliminares in-situ y pruebas en laboratorio. Esta data influirá en la elección del análisis a ejecutar para evaluar el comportamiento del monumento.

En el caso de las iglesias de albañilería, varios estudios han sido enfocados a la evaluación de sus arcos triunfales, considerándolos como subestructuras independientes. Mele et al (2003) analizó el arco triunfal de la iglesia San Ippolito Martire mediante la aplicación del análisis límite cinemático y análisis estático no lineal, con el objetivo de evaluar su comportamiento estructural y vulnerabilidad sísmica. Dado que esta construcción está compuesta por elementos estructurales bien definidos como las fachadas, arco triunfal, muros laterales, etc., es válido realizar el estudio individual de cada elemento, lo cual provee información del comportamiento local, así como indicaciones útiles de la efectividad de medidas de intervención específicas ejecutadas en el elemento bajo estudio. Tres elementos específicos de la iglesia fueron estudiados, resultando en la evaluación simplificadas del comportamiento sísmico de la fachada posterior del presbiterio, arco triunfal y una sección longitudinal de la arquería de la nave.

En el caso del arco triunfal se logró obtener una alta correlación entre los resultados de ambos análisis, indicando una máxima capacidad de 0.283g. Asimismo, otros análisis adicionales fueron aplicados al arco con el fin de evaluar el efecto de diferentes valores de resistencia a la compresión y tracción.

Del mismo modo, se propuso un procedimiento simplificado para la evaluación de la capacidad sísmica de arcos triunfales en De Luca et al. (2004). Dos tipos de análisis fueron considerados: análisis límite cinemático y análisis estática lineal. El primero se realizó con el objetivo de determinar la aceleración que promueve la inestabilidad - y por lo tanto el fracaso - del mecanismo cinemático asumido. Por otro lado, el otro análisis fue ejecutado para detectar las zonas de alta concentración de tracciones que pudiesen producir las fracturas y mecanismos de colapso. Además, se aplicó el análisis estático no lineal con el fin de verificar los resultados del análisis límite. Dos arcos triunfales de diferentes iglesias fueron seleccionados como casos de estudio, correspondientes: la iglesia de San Giovanni a Mare y la iglesia de San Giovanni Maggiore, presentando cada caso caracteres arquitectónicos particulares. El primer arco triunfal tiene forma asimétrica, con un arco principal de medio punto, flanqueado por dos arcos apuntados más bajos y estrechos. El segundo es un gran arco de medio punto con paredes laterales anchas y considerable espesor. Las zonas críticas y los mecanismos potenciales se determinaron debido a estas distribuciones de tensiones calculadas mediante análisis lineal. Como en el caso anterior, el multiplicador crítico al colapso fue definido mediante la variación de la posición de las secciones de falla. En ambos casos, se obtuvo una buena correlación entre el los resultados del análisis límite y análisis estático no lineal. Los multiplicadores de colapso del análisis límite fueron 0.224 y 0.4, y las capacidades de cargas máximas fueron 0.20 y 0.31 para San Giovanni a Mare y San Giovanni Maggiore, respectivamente. Cabe mencionar que a pesar de las diferencias geométricas evidenciadas, se logró definir un tipo de mecanismo global similar para ambos arcos.

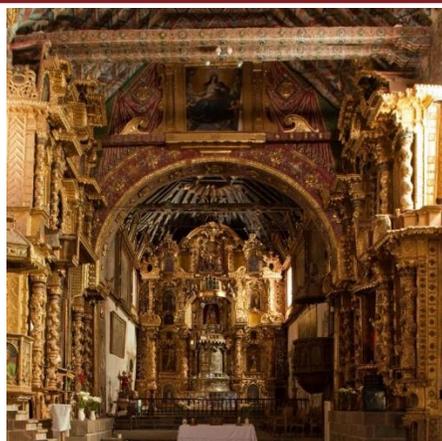
Este capítulo presenta parte del estudio preliminar del comportamiento sísmico de la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, lo cual fue motivado debido a que el templo y sus ocupantes se encuentran en constante riesgo. Esto es debido a que la iglesia está construido casi en su totalidad de adobe y localizada en una zona de alta actividad sísmica. Asimismo, en este capítulo se proporcionaron los aspectos históricos, arquitectónicos y estructurales, así como una descripción del arco triunfal de la iglesia.

Posteriormente se reportó brevemente los ensayos dinámicos realizados en la torre del campanario y el procedimiento de calibración del modelo de elementos finitos, cuya finalidad fue determinar las propiedades elásticas de la albañilería de adobe. Finalmente se presentaron los resultados del análisis estático no lineal, los cuales evidencian la influencia de los diferentes elementos estructurales sobre la capacidad del arco bajo en aceleraciones horizontales. Para ello, se construyeron tres modelos computacionales en dos programas de elementos finitos: ABAQUS/CAE Explicit y DIANA.

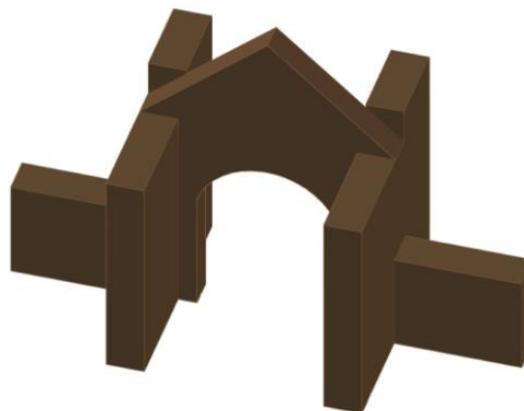
3.2. Iglesias San Pedro Apóstol de Andahuaylillas

La iglesia San Pedro Apóstol está ubicada en la Plaza de Armas del pueblo de Andahuaylillas. Aunque la iglesia fue construida por fines religiosos, este templo también contribuye económica y culturalmente al pueblo de Andahuaylillas (Andahuaylillas, 2015). La iglesia fue construida por los jesuitas sobre los restos de huaca precolombina y, basándose en el estilo de las pinturas que alberga la iglesia en su interior, su edificación data probablemente de finales del siglo XVI o principios del siglo XVII (Andahuaylillas, 2015; Castillo et al, 2012). La iglesia está compuesta por una nave, el presbiterio, el campanario y varias capillas laterales. En la zona frontal del templo, la nave está conectada con el baptisterio, la torre de campanario, el sotocoro y dos capillas. El presbiterio está separado de la nave por el arco triunfal y adyacente a esta zona, se encuentran cuatro capillas.

La subestructura en estudio fue el arco triunfal, la cual está compuesta por el arco propiamente, un tímpano y muros de corte correspondiente a los muros adyacentes de las capillas laterales. En la Figura 3.2a se presenta una vista del arco desde el interior de la iglesia. El modelo 3D en la Figura 3.2b proporciona una vista arquitectónica de la subestructura (en este caso, incluyendo secciones de los muros laterales de la nave). El arco triunfal está compuesto principalmente por albañilería de adobe con un espesor promedio de 1.5 m.



(a)



(b)

Figura 3.2: Representación arquitectónica: (a) Vista de planta de la iglesia (b) modelo tridimensional del arco triunfal.

Dadas los múltiples trabajos de conservación realizados en la iglesia durante los últimos 50 años, no es posible identificar fácilmente el daño profundo acumulado a lo largo de los años (Vargas et. al, 2012). Mediante la inspección visual se logró detectar varias fracturas profundas en las paredes del presbiterio y las capillas, así como en el tímpano del arco triunfal. Por ejemplo, en la Figura 3.3, se observa grietas de espesor considerable en el muro sur junto al arco del triunfo y profundas grietas diagonales en el tímpano del arco triunfal, las cuales solo fueron posibles detectar luego de retirar un lienzo que estaba localizado sobre el arco.



Figura 3.3. Grietas encontradas en el tímpano de adobe del arco triunfal

3.3. Ensayos de identificación modal y determinación de propiedades elásticas

Los ensayos experimentales de identificación modal (Aguilar et. al, 2013) ofrecen un enfoque útil para el estudio de construcciones de históricas de adobe mediante la identificación de propiedades dinámicas y condiciones estructurales como el daño (Aguilar et. al, 2013a; Aguilar et. al, 2013b). Debido a que la fuente de excitación corresponde a vibraciones ambientales, estos ensayos encajan dentro de filosofías de conservación del patrimonio arquitectónico, siendo considerados como una técnica de diagnóstico no destructiva. Como parte del estudio preliminar de la iglesia de Andahuaylillas se realizaron estas pruebas en la torre de campanario, a fin de estimar sus características dinámicas. Las pruebas se ejecutaron en la torre para obtener una mayor amplitud de la respuesta modal. Las mediciones resultantes fueron utilizadas para la calibración del modelo de elementos finitos de la iglesia, determinando las propiedades elásticas del adobe (Módulo de Young y relación de Poisson).

Para los ensayos de identificación modal se consideraron ocho puntos de medición, como indica la Figura 3.4a, estableciendo siete configuración biaxiales. Los transductores utilizados fueron cuatro acelerómetros piezoeléctricos con una sensibilidad de 10 V/g y un rango dinámico de 0.5g, en conjunto con un módulo de adquisición de datos de 24 bits de resolución alimentados por USB. El procesamiento de los datos se realizó mediante el método de identificación subespacio estocástico (SSI) implementado en el software de Artemis. Las tres primeras formas modales identificadas se muestran en la Figura 3.4b.

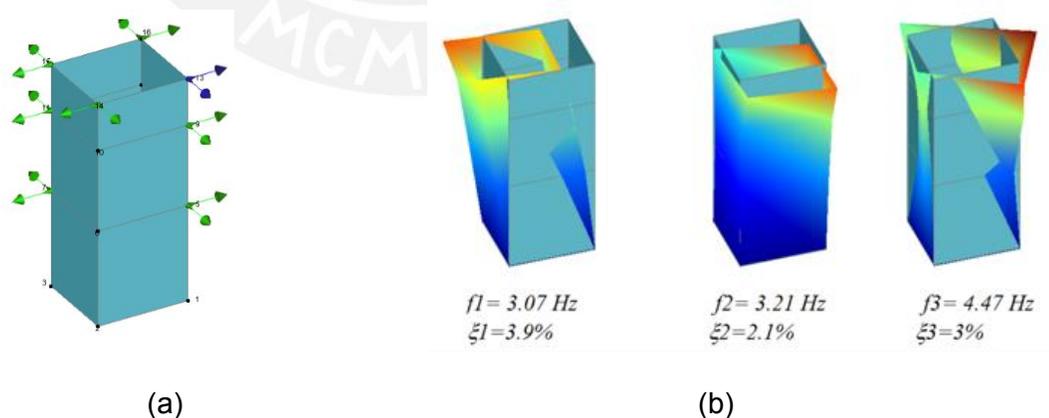


Figura 3.4. Ensayos de identificación modal en la torre del campanario (a) Configuración general de la torre, (b) tres primeros modos de vibración

Para la iglesia, la calibración del modelo se basó en un enfoque de análisis modal, para lo cual se considera su respuesta estructural en el rango elástico. Dos modelos de elementos finitos fueron construidos en DIANA (DIANA, 2015) y ABAQUS/CAE (ABAQUS/CAE, 2015). En ambos casos, la albañilería de adobe fue considerada como un material elástico lineal homogéneo. Los modelos fueron calibrados mediante un análisis de sensibilidad de las propiedades del material y condiciones de contorno, comparando los resultados de análisis modal con las provenientes de pruebas experimentales. Para compara las formas modales y frecuencias entre los modos de vibración experimentales y analíticos se utilizó el criterio de correlación modal (MAC) (Allemang, 2003). En la Figura 3.5 y Figura 3.6 se muestran los modelos resultantes al término del proceso de calibración, evidenciando una alta correlación entre ambos modelos numéricos con los resultados experimentales.

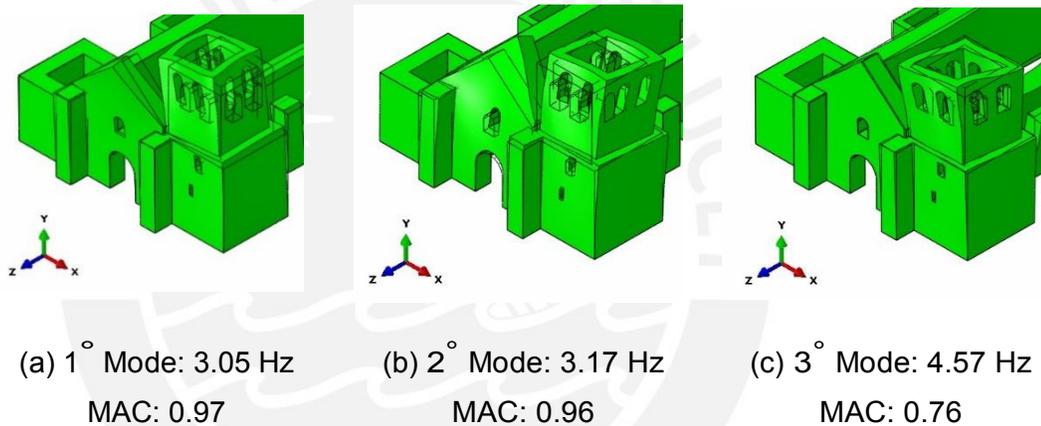


Figura 3.5: Resultados del análisis modal de la iglesia en Abaqus/CAE Explicit: (a-c) Tres primeros modos de vibración

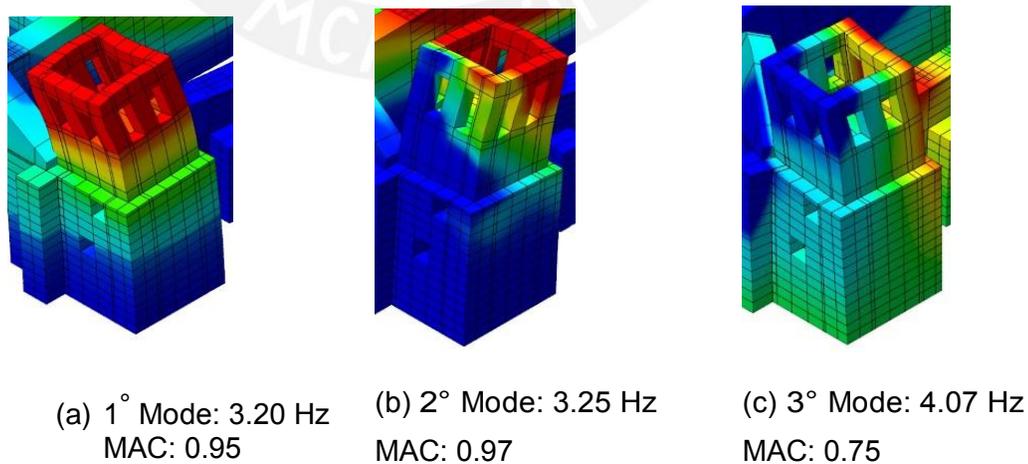


Figura 3.6: Resultados del análisis modal de la iglesia en Abaqus/CAE Explicit: (a-c) Tres primeros modos de vibración

Las propiedades elásticas finales de los materiales fueron asumidas en base a las recomendaciones dadas en Fonseca y D' Ayala (2012), y NTE.010 (2006). Las propiedades elásticas resultantes del proceso de calibración se presentan la Tabla 3.1.

Material	Peso específico (KN/m ³)	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación De Poisson
Albañilería de adobe	15.1	350	0.25
Albañilería de piedra	24.0	800	0.20
Elementos de madera	4.7	10000	0.20

Tabla 3.1: Propiedades elásticas de los materiales

3.4. Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal fue aplicado para el estudio de los patrones de agrietamiento resultantes ante acciones sísmicas. Asimismo, este análisis es útil para evaluar el rendimiento de los edificios mediante verificaciones de desplazamiento e identificar las zonas críticas para posteriormente verificar el estado final del edificio y proponer medidas de reforzamiento sísmico. En este estudio, tres modelos computacionales desarrollados en ABAQUS/CAE Explicit y DIANA, fueron utilizados para evaluar la influencia de los elementos estructurales de la capacidad lateral y en el patrón de daño del arco de triunfo.

En ABAQUS/CAE Explicit, el adobe fue modelado como un material cuasi-frágil usando la formulación de la plasticidad para el concreto dañado. Las propiedades no lineales de los materiales fueron extrapoladas a partir de los resultados experimentales dadas en la sección anterior, considerando las relaciones proporcionadas en Tarque (2011); Van der Plujim (1999) y Lourenco (2009). Obteniendo finalmente que la resistencia a la compresión como $f_m = E/400$, donde E es el módulo de Young. La resistencia a la tracción y la energía de fractura a la tracción fueron estimadas como $f_t = f_m/10$ y $G_f = 4 \text{ N/m}$, respectivamente. El comportamiento plástico de compresión se extrapoló a partir de Tarque (2011), mientras que para tracción se adoptó una curva de decaimiento exponencial basado en la energía de fractura a la tracción calculada para el comportamiento plástico a la tracción según la relación dada en Van der Plujim (1999) y

Lourenco (2009). Las propiedades elásticas y plásticas del material son presentadas en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3 la, respectivamente, mientras que las curvas de comportamiento a compresión y tracción son mostradas en la Figura 3.7.

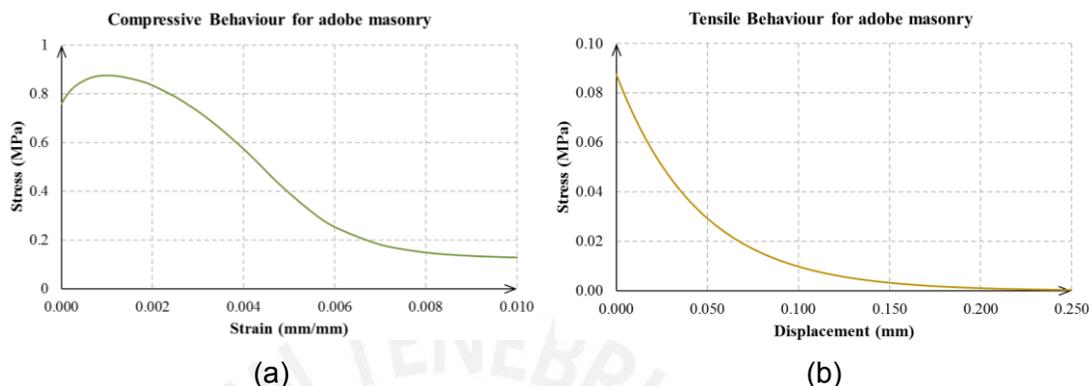


Figura 3.7. Leyes constitutivas de la albañilería de adobe a (a)tracción y (b)compresión consideradas en Abaqus/CAE Explicit

Peso específico (KN/m ³)	E (MPa)	ν
15.1	350	0.25

Tabla 3.2 : Propiedades elásticas para la albañilería de adobe en ABAQUS/CAE and DIANA

Ángulo de dilatación	Excentricidad	f_{b0}/f_{c0}	K	Viscosidad	f_c (MPa)	f_t (MPa)
1	0.1	1.16	0.66	1E ⁻⁸	0.875	0.0875

Tabla 3.3: Propiedades plásticas para la albañilería de adobe en ABAQUS/CAE Explicit

En DIANA, el comportamiento no lineal de la albañilería fue modelado mediante la consideración del modelo “Total Strain Crack Model”, el cual proporciona una buena estabilidad en el control de la fisuración del material, así como el costo computacional (DIANA, 2015). Las leyes constitutivas a compresión y tracción considera tendencias parabólicos y exponenciales, respectivamente (Lourenco, 2009). La Figura 3.8 presenta ambas curvas que representan el comportamiento de la albañilería de adobe. Por otro lado, referente al comportamiento en corte, se consideró un factor de retención de corte de 0.01. Similarmente a los modelos adoptados en Abaqus/CAE, la resistencia a compresión y tracción, así como la energía de fractura a la tracción fueron 0.875 MPa,

0,0875 MPa, y 0,004 N/mm, respectivamente. Además, considerando un factor de ductilidad de 1.6×10^{-3} m (Lourenco, 2009), la energía de fractura de compresión se estimó como $G_m = 1,6 \times f_m = 0,140$ N/mm.

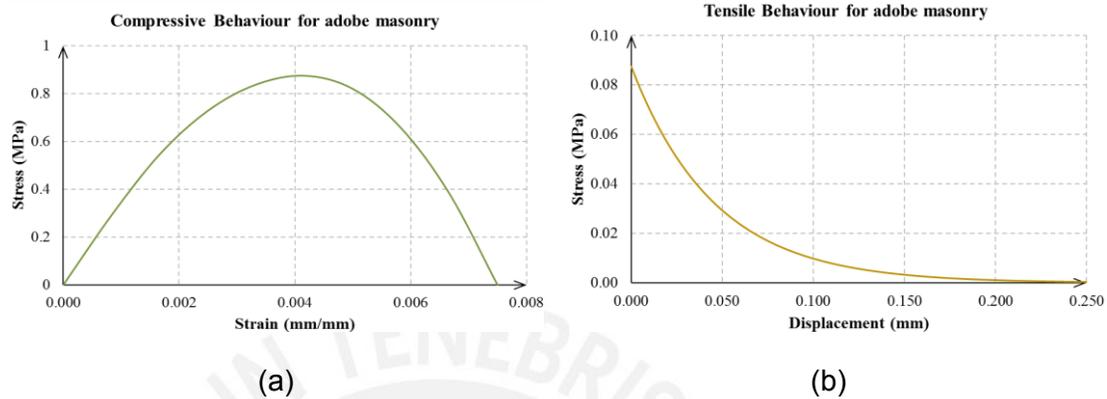


Figura 3.8. Leyes constitutivas de la albañilería de adobe a (a)tracción y (b)compresión consideradas en DIANA

Tracción		Compresión	
f_t (MPa)	G_f (Nmm ⁻¹)	f_c (MPa)	G_c (Nmm ⁻¹)
0.0875	0.004	0.875	0.14

Table 3.1 Propiedades plásticas para la albañilería de adobe en DIANA

El análisis en ABAQUS/CAE se ejecutó en tres etapas de carga. Las condiciones cinemáticas de contorno se establecieron en la etapa inicial. Para simular una situación realista, se aplicó primero la aceleración gravitacional seguida por la aceleración horizontal. Ambas aceleraciones se aplicaron uniformemente, de tal forma que actuaron en cada nodo constituyente del modelo computacional. La magnitud de la aceleración aumentar linealmente con el tiempo hasta llegar al valor total. Con el fin de mantener la condición estática durante el análisis, el incremento de tiempo máximo para cada paso se fijó a 1×10^{-6} .

De manera similar, se aplicaron primero las de gravedad en los modelos construidos en DIANA. Posteriormente, la estructura fue empujada lateralmente con una aceleración volumétrica horizontal aplicada uniformemente sobre toda la malla. Se adoptó el método

de Newton-Raphson Modificado, tomando en consideración la energía como criterio de convergencia, con una tolerancia de 0.001.

3.4.1. Descripción del modelo

El arco triunfal está compuesto por varios elementos sub-estructurales: el arco, el tímpano y las paredes laterales con ventanas. Cada elemento contribuye notoriamente a la capacidad del arco y por lo tanto debe ser examinada a través de modelos de elementos finitos individuales. La Figura 3.9 muestra los tres modelos construidos: M1, el arco; M2, el arco que incluye el tímpano y las paredes laterales sin ventanas; y M3, la misma configuración que M2 pero con la inclusión de ventanas.

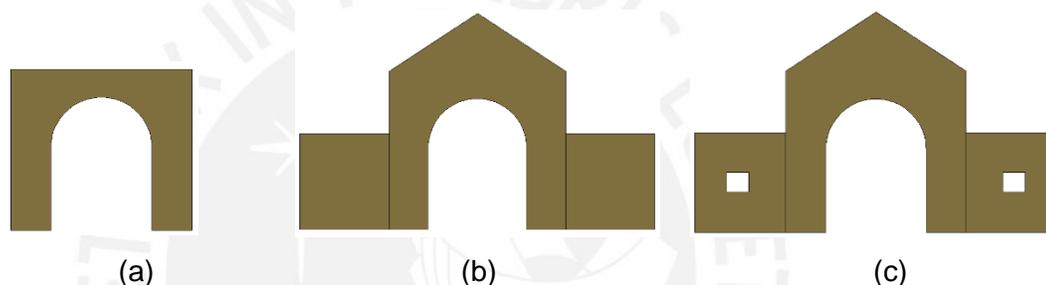


Figura 3.9. Casos de estudio: (a) M1, (b) M2, and (c) M3

Cada modelo se analizó en ABAQUS/CAE Explicit y DIANA usando mallas 2D de elementos triangulares cuadráticos - CPS6 y CT12M, respectivamente. Todos los modelos fueron completamente empotrados en la base.

3.4.2. Resultados

A) El arco

Los modelos construidos en ambos programas consideran prácticamente la misma distribución de elementos, obteniendo mallas de elementos finitos casi idénticas, las cuales se muestran en la Figura 3.10a y b. Las Figura 3.10c y d muestran el estado de daño de ambos modelos, presentando los resultados en términos de deformaciones plásticas principales máximas (ABAQUS/CAE) y estado de daño de los elementos (DIANA). Como era de esperar, el daño se originó en el centro del intradós al término de la aplicación de carga de la gravedad, lo cual indicó que una grieta vertical comenzaría a formarse en esta zona. Cuando se aplicó la aceleración horizontal, la grieta se desvió lateralmente y luego hacia abajo. Además, como se muestra en la Figura 3.10c y d, otras

dos fisuras adicionales se produjeron en el parte superior derecha y en la parte inferior de la columna derecha. Posteriormente, esta columna colapsó a través de rotación alrededor de su esquina inferior derecha, mientras que el arco se rompió en dos partes separadas. Inmediatamente después, la zona superior izquierda del arco colapsó.

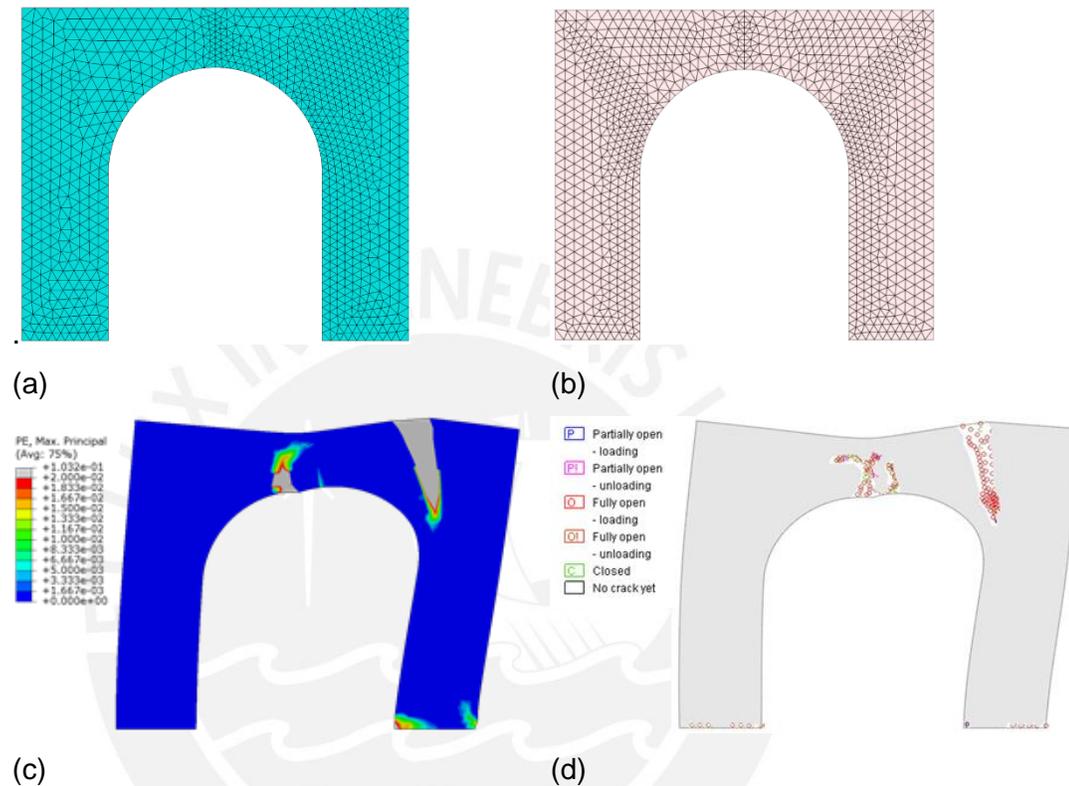


Figura 3.10. Modelo del arco (M1): (a) modelo en Abaqus CAE/Explicit, y (b) modelo en DIANA (c) Deformaciones plásticas en (a) y (d) estado de daño de los elementos en (b)

La energía interna, energía de deformación, la energía de disipación plástica, y la energía cinética calculada por Abaqus / CAE son representadas como funciones en el tiempo en la Figura 3.11a. La gravedad fue aplicada gradualmente 0 a 3s, y se mantuvo constante al término de la aplicación. Del mismo modo, a partir de 3s, la aceleración lateral fue aplicada con un valor máximo de 0,2g a los 13s. Hasta 6s, la energía cinemática es casi cero y la energía de deformación contribuyó casi al 100% de la energía interna. Aproximadamente a 7s, la grieta en la zona superior derecha se propagó verticalmente, generando grandes desplazamientos en el pilar derecho, lo cual se evidenció por el salto en la curva de energía de disipación plástica. El inicio de las condiciones de colapso final fue claramente definido en 9.9s por el crecimiento de

disipación plástica y energía cinética, y por la notoria disminución simultánea de energía de deformación. Cabe mencionar que la energía cinética siguió siendo insignificante hasta 9.9s, lo cual indicó que el análisis explícito sigue siendo cuasi-estático hasta que ocurrió el colapso final.

Las curvas de capacidad resultantes de ABAQUS y DIANA son mostradas en la Figura 3.11b. generando resultados similares referentes a la parte inicial de la aplicación de la carga lateral. El modelo del DIANA produjo resultados similares en la primera parte de la carga lateral, pero la convergencia solamente fue alcanzada hasta el valor de 0.09g, con un patrón de agrietamiento muy parecido al producido por ABAQUS/CAE en aproximadamente 7s. La respuesta del modelo explícito ABAQUS/CAE muestra la capacidad máxima del arco corresponde aproximadamente a 0.12g, lo que corresponde a un desplazamiento 0.022m de la esquina superior izquierda.

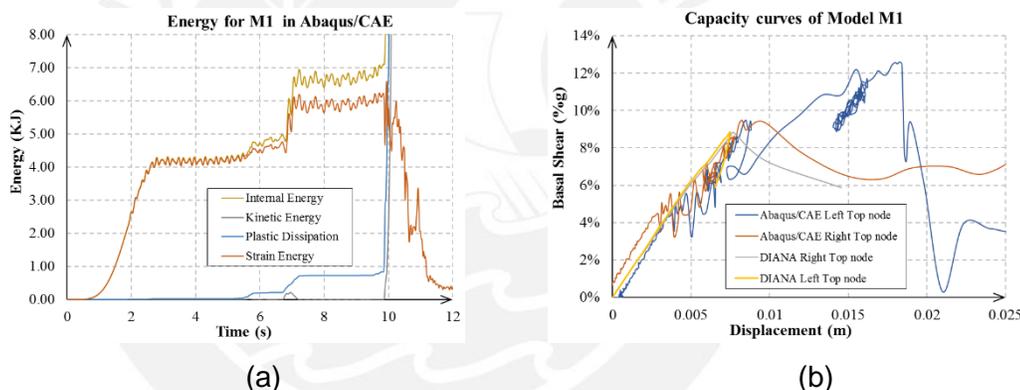


Figura 3.11 Análisis estático no lineal de M1: (a) curvas de energía resultante en Abaqus/CAE Explicit, and (b) curvas de capacidad en ambos programas

B) Arco con tímpano incluyendo muros laterales

Las mallas de los modelos computacionales generadas en ABAQUS/CAE y DIANA son presentadas en la Figura 3.12a y b. A diferencia del caso anterior, la carga gravitacional no produce daño en el centro del intradós o en otras partes de la estructura, lo cual ocurrió debido al efecto de restricción al desplazamiento de las paredes laterales. Posteriormente, ante la aplicación de aceleraciones horizontales, las cuales fueron aplicadas gradualmente desde 0 a 0.6g, se generó una grieta asimétrica a partir del intradós, la cual se propagó lateralmente. Paralelamente una grieta vertical localizada en la conexión de pared izquierda con el pilar izquierdo se fue propagando - véase la Figura 3.12c y d.

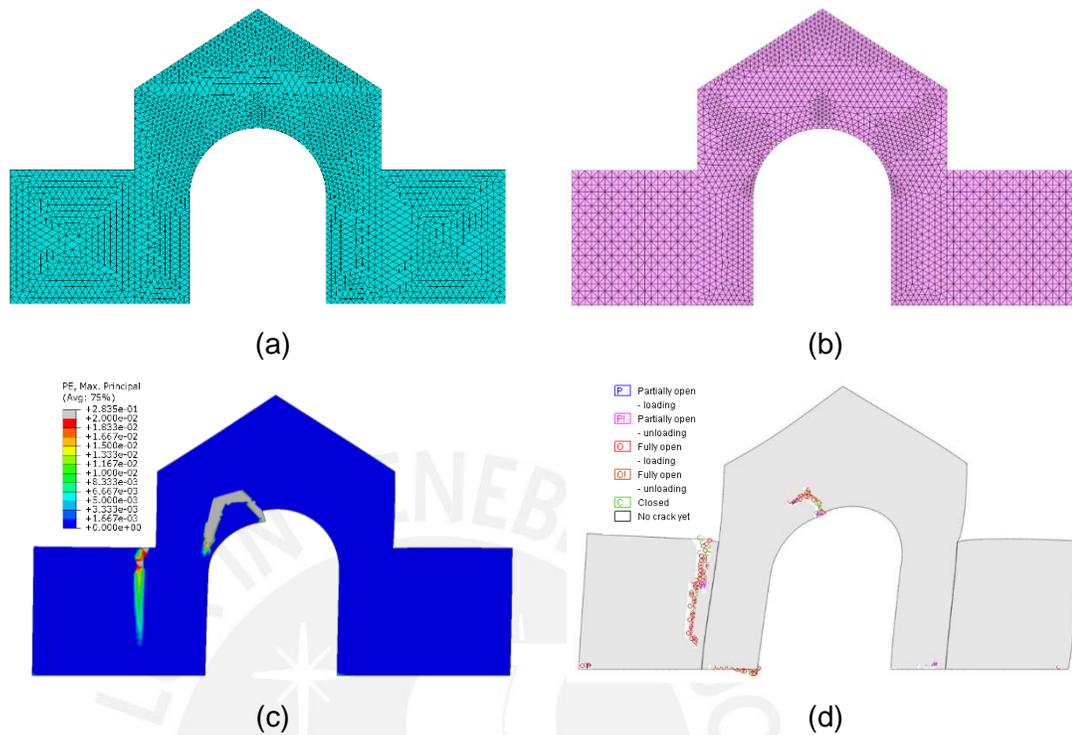


Figura 3.12. Modelo del arco con tímpano y paredes laterales (M2): (a) modelo en Abaqus CAE/Explicit, y (b) modelo en DIANA (c) Deformaciones plásticas en (a) y (d) estado de daño de los elementos en (b)

La energía interna, energía de deformación, la energía de disipación plástica y la energía cinética se muestran en la Figura 3.13a. Aproximadamente a 10.5s, la parte fracturada del intradós del arco - véase la Figura 3.12c - se desprendió provocando un aumento notorio en la energía de disipación plástica y energía cinética. Sin embargo, este cambio puede ser interpretado como una indicación de un colapso local dado que la energía de deformación continuó aumentando monótonamente. El colapso final ocurrió a 11.9s, lo cual fue evidenciado por la caída vertical de la curva de energía de deformación, aparentemente provocada por la aparición de grietas de corte extensas de en la pared derecha, acompañado por la separación entre esta pared y el pilar adyacente.

Las curvas de capacidad - Figura 3.13(b) – evidencian una buena correlación en términos de rigidez, a pesar de que la respuesta DIANA culmina antes, ligeramente por debajo del punto máximo de la curva de capacidad obtenida en ABAQUS/CAE debido al colapso local (aproximadamente a 0.45g). De acuerdo con el modelo explícito, la

capacidad de carga final es aproximadamente 0.56g, cuatro y media veces la capacidad del modelo del arco. La presencia de las paredes laterales aporta a un mejor comportamiento del arco triunfal, mejorando la estabilidad de la estructura bajo cargas verticales y horizontales.

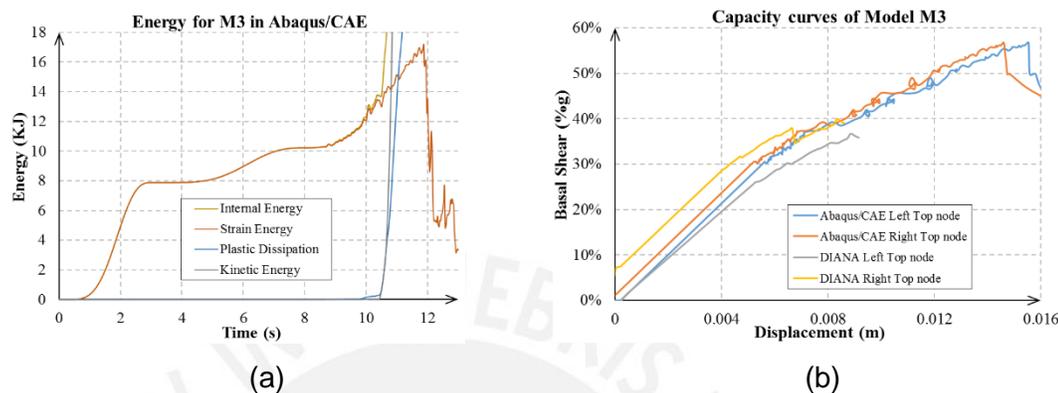


Figura 3.13. Análisis estático no lineal de M2: (a) curvas de energía resultante en Abaqus/CAE Explicit, and (b) curvas de capacidad en ambos programas

C) Arco con tímpano, muros laterales y ventanas

Las Figura 3.14a y b muestran las mallas de los modelos de elementos finitos para los análisis en ABAQUS/CAE y DIANA, respectivamente. Como en el caso anterior, al final de la carga gravitacional, no se detectaron daños en la estructura, lo cual confirma el efecto estabilizante de las paredes laterales. La similitud con el caso anterior continuó durante las etapas iniciales de la aceleración horizontal, como por ejemplo la grieta asimétrica desarrolla en el intradós, la cual luego se propaga hacia adentro. Posteriormente, se originaron rápidamente grietas de corte en las ventanas en conjunto con grietas que separan las paredes de los pilares del arco - ver Figura 3.14c y d. Por último, se logró observar que fisuras de corte en la ventana de la derecha condujeron al colapso total de la estructura.

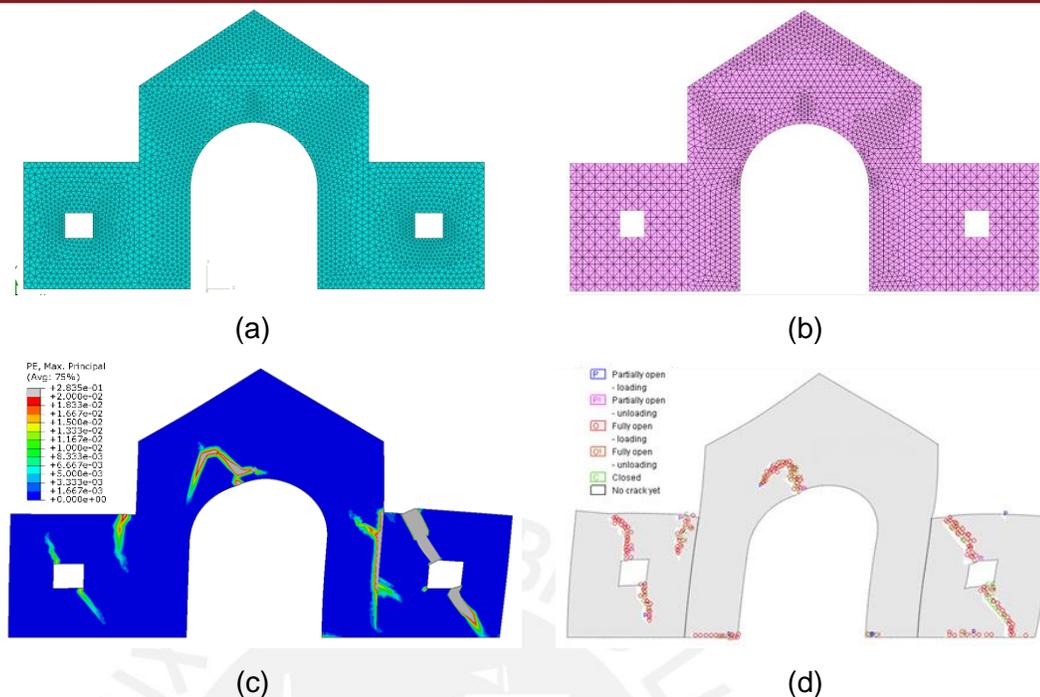


Figura 3.14. Modelo del arco con tímpano, paredes laterales y ventanas (M3): (a) modelo en ABAQUS CAE/Explicit, y (b) modelo en DIANA (c) Deformaciones plásticas en (a) y (d) estado de daño de los elementos en (b)

La energía interna, energía de deformación, la energía de disipación plástica y la energía cinética son mostradas en la Figura 3.15a. Antes de 10.3s, la energía cinética fue despreciable, mientras que la energía de deformación contribuyó casi el 100% de la energía interna. En 10.3s, las curvas de energía de disipación plástica y energía cinética crecieron notoriamente mientras que la energía de deformación disminuyó bruscamente indicando que la estructura alcanzó el colapso.

Las curvas de capacidad indicadas en la Figura 3.15a y b muestran una buena correlación entre los resultados de los modelos computacionales desarrollados en ABAQUS/CAE y DIANA. Sin embargo, como se observó en los casos anteriores, la respuesta DIANA terminó antes, mientras el algoritmo explícito en ABAQUS evidenció que la capacidad lateral máxima del arco triunfal fue aproximadamente 0.43g. Este valor es un 23% menor en comparación con la capacidad al colapso total para el modelo sin ventanas, concluyendo que la presencia de las ventanas contribuye sustancialmente a reducir el efecto estabilizador de las paredes laterales bajo aceleraciones laterales.

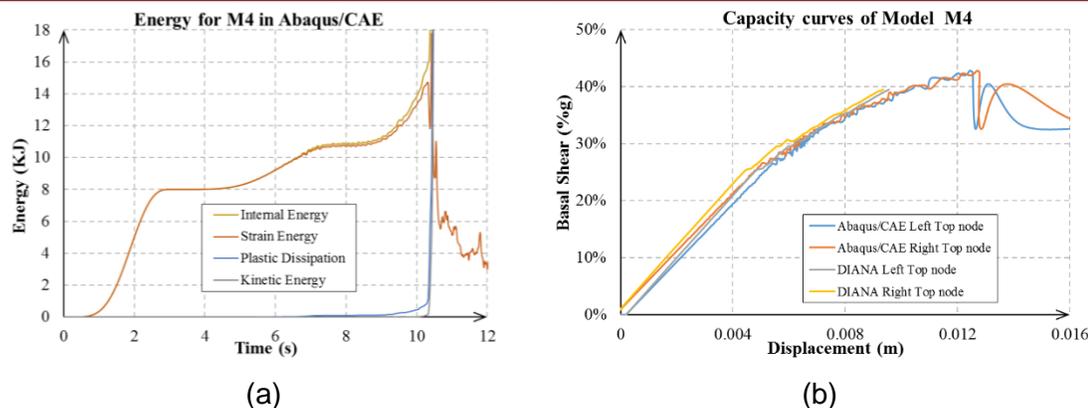


Figura 3.15. Análisis estático no lineal de M3: (a) curvas de energía resultante en ABAQUS/CAE Explicit, and (b) curvas de capacidad en ambos programas

3.5. Conclusiones

La iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas es una estructura representativa de los edificios coloniales religiosos peruanos construidos en adobe. Dadas sus características históricas, arquitectónicas y artísticas, esta iglesia es considerada como una obra maestra de la arquitectura barroca andina. Su evaluación sísmica requirió el estudio individual de los elementos estructurales específicos que presentan una alta concentración de los daños, como es el caso del arco de triunfo. Este capítulo presentó los resultados preliminares de la evaluación sísmica del arco sometido a aceleraciones en plano lateral. El estudio se llevó a cabo considerando modelos de elementos finitos no lineales en 2D desarrollados en ABAQUS/CAE Explicit y DIANA. Con el fin de comprender mejor cómo cada elemento estructural contribuye a la capacidad de la estructural completa del arco triunfal, varios modelos de elementos fueron construidos estudiando el aporte individual de cada sub-elemento.

Los resultados indicaron que el patrón agrietamiento y la capacidad lateral fueron afectados notoriamente por la geometría del modelo. Los análisis confirmaron la debilidad de la tracción en o cerca del centro del intradós y en las conexiones con las paredes laterales. La influencia de los muros de corte y ventanas de la capacidad sísmica fue evidente. Los muros de corte aumentaron considerablemente la capacidad de carga mediante la estabilización del arco, pero la inclusión de las ventanas redujo notablemente su efecto. En base a estos resultados, se especula que los muros

longitudinales de nave deberían afectar considerablemente la capacidad sísmica del arco triunfal ya que limita los desplazamientos laterales.

Las diferencias entre los resultados de los ambos programas computacionales utilizados en el estudio fueron debidas principalmente a los diferentes procedimientos de solución utilizados para la solución del problema no lineal. Por un lado, la formulación explícita ofrece una visión completa y detallada de todo el mecanismo de colapso, incluidos los casos de colapso parcial. Los cambios bruscos en las curvas de disipación plástica, y energías cinéticas probablemente podrían ser utilizados para definir sin ambigüedades la aparición de colapso de las estructuras de adobe. Al mismo tiempo, debido a los incrementos pequeños de tiempo infinitesimalmente para simular las condiciones estáticas, el análisis explícito requiere de mucho tiempo, incluso para problemas bidimensionales relativamente simples. En la fortaleza del método de Newton-Raphson Modificado, DIANA realiza el análisis en un tiempo mucho más corto, produciendo patrones de daño y curvas de capacidad que coinciden con las resultantes del algoritmo explícito. Dada la complejidad inherente de los problemas no lineales considerados en el presente estudio, y la dificultad en la validación de los resultados numéricos, la aplicación de dos metodologías diferentes de análisis de modelos de elementos finitos proporciona un medio necesario para verificar la consistencia de los modelos.



CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

4.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo se muestran a continuación:

- El estudio de edificaciones patrimoniales requiere de un trabajo interdisciplinario que implica la investigación histórica, arquitectónica y estructural, la cual es de gran utilidad para la construcción del modelo computacional y entendimiento de las patologías encontradas en la construcción.
- Las técnicas de experimentación in-situ no intrusivas son procedimientos de gran utilidad que permiten obtener información representativa del edificio bajo estudio. Particularmente, en el caso de la identificación de anomalías fue necesario aplicar la termografía para obtener información que no era posible determinarla mediante inspecciones visuales pasadas.
- En la iglesia de Andahuaylillas, el estudio de diagnóstico estructural mediante termografía ha mostrado que existen grietas en las zonas de conexión de elementos de madera y muros de adobe, así como en grietas en vanos. Además, existen agrietamiento escondido por intervenciones recientes en el último nivel del campanario.
- Para la construcción de modelos de elementos finitos bidimensionales es recomendable la aplicación de elementos cuadráticos triangulares, es decir con nodos intermedios entre los vértices del elemento. Cuando se realiza un análisis no lineal es recomendable el uso de elementos cuadráticos para obtener una respuesta más representativa. Además los elementos triangulares permite la construcción de modelos más regulares que utilizando elementos cuadrangulares.
- De los resultados del análisis sísmico se concluyó que el patrón de agrietamiento y la capacidad lateral del arco triunfal son afectados considerablemente por la geometría del modelo numérico. Los análisis confirmaron que el intradós y la conexión con las paredes laterales son una zona vulnerable ante fuerzas laterales. Asimismo, se dedujo que los muros de corte aumentan la capacidad del arco, mientras que la inclusión de ventanas afectaba negativamente a su comportamiento.
- Las diferencias entre los resultados procedentes de ambos programas computacionales de elementos finitos son ocasionadas principalmente a los diferentes procedimientos de solución utilizados para resolver un caso de estudio

que considere la no linealidad del material. Cabe mencionar que pese a que el procedimiento explícito del Abaqus/CAE permite la obtención de respuestas más desarrolladas, este proceso consume horas de procesamiento. Mientras que el software DIANA permite obtener resultados en minutos, los cuales pueden ser utilizados evaluaciones preliminares rápidas.

4.2. TRABAJO FUTURO

Para futuros estudios se recomienda la ejecución de labores y aplicación de consideraciones adicionales, las cuales son mencionadas a continuación:

- Respecto al diagnóstico experimental de la iglesia, se recomienda la identificación de patologías mediante termografía infrarroja activa, ya que puede que existan ciertas patologías y particularidades del material que no pudieron ser detectadas en la campaña de termografía pasiva.

Adicionalmente, dado que las propiedades elásticas utilizadas fueron consideradas de ensayos de identificación modal, se pueden emplear ensayos sísmicos en diferentes puntos de la iglesia, con el fin de corroborar el estado de daño de las paredes y módulos de elasticidad del material.

- Dado que las propiedades mecánicas fueron definidas según las relaciones de la bibliografía indicadas, se sugiere definir las propiedades mecánicas del material como unidad, por lo menos, para verificar la factibilidad de estos valores. Las muestras pueden ser extraídas de la zona superior de los muros laterales.
- Para la construcción del modelo computacional se sugiere tener en consideración la interacción con el terreno, mediante su modelamiento o representación de resortes que representen su comportamiento.
- Referente al análisis numérico, se recomienda realizar el análisis estático no lineal de la iglesia, con el fin de determinar posibles mecanismos de falla. Además se sugiere evaluar los factores de colapso de estos mecanismos mediante como análisis límite.

Asimismo, se propone la ejecución del análisis dinámico no lineal, con el fin de verificar los resultados anteriores.

- Considerando los resultados obtenidos de los análisis anteriores se podría evaluar la efectividad de ciertas medidas de intervención como la inclusión de

más tirantes de madera en zonas con mayor deformación local, reforzamiento con contrafuertes de altura completa, etc.



Referencias

Abaqus CAE (2013). Software for finite element analysis Abaqus/Complete Abaqus Environment, Version 6.12. Dassault Systèmes. Vélizy-Villacoublay.

Aguilar R., Ramos L. F., Torrealva D., Chácara C. (2013) “Experimental modal identification of an existent earthen residential building”, In Proc. of the 5th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC 2013), Guimaraes, Portugal.

Aguilar R., Sovero K., Martel C., Chácara C., Boroschek R. (2013) “Advanced techniques for the seismic protection of existing heritage”, *BiT La Revista Técnica de la Construcción*, 90:58-61

Allemang J. R. (2003), “The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*”, 37(8):14-23.

Binda, L., & Saisi, A. (2001). State of the art of research on historic structures in Italy. *Dept. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy*.

Castillo, M.; Kuon, E. & Aguirre, C. (2012) *Saint Peter the Apostle of Andahuaylillas: tour guide*. Peru, Cusco: Association Jesús Obrero

De Luca A., Giordano A. & Mele E. (2004) “A simplified procedure for assessing the seismic capacity of masonry arches”, *Engineering Structures*, 26 (13), 1915-1929.

DIANA (2013). Displacement method Analyser, Version 9.4.4. TNO DIANA BV. Delft

FLIR T420 & T440 (2012) Consulted September, 2015, www.flir.com

Fonseca F., D'Ayala D. (2012) “Seismic assessment and retrofitting of Peruvian earthen churches by means of numerical modelling”, In Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Spain.

Giuffre A., Carocci C. (1996) "Vulnerability and mitigation in historical centers in seismic areas: Criteria for the formulation of a "practice code". In Proc. of the 11th World Conference on Earthquake Engineering. Elsevier: Acapulco, Mexico.

Houben H., Guillaud H. & Hall B. B. (1994) "Earth construction: a comprehensive guide", Intermediate Technology Publications, London, UK.

Información referente a termografía infrarroja: ¿Cómo funciona? Consultada Noviembre, 2015, <http://www.silentsentinel.com/thermal-imaging-cameras.html>, sitio web de Silent Sentinel

Información referente a la iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas: Pinturas murales. Consultada Noviembre, 2015, <http://www.andahuaylillas.com>, sitio web del proyecto social en Andahuaylillas

Lourenco P. B. (2009), "Recent advances in masonry structures: Micromodelling and homogenization". In Multiscale Modeling in Solid Mechanics: Computational Approaches. ed. U. Galvanetto & M.H. Ferri Aliabadi, Imperial College Press, 251-294, London, UK.

Mele E., De Luca A. & Giordano A. (2003) "Modelling and analysis of a basilica under earthquake loading", *Journal of Cultural Heritage*, 4(4), 355-367.

NTE.010 (2006). "Reglamento de edificaciones del Perú, Norma técnica E.010: Madera" (Peruvian design code for wood structures). SENCICO: Lima, Peru.

Spodek, J., & Rosina, E. (2009). Application of infrared thermography to historic building investigation. *Journal of Architectural Conservation*, 15(1), 65-81.

Tarque N. (2011), "Numerical modelling of the seismic behaviour of adobe buildings" PhD. Thesis, Università degli Studi di Pavia: Pavia, Italy.

Tolles, E. L., Kimbro, E. E., & Ginell, W. S. (2003). *Planning and engineering guidelines for the seismic retrofitting of historic adobe structures*. Getty Publications.

Van der Pluijm R. (1999), “Out of plane bending of masonry: Behaviour and strength” PhD thesis, Eindhoven University of Technology: Eindhoven, Netherlands.

Vargas, J.; Aguilar, R.; Gonzales, M. & Briceño, C. (2013) Structural intervention in Saint Peter the Apostle Church of Andahuaylillas in Cusco, Peru. *In: Proceedings of the 13th Ibero-American Seminar on Earthen Architecture and Construction (XIII SIACOT)*, Valparaíso, Chile.

