

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS
DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES:

Alvaro Gustavo Oré Espinoza

Percy Enrique Suárez Cabellos

ASESOR:

Dr. César Javier Chácara Espinoza

Lima, agosto, 2021

RESUMEN

En el Perú, existe un gran número de edificaciones históricas que han sido afectadas principalmente por eventos sísmicos. Por ello, aparece la necesidad de conservar el patrimonio arquitectónico ya que estas construcciones representan un valor cultural y económico para el país. Para lograr preservarlas, se necesitan métodos adecuados de intervención estructural y no únicamente de restauración arquitectónica. En este sentido, el modelado numérico es un procedimiento indispensable para comprender la respuesta estructural y proponer una adecuada intervención a las construcciones, especialmente las históricas.

Se debe considerar que la simulación de la respuesta de este tipo de construcciones es un proceso complejo que requiere de información esencial como la documentación histórica para conocer su sistema estructural y su proceso constructivo. Además de esta investigación, es necesario planificar una campaña experimental para la detección de las anomalías estructurales y ejecutar un levantamiento geométrico para conocer la geometría de los elementos estructurales, y elaborar una correcta modelación. Además, en esta campaña, es importante realizar ensayos no destructivos para determinar las propiedades de los materiales y asignarlas al modelo. También, mediante estos ensayos se identifican los parámetros dinámicos (frecuencias, formas modales y coeficientes de amortiguamiento) de las construcciones los cuales ajustan la respuesta estructural del modelo numérico.

Esta investigación presenta como finalidad calibrar un modelo basado en el método de elementos finitos de la iglesia de la Compañía de Jesús, un monumento histórico de mampostería de piedra ubicado en la ciudad de Cusco, a partir de los resultados obtenidos en una campaña experimental. La investigación está dividida en cuatro etapas: La primera es la recopilación histórica de información referente al sistema constructivo e intervenciones a través del tiempo en la iglesia. La segunda muestra los resultados de la campaña experimental para el levantamiento geométrico de la iglesia, la detección de anomalías y la obtención de sus parámetros dinámicos. La tercera es la creación de un modelo numérico en elementos finitos a partir del levantamiento geométrico con el escáner laser terrestre y la fotogrametría aérea. El último paso consiste en un proceso de calibración mediante un análisis de sensibilidad y un procedimiento de optimización para mejorar la confiabilidad de los resultados del modelo. Los resultados finales indicaron que el modelo numérico representa aceptablemente la respuesta de la iglesia obtenida mediante ensayos no destructivos.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiéramos expresar nuestro mayor agradecimiento al Dr. César Chácara por su asesoría constante, por su invaluable apoyo personal y profesional durante el tiempo de la realización de la tesis. Además, agradecemos al Dr. Rafael Aguilar por brindarnos la oportunidad de participar en el proyecto de investigación.

Queremos brindar un especial agradecimiento a nuestros compañeros del grupo Engineering and Heritage, en especial a Rony Reátegui y Carlos Yaya ya que su apoyo fue relevante para la culminación de la tesis.

Alvaro Oré Espinoza

Quisiera agradecer a mis padres Carlos y Nora y a mis hermanas Belén y Karla por su amor incondicional y ser una fuente inagotable de motivación.

Agradezco a cada uno de mis familiares quienes me han ayudado a culminar satisfactoriamente mis estudios y con quienes he compartido gratos momentos.

Quisiera expresar un gran agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica del Perú por apoyarme con una beca integral durante mis estudios de pregrado.

A mis profesores quisiera brindarles un especial reconocimiento por sus enseñanzas y valiosos consejos. Asimismo, a mis queridos amigos de la universidad y del intercambio estudiantil en Porto por los grandes e inolvidables momentos de felicidad.

Percy Suárez Cabellos

Quiero agradecer a mi familia por ser el soporte emocional durante la carrera universitaria, especialmente a mi madre Bertha por su cariño y apoyo incondicional.

A los profesores universitarios que guiaron mi camino no solo mediante el conocimiento, sino también por los valores inculcados.

Agradezco cada palabra de aliento y cada consejo que me dieron mis amigos y a todo aquel que estuvo a mi lado desde la concepción de la tesis hasta su finalización.

ÍNDICE

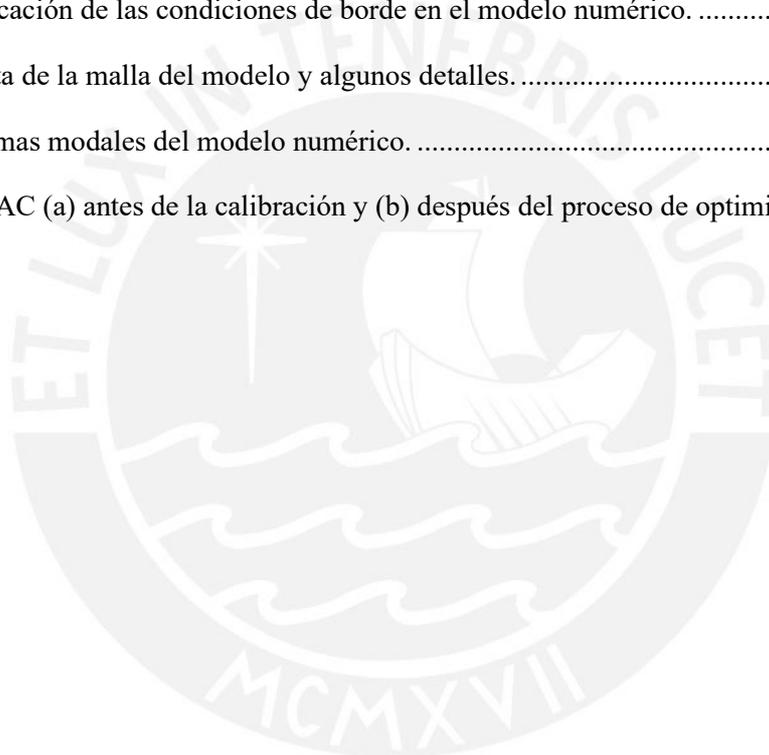
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	2
1.2 Antecedentes	2
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodología	4
1.5 Organización	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Introducción	8
2.2 Técnicas no destructivas.....	9
2.2.1 Ensayos geomáticos	10
2.2.2 Termografía Infrarroja.....	16
2.2.3 Ensayos de identificación modal.....	19
2.3 Modelado numérico de la mampostería	25
2.3.1 Macro-modelado	26
2.3.2 Micro-modelado simplificado	28
2.3.3 Micro-modelado detallado	33
2.4 Propiedades mecánicas de la mampostería y el relleno.....	34
CAPÍTULO 3. IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS	40
3.1 Información general	41
3.1.1 Ubicación y composición.....	41
3.1.2 Reseña histórica.....	41
3.1.3 Antecedentes de las intervenciones.....	42
3.2 Sistema constructivo	46
3.2.1 Descripción arquitectónica.....	46
3.2.2 Descripción estructural.....	48
CAPÍTULO 4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL IN-SITU.....	50
4.1 Levantamiento geométrico.....	51
4.2 Inspección de anomalías.....	52
4.3 Ensayos de termografía infrarroja	56
4.4 Ensayo de vibración ambiental.....	57
CAPÍTULO 5. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	59
5.1 Modelado numérico.....	60
5.2 Análisis de sensibilidad.....	67
5.3 Calibración del modelo	69
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	73
6.1 Conclusiones	74
6.2 Trabajo futuro.....	75
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	76
CAPÍTULO 8. ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Daños ocurridos en iglesias peruanas debido a la ocurrencia de sismos (a) La Catedral de Arequipa en el momento del sismo del 2001 (Torrealva y Blanco, 2002), (b) daños en la nave de la Catedral de Ica (Ciocci et al., 2017).....	3
Figura 1.2 Metodología propuesta para la evaluación estructural de la iglesia.....	6
Figura 2.1 Información requerida para la evaluación estructural y técnicas de investigación correspondientes (Adaptado de Binda et al., 2000).....	10
Figura 2.2 Vistas de reconstrucción en 3D de iglesias en realidad aumentada de arquitectura gótica (Luna et al., 2019).....	11
Figura 2.3 Modelo 3D texturizado con las posiciones de la cámara y sus respectivas orientaciones en la excavación de la abadía de Boudelo (De Reu et al., 2013).	13
Figura 2.4 Implementación de tecnologías de detección (a) mallas 3D generadas, (b) modelo texturizado 3D y (c) ortofoto de la cúpula del Palacio de Dolmabahce (Yastikli, 2007).....	15
Figura 2.5 Nube de puntos generada por (a) escáner laser terrestre, (b) fotogrametría aérea y (c) la combinación de ambas nubes de puntos (Balsa Barreiro y Fritsch, 2017).....	16
Figura 2.6 Vista externa de un edificio e información infrarroja (Lehmann et al., 2013).....	17
Figura 2.7 Termogramas de la torre de campanario y fachada principal de la iglesia Santa Bárbara (Ruiz Valero et al., 2019).....	19
Figura 2.8 Grafico de la ubicación de acelerómetros en el techo de la Basílica de los Catorce Santos Auxiliares, en rojo los acelerómetros de referencia (Compan et al., 2017).	21
Figura 2.9 Equipamiento usado para los ensayos de vibración ambiental: (a) acelerómetros uniaxiales y (b) tablero de adquisición de datos (Foti et al., 2012).....	22
Figura 2.10 (a) Gráfico de densidad espectral de potencia del método EFDD, (b) Diagrama de estabilización del método SSI (Adaptado de Zanotti, 2015).....	24
Figura 2.11 (a) Formas modales experimentales determinadas con OMA, (b) formas modales determinadas con el FEM (Adaptado de Aguilar et al., 2015).....	25
Figura 2.12 Estrategias de modelo para estructuras de mampostería: (a) micro-modelo detallado, (b) micro-modelo simplificado, (c) macro-modelo (Adaptado de Lourenço, 2002).	26
Figura 2.13 Discretización para macro-elementos en muros de mampostería con diferentes tamaños de malla (Caliò et al., 2012).	28
Figura 2.14 Principales esfuerzos en compresión representados en una malla deformada para desplazamientos horizontales (P. B. Lourenço y Rots, 1997).	30
Figura 2.15 Vistas del modelo DEM de la mezquita Mustafa Pasha (Çaktı et al., 2016).	31
Figura 2.16 Modelo de un arco de mampostería semicircular relleno con partículas circulares (Adaptado de Thavalingam et al., 2001).	32
Figura 2.17 Modos de falla para condiciones de carga fuera de plano (Tiberti y Milani, 2020b). ..	34

Figura 2.18 Elevación de muros que muestran dos tipos de construcciones: (a) construcción de mampostería irregular (b) construcción de mampostería regular (Adaptado de Maccarini et al., 2018).	35
Figura 2.19 Clasificación de la mampostería de piedra según su sección transversal: (a) dos hojas bien conectadas, (b) dos hojas parcialmente conectadas, (c) dos hojas sin conexión y (d) tres o más hojas (Binda et al. 1997).	35
Figura 2.20 Tipología del relleno encontrado en el extradós de las bóvedas de España (Ramos, 2015).	38
Figura 2.21 Disposición habitual de los rellenos: a) Relleno rígido y granular y b) Relleno rígido y aligerado (Ramos, 2015).	39
Figura 3.1 Fotografías de la iglesia de la Compañía (a) fachada de la iglesia (b) altar mayor.	41
Figura 3.2 Archivo fotográfico de la reconstrucción de los campanarios de la iglesia por el sismo de 1950 (a) apuntalamiento y andamiaje (b) enumeración de bloques (c) reconstrucción.	43
Figura 3.3 Intervenciones entre los años 1986 y 1989 en la planta de techo de la iglesia Compañía de Jesús (información adaptada de INC-Cusco, 1990).	45
Figura 3.4 Vista en corte de las intervenciones realizadas entre 1986 y 1989 (información adaptada de INC-Cusco, 1990).	45
Figura 3.5 Detalle arquitectónico de la fachada de la iglesia de la Compañía (Caja Municipal de Cusco, 2013).	47
Figura 3.6 Diagrama de la ubicación proyectada del <i>Amarucancho</i> bajo la Iglesia de la Compañía (Beltrán Caballero, 2013).	48
Figura 3.7 Planta del complejo de la Compañía de Jesús	49
Figura 4.1 Nube de puntos híbrida de (a) la fotogrametría aérea y (b) el escaneo láser terrestre. ...	52
Figura 4.2 Leyenda de anomalías encontradas en la iglesia.	52
Figura 4.3 Diferentes anomalías localizadas en el (a) interior y la (b) fachada de la iglesia.	53
Figura 4.4 (a) Identificación del patrón de agrietamiento de la iglesia y (b) Grietas en elementos importantes de la iglesia en la torre del campanario y la portada retablo.	54
Figura 4.5 Manchas en elementos de la iglesia debido a la humedad: (a) sacristía, (b) torre del campanario (c) arco de la nave y (d) bóveda de la Capilla de Loreto.	55
Figura 4.6 Presencia de patologías biológicas en la cara exterior del muro de la Capilla de Loreto, (a) decoloración y (b) erosión en la piedra.	55
Figura 4.7 Identificación de anomalías estructurales en el ensayo de termografía infrarroja activa: (a) grietas verticales en un bloque de piedra, (b) abombamiento del yeso de una pared causado por la presencia de humedad.	56
Figura 4.8 Identificación de anomalías estructurales en el ensayo de termografía infrarroja inactiva: (a) fachada exterior de la torre campanario, (b) grietas y desprendimiento de un pilar, (c) intradós de la bóveda de crucería de la nave principal.	57

Figura 4.9 Ensayo de identificación modal: (a) Ubicaciones de los acelerómetros para el ensayo de vibración ambiental, (b) Acelerómetros utilizados.	57
Figura 4.10 Gráfica de densidad espectral obtenida con el método EFDD.....	58
Figura 4.11 Formas modales, valores de frecuencias y coeficientes de amortiguamiento del ensayo de vibración ambiental para el: (a) primer modo, (b) segundo modo y (c) tercer modo.....	58
Figura 5.1 Sección típica de los nervios barrida en las líneas guía de la bóveda de crucería y plementos generados mediante solevación.....	61
Figura 5.2 (a) Elementos de la bóveda de crucería y (b) Vista inferior de la bóveda de crucería....	63
Figura 5.3 Perspectiva axométrica del modelo numérico con la identificación de los diferentes materiales.	63
Figura 5.4 Ubicación de las condiciones de borde en el modelo numérico.	64
Figura 5.5 Vista de la malla del modelo y algunos detalles.....	65
Figura 5.6 Formas modales del modelo numérico.	66
Figura 5.7 FMAC (a) antes de la calibración y (b) después del proceso de optimización.	72



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas lineales de la mampostería de piedra irregular, regular y ladrillo cocido.	36
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas lineales del relleno.	39
Tabla 5.1 Guías para el modelado de las bóvedas de cañón con lunetos y su modelo 3D.....	60
Tabla 5.2 Guías para el modelado de las bóvedas de arista y su modelo 3D.....	61
Tabla 5.3 Guías para el modelado de las bóvedas vaída y su modelo 3D.....	61
Tabla 5.4 Guías para el modelado de las bóvedas de crucería y su modelo 3D.....	62
Tabla 5.5 Propiedades mecánicas lineales de los materiales del modelo numérico.....	64
Tabla 5.6 Comparación entre las frecuencia experimental y numérica del modelo inicial.....	67
Tabla 5.7 Modificación de los valores de la rigidez cortante del elemento de interface en el modelo numérico.....	68
Tabla 5.8 Valores de frecuencia (Hz) y MAC para las distintas combinaciones de la rigidez cortante del elemento de interface en el modelo numérico.....	68
Tabla 5.9 Comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas con el valor óptimo de la rigidez cortante del elemento de interface.....	68
Tabla 5.10 Modificación de los valores de la rigidez normal del elemento de interface en el modelo numérico.....	68
Tabla 5.11 Valores de frecuencia (Hz) y MAC para las distintas combinaciones de la rigidez normal del elemento de interface en el modelo numérico.....	69
Tabla 5.12 Comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas con el valor óptimo de la rigidez normal del elemento de interface.....	69
Tabla 5.13 Valores máximos y mínimos de los módulos de elasticidad y la profundidad equivalente de la base.....	70
Tabla 5.14 Frecuencias obtenidas de las combinaciones establecidas.....	71
Tabla 5.15 Resultados obtenidos de los parámetros más influyentes en el proceso de calibración.....	71
Tabla 5.16 Valores de las propiedades de los materiales después del proceso de optimización.....	71
Tabla 5.17 Comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas y MAC después del proceso de optimización.....	72



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En las últimas décadas, la conservación y restauración del patrimonio histórico adquirieron mayor relevancia, ya que su deterioro o destrucción es cada vez más recurrente, y esto suprimiría parte de nuestro legado e identidad. Los monumentos históricos se han deteriorado progresivamente debido a diversos factores como físicos, mecánicos, biológicos, químicos, entre otros. Además, estas son estructuras complejas que necesitan un enfoque adecuado para entender su comportamiento ante fenómenos naturales como los sismos. El Consejo Internacional de Monumentos y Sitios, ICOMOS por sus siglas en inglés, presentó estrategias para estudiar los monumentos históricos. Los primeros parámetros regulatorios para su intervención se propusieron el siglo pasado en los documentos internacionales de la Carta de Atenas (ICOMOS, 1931) y la Carta de Venecia (ICOMOS, 1964). Luego, en las Recomendaciones para el Análisis, Conservación y Restauración estructural del Patrimonio Arquitectónico (ICOMOS, 2003) se establecieron principios para salvaguardar la estructura como mantener las características de compatibilidad de materiales, reversibilidad e intervención mínima. Estas recomendaciones dejaron en evidencia que es necesario generar un amplio conocimiento que involucre la participación de distintas ramas de estudio en la conservación del patrimonio, siendo una de ellas la Ingeniería Civil.

Algunos de los monumentos más importantes son las iglesias antiguas de mampostería. Estas edificaciones constituyen arquetipos únicos que no encajan en ningún esquema estructural convencional. Además, son altamente susceptibles a sufrir daño con la ocurrencia de eventos sísmicos ya que fueron construidas sin el uso de códigos de diseño. Según Betti y Vignoli (2011), cada iglesia histórica presenta características particulares por la época en que se construyeron; por tanto, conocer su respuesta estructural es un trabajo complicado ya que se requiere una amplia investigación. Una de las formas de analizar la respuesta de estas estructuras es mediante la construcción de un modelo numérico lo suficientemente cercano a la realidad que permita representarlo adecuadamente. Para ello, se necesita modelarlo correctamente con la información geométrica de sus elementos estructurales, comprender el comportamiento de sus materiales, las condiciones de su entorno y definir las cargas que simulen eventos sísmicos. Esto permite realizar una evaluación estructural y conocer las medidas de seguridad sísmica necesarias para salvaguardar la vida de las personas y evitar daños en las construcciones.

1.2 Antecedentes

El Perú posee un legado inmenso de construcciones históricas y sitios arqueológicos que van desde construcciones de adobe en la costa hasta las construcciones de mampostería en la región andina. Además, el Perú es un país altamente sísmico ya que se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico. Debido a su ubicación geográfica, existe un riesgo latente para estas estructuras. Como se

observa en la Figura 1.1a, el peligro sísmico, al que muchas iglesias históricas están expuestas, pone en riesgo su valor cultural, así como la vida de las personas. Esto justifica la necesidad de realizar un mayor número de investigaciones relacionadas al estudio del comportamiento sísmico, la intervención y monitoreo de las iglesias con la finalidad preservarlas.

Algunos estudios recientes muestran que es necesario poner en práctica metodologías y usar tecnologías modernas para comprender el comportamiento sísmico de las iglesias. Entre los estudios más recientes están Ciocchi et al. (2017) en la Catedral de Ica, la evaluación estructural de la iglesia de Kuñotambo por Karanikoloudis y Lourenço (2018) y el análisis sísmico de la iglesia de San Juan Bautista de Huaró por Aguilar et al. (2019). Estas investigaciones aplicaron desde ensayos no destructivos para caracterizar al material y obtener la geometría de la iglesia hasta programas computacionales avanzados de modelos numéricos. Estos programas permiten predecir el comportamiento estructural de las construcciones patrimoniales con un mayor grado de confiabilidad e identificar las zonas que presentan concentración de daño. Mediante el uso de estos programas, se identificó que las bóvedas de las iglesias son elementos particulares de las construcciones históricas que han sufrido daños importantes por un inadecuado diseño y proceso constructivo. En el Perú, los eventos sísmicos han demostrado que las bóvedas son elementos estructurales sumamente vulnerables y propensos a agrietarse y destruirse como ocurrió en la Catedral de Ica en el año 2007 (ver Figura 1.1b). Por lo tanto, es importante comprender la complejidad de estos elementos para realizar un adecuado análisis estructural de las iglesias.



Figura 1.1 Daños ocurridos en iglesias peruanas debido a la ocurrencia de sismos (a) La Catedral de Arequipa en el momento del sismo del 2001 (Torrealva y Blanco, 2002), (b) daños en la nave de la Catedral de Ica (Ciocchi et al., 2017).

La ciudad de Cusco posee un legado histórico y un patrimonio arquitectónico influenciado por la manifestación arquitectónica del Imperio Inca y la influencia de la cultura española. Ambas generaron una combinación cultural que potenció el desarrollo urbano y artístico otorgando un valor excepcional a las construcciones. Debido a que la ciudad del Cusco fue declarada como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (1983) y capital cultural del Perú en la Constitución de 1993, es

sumamente importante preservar sus construcciones históricas. Entre ellas está la iglesia de la Compañía de Jesús la cual es una de las iglesias más grandes y antiguas de la ciudad. Esta iglesia contiene valor cultural inmenso por su arquitectura, sus elementos artísticos y su relevancia histórica.

1.3 Objetivos

Esta tesis presenta como objetivo calibrar un modelo numérico de la iglesia de la Compañía de Jesús a través de la investigación histórica y el uso de ensayos no destructivos.

Objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica de los ensayos no destructivos, sobre el modelado numérico y las propiedades mecánicas en las construcciones históricas de mampostería,
- Describir las principales características estructurales y arquitectónicas y el estado de conservación de la iglesia de la Compañía de Jesús,
- Determinar el estado de conservación actual de la iglesia mediante la aplicación de ensayos no destructivos,
- Identificar las propiedades más influyentes en el comportamiento dinámico del modelo numérico y estimar sus valores óptimos mediante un análisis de sensibilidad y procesos de optimización.

1.4 Metodología

En esta investigación, la metodología propuesta presenta como base las recomendaciones internacionales para el análisis, conservación y restauración estructural del patrimonio arquitectónico, dado por ICOMOS (2003). Esta metodología se centra en la recolección de datos y la predicción del comportamiento estructural como parte esencial de la preservación de monumentos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se aprecian las actividades realizadas para las cuatro etapas del estudio, las cuales serán explicadas a continuación.

Revisión de literatura:

Se realizó una investigación de las principales técnicas de evaluación no destructiva en las construcciones históricas como los ensayos geomáticos, la termografía infrarroja y los ensayos de identificación modal; asimismo, se investigó sobre los distintos enfoques de modelado numérico en la mampostería. También, se realizó una recopilación bibliográfica de las propiedades mecánicas de la mampostería de piedra y el material de relleno en el extradós de las iglesias.

Documentación histórica:

Luego, se realizó una búsqueda de información de la iglesia de la Compañía de Jesús como su historia, sus antecedentes ante eventos sísmicos e intervenciones de restauración. Además, se incluyó una descripción del sistema constructivo de la iglesia, así como sus componentes estructurales y arquitectónicos.

Campaña experimental:

La información obtenida de las investigaciones resultó útil para elaborar una estrategia de exploración del campo y ejecutar ensayos no destructivos. En la campaña experimental, se evaluó el estado actual de la iglesia mediante una inspección visual, en la que se detectaron las anomalías en las partes visibles de la iglesia. Adicionalmente, en la iglesia se realizaron evaluaciones como el ensayo de termografía infrarroja y ensayo de vibración ambiental. Además, se realizó el levantamiento geométrico de la iglesia utilizando el escáner laser terrestre y la fotogrametría aérea.

Calibración del modelo:

Con la información de la nube de puntos híbrida del escaneo láser terrestre y la fotogrametría aérea, se construyó un modelo numérico de la iglesia. En este modelo, se asignaron las propiedades mecánicas de los materiales obtenidas de la información de literatura. Además, se establecieron las condiciones de contorno en la base y los elementos de interface para simular las construcciones colindantes al modelo.

Con los resultados obtenidos a partir de los ensayos de vibración ambiental (frecuencias naturales y las formas modales de vibración), se realizó la calibración del modelo numérico de la iglesia para brindarle un mayor grado de confiabilidad. Primero, se determinaron los parámetros con mayor influencia del modelo con un análisis de sensibilidad. Luego, se realizó un proceso de calibración del modelo de elementos finitos mediante el método de Douglas Reid para obtener los valores óptimos de los parámetros identificados y reducir la diferencia en la comparación de la respuesta experimental y la respuesta numérica.

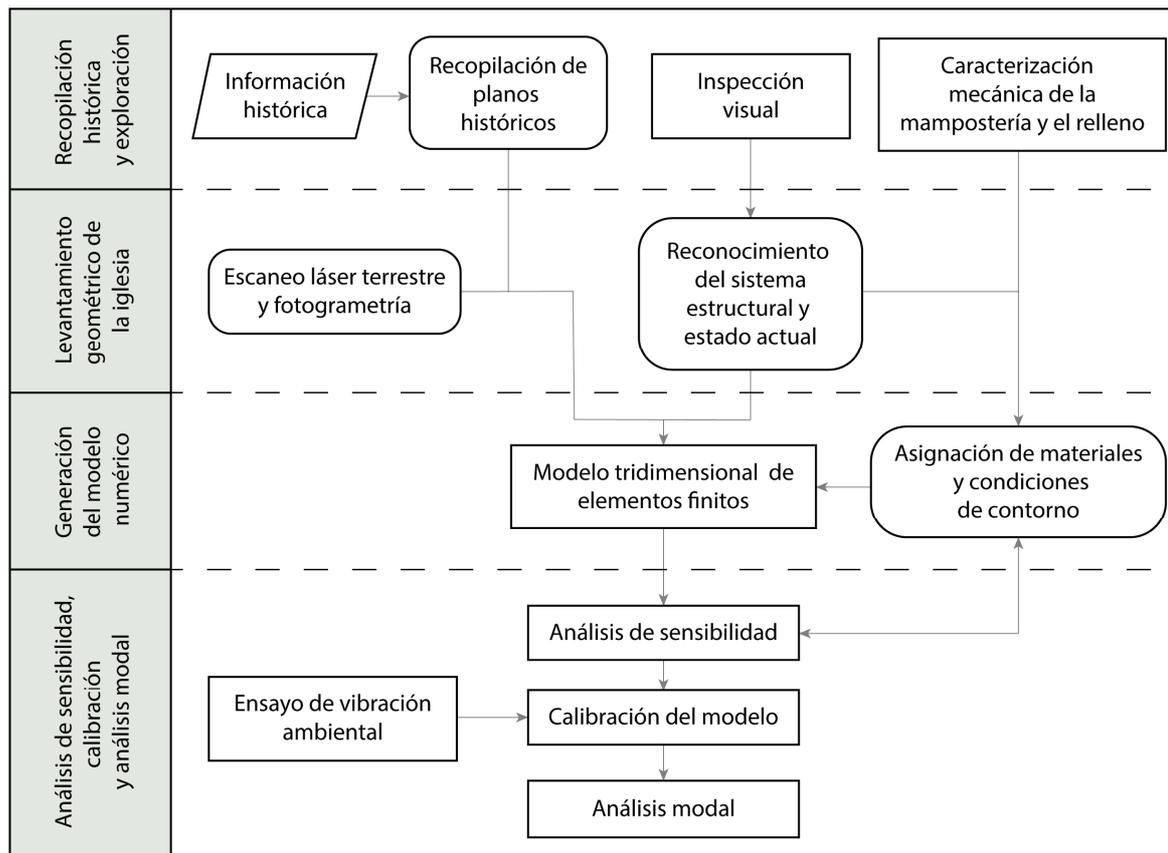


Figura 1.2 Metodología propuesta para la evaluación estructural de la iglesia.

1.5 Organización

Esta tesis se divide en seis capítulos estructurados de la siguiente manera: El **primer capítulo** contiene la motivación, los antecedentes, la justificación, los objetivos, la metodología y la organización de la tesis. El **segundo capítulo** aborda el marco teórico y el estado del arte de la investigación. Se describen las técnicas no destructivas, los enfoques de modelado numérico y se resumen las propiedades mecánicas de la mampostería de piedra y el material de relleno. El **tercer capítulo** incluye información de la Iglesia de la Compañía de Jesús de Cusco. Se presenta una revisión histórica de la iglesia, antecedentes de intervenciones y su sistema constructivo. El **cuarto capítulo** presenta los resultados de la campaña experimental como el levantamiento geométrico de la iglesia, la detección de anomalías, el ensayo de termografía infrarroja y el ensayo de vibración ambiental. El **quinto capítulo** presenta la generación del modelo numérico y el proceso de calibración. El **sexto capítulo** aborda las conclusiones de la investigación y recomendaciones para trabajos futuros.



**CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO
DEL ARTE**

2.1 Introducción

Lourenço (2006) mencionó que el rol de la ingeniería dentro de la preservación de construcciones históricas es de vital importancia durante todas las etapas de cualquier proyecto de restauración. Además, se debe considerar que el tratamiento que se le debe otorgar a las estructuras históricas es distinto de las construcciones modernas. Para estudiar los monumentos históricos, se deben involucrar distintas ramas de estudio que se complementan entre sí. Por ejemplo, un ingeniero que evalúa el estado actual de una construcción histórica debe relacionarse con el equipo de arqueólogos, historiadores y arquitectos para que lo ayuden a comprender el proceso histórico de la misma (Lourenço, 2006).

Para generar una evaluación adecuada de las estructuras históricas es necesario conocer a detalle sus características. Por ello, primero se tiene que recopilar información sobre los procesos constructivos de la estructura para entender mejor su comportamiento. Posteriormente, se pueden aplicar diversos ensayos que van desde la medición de la resistencia con ensayos de aplicación directa hasta la generación de correlaciones indirectas que permiten conocer las propiedades del material y la caracterización geométrica de la construcción (Binda y Saisi, 2005). Particularmente, en las construcciones de mampostería es de vital importancia analizar sus procesos constructivos, la composición de sus elementos y sus propiedades mecánicas.

Luego de obtener esta información, se puede modelar la construcción. El modelado estructural representa un sistema idealizado que contribuye a la comprensión y predicción del comportamiento sísmico de las estructuras. Este presenta una alta complejidad ya que depende de varios factores como la geometría de la estructura, las conexiones entre los elementos estructurales y no estructurales, la rigidez de los diafragmas y las solicitaciones del edificio (Lourenço et al., 2011).

Respecto a las construcciones históricas, existen tipologías estructurales con una complejidad geométrica difícil de representar como es el caso de elementos curvos de mampostería, como arcos, domos y bóvedas (Tralli et al., 2014). Por otro lado, es importante aplicar una estrategia adecuada de modelado y asignar adecuadamente las propiedades mecánicas de los materiales para obtener los resultados deseados. Esta tarea no resulta ser tan fácil, ya que la mampostería es un material heterogéneo y presenta un comportamiento mecánico particular.

En este capítulo se presenta las técnicas de evaluación no destructivas, las estrategias de modelado numérico de estructuras y la caracterización de las propiedades mecánicas de la mampostería de piedra y rellenos.

2.2 Técnicas no destructivas

La idealización de una construcción histórica de mampostería debe considerar diferentes factores como su heterogeneidad, comportamiento anisótropo y la sensibilidad a la orientación de las cargas. Por ello, representar la geometría y caracterizar sus propiedades mecánicas resulta ser una tarea complicada, pero a la vez necesaria para la generación de un modelo adecuado (Asteris et al., 2019). Con respecto a las construcciones patrimoniales, Hum-Hartley (1978) fue la pionera en la aplicación de este enfoque y propuso el uso de ensayos no destructivos para las estructuras patrimoniales, ya que uno de los principios de la conservación del patrimonio es mantener al mínimo la perturbación que se pueda generar en las intervenciones.

Actualmente, las técnicas de evaluación deben seguir la metodología propuesta por ICOMOS (2003) la cual respeta la autenticidad y el valor cultural de las edificaciones históricas. Esta metodología incluye un proceso de adquisición de datos, evaluación estructural, diagnóstico y seguridad y medidas de intervención. La adquisición de datos está directamente relacionada con la investigación histórica, la identificación del sistema estructural y estado actual y la caracterización de materiales. Binda et al. (2000) presentaron distintas evaluaciones in situ y de laboratorio sobre la caracterización mecánica en estructuras históricas de mampostería y las relacionó con la información requerida para los procedimientos de evaluación en estructuras, como se muestra en la Figura 2.1. Se puede observar que con el avance tecnológico se desarrollaron herramientas que permiten evaluar características de las construcciones históricas para conocer su geometría, evaluar el estado actual, monitorear cambios y caracterizar las propiedades de los materiales.

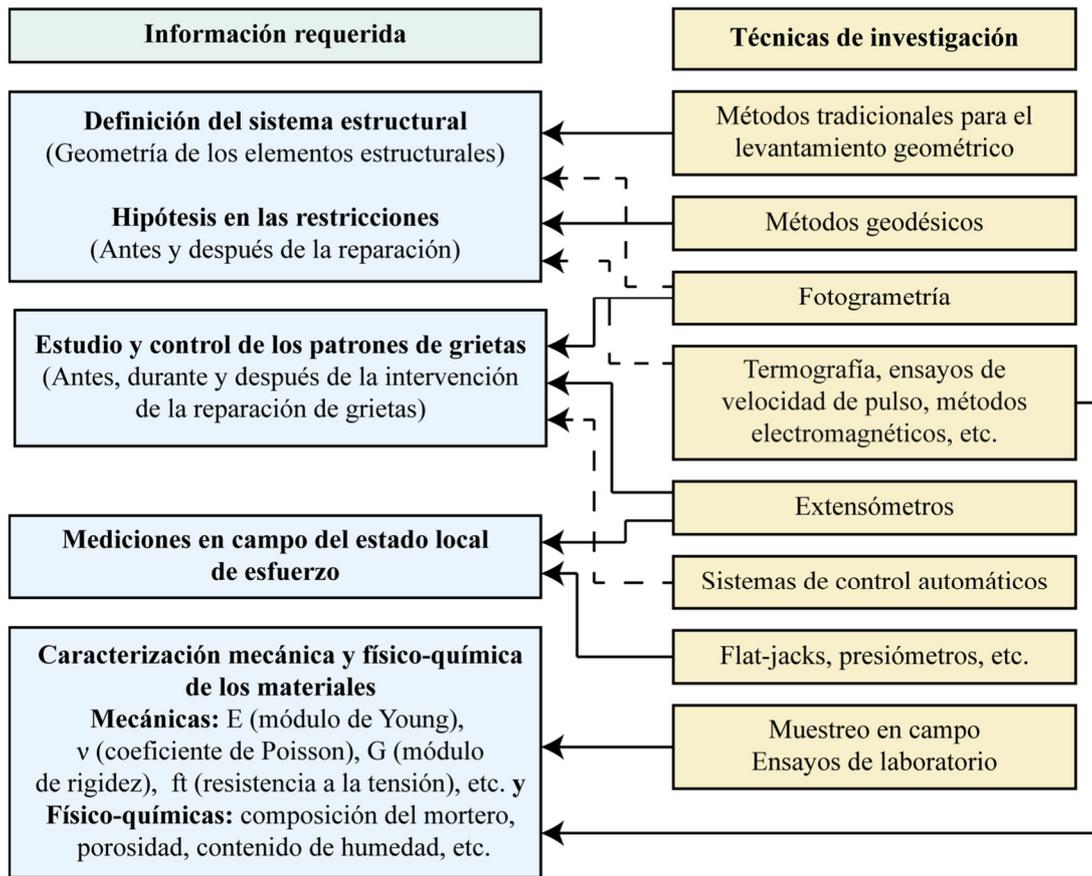


Figura 2.1 Información requerida para la evaluación estructural y técnicas de investigación correspondientes (Adaptado de Binda et al., 2000).

2.2.1 Ensayos geomáticos

Los ensayos geomáticos son técnicas no-destructivas que registran y procesan datos para la reconstrucción de los objetos en forma de imágenes o sólidos en 3D. Debido al desgaste y cambios que sufren las construcciones históricas y sitios arqueológicos por diferentes factores como fenómenos naturales, es importante poseer un registro digital para su preservación. Pieraccini et al. (2001) indicaron que existe un gran potencial entre el patrimonio y la digitalización 3D para coleccionar archivos, poseer réplicas precisas de obras de arte, realizar reconstrucciones digitales y monitorear el patrimonio. En la actualidad, la geomática sigue brindando herramientas útiles con objetivo académico, por ejemplo, la aplicación de realidad virtual y realidad aumentada para la reconstrucción de espacios y monumentos históricos a través de modelos en 3D (Luna et al., 2019), como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Vistas de reconstrucción en 3D de iglesias en realidad aumentada de arquitectura gótica (Luna et al., 2019)

De acuerdo a la instrumentación y recursos disponibles, existen cuatro técnicas para la digitalización de monumentos, i) técnicas empíricas, ii) técnicas topográficas, iii) técnicas de escaneo láser y iv) fotogrametría (Pavlidis et al., 2007). Las tecnologías geomáticas, que se caracterizan por poseer una mayor precisión cuando se genera información sobre los monumentos, más conocidas son el escáner láser terrestre (TLS) y la fotogrametría.

El escaneo láser terrestre (TLS, por sus siglas en inglés Terrestrial Laser Scanning) es una técnica que permite obtener de manera rápida y precisa la geometría espacial en un objeto o superficie usando la detección de luz para medir distancias entre el instrumento y el objeto (Gordon y Toth, 2008). A pesar de que se identificaron limitaciones como la cantidad de información que se puede procesar, el desarrollo de herramientas y algoritmos facilitan cada vez más este proceso (Riveiro et al., 2016). El uso de este método suele ser tedioso; sin embargo, su utilidad para escanear elementos arquitectónicos, fachadas de edificios o sitios patrimoniales son muestra de la conveniencia de esta tecnología (Riveiro et al., 2016).

Para aplicar esta técnica en la construcción de modelos 3D de edificaciones y sitios patrimoniales se considera la adquisición y el procesamiento de datos. La adquisición de datos consiste en colocar el escáner láser en posiciones estratégicas para tomar las distancias de puntos y sus respectivos ángulos de deflexión en las superficies de la estructura u objeto. El escáner gira a altas velocidades registrando una cantidad importante de información que en conjunto conforma una nube de puntos de un registro. Posteriormente, las mediciones se unen en un sistema único de referencia para poseer una nube de puntos de toda la estructura (Gordon y Toth, 2008). En la etapa de procesamiento de datos, la información de la nube de puntos es usada para generar modelos digitales de superficie y modelos volumétricos 3D (Lubowiecka et al., 2009). Primero, se realiza una limpieza de puntos de la nube que no contribuyen a la conformación del modelo como datos redundantes, obstáculos externos o ruido. Con una nube de puntos optimizada, se procede a generar un modelo digital de superficie con métodos como la triangulación. Este modelo puede ser mejorado con la etapa de post-procesamiento, por ejemplo, con imágenes o texturas de los objetos sirven para crear modelos de superficie

fotorrealistas y pueden dar como producto geometrías nítidas y ortofotos (Riveiro et al., 2016). Con estos productos es posible generar archivos digitales, planos de las construcciones históricas, visualización para realidad virtual y realidad aumentada, entre otros.

Por otro lado, para crear un modelo de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés Finite Element Method) es recomendable el uso previo de un software CAD que pueda proporcionar un modelo 3D simplificado y evite problemas en la generación de mallas (Laefer et al., 2011). También es posible construir modelos arquitectónicos completos en el formato de IFC (Industry Foundation Classes) mediante un software de reconocimiento de objetos aplicado en CAD (Arayici, 2007).

En las aplicaciones del TLS existen diferentes trabajos relacionados a la documentación arquitectónica y la identificación de patologías. Armesto-González et al. (2010) utilizaron esta tecnología para la evaluación el estado actual de las ruinas de Santo Domingo en Pontevedra. El escaneo láser fue útil para detectar y caracterizar las patologías superficiales de los muros de mampostería. En cuanto a la inspección de estructuras, Laefer et al. (2010) utilizaron el escáner láser para obtener datos que fueron almacenados y aplicados posteriormente en la detección automática de grietas en fachadas de edificios. Otra aplicación es el enfoque en el monitoreo de estructuras, por ejemplo, Park et al. (2007) analizaron los beneficios de aplicar el TLS en el monitoreo de estructuras y propone un modelo en el que a partir de una transformación de coordenadas a un sistema de coordenadas estructural se pueda captar variaciones y desplazamiento en las estructuras. Más adelante, Lercari (2019) generó avances respecto al monitoreo de estructuras mediante una metodología aplicada a un sitio arqueológico para cuantificar el deterioro de sitios arqueológicos de tierra mediante el uso del escaneo laser terrestre multi-temporal.

La fotogrametría es una técnica de teledetección pasiva que aplica un modelado basado en imágenes y consiste en construir modelos 3D a través algoritmos de correlación que identifican los puntos comunes en imágenes del mismo objeto. Estas imágenes pueden ser captadas mediante instrumentos satelitales, aéreos o terrestres de acuerdo a la escala de aplicación (Mikhail et al., 2001). Esta tecnología como el escáner láser se aplican principalmente en la cartografía, documentación patrimonio cultural, ingeniería inversa, deformación de estructuras, planificación urbana, navegación, telecomunicaciones, entre otros (Remondino, 2011).

La adquisición de datos es la fase de trabajo de campo en el que se realiza un registro fotográfico alrededor de un objeto en la cual cada imagen se acopla y traslapa. Para determinar las coordenadas espaciales de los puntos que configuran la superficie del objeto es necesario conocer la orientación interior y exterior de los instrumentos (Mikhail et al., 2001). Los parámetros de orientación interior describen la ubicación del punto principal y la distancia focal calibrada de la cámara, mientras que la orientación exterior se determina mediante puntos de control terrestre o distancias entre puntos.

Esta orientación permite que toda la información se trabaje en un marco de coordenadas local con dimensiones relativas, en el que cada imagen podrá traslaparse de manera correcta (De Reu et al., 2013). Es posible realizar cambios manuales en todas las fases para mejorar el resultado; por ejemplo, antes de procesar los datos es posible mejorar la calidad de las imágenes e incluso volver a captar una foto donde falte información de la textura de los objetos.

El procesamiento de datos se puede realizar con programas de automatización a través de tres pasos, i) la alineación de imágenes, ii) la construcción de una superficie 3D y iii) la asignación de texturas al modelo (Verhoeven, 2011). El primero consiste en alinear imágenes según la identificación de sus características y mediante un programa computacional se genera una nube de puntos que plasma la superficie (Yastikli, 2007). El segundo paso requiere la mayor operación computacional de todo el proceso. El tiempo que toma este proceso dependerá de la resolución y cantidad de imágenes usadas, además del nivel de detalle requerido (De Reu et al., 2013). Para la asignación de texturas (ver Figura 2.3) cada vértice del modelo presenta atributos adicionales como el color. Esto ocasiona que el programa también proporcione un primer texturizado de la geometría 3D. Este proceso no es tan exacto por lo que si se requiere mayor nitidez se aplica un texturizado adicional que determina una gama de colores y texturas a partir de fotografías originales (De Reu et al., 2013).

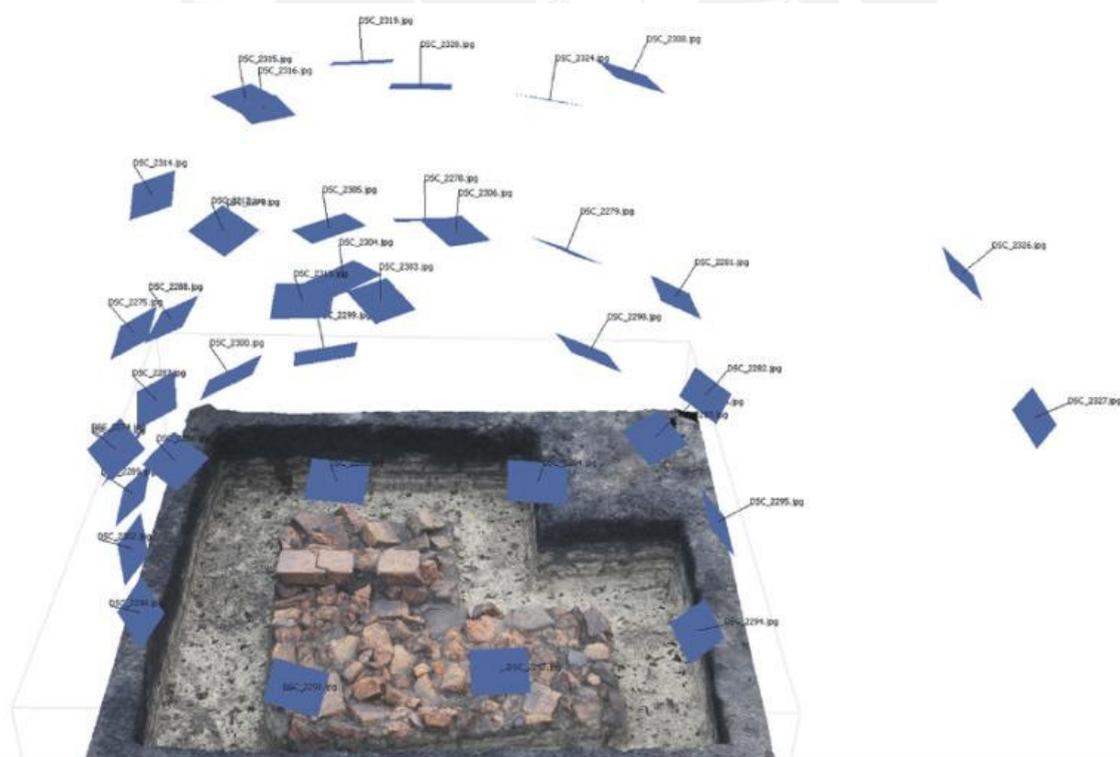


Figura 2.3 Modelo 3D texturizado con las posiciones de la cámara y sus respectivas orientaciones en la excavación de la abadía de Boudelo (De Reu et al., 2013).

La fotogrametría también muestra cualidades para la obtención de modelos 3D. A diferencia del TLS, la fotogrametría puede trabajar con instrumentación menos costosa y en espacios más grandes.

Además, la accesibilidad no es un problema por avances como la captura de imágenes mediante drones o algún vehículo aéreo no tripulado (UAV). En cuanto a las aplicaciones de la fotogrametría en construcciones históricas, Hendrickx et al. (2011) propusieron el uso de los micro-drones para la fotogrametría de estructuras. Algunas ventajas de este instrumento es la accesibilidad por el bajo costo y mayor facilidad en el manejo. En la investigación, se analizaron las potencialidades y limitaciones del micro-dron para el procesamiento de un área remota en Rusia. Kaamin et al. (2017) implementaron un método de inspección visual de monumentos históricos mediante el uso de UAVS para la identificación de patologías que ocurren en la estructura exterior del museo. A partir de este análisis se detectaron 91 patologías y se comprobó la utilidad de usar UAVs en el trabajo de conservación y mantenimiento. Shults (2017) propuso el uso de teléfonos inteligentes como estrategia de bajo costo para la implementación de fotogrametría en construcciones históricas. Con ello, se construyó un modelo 3D de estructuras de defensa. La precisión del modelo fue verificada con mediciones de controles de líneas, obteniéndose resultados satisfactorios.

Ambos métodos descritos anteriormente presentan ventajas y limitaciones. Por ejemplo, la fotogrametría es capaz que generar un gran nivel de detalle con pocos recursos económicos, manejo en espacios limitados y portabilidad, aunque no llegan a presentar una calidad alta en el texturizado (Grussenmeyer et al., 2008). Por otro lado, Remondino y El-Hakim (2006) mencionaron que los modelos 3D se pueden generar con datos basados en imágenes y basados en rangos o distancias, la complementación de ambos métodos resulta ser conveniente. Por ejemplo, Yastikli (2007) concluyó que el uso de la fotogrametría y el TLS en la implementación de modelos 3D son estrategias adecuadas para documentar el patrimonio cultural; además, la automatización mejoró en gran medida la obtención de resultados adecuados. La combinación de ambos enfoques también es útil para la asignación de colores a los puntos escaneados, la generación de mallas se muestra Figura 2.4a y texturas en la Figura 2.4b y la producción de ortoimágenes en la Figura 2.4c. Sánchez-Aparicio et al. (2014) presentaron un procedimiento basado en la aplicación de distintos ensayos como el TLS, fotogrametría y ensayos de identificación modal para mejorar la construcción de modelos numéricos que permitan identificar y monitorear el daño en la iglesia de San Torcato de Portugal. Como resultado de esa investigación, se pudo comprobar que este tipo de ensayos es útil para identificar grietas y desplazamientos y generar modelos de elementos finitos.

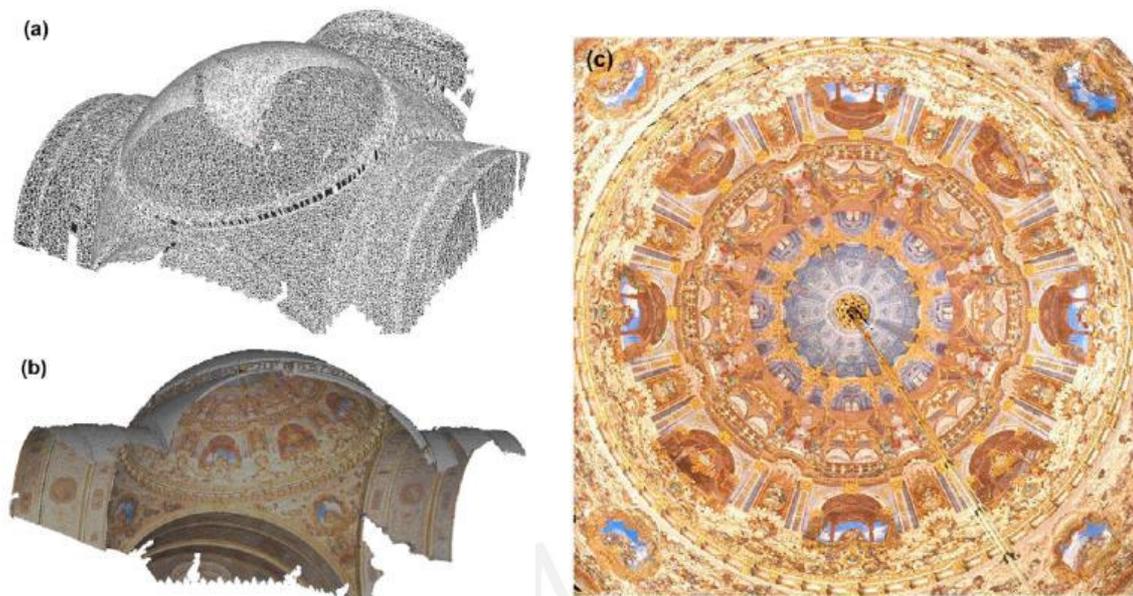


Figura 2.4 Implementación de tecnologías de detección (a) mallas 3D generadas, (b) modelo texturizado 3D y (c) ortofoto de la cúpula del Palacio de Dolmabahce (Yastikli, 2007).

Balsa-Barreiro y Fritsch (2017) elaboraron una metodología innovadora para la generación de modelos virtuales 3D de ciudades históricas mediante el uso de TLS (ver Figura 2.5a) y fotogrametría (ver Figura 2.5b) para luego unirlos en una nube de puntos híbrida (ver Figura 2.5c). Al aplicarla en el centro histórico de Calw en Alemania se obtuvo un modelo virtual 3D de gran precisión geométrica, calidad visual e integración a una aplicación web, como se muestra en la Figura 2.5. En el Perú, una de las primeras aplicaciones de este método fue presentada por Lambers et al. (2007) quienes realizaron el modelado 3D de Pichango Alto mediante el uso de un mini helicóptero y un escáner láser terrestre. El objetivo de la investigación fue realizar varios análisis arqueológicos espaciales en diferentes escalas. Arce et al. (2016) aplicaron una metodología mixta para la construcción de un modelo 3D detallado de tres iglesias cusqueñas. Mediante un TLS, se realizó la inspección interna de las iglesias, mientras que con fotogrametría realizara por un dron se complementó la parte externa. Este método resultó ser adecuado por el aprovechamiento de las cualidades de ambos métodos para construir modelos 3D precisos de las iglesias. Aguilar et al. (2019) demostraron la utilidad de los ensayos geomáticos en la ingeniería inversa. El método aplicado consistió en la generación de un modelo numérico de elementos finitos de la iglesia de San Juan Bautista de Huaró en Cusco. El FEM se generó a partir de la nube de puntos creada mediante fotogrametría y TLS. Otra innovación para la aplicación de tecnologías de teledetección es su relacionamiento con el Modelado de Información de Edificios Históricos (HBIM). Rocha et al. (2020) aplicaron esta metodología en el monumento de Paços Reais en Lisboa, en la que se aborda la creación de un modelo HBIM de activos patrimoniales utilizando el escáner láser 3D y la fotogrametría. Además, se describieron los pasos a seguir para realizar un escaneo con TLS y fotogrametría que permita generar un modelo HBIM.

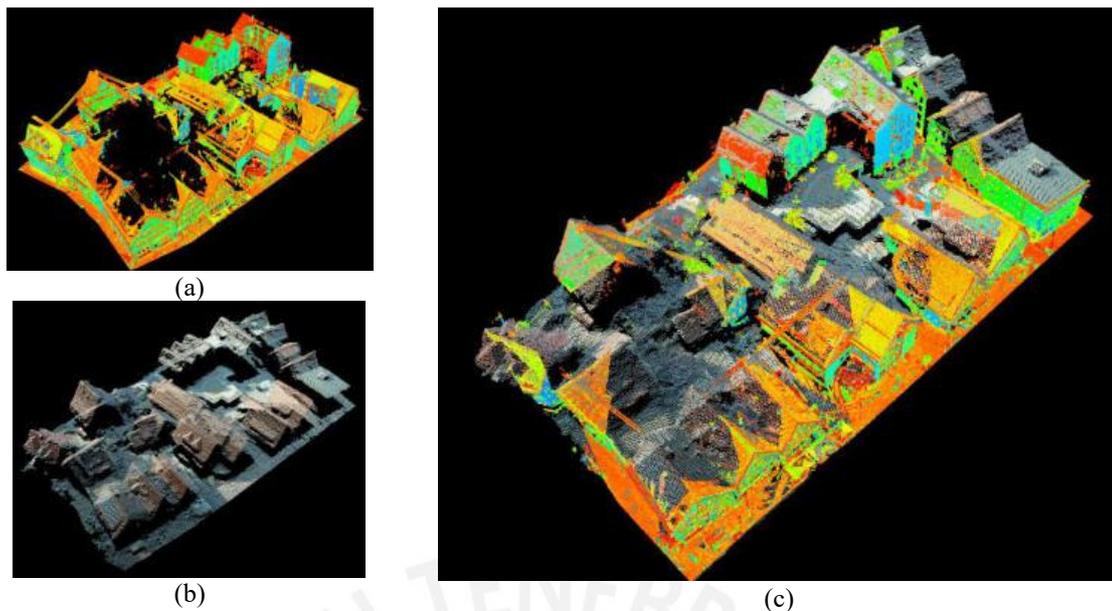


Figura 2.5 Nube de puntos generada por (a) escáner laser terrestre, (b) fotogrametría aérea y (c) la combinación de ambas nubes de puntos (Balsa Barreiro y Fritsch, 2017).

2.2.2 Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja (IRT, por sus siglas en inglés Infrared Thermography) es una técnica basada en la medición de valores de temperatura a cuerpos que fueron emitidos con radiación. Estos datos pueden ser obtenidos con las cámaras termográficas que producen una imagen de temperatura con una conversión de la radiación emitida (Maldague, 2001). Este tipo de ensayo es una herramienta que puede ser aplicada en distintos campos como el militar, industrial, médico o ingenieril. Además, estas aplicaciones mantienen vigencia por el uso de cámaras sofisticadas termográficas portátiles, que fueron diseñadas específicamente para ensayos no destructivos (Titman, 2001). La IRT presenta ventajas como la corta duración del ensayo, la visualización inmediata de termogramas, el manejo simple de los aparatos y la posibilidad de combinar este método con otros ensayos. Por otro lado, algunas condiciones externas generan limitaciones para la recolección de datos, por ejemplo, los vientos fuertes, enfriamientos temporales de los materiales por causas como la lluvia, debajo de la superficie, entre otros.

El proceso de la captación de la temperatura de los objetos parte de que todo material con una temperatura mayor al cero absoluto emite una radiación electromagnética de infrarrojo. La radiación infrarroja, descubierta por William Herschel, es un modo de transferencia de calor definida como la energía emitida por la materia que se encuentra a una cierta temperatura. Esta energía puede ser medida como parte del espectro electromagnético de ondas y presenta una longitud de onda que va desde 780 nm hasta 1 mm (Balaras y Argiriou, 2002). Para las temperaturas encontradas en estructuras y sus instalaciones mecánicas o eléctricas, la gran parte de la energía emitida está en el rango infrarrojo, y mientras mayor calor tenga un objeto mayor será la radiación que proporcionará.

Es importante mencionar que incluso las superficies frías emiten radiación suficiente para ser detectada (Balaras y Argiriou, 2002).

Existen tres condiciones necesarias para el uso de la termografía. Primero, cualquier objeto internamente es más caliente o frío que el medio donde se aloja. Segundo, el gradiente térmico no varía significativamente en un elemento homogéneo; sin embargo, condiciones como la falta de material, daño local en el elemento u otros factores que la temperatura varíe. Tercero, la ausencia de una fuente térmica no permite captar el calor en los materiales; por lo tanto, se puede inducir calor para que se muestren distintos elementos que antes no emitían la radiación suficiente (Titman, 2001).

Para realizar ensayos IRT en edificaciones debe haber una diferencia considerable de temperatura entre el interior y el exterior, idealmente mayor a 10° C. Los ensayos incluyen factores como la emisividad, temperatura de reflexión, temperatura atmosférica y la humedad relativa (Kylili et al., 2014). La cámara de infrarrojos es un dispositivo que produce una secuencia de imágenes de la distribución térmica. Estas cámaras pueden incluir un detector refrigerado que realizan filtrados espectrales y permiten visualizar detalles. Para transformar la radiación en imágenes se enfoca el objeto ópticamente sobre el sensor de infrarrojos y la señal de respuesta eléctrica se convierte en una imagen digital (Kylili et al., 2014). Estas imágenes muestran una gama de colores que representan una variación según la temperatura de la superficie (ver Figura 2.6). De esta manera, es posible identificar distintas anomalías a través de un aumento o descenso de temperatura.



Figura 2.6 Vista externa de un edificio e información infrarroja (Lehmann et al., 2013).

En la termografía existen dos enfoques para las inspecciones, el pasivo y el activo. En el primero, se realizan mediciones de una estructura en condiciones normales, sin ningún tipo de estímulo externo que afecte la temperatura (Kylili et al., 2014). Por otro lado, el enfoque activo consiste en suministrar un estímulo de calor en el elemento. Este suministro de calor se puede realizar mediante la termografía de pulso y la de Lock-in. La primera se realiza emitiendo una cantidad intensa de calor en un tiempo corto y las mediciones se obtienen durante el enfriamiento. La termografía de Lock-in consiste en la aplicación de ondas térmicas que someten a los objetos a calentamientos periódicos

con el fin de observar termogramas para la fase de propagación de la onda y para la amplitud (Maldague, 2002). Una aplicación del enfoque pasivo en construcciones históricas se presenta en Martínez et al. (2013), quienes realizaron un análisis de daños del mortero original de una iglesia antigua con ensayos no destructivos. En dicha investigación, el IRT se usó para detectar problemas de humedad, disgregación del mortero, y agrietamiento. Grinzato et al. (1998) presentaron un ejemplo del enfoque activo a través de la termografía de pulso. Se consideró una fuente solar para obtener imágenes térmicas que se procesaron cuantitativamente para caracterizar las deficiencias de cuatro edificios.

Por su gran utilidad, la termografía posee diversas aplicaciones en campos como la medicina, agricultura, medio ambiente, mantenimiento, entre otros. Particularmente, en el campo de la ingeniería civil, la termografía estuvo inicialmente limitada a la investigación de características térmicas de la envolvente de edificios y la detección de infiltraciones de agua en paredes (Meola y Carlomagno, 2004). Luego, se generaron diferentes aplicaciones, entre ellas están las evaluaciones cuantitativas para el diagnóstico de edificios, la detección de puentes térmicos, fugas de aire, aislamiento térmico dañado, fuentes de humedad, la ubicación de los componentes de la construcción. Algunas de estas estrategias fueron de mucha utilidad para la conservación del patrimonio y monumentos históricos (Kylili et al., 2014).

Respecto a los objetos históricos, Theodorakeas et al. (2015) presentaron una revisión de las distintas aplicaciones de termografía en la inspección de mosaicos y concluyeron que el IRT es una herramienta eficiente para la detección de humedad y monitoreo rápido de los mosaicos. Mercuri et al. (2011) realizaron una revisión histórica de la aplicación de termografía activa en la investigación del arte y objetos históricos. Las primeras aplicaciones de la termografía infrarroja en las construcciones históricas fueron en proyectos aislados para diagnosticar el estado de las construcciones, como fue el caso de la restauración de la fachada de San Pedro (Meola y Carlomagno, 2004). Posteriormente, se aplicó la termografía en el patrimonio cultural para aplicar ensayos no destructivos, evaluación de intervenciones, monitoreo de estructuras entre otros.

En el diagnóstico del deterioro de las construcciones, Moropoulou et al. (2015) usaron técnicas no destructivas para entender el tipo de estructura de mampostería que fue construida originalmente el Monasterio de Kaisarini. A través de la termografía identificaron las diferentes fases y materiales de construcción; además, identificaron la presencia de humedad y los tipos de deterioro en la superficie. Para la investigación de anomalías, Kordatos et al. (2013) evaluaron daños de murales y mampostería del Monasterio de Molybdoskepastos en Grecia. Mediante termografías de pulso y Lock-In se evaluaron distintos murales, en los que se visualiza las grietas críticas y separaciones extendidas de manera precisa. Ruiz Valero et al. (2019) realizaron una investigación para estudiar las condiciones de humedad en fachadas de construcciones históricas mediante ensayos no destructivos. Con el IRT

se generó una imagen térmica de la fachada de la iglesia Santa Bárbara en República Dominicana que permitió identificar las zonas con mayor humedad, como se muestra en la Figura 2.7. Estos resultados fueron validados con mediciones de resistencia eléctrica y con ello se pudo obtener un resultado rápido, económico y preciso de las áreas de humedad en el lugar.

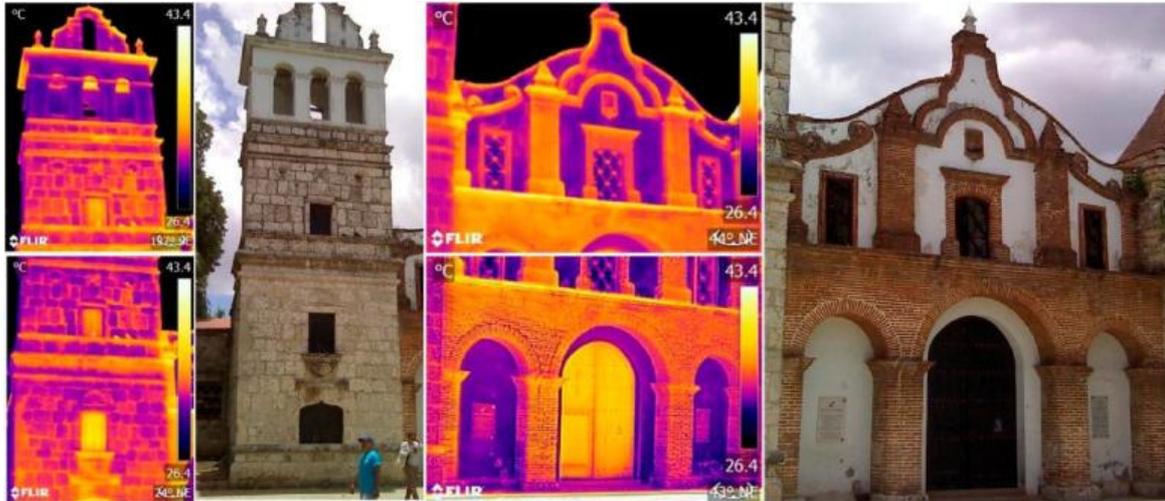


Figura 2.7 Termogramas de la torre de campanario y fachada principal de la iglesia Santa Bárbara (Ruiz Valero et al., 2019).

2.2.3 Ensayos de identificación modal

Los ensayos de identificación modal son una herramienta útil para identificar los parámetros dinámicos de las estructuras (Compan et al., 2017) mediante la medición de un parámetro que varíe en el tiempo (desplazamiento, velocidad o aceleraciones). Estos ensayos son usados en la ingeniería civil desde los años 80, como herramienta de calibración de los modelos numéricos, control de calidad y detección de daño; además, se utilizan de manera aislada o integrados en procesos de monitoreo continuo (Aguilar et al., 2014). Se dispone de dos metodologías para realizar las pruebas experimentales: el análisis modal experimental (EMA, por sus siglas en inglés Experimental Modal Analysis) y el análisis modal operacional (OMA, por sus siglas en inglés Operational Modal Analysis).

El EMA consiste en aplicar una fuerza conocida a la estructura y monitorear su respuesta; sin embargo, el inconveniente de este método es la falta de energía de los equipos utilizados para excitar algunos modos de vibración (Aguilar, 2010). Los ensayos de EMA usualmente se realizan en pruebas de laboratorio y no son recomendables para las construcciones históricas por la posibilidad de generar daños, además de que la instrumentación es más cara (Standoli et al., 2020).

Por otro lado, el OMA consiste en la obtención de los parámetros modales a través de fuentes ambientales. Este método es más adecuado para el monitoreo de estructuras, ya que es una técnica que puede realizarse en condiciones de servicio y es posible estudiar el edificio a escala completa (C.

Gentile y Saisi, 2007). El uso del OMA es la técnica más conveniente para la caracterización dinámica de las construcciones históricas porque es una técnica no destructiva y no invasiva que no requiere el uso de herramientas que generen excitación externa (Compan et al., 2017). La aplicación de OMA adquiere los datos mediante ensayos de vibración ambiental (AVT, por sus siglas en inglés Ambiental Vibration Test). El AVT es un procedimiento de campo para registrar las vibraciones de estructuras que son generadas por actividades del ambiente como el tráfico o el viento. El sistema de adquisición de datos cableado es el más usado para aplicar ensayos experimentales de identificación modal. Este sistema está compuesto por transductores o sensores de medición que están conectados a una computadora portátil. En los ensayos in situ, los transductores convierten la cantidad mecánica medida por el movimiento en una señal eléctrica y pasan la información obtenida hacia la computadora.

Los sensores cumplen un rol vital en el registro de la respuesta de las estructuras. Para registrar la respuesta de las estructuras patrimoniales se pueden usar diferentes sensores como los sismómetros (Lacanna et al., 2016), velocímetros (Cimellaro et al., 2012) y acelerómetros (Foti et al., 2012). En las construcciones, es importante mencionar que, para optimizar las mediciones de los parámetros dinámicos, los sensores deben ubicarse en puntos de la estructura que presenten un movimiento significativo en las formas modales (Ceravolo et al., 2016). Shimpi et al. (2019) mencionaron que las ubicaciones efectivas de los sensores se pueden determinar en función del juicio del ingeniero, experiencias pasadas, modelos numéricos iniciales y análisis modal, algoritmos de optimización y la combinación de los parámetros anteriores.

Para el caso de construcciones históricas, algunos de los estudios mostraron dificultades para colocar los acelerómetros en las ubicaciones deseadas por restricciones como la geometría compleja o la falta de accesibilidad. En Turek et al. (2002) mencionaron que no fue posible ingresar a ciertas partes de la torre por los trabajos de reacondicionamiento y para realizar los ensayos tuvieron que ubicar los acelerómetros en lugares cercanos a las áreas restringidas. Por otro lado, Diaferio et al. (2015) tuvieron dificultades para colocar los acelerómetros en una posición ortogonal en la torre estudiada, por las irregularidades de los pisos. Para completar los ensayos fue necesario diseñar bloques rectangulares que permitan ubicar a los acelerómetros de forma ortogonal.

La cantidad de sensores dependerá del modelo que se requiera construir y la cantidad de modos de vibración necesarios en la investigación. Por ejemplo, Compan et al. (2017) realizaron pruebas de vibración ambiental en el techo de la Basílica de los Catorce Santos Auxiliares en Alemania. Esta basílica presenta muchas singularidades y un gran nivel de complejidad geométrica. En este caso, se planteó una configuración de 276 puntos de medición en los tres ejes principales con malla bastante densa, con el objetivo de capturar los modos de vibración global en la dirección longitudinal, lateral y vertical de las bóvedas, como se muestra en la Figura 2.8.

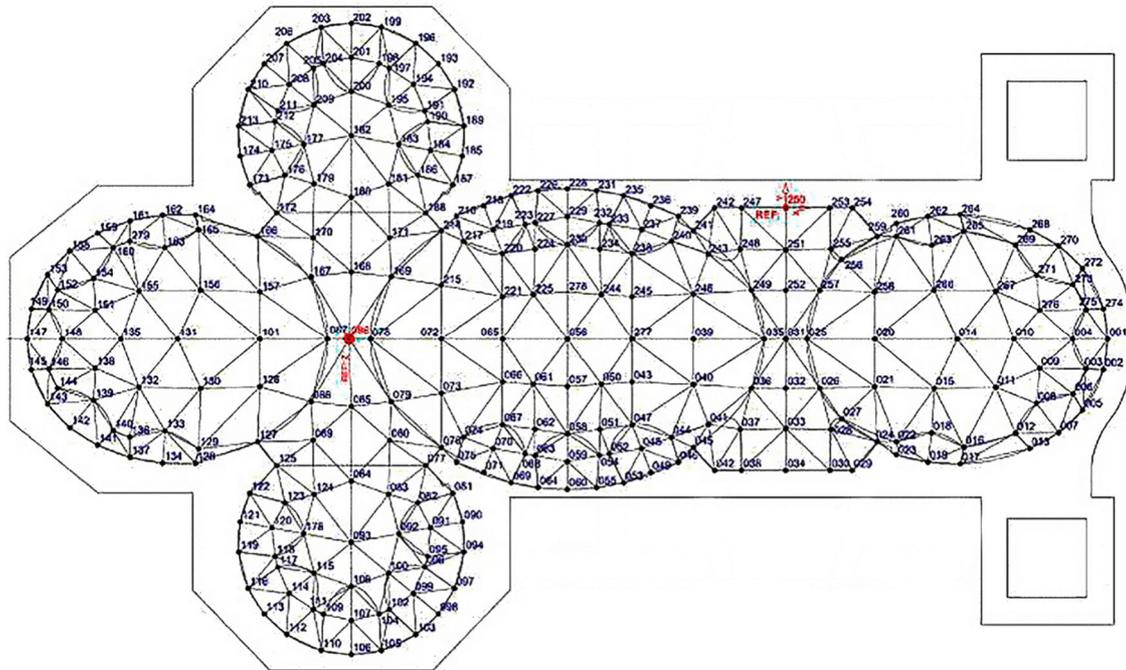


Figura 2.8 Grafico de la ubicación de acelerómetros en el techo de la Basílica de los Catorce Santos Auxiliares, en rojo los acelerómetros de referencia (Compan et al., 2017).

Los acelerómetros más utilizados en construcciones históricas son los acelerómetros piezoeléctricos y de equilibrio de fuerza. Los primeros se basan en las propiedades de sus cristales internos, los cuales, al ser sometidos a deformaciones, generan cargas eléctricas proporcionales a ese desplazamiento. Una aplicación de estos transductores en construcciones históricas es presentada en (Gentile et al., 2015). Por otro lado, los acelerómetros de equilibrio de fuerza presentan un mecanismo que consta de una masa y un elemento sensible que detecta su movimiento y los transforma en una señal eléctrica. Foti et al. (2012) usaron este tipo de acelerómetro para evaluar una torre histórica (ver Figura 2.9a) y además un tablero de adquisición para registrar los datos (ver Figura 2.9b). Para la identificación modal en las estructuras, los acelerómetros de equilibrio de fuerza presentan una ventaja en la mayoría de los acelerómetros piezoeléctricos porque pueden medir frecuencias naturales de vibración muy bajas debido a su sensibilidad de lectura (Rodrigues, 2004).



Figura 2.9 Equipamiento usado para los ensayos de vibración ambiental: (a) acelerómetros uniaxiales y (b) tablero de adquisición de datos (Foti et al., 2012).

Con la información obtenida de los sensores de medición, se registran las señales mediante un equipo de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés Data Acquisition). Este equipo se encarga de convertir las señales analógicas en digitales. Las señales digitalizadas pasan por filtros y luego se dirigen hacia el procesador central para el almacenamiento de los datos. El análisis de operación modal es el procedimiento numérico usado para procesar las señales recolectadas en el AVT. El procesamiento presenta como objetivo eliminar las señales de ruido no deseadas e identificar los modos de vibración de una estructura. Para el OMA, se puede aplicar el método del dominio de la frecuencia y método del dominio del tiempo. Respecto al dominio de la frecuencia, los métodos más conocidos son la descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés Frequency Domain Decomposition) y el método de descomposición mejorada en el dominio de la frecuencia (EFDD, por sus siglas en inglés Enhanced Frequency Domain Decomposition) (Brincker et al., 2000). Con respecto al dominio del tiempo, la técnica más conocida es la identificación de subespacio estocástico (SSI, por sus siglas en inglés Stochastic Subspace Identification).

La técnica FDD permite evaluar las frecuencias naturales de la estructura mediante la descomposición de valores singulares de una matriz de densidad espectral. De esta manera, los espectros de respuesta se pueden separar en un conjunto de funciones de densidad espectral de un solo grado de libertad (SDOF, por sus siglas en inglés Single Degree Of Freedom) y cada uno de ellos correspondería a un modo de vibración del sistema (Brincker et al., 2000). En el caso del método EFDD, se presenta un método mejorado en el que se aplica la transformada inversa de Fourier a la función de densidad espectral para analizarla en el dominio del tiempo. A partir de esto, se obtienen funciones de auto correlación con las que se estiman las frecuencias y los coeficientes de amortiguamiento mediante un decremento logarítmico (Brincker et al., 2001). Sin embargo, el amortiguamiento es un parámetro sensible cuya estimación mediante ensayos experimentales es

compleja, especialmente para construcciones de mampostería (Mendes, 2012). En ambos métodos las frecuencias y las formas modales son estimadas seleccionando los máximos o picos del gráfico de densidad espectral. Sin embargo, en el método EFDD, no solo se seleccionan los picos en el gráfico, sino zonas cuyos respectivos vectores singulares poseen entre sí una correlación elevada (Rodrigues, 2004).

Para el método en el dominio del tiempo, según Ramos (2007) es posible obtener una alta resolución de las frecuencias con el método SSI y, por lo tanto, medir de manera muy precisa los parámetros modales. Esto no ocurre con los métodos FDD y EFDD cuyos resultados, a pesar de ser más rápidos de obtener, pueden ser inexactos por las dificultades para reconocer los valores pico de frecuencia. El método SSI utiliza estrategias como la factorización QR y la descomposición de valores singulares (SVD, por sus siglas en inglés Single Value Decomposition). La factorización QR brinda como resultado una reducción significativa de datos; en cambio, el SVD se utiliza para evitar el ruido en el sistema (Aguilar, 2010). Se denomina SSI-COV si el método de ajuste directo se enfoca en las funciones de correlación de la respuesta de los sistemas; en cambio, si se centra en la serie de respuesta se llama SSI-DATA (Rodrigues, 2004). En los diagramas de estabilización se presentan polos estables, inestables y polos de ruido. La obtención de los modos de la estructura se logra mediante la selección de los polos estables, los cuales son identificados en la gráfica en una línea vertical. Mientras mayor sea la verticalidad de la línea, los valores de frecuencia serán más precisos (Aguilar, 2010).

En el trabajo realizado por Zini et al. (2018), se concluyó que las técnicas mencionadas (FDD, EFDD y SSI) se consolidan en el análisis de grandes estructuras civiles modernas ya que en estas se puede presentar un mayor nivel de registro de señales y además se consigue identificar un mayor número de parámetros dinámicos. Sin embargo, para los edificios patrimoniales las señales registradas suelen ser muy débiles ya que se genera una captación significativa de ruido. Para superar los inconvenientes en el registro de las señales, los investigadores, según un conocimiento empírico, aplicaron criterios de selección de valores de frecuencia para determinar los parámetros dinámicos de las estructuras. Por ejemplo, Aguilar et al. (2013) llevaron a cabo ensayos de OMA en el Hotel Comercio con los procesos de identificación modal en el dominio de la frecuencia (FDD, EFDD) y en el dominio del tiempo (SSI). Con los dos primeros métodos, fue posible identificar las dos primeras frecuencias, mientras que con el SSI se pudieron identificar hasta nueve frecuencias naturales. De manera similar, Zanotti (2015) identificó los primeros cuatro modos de vibración con una combinación de los métodos de procesamiento EFDD y SSI en la iglesia de Kuñotambo de Cusco. Con el método EFDD, ver Figura 2.10(a), resultó complicado seleccionar los valores de frecuencias en el gráfico de densidad espectral, ya que había varios picos de frecuencia. Por ello, se utilizó adicionalmente el

método SSI, como se muestra en la Figura 2.10(b), puesto que polos estables en la gráfica permitieron determinar con mejor precisión y rapidez los principales modos de vibración.

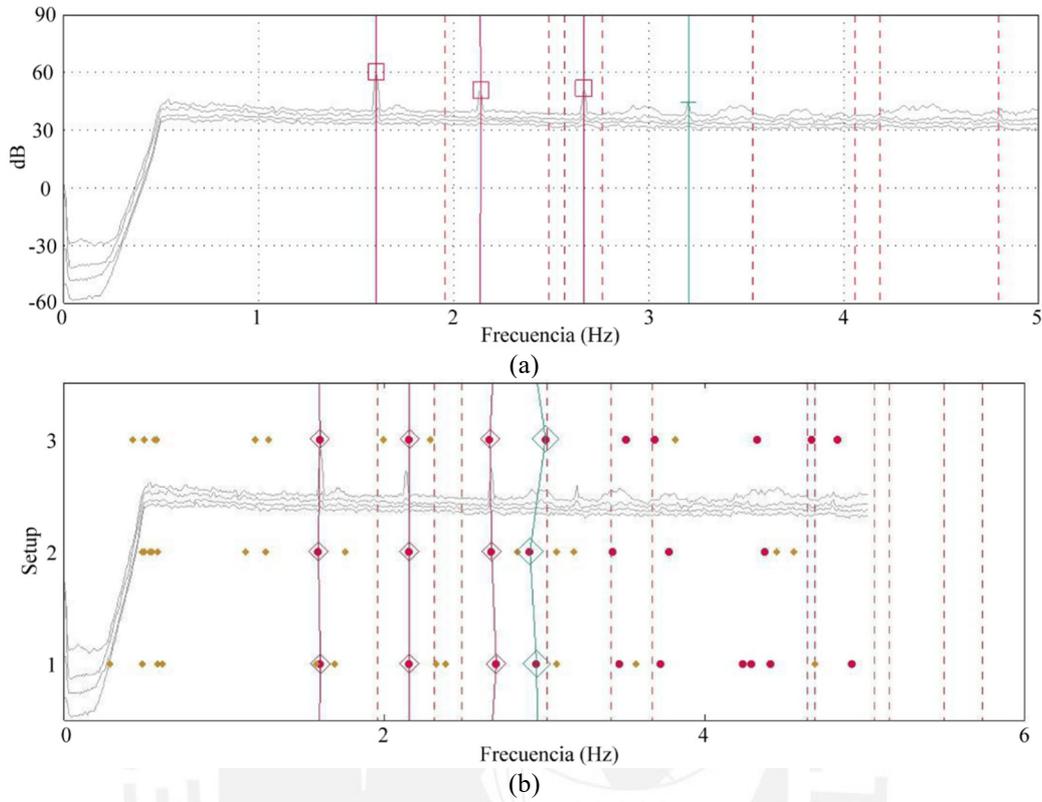


Figura 2.10 (a) Gráfico de densidad espectral de potencia del método EFDD, (b) Diagrama de estabilización del método SSI (Adaptado de Zanotti, 2015).

Existen numerosas aplicaciones en la ingeniería civil para los ensayos de vibración ambiental y ensayos de identificación modal. Para estructuras patrimoniales, se utilizaron los resultados de OMA y AVT para la actualización del modelo de elementos finitos, evaluación de la vulnerabilidad sísmica, identificación de daños y monitoreo de las estructuras patrimoniales (Shimpi et al., 2019). Por ejemplo, Aguilar et al. (2015) aplicaron el método de Douglas Reid para optimizar los valores del módulo de elasticidad y peso específico en el modelo numérico del sitio arqueológico de Chokepukio, de manera que las frecuencias y formas modales determinados en la identificación dinámica (ver Figura 2.11a) se correlacionen con el modelo de elementos finitos, como se muestra en la Figura 2.11b. La actualización de los modelos numéricos también es útil para la evaluación sísmica de estructuras, ya que a partir de un modelo calibrado con los resultados obtenidos a partir de OMA es posible obtener resultados más representativos para los análisis sísmicos. (Aguilar et al., 2019) aplicaron ensayos de vibración ambiental para obtener las frecuencias de la iglesia de San Juan Bautista de Huaro en Cusco a través del método de SSI-DATA. Posteriormente, actualizaron el modelo de elementos finitos para que se correlacione con los resultados experimentales obtenidos en el OMA.

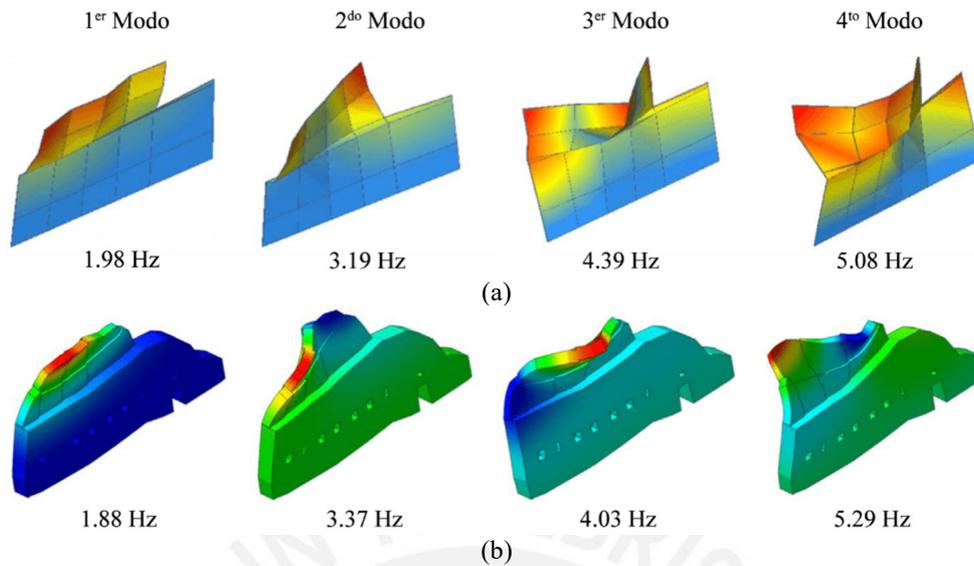


Figura 2.11 (a) Formas modales experimentales determinadas con OMA, (b) formas modales determinadas con el FEM (Adaptado de Aguilar et al., 2015).

2.3 Modelado numérico de la mampostería

El modelado numérico implica una idealización matemática que se aplica con la finalidad de representar el comportamiento de estructuras. Este modelado ha sido aplicado en la ingeniería estructural moderna desde mediados del siglo pasado y su desarrollo fue exponencial a través de los años. A fines del siglo pasado ya se dispondría de un mayor avance en cuanto a los programas computacionales de tal manera que se empezaron a analizar estructuralmente los monumentos históricos (Meli, 1998). Como ejemplo de las primeras aplicaciones está La Torre de Pisa por Macchi et al (1993), la Catedral de México por Meli y Sánchez Ramírez (1995), y el Coliseo de Roma por Croci (1996). Con el paso del tiempo, el desarrollo de herramientas tecnológicas permitió abordar de manera específica la complejidad que implica el modelado de construcciones históricas. Aunque por la complejidad de las estructuras, todavía existen algunas complicaciones para representar el material o la geometría de las construcciones históricas (Roca et al., 2010).

Los modelos numéricos sirven para representar el comportamiento del material y las solicitaciones externas como la fuerza sísmica. La elección de estos modelos se realiza dependiendo de la información disponible, los resultados esperados, la disponibilidad y compatibilidad, los costos, la idealización y validación (Lourenço, 2002). El modelado numérico, para evaluar el comportamiento de la mampostería, puede llegar a ser complicado, ya que es un material heterogéneo que se compone de unidades y juntas. Además, existen muchas combinaciones posibles por la geometría, la naturaleza y arreglo de las unidades (Lourenço, 2002). Existen varias estrategias de modelos que se pueden

elegir dependiendo del nivel de precisión y complejidad. Estas son el micro-modelado detallado, el micro-modelado simplificado y el macro-modelado (ver Figura 2.12).

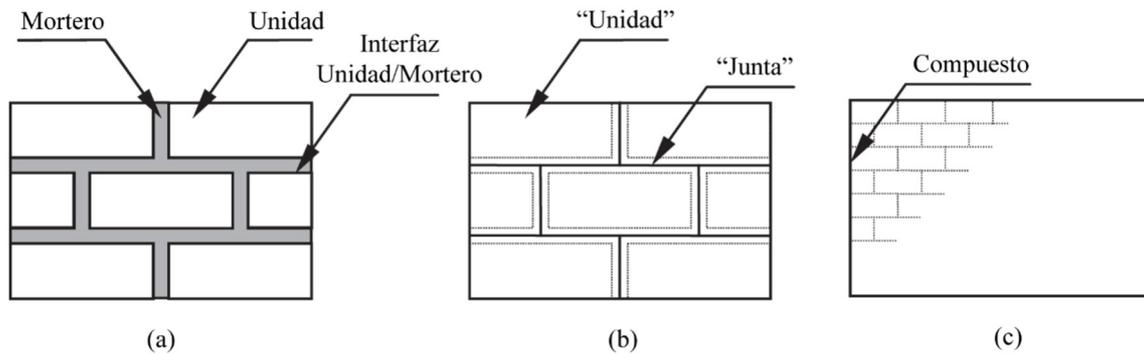


Figura 2.12 Estrategias de modelo para estructuras de mampostería: (a) micro-modelo detallado, (b) micro-modelo simplificado, (c) macro-modelo (Adaptado de Lourenço, 2002).

En el macro-modelo, las unidades, el mortero y la interface unidad-mortero se idealizan como un material continuo. El micro-modelo simplificado considera que las unidades se encuentran expandidas y están representadas por elementos continuos, mientras que las juntas y la interacción unidad-mortero son sustituidas por elementos de interface. Por otro lado, el micro-modelo detallado consiste en tratar a las unidades y las juntas como elementos continuos independientes, y la interacción entre la unidad y el mortero se modela mediante elementos de interface (Lourenço, 2002). Para desarrollar los distintos enfoques de modelado numérico de la mampostería, Asteris et al. (2015) presenta una clasificación detallada para cada estrategia de modelado numérico en la mampostería.

2.3.1 Macro-modelado

Este es un método que permite simular el comportamiento estructural de una construcción mediante la aproximación con ecuaciones diferenciales. Para ello se necesita una descripción matemática del comportamiento del material. Esto determina la relación entre los tensores de esfuerzo y de deformación en un determinado punto del cuerpo.

Los macro-modelos son muy usados por su menor demanda de cálculo y por lo tanto se utilizan para representar grandes elementos de mampostería. En este modelado, se considera al material como un continuo ortótropo homogéneo ficticio (Roca et al., 2010). Dentro del enfoque de los macro-modelos se encuentra los modelos continuos que representan a las estructuras de forma unitaria y sin separaciones. Por otro lado, los modelos discontinuos son una manera de graficar separaciones, como las grietas o las uniones físicas, para representar fenómenos de separación de bloques, rotación o deslizamiento por fricción (Roca et al., 2010).

a) Macro-modelos continuos

Los modelos continuos simulan cuerpos deformables en los que se definen leyes constitutivas con propiedades de la mampostería definidas en ensayos experimentales. Uno de los primeros intentos por representar el comportamiento mecánico de la mampostería fue mediante aproximaciones lineales realizada por Maier y Nappi (1990), quienes generaron un modelo continuo isótropo sin esfuerzos de tensión. Más adelante, Angelillo (1994) propuso un enfoque de elementos finitos con el teorema de la energía complementaria para estructuras elásticas. Un enfoque adicional de simulación de elementos finitos sin considerar la tensión es desarrollado por Bruggi and Talierecio (2015) quienes presentaron una solución basada en energía para lograr un estado de tensión de solo compresión. En general, este enfoque de elementos finitos no es aplicado por su limitación para la evaluación sísmica de estructuras.

Las leyes constitutivas no lineales se desarrollaron basándose en teorías de la mecánica de fracturas, daños y plasticidad. No obstante, Lotfi y Shing (1991) propusieron un modelo para mampostería con el enfoque de “*smearred crack*” que mostró una respuesta confiable en el comportamiento de flexión. Posteriormente, los modelos fueron mejorando y representando eficientemente el comportamiento de la mampostería debido al avance de los softwares computacionales. A pesar de las incertidumbres que existen al evaluar las características mecánicas de la mampostería, se obtuvieron resultados favorables mediante la aplicación de modelos isótropos no lineales en iglesias históricas (Betti y Vignoli, 2011; Milani y Valente, 2015; Fortunato et al., 2017; Aguilar et al., 2019).

b) Macro-modelos discontinuos

Este enfoque plantea la representación de componentes estructurales que presentan un comportamiento mecánico. Este modelado también es llamado modelo de macro-elementos y es una estrategia numérica que analiza el comportamiento sísmico global de las estructuras de mampostería, ya que la respuesta sísmica está asociada al comportamiento de los elementos de mampostería y la redistribución de cargas horizontales. Se diferencian dos tipos de elementos como los pilares, que son elementos portantes verticales, y las enjutas, que son elementos horizontales que trasladan las cargas horizontales hacia los pilares (Quagliarini et al., 2017). Estos modelos no requieren una alta demanda computacional, son fáciles de construir y requieren pocas propiedades mecánicas. Algunas limitaciones de los macro-elementos son las dificultades para representar fallas fuera de plano, detalles estructurales e irregulares en las edificaciones (Berti et al., 2017). Existen dos enfoques en los macroelementos, los modelos de marco equivalente y los modelos basados en resortes.

El método de marco equivalente consiste en representar el comportamiento global de un panel mediante un elemento de viga no lineal. Este enfoque fue desarrollado por Tomažević (1978), quien elaboró un modelo equivalente de vigas basado en relaciones elastoplásticas simplificadas para

describir la no linealidad de la viga. Posteriormente, autores como Kappos et al. (2002) y Penelis (2006) desarrollaron modelos con separación entre pilares y enjutas, la unión de elementos se representaba por relaciones constitutivas no lineales. Lagomarsino et al. (2013) implementaron un software para el análisis sísmico no lineal de edificaciones de mampostería con modelos de marco equivalente. Este avance permite analizar construcciones en tres dimensiones con alta confiabilidad y bajo esfuerzo computacional.

El modelo basado en resortes consiste en simular las interacciones entre bloques mediante resortes. Chen et al. (2008) fueron los pioneros en la implementación de resortes no lineales para analizar los modos de falla de pilares en mampostería. Luego, Calìo et al. (2012) realizaron avances en este enfoque con el desarrollo de un modelo de macroelementos basado en resortes (ver Figura 2.13) para simular la respuesta no lineal en el plano de muros de mampostería. En este modelo, la respuesta se aproximó mediante un elemento discreto equivalente. El concepto de discretización de macroelementos es usado para simular los mecanismos de falla en el plano de las estructuras de mampostería no reforzada, que son flexión, corte-diagonal y corte-deslizamiento. Pantò et al. (2017) actualizaron este modelo, a través de la introducción de nuevos grados de libertad que hicieron posible la simulación de otros mecanismos de falla como los efectos de torsión y la respuesta fuera de plano. Con estas mejoras, se pudo obtener predicciones confiables del comportamiento de una estructura para mecanismos de falla en el plano y fuera de plano con un costo computacional menor al generado con simulaciones con modelos de elementos finitos.

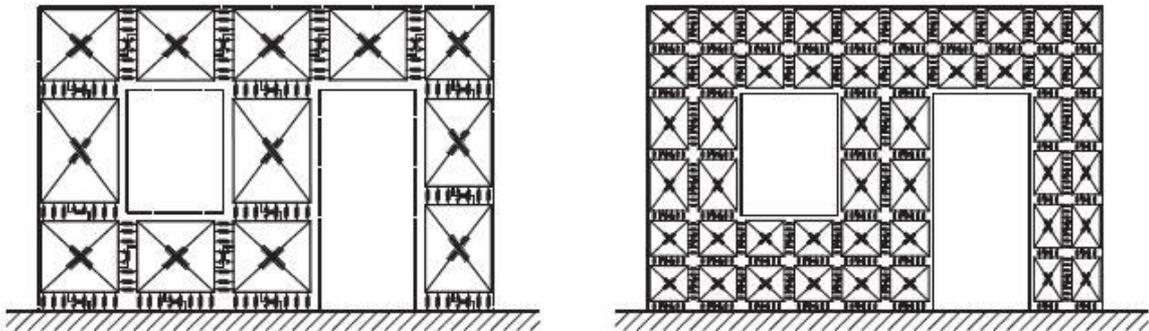


Figura 2.13 Discretización para macro-elementos en muros de mampostería con diferentes tamaños de malla (Calìo et al., 2012).

2.3.2 Micro-modelado simplificado

El micro-modelo, introducido por Page (1978), considera a las unidades de mampostería como bloques que interactúan entre sí a través de juntas. Este modelado generalmente es aplicado para estructuras pequeñas y permite diferenciar parámetros mecánicos y leyes constitutivas entre los bloques y el mortero para representar las fallas adecuadamente. Por el nivel de detalle que requieren este tipo de modelos, el esfuerzo computacional es significativamente mayor por lo que su aplicación

está más enfocada al estudio de estructuras pequeñas con fines de investigación (Lourenço, 2013). Existen distintos tipos de micro-modelado, entre lo que destacan los modelos discontinuos de elementos finitos, los modelos discretos, modelos de bloques con análisis límite y modelos de elementos de borde.

a) Modelos de elementos finitos discontinuos

Estos modelos representan a los bloques de mampostería mediante elementos continuos, mientras que las juntas se representan como discontinuidades en las que puede ocurrir rotura, deslizamiento o falla por aplastamiento. La unión entre los bloques y el mortero se puede modelar con elementos de espesor cero cuya función es representar la interacción entre estructuras deformables (Lourenço y Rots, 1997). El modelado de las condiciones de borde es una tarea fundamental para las estrategias de modelado con discontinuidades. Este campo de investigación sigue siendo foco de estudio dentro del modelado de estructuras de mampostería. Para la representación de las juntas se pueden utilizar elementos de resorte que conectan los bloques para que las uniones puedan liberarse dependiendo de las condiciones del modelo (Dawe et al., 2001). Otra forma más precisa y empleada es el uso de elementos de interface que son representados mediante diferentes leyes constitutivas que asignan propiedades lineales o no lineales a las uniones.

Por ejemplo, Stavridis y Shing (2010) construyeron un modelo de interface que analiza la respuesta mecánica de la mampostería con una idealización basada en las leyes constitutivas de “*smearred crack*” y “*discrete crack*” para analizar distintos modos de falla de los marcos rellenos de concreto armado en mampostería. Lourenço (1996) desarrolló un modelo constitutivo compuesto para el análisis estático de elementos de interface basado en la teoría de la plasticidad. El modelo para las interfaces contemplaba fallas por tracción, cizallamiento y compresión. Luego, Lourenço y Rots (1997) generaron un gran avance mediante la creación un modelo multi-superficie de interface que contempla las propiedades no lineales, como se muestra en la Figura 2.14. Este incluyó los mecanismos de falla de la mampostería como el agrietamiento de las juntas, unión de la cama, el agrietamiento de las unidades y el aplastamiento de la mampostería ante la acción de una carga monótona. Orduña (2017) presentó una formulación para el análisis estático no lineal de modelos de bloques rígidos con el modelado una estructura 3D como un conjunto de bloques rígidos que interactúan a través de interfaces planas.

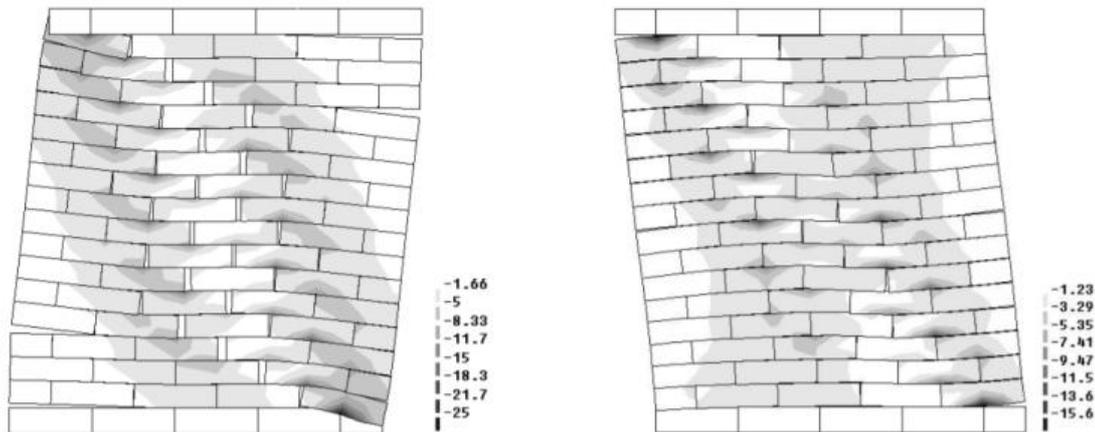


Figura 2.14 Principales esfuerzos en compresión representados en una malla deformada para desplazamientos horizontales (P. B. Lourenço y Rots, 1997).

Gambarotta y Lagomarsino (1997) desarrollaron un modelo constitutivo de juntas basado en los principios de la mecánica del daño. Este modelo considera el daño del mortero tanto cuando se genera agrietamiento como para el deslizamiento por fricción. Este enfoque puede simular el comportamiento inelástico de la mampostería, pero posee un costo computacional alto. Pegon et al. (2001) realizaron un análisis estructural en 2D y 3D para una construcción de mampostería y emplearon elementos de interface representada por una ley de fricción elastoplástica mejorada de Coulomb sin considerar tanta rigidez en el material y con una tolerancia para la dilatación. Entre otros modelos propuestos, Parrinello et al. (2009) presentaron un modelo de interface con comportamiento cohesivo y basado en la teoría de la mecánica del daño. Esta formulación permite modelar las propiedades mecánicas de la interface durante el proceso de extensión de las microfisuras hasta la formación de la superficie de macrogrietas.

b) Método de elementos discretos

En general, se denomina elementos discretos a los modelos numéricos que permite desplazamientos finitos y rotaciones de cuerpos discretos y reconoce nuevos contactos entre los bloques o partículas a medida que avanza el cálculo (Cundall y Hart, 1971). Sus primeras aplicaciones se generaron en el análisis de mecanismos de falla de roca dura en taludes, en general en la estabilidad de geomateriales. Con el desarrollo de distintas estrategias de modelado en construcciones históricas, este método ha sido aplicado para entender el comportamiento de la mampostería (Lemos, 2007). En este campo, la concepción fundamental es representar a la mampostería como un arreglo de bloques o partículas que interactúan a lo largo de sus límites. Se pueden generar modelos no lineales, simular desplazamientos grandes e incluso adaptarlos al estudio de fallas. De esta manera, se tienen distintas formulaciones, tales como, El Método de Elemento Distinto (DEM, por sus siglas en inglés Distinct Element Method), el Método de Elemento Finito-Discreto (FDEM, por sus siglas en inglés Finite-

Discrete Element Method), el Análisis de Deformación Discontinua (DDA, por sus siglas en inglés Discontinuous Deformation Analysis) y el Código de Flujo de Partículas (PFC, por sus siglas en inglés Particle Flow Code).

El DEM considera a los bloques como elementos discretos que se conectan entre sí y la interacción entre bloques se modela mediante leyes de fricción o de contacto cohesivo-friccional. Bajo el enfoque propuesto por Cundall y Hart (1971), se ha extendido ampliamente los trabajos realizados en el código UDEC para la simulación de arreglos con elementos discretos. Algunos ejemplos de ello son los trabajos de Giordano et al. (2002), Lemos (2007), Bui et al. (2017) y Foti et al. (2018). El campo de aplicación que se ajusta a los análisis DEM es el que analiza estructuras compuestas por mampostería de forma regular o de bloques de piedra. Entre algunos análisis típicos se encuentran los muros de carga, puentes de piedra, pilares, arcos, entre otros. Es recomendable usarlo para estructuras simples ya que modelos grandes implican una demanda computacional significativa (Roca et al., 2010). Actualmente, esa limitación parece ser menos clara ya que existen ejemplos como el de Çaktı et al. (2016) quienes generaron un modelo DEM de la mezquita Mustafa Pasha (ver Figura 2.15). El comportamiento no lineal del modelo numérico de bloques rígidos de la mezquita fue comparado con los ensayos experimentales en una mesa vibratoria. Con ello, mostraron que el enfoque de elementos discretos presentaba la capacidad de manejar el modelado dinámico no lineal de estructuras complejas de mampostería.

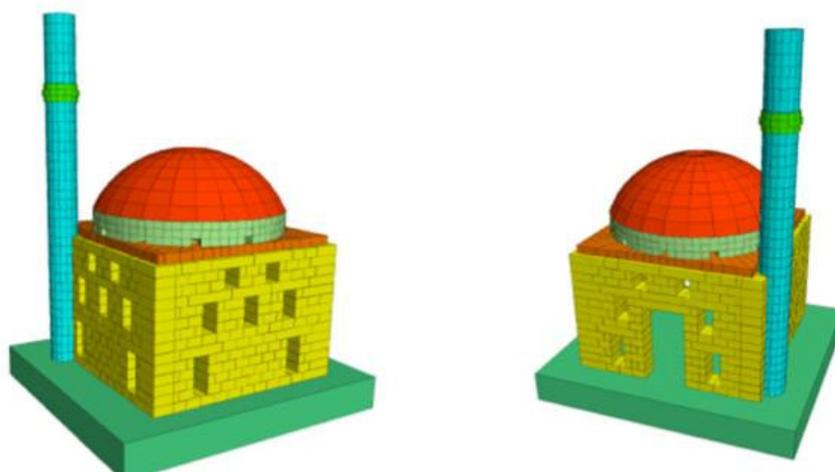


Figura 2.15 Vistas del modelo DEM de la mezquita Mustafa Pasha (Çaktı et al., 2016).

El Análisis de Deformación Discontinua (DDA) desarrollado por Shi (1992) consiste en representar la deformación de bloques mediante una integración implícita. En este modelado consideran los esfuerzos de tracción y la penetración entre bloques no está permitida. Este método ha sido aplicado exitosamente en arcos de mampostería (Bićanić et al., 2003). Algunas diferencias entre este enfoque y los DEM son que cada bloque tiene un estado de tensión uniforme, los desplazamientos son

desconocidos, el equilibrio se consigue con un método implícito y la energía potencial total del sistema se minimiza para encontrar la solución (Sarhosis, 2012).

Por otro lado, los modelos de partículas circulares y esféricas son otro tipo de métodos de elementos discretos que están teniendo mayor relevancia por sus aplicaciones en la ingeniería. El código de Flujo de Partículas es un software de modelado para el análisis micro-mecánico de geomateriales y sistemas de partículas. Una aplicación en mampostería se presenta en Thavalingam et al. (2001), quienes compararon la capacidad de carga de un puente de arco de mampostería mediante tres modelos. Uno de ellos es basado en elementos finitos, otro se analiza usando el DDA y el último con PFC. Siendo este último el más exacto (ver Figura 2.16) en las predicciones del colapso ya que se relacionaba con los resultados de modelo experimental.

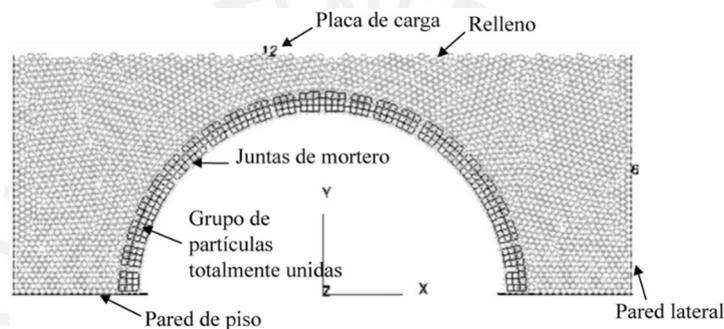


Figura 2.16 Modelo de un arco de mampostería semicircular relleno con partículas circulares (Adaptado de Thavalingam et al., 2001).

Con el desarrollo de las idealizaciones con discontinuidades en códigos de elementos finitos y la perspectiva inversa de esta idealización a través los DEM, la distinción entre los códigos generados en los FEM y DEM es más borrosa ya que se están combinando características de ambos métodos para analizar elementos (Lemos, 2007). Por ello, existen modelos de elementos finitos-discretos que combinan características de los métodos DE y FE. Por ejemplo, Owen et al. (1998) utilizaron elementos finitos y discretos para evaluar la capacidad de carga máxima de un puente dañado de arco de mampostería de dos tramos. Mientras que los bloques de mampostería fueron representados por elementos discretos deformables, el relleno fue representado por elementos discretos esféricos. Por otro lado, Komodromos (2005) propuso una formulación Lagrangiana actualizada que combinaba métodos de elementos finitos y discretos para la simulación de varios cuerpos deformables, como las estructuras de mampostería.

c) Modelo de bloques con análisis límite

El análisis límite es un método antiguo pero muy útil para determinar esfuerzos críticos y mecanismos de colapso. Baggio y Trovalusci (1998) fueron los pioneros en proponer un procedimiento para determinar la carga de colapso para estructuras tridimensionales completas

utilizando un enfoque de análisis límite no estándar. Ferris y Tin-Loi (2001) propusieron un modelo de bloques con análisis límite través de un programa de optimización llamado Programa Matemático con Restricciones de Equilibrio que formula y resuelve cargas de colapso de sistemas de bloques rígidos caracterizadas por interfaces de contacto friccionales no asociativas y sin fricción. Posteriormente, Gilbert et al. (2006) presentaron un procedimiento iterativo simple que resuelve problemas pequeños de programación lineal. Este análisis límite en conjuntos de bloques adopta una superficie de falla de Mohr-Coulomb actualizada en cada interface de contacto hasta que se obtiene una solución convergente. Portioli et al. (2013) formularon un avance a través de una programación de análisis de límites de estructuras de mampostería tridimensionales discretizadas con ensamblajes de bloques rígidos con interfaces de contacto sin tensión y fricción en la que se considera la torsión.

d) Modelos de elementos de contorno

Existen otros enfoques para el modelado de mampostería. Uno de ellos es el método de elementos de contorno (BEM) cuyo planteamiento numérico es parecido al FEM aplicado al micro-modelado. Alessandri y Brebbia (1987) fueron los primeros en aplicar el BEM para el análisis estático de muros de mampostería. Se usaron dos muros que fueron llevados al punto de colapso aplicando cargas horizontales y luego de ser reparados con inyecciones de mezclas de cemento se aplicó nuevamente cargas horizontales hasta el mecanismo de colapso. Los resultados de diagramas de desplazamiento y estados de tensión fueron comparados con los registrados de las pruebas experimentales. Más adelante, Rashed et al. (1997) utilizaron el BEM para modelar el comportamiento no lineal de la mampostería y consideraron los modos de falla por agrietamiento, desprendimiento y aplastamiento. Una aplicación más reciente es la de De Oliveira Neto et al. (2013) quienes presentaron una aplicación de una formulación BEM para el análisis de cuerpos anisótropos utilizando una solución fundamental isotrópica.

2.3.3 Micro-modelado detallado

El micro-modelado detallado consiste en la representación realista de cada componente de la mampostería. Bajo este enfoque se pueden considerar más propiedades mecánicas de cada elemento, ya sean elásticas o inelásticas. Tanto los bloques como el mortero presentan leyes constitutivas que reproducen su comportamiento así como la interacción entre estos (Asteris et al., 2015). Este método requiere mayor nivel de detalle por lo que también se necesita un gran esfuerzo computacional y se emplea generalmente para simular ensayos en muestras pequeñas para determinar la distribución de esfuerzo en los materiales. Para superar este inconveniente, se emplean estrategias de homogeneización que son técnicas de modelado que interpreta un medio heterogéneo mediante varios medios continuos únicos. Además, presenta como fin determinar los parámetros mecánicos del material ficticio único que representa mejor al material heterogéneo real (Rivieccio, 2006).

Aunque la homogeneización puede ser usada tanto en macro-modelos como en micro-modelos, se han desarrollado muchos micro-modelos que son bastante representativos para entender el comportamiento de la mampostería. Por ejemplo, Zucchini y Lourenço (2006) aplicaron la homogeneización no lineal que toma en cuenta la posibilidad de daño progresivo a tracción y compresión, tanto en la unidad como en el mortero. También, Lourenço (2009) aplicó un modelo basado en una expansión polinomial del campo de microesfuerzos. En la investigación, se comparó este modelo de partículas con un modelo continuo, en la cual el primero presentó mayor correlación con el modelo experimental. Milani et al. (2006) afirmaron que al unir el análisis límite con la técnica de homogeneización se obtendría una herramienta poderosa para el análisis estructural para producir resultados confiables en caso ocurra un colapso a nivel de micro-modelado. En Tiberti y Milani (2020a), mediante el concepto de "*test-window*", aplicaron exitosamente la homogeneización en mampostería. Luego, En Tiberti y Milani (2020b) presentaron un modelo 3D basado para ladrillos, como se muestra en Figura 2.17, que tiene como fin la derivación de superficies de falla homogeneizadas dentro y fuera del plano para mampostería.

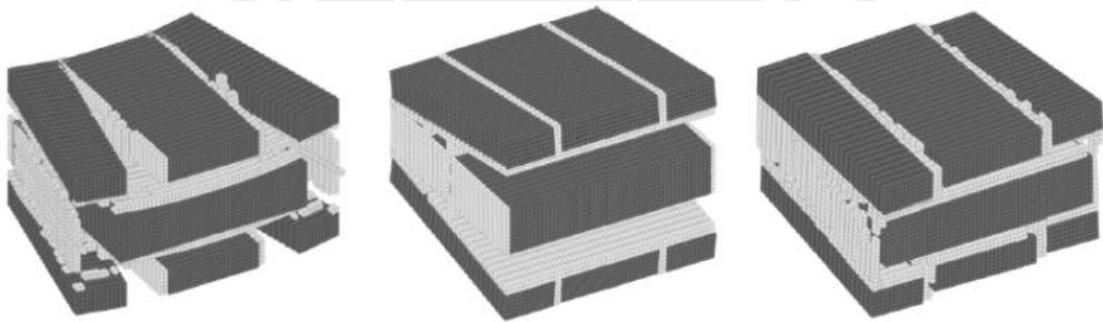


Figura 2.17 Modos de falla para condiciones de carga fuera de plano (Tiberti y Milani, 2020b).

2.4 Propiedades mecánicas de la mampostería y el relleno

a) Mampostería

La mampostería es una construcción compuesta por bloques los cuales pueden estar unidos con mortero o juntas secas. Los bloques son unidades como las piedras, adobe o ladrillo mientras que el mortero es cualquier tipo de ligante entre bloques, usualmente esta mezcla está conformada por cal o cemento, arena y agua. La principal división de la mampostería es según su tipo de apilamiento, como se observa en la Figura 2.18a, las piedras presentan una distribución irregular; en cambio en la Figura 2.18b, las piedras se distribuyen de forma regular. En estos tipos de construcciones, la interacción entre sus materiales es distinta y por tanto influye directamente en sus propiedades mecánicas de la mampostería.

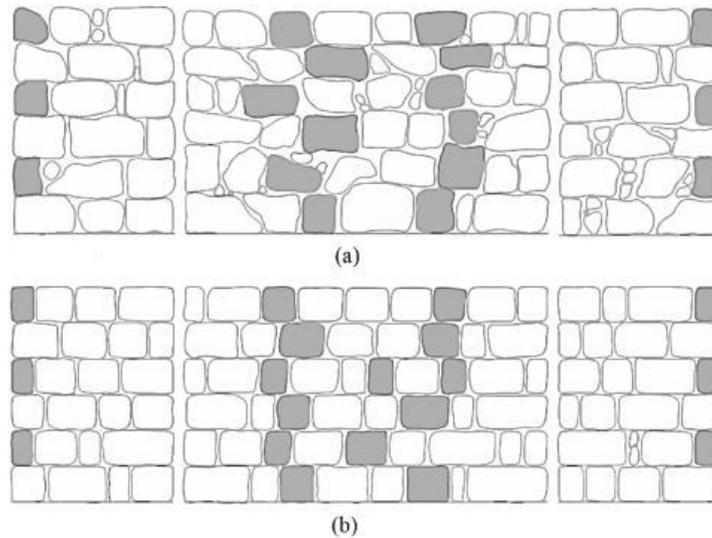


Figura 2.18 Elevación de muros que muestran dos tipos de construcciones: (a) construcción de mampostería irregular (b) construcción de mampostería regular (Adaptado de Maccarini et al., 2018).

Asimismo, exteriormente se puede clasificar a la mampostería con caras aparentemente regulares; sin embargo, se desconoce la composición interna. Binda et al. (1997) investigaron en diferentes zonas de Italia aproximadamente 2000 tipos de mampostería de piedra con el fin de realizar restauraciones con inyecciones de mortero y como resultado se obtuvo una clasificación de la mampostería según sus secciones transversales. Como se observa en la Figura 2.19a, los muros están bien conectados y están conformados por capas separadas de relleno con pequeños materiales de escombros. En la Figura 2.19b, las hojas están parcialmente conectadas por el relleno; en cambio en la Figura 2.19c las hojas no tienen conexión porque hay una superposición entre las piedras. Por último, en la Figura 2.19d, se clasifican a los muros por presentar tres o más hojas con capas externas de textura regular. Los investigadores recomendaron que en la modelación numérica de estos muros se consideren leyes constitutivas que representen la fricción y cohesión entre las unidades y el mortero para obtener una mejor simulación de su comportamiento.

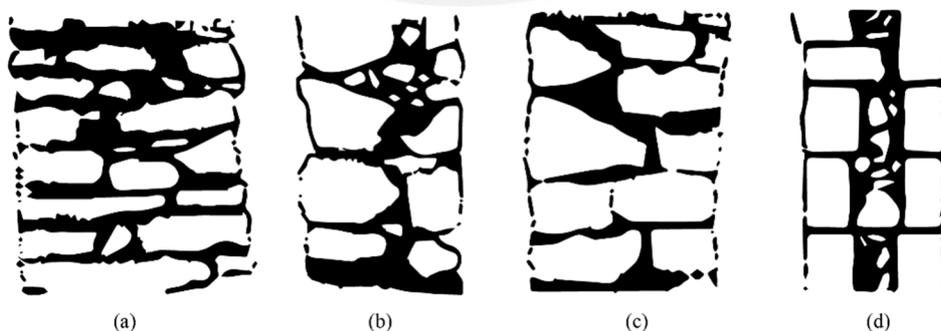


Figura 2.19 Clasificación de la mampostería de piedra según su sección transversal: (a) dos hojas bien conectadas, (b) dos hojas parcialmente conectadas, (c) dos hojas sin conexión y (d) tres o más hojas (Binda et al. 1997).

La mampostería presenta un comportamiento frágil en tensión. Esto quiere decir que falla de forma repentina cuando alcanza su capacidad máxima. Por otro lado, la piedra de la mampostería cuenta

con una alta resistencia a la compresión y una alta rigidez mayor a los valores del mortero. Esta diferencia conlleva que el comportamiento inicial de la mampostería se encuentre principalmente gobernado por las características mecánicas de las juntas. Estas pueden definir su ruptura principal como desplazarse por fuerzas de compresión, abrirse por fuerzas de tracción y deslizarse por fuerzas de cizallamiento (Quelhas et al., 2014). Asimismo, la mampostería posee un material discontinuo y anisótropo; por tanto, no se puede caracterizar su comportamiento de la misma forma que materiales compuestos más recientes como el acero, la madera y el hormigón armado (Huerta, 2004). Para conocer correctamente el comportamiento de la mampostería se deben caracterizar adecuadamente las propiedades mecánicas de cada componente (unidades y juntas), el ancho de las juntas, las dimensiones de las unidades, la calidad de obra y el estado de conservación (Lourenço, 1996). Todas estas características definen a la mampostería como un material muy heterogéneo y complicado de caracterizar.

En el caso de construcciones históricas, las propiedades mecánicas de los materiales se basan en una idealización debido a que la información acerca de su composición interna es aún complicada de definir. Esta falta de información conlleva a caracterizar a la mampostería como un material homogéneo e isótropo; es decir que sus propiedades son independientes de la posición y la dirección analizada. Considerando la idealización de las propiedades de la mampostería, en el rango lineal elástico, las propiedades más importantes de la mampostería son el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν) y la densidad (ρ). Según Meli (1998), se obtuvieron valores de módulo de elasticidad desde 0.50 GPa para la mampostería irregular con altos contenidos de mortero; en cambio, para la mampostería de piedra regular con juntas de mortero muy delgadas se ha registrado valores de elasticidad de 19.60 GPa. Por ende, se deduce que la organización de las piedras es un factor muy importante para la resistencia del conjunto.

Las propiedades mecánicas lineales, según material de literatura, para distintos tipos de mampostería en las construcciones históricas son agrupadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas lineales de la mampostería de piedra irregular, regular y ladrillo cocido.

Referencias	Propiedades mecánicas lineales de la mampostería								
	Piedra irregular			Piedra regular			Ladrillo cocido		
	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Milani et al. (2014)	-	-	-	-	-	-	1.50	-	1800
NTC (2008)	1.02- 1.44	-	1900	1.50- 1.98	-	2100	1.20- 1.80	-	1800
Ciocci et al. (2017)	-	-	-	-	-	-	0.85	0.20	1900
Angjeliu et al. (2019)	-	-	-	2.00	0.20	2000	2.00	0.20	1800
Ramírez et al. (2016)				1.90	0.20	2100	1.36	0.20	1800
Meli (1998)	0.49	-	2000	19.60	-	2000	0.49- 0.98	-	1600/ 2000

b) Relleno

Las construcciones históricas usualmente presentan materiales de relleno en los muros de mampostería, el extradós de las bóvedas de iglesias y puentes de mampostería, entre otros. Este material no suele ser considerado en el modelado de las iglesias históricas cuando los techos están contruidos con materiales ligeros que no generan mayor aporte estructural además del peso. Por ejemplo, en construcciones con techos de madera, las conexiones del el techo son difíciles de modelar por su comportamiento (Fonseca Ferreira y D' Ayala, 2012). Respecto a las construcciones de mampostería es importante considerar el trasdós de las bóvedas y arcos, ya que representan la parte de estructural del techo. Por otro lado, el relleno se suele considerar como un peso adicional en la estructura; sin embargo, podría ser modelado de acuerdo a su magnitud e importancia, tal como sucede en el relleno de los puentes de mampostería.

Actualmente, existe poca información acerca de este material en las iglesias históricas de mampostería a diferencia de los puentes de mampostería que posee más estudios. Sin embargo, de manera general, la influencia estructural en las bóvedas se puede considerar la misma en ambas construcciones. Aunque Milani et al. (2014) indicaron que el relleno en las bóvedas de los edificios históricos fueron normalmente contruidos con menor cuidado que en el caso de los puente de mampostería y por tanto los parámetros mecánicos pueden ser sobreestimados o más inciertos.

Además de la presencia del relleno como carga adicional, este material es un elemento importante debido a sus funciones estructurales. Por ejemplo, el relleno apoya en el reparto de cargas las cuales son aplicadas en su superficie. También, su peso propio genera un efecto de precompresión en las bóvedas y esto sirve de estabilidad porque las comprimen inicialmente favoreciendo su comportamiento estructural. Asimismo, el relleno que parte del trasdós de las bóvedas verticaliza las reacciones en sus extremos actuando como estructuras de contención. Por tanto, se evidencia el papel fundamental de los rellenos para asegurar la estabilidad de las bóvedas y los demás elementos estructurales.

La influencia estructural del relleno en las bóvedas es variable dependiendo de la composición del material que contiene. Para ello, Ramos (2015) realizó una clasificación de los rellenos en el extradós de las bóvedas de edificios históricos (ver Figura 2.20) y según su morfología los dividió de la siguiente manera:

- Relleno rígido: Está formado por materiales de diferentes granulometrías unidos por un material ligante; es decir, este tipo de relleno presenta una cohesión elevada. Además, posee mucha rigidez parecida a la bóveda.

- Relleno granular firme: Está constituido por material granular de tamaño grande, pero sin ligante; es decir, que carece de cohesión interna. Es una transición entre el relleno rígido y el relleno granular suelto.
- Relleno granular suelto o cohesivo: Está compuesto por arenas o arcillas con cierta cohesión, pero sin ligante.
- Relleno aligerado: Está conformado por vasijas de barro cocidas, huecas y tapadas, cal y canto formado por arena y trozos de materiales cerámicos, etc. Estos materiales evitan una carga innecesaria en las bóvedas. En general, la altura de estos rellenos es elevada y llega a cubrir el trasdós de las claves que son elementos que unen a los nervios en las bóvedas.
- Escombros: Está constituido por restos de derrumbes (ladrillos, maderas, tejas, etc.) y cumplen una función de carga muerta en las bóvedas.

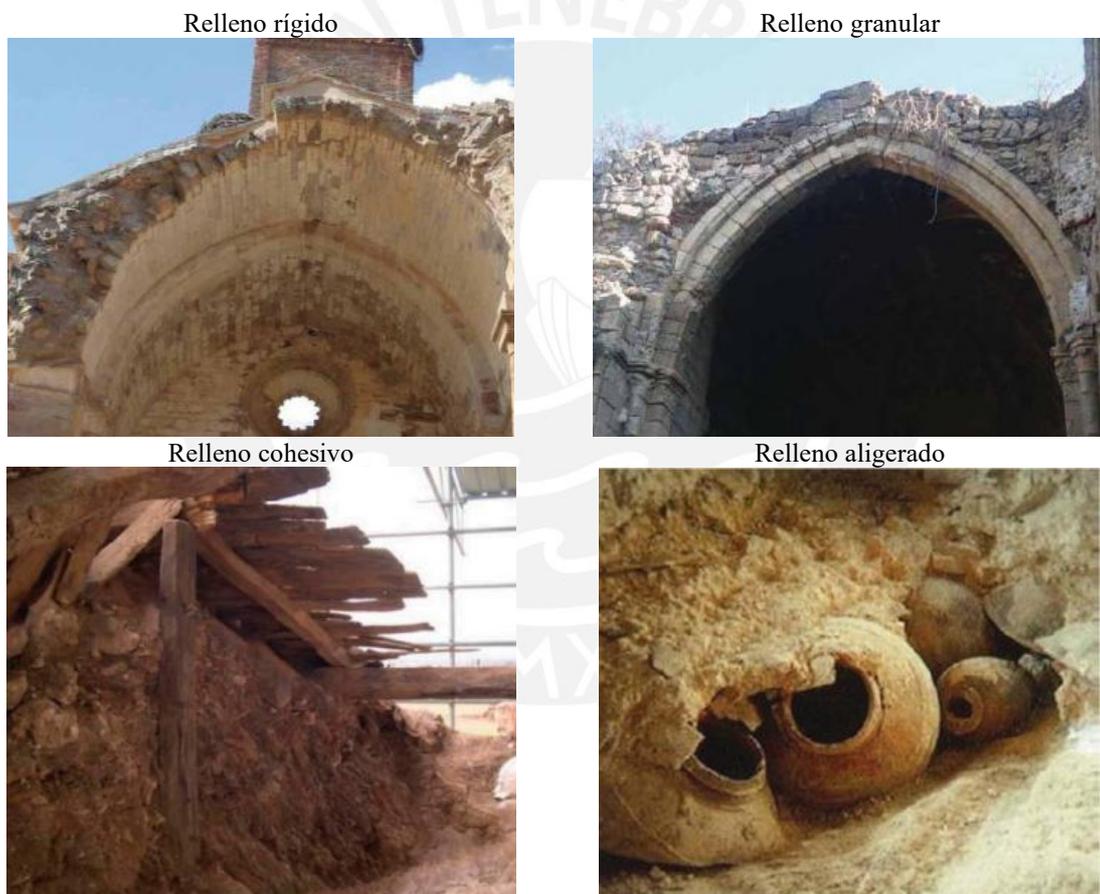


Figura 2.20 Tipología del relleno encontrado en el extradós de las bóvedas de España (Ramos, 2015).

Por otro lado, para mejorar la consideración de comportamiento estructural de las bóvedas, es importante mencionar que el relleno rígido está situado generalmente en el arranque de las bóvedas y el relleno granulado como el aligerado están sobre el relleno rígido. En el caso de la Figura 2.21a, se muestra la disposición del relleno encontrado en bóvedas de estilo románico y en el caso de la Figura 2.21b se presenta la distribución de relleno encontrado en bóvedas de crucería góticas.

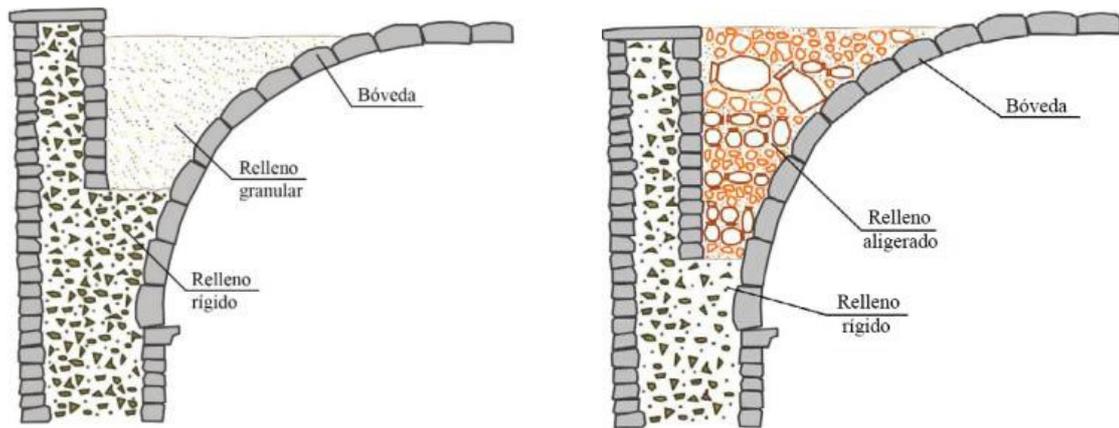


Figura 2.21 Disposición habitual de los rellenos: a) Relleno rígido y granular y b) Relleno rígido y aligerado (Ramos, 2015).

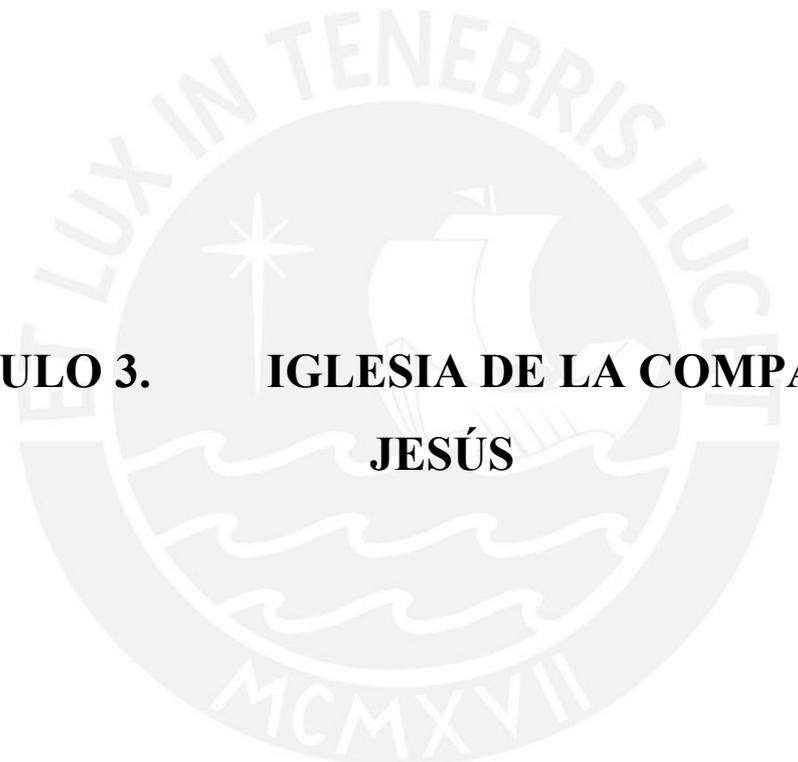
Además de estos materiales de relleno, pueden existir materiales pesados y contaminantes en su contenido que disminuyen aún más el tiempo de vida en la mampostería donde reposa. Por tanto, es importante realizar la estratigrafía del relleno la cual requiere una amplia investigación in situ en las estructuras; sin embargo, esta es una actividad complicada por el difícil acceso a su contenido. En el caso de incertidumbre de los materiales que lo componen, se consideran materiales de rellenos probables ya que estos, por lo general, están conformados por recursos cercanos a las construcciones.

Milani et al. (2014), Saloustros et al. (2020) y Angjeliu et al. (2019) presentaron distintas propiedades mecánicas en el material de relleno. Milani et al. (2014) utilizaron el 0.75GPa para el relleno como propiedad asumida según valores recomendados por la norma italiana. En Saloustros et al. (2020) mencionaron que se puede considerar un modelo de relleno resistente con 0.80 GPa y otro modelo no resistente y no cohesivo con 0.03 GPa. En el caso del segundo modelo, se consideró esta propiedad debido a que en la parte interior se encontraron materiales de mala calidad. Por último, Angjeliu et al. (2019) indicaron que las propiedades del relleno fueron asumidas como 0.80 GPa en la catedral de Milán debido a que similares propiedades fueron reportadas otras en catedrales góticas.

Se ha realizado una tabla resumen, ver Tabla 2.2, de las propiedades mecánicas lineales de este material según material de literatura.

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas lineales del relleno.

Referencias	Propiedades mecánicas lineales del relleno		
	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Milani et al. (2014)	0.75	-	-
Saloustros et al. (2020)	0.03/0.80	-	1900
Angjeliu et al. (2019)	0.80	0.20	1600



**CAPÍTULO 3. IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE
JESÚS**

3.1 Información general

3.1.1 Ubicación y composición

La iglesia de la Compañía de Jesús está situada en la Plaza de Armas de la ciudad de Cusco con dirección al suroeste. Su conjunto monumental está conformado por la Capilla de Nuestra Señora de Loreto, antes llamada Capilla de Indios, la cual está situada a la izquierda de la iglesia, mientras que al lado derecho, se encuentra la Capilla San Ignacio de Loyola y el Paraninfo Universitario (Chara Zereceda y Caparó Gil, 1998). Por su antigüedad y sus características arquitectónicas y artísticas excepcionales, esta iglesia posee una gran relevancia histórica. En principio, fue construida con fines religiosos por los jesuitas; sin embargo, en la actualidad también contribuye económica y culturalmente a la ciudad debido al turismo. Algunos de los componentes artísticos más importantes de la iglesia son la fachada y el altar mayor. La portada retablo, mostrada en la Figura 3.1a, es el elemento más importante de la arquitectura de la iglesia jesuita y, por su altura y relieves, influyó en la composición de iglesias en Cusco que la tomaron como referencia (Kubiak, 2012). Por otro lado, el altar mayor (ver Figura 3.1b) fue construido en madera recubierta en pan de oro y tiene una altura aproximada de 18 m. Es importante mencionar que la riqueza artística de la iglesia está dada por una colección prominente de esculturas y cuadros de la Escuela Cusqueña.



(a)



(b)

Figura 3.1 Fotografías de la iglesia de la Compañía (a) fachada de la iglesia (b) altar mayor.

3.1.2 Reseña histórica

La última orden religiosa de la Iglesia católica en llegar a América fue la Compañía de Jesús, la cual se fundó el año 1540. Una de sus prioridades fue la evangelización y con esta consigna llegaron al Perú los primeros jesuitas en el año 1568 y a la ciudad de Cusco en el año 1571 encabezados por el padre Gerónimo. Luego, el virrey Toledo adjudicó el sector urbano incaico denominado Amarucancho o “casa de la serpiente” a la Compañía. Este lugar presentaba una doble importancia

simbólica, ya que se encontraba en la plaza mayor y era uno de los lugares más sagrados de la ciudad por haber sido el palacio de Huayna Cápac (Alcalá, 2002).

En 1578 empezó la primera construcción de la iglesia de la Compañía con el apoyo de Teresa Ordoñez, esposa del conquistador Diego de Silva. La construcción fue dirigida por el arquitecto Juan Ruíz, a quien se le atribuye el trazado de la iglesia. En 1587 se concluyó la portería y el campanario, además algunas obras complementarias, mientras que en 1593 se consagró la edificación, siendo uno de los primeros templos en construirse en Cusco (Alcalá, 2002). A esta primera iglesia, también llamada “iglesia primitiva” fue más pequeña que la actual y se conformaba de una nave, dos capillas y un coro alto (Gisbert y de Mesa, 1985).

El 31 de marzo de 1650 ocurre, en Cusco, el terremoto más fuerte desde la creación de la ciudad. Este evento destruyó gran parte de la ciudad, siendo los templos las estructuras más dañadas (Cuenca, 1991). En el caso de la iglesia de la Compañía de Jesús, se desplomó gran parte de la estructura y, por la gran inestabilidad que presentaban los elementos restantes, se decidió derrumbar todo el complejo. En cambio, la Capilla de Indios no sufrió daños severos por lo que fue utilizada para los eventos religiosos mientras se reconstruía la iglesia de la Compañía con las donaciones de la orden Jesuita (Gisbert y de Mesa, 1985). Los primeros trabajos iniciaron en 1651 y culminaron en el año 1668. La iglesia se presentó como un monumento emblemático de Cusco que generó un conflicto entre comunidades religiosas, ya que el catedralicio quería proteger la supremacía de la Catedral del Cusco por ser la iglesia más majestuosa por sus dimensiones y arquitectura. Por ese motivo, se establecieron límites en su tamaño, enfocándose en mejorar su lado artístico y arquitectónico. En ese sentido, este monumento se convirtió en una construcción pionera del barroco en el Perú y una de las iglesias más bellas de América por la armonía y detalles arquitectónicos en su interior y exterior (Kubiak, 2012).

3.1.3 Antecedentes de las intervenciones

El 21 de mayo de 1950 ocurrió un sismo importante en la ciudad de Cusco, el cual tuvo una intensidad de VII en la escala de Mercalli y dañó a más de la mitad de las construcciones en la ciudad. Con respecto a los templos, los más dañados fueron el convento de Santo Domingo, iglesia de la Compañía de Jesús, la Universidad San Antonio Abad, el Convento de Santa Catalina y las iglesias de Belén y San Sebastián (de Acevedo, 1982). En la iglesia de la Compañía, se derrumbó el arco de descarga de la fachada lo que ocasionó fallas en la bóveda del coro y el dintel interior. Asimismo, se destruyó la parte alta de los campanarios de la iglesia y la parte occidental sufrió mayores daños por los problemas de inestabilidad de la torre. En cuanto a los techos, la cúpula presentó agrietamientos y se hundió por el ensanche que se presentó en el tambor, y también hubieron agrietamientos importantes en las bóvedas (Kubler, 1952).

La evaluación del estado de conservación de los monumentos en Cusco fue posible por la misión enviada por la UNESCO, a cargo de George Kubler. A partir de este acontecimiento, se generaron avances en la restauración del patrimonio en Cusco, pues se creó la Junta de Reconstrucción y Fomento Industrial de Cusco. Esta entidad promovió la restauración de varios monumentos, uno de ellos fue la iglesia de la Compañía de Jesús (Kubler, 1952). El programa de restauración duró desde 1951 hasta 1956; sin embargo, se identificó que se realizaron más intervenciones arquitectónicas y estructurales, de las cuales muy pocas han sido documentadas (de Acevedo, 1982).

Las intervenciones realizadas después del sismo de 1950 en la iglesia de la Compañía consistieron en el apuntalamiento de bóvedas y puertas debilitadas, la reparación del campanario de la torre occidental, el reforzamiento de la cubierta de la bóveda de la capilla de Loreto, etc. Posteriormente, se reconstruyeron las partes dañadas, las cuales se concentraban en el techo y se intervinieron algunos muros, puertas y cornisas (Kubler, 1952). Las mayores intervenciones fueron la reconstrucción de los campanarios y la reparación de la cúpula (ver Figura 3.2). En los campanarios, se construyeron andamiajes a su alrededor para recolocar los bloques de piedra con uniones de mortero de cemento y varillas de acero. En la cúpula, se construyeron andamiajes en su interior y exterior que sirvieron para el apuntalamiento y la reconstrucción de siete contrafuertes del tambor y la linterna, mientras que, para rectificar el tambor, se colocaron dos cercos de acero a su alrededor.

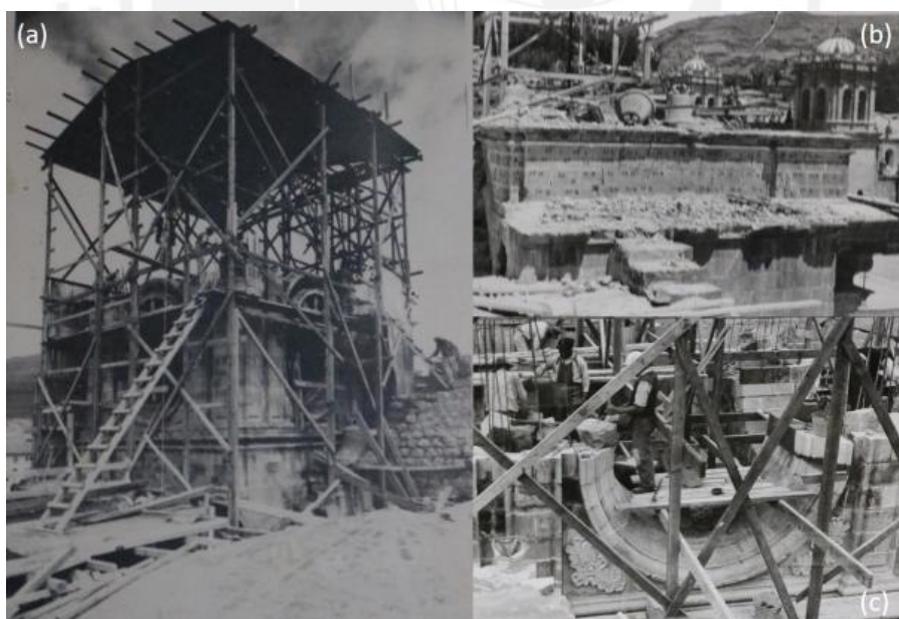


Figura 3.2 Archivo fotográfico de la reconstrucción de los campanarios de la iglesia por el sismo de 1950 (a) apuntalamiento y andamiaje (b) enumeración de bloques (c) reconstrucción.

El último sismo que afectó a la iglesia de la Compañía de Jesús ocurrió el 5 de abril de 1985. A pesar que no hubieron daños considerables en la iglesia, ocurrieron desprendimientos de elementos arquitectónicos y todo el techo fue afectado por agrietamientos y asentamientos en las bóvedas de la nave y la cúpula (Chara Zereceda, 1992). Por ello, se intervino la iglesia con trabajos de reparación

que duraron desde 1986 hasta 1989. Según el Instituto Nacional de la Cultura de Cusco (INC-Cusco, 1990) las intervenciones realizadas en la iglesia se centraron en los techos, particularmente el sistema de bóvedas (ver Figura 3.3 y Figura 3.4).

En 1986 se realizaron trabajos de apuntalamiento, reforzamiento estructural de los templetes, consolidación integral de la parte superior del imafronte con mortero y la consolidación de la linterna con el refuerzo de las columnas. Luego, en 1987 se consolidó la bóveda del coro de la iglesia y la primera bóveda de crucería de la nave principal, la cual es la más cercana a la fachada. Con respecto a la cúpula, se mejoró el cimborrio renovando el material deteriorado y aumentando acero en el núcleo. En 1988 se consolidó la segunda bóveda de la nave y se reforzaron los revoques y acabados hasta la pintura interior. En la cúpula, se consolidaron dos contrafuertes del cimborrio. El año siguiente se completó la restauración de la tercera y cuarta bóveda, asimismo, se mejoraron las bases de los contrafuertes.

Posteriormente, el INC-Cusco (1990), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y otras instituciones realizaron intervenciones del patrimonio cultural de Cusco. Entre 1988 y 1992, estas instituciones ejecutaron trabajos en la Compañía de Jesús enfocados en la restauración arquitectónica del lugar, la restitución de empastes en muros y bóvedas, la recuperación de los pisos de ladrillo pastelero y laja de piedra, los trabajos de carpintería, la iluminación, entre otros. Adicionalmente, hasta 1994 se realizaron trabajos de restauración artística de los retablos, esculturas y lienzos de la iglesia. A pesar de la poca documentación existente respecto a los cambios realizados en la iglesia, es notorio que distintos fenómenos como los sismos, las lluvias y la interacción de la estructura con el suelo han menguado la resistencia de la iglesia.

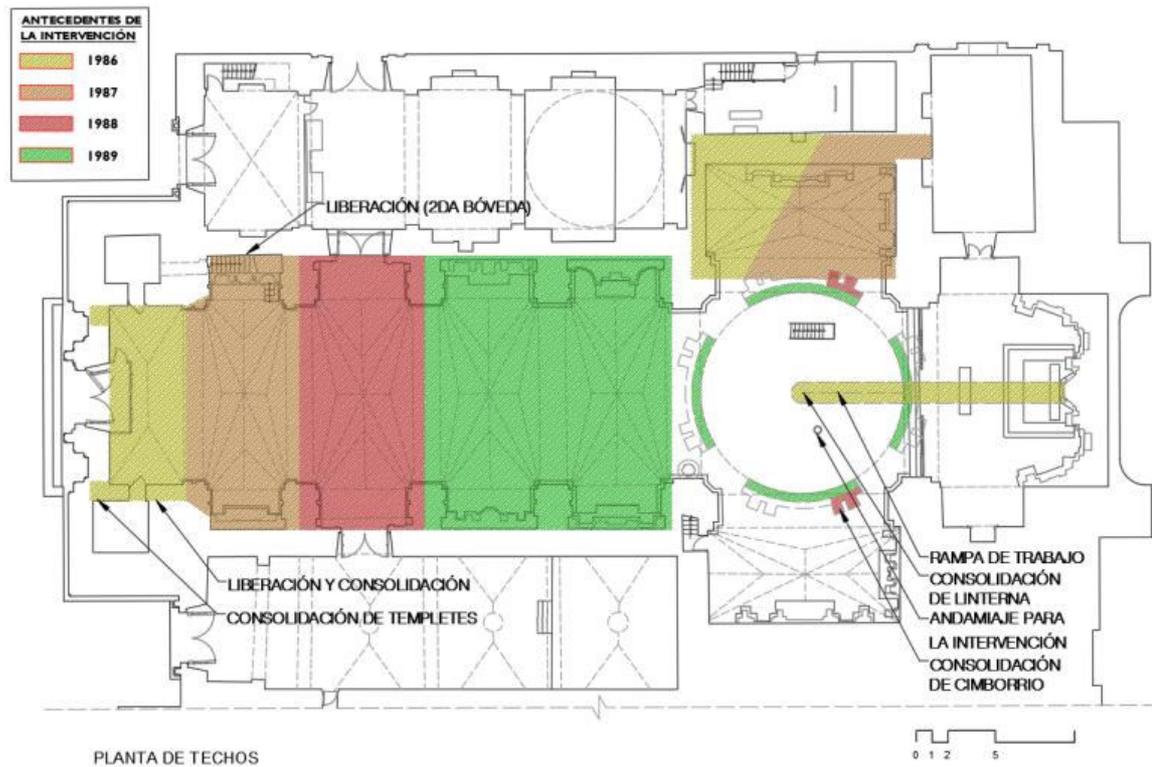


Figura 3.3 Intervenciones entre los años 1986 y 1989 en la planta de techo de la iglesia Compañía de Jesús (información adaptada de INC-Cusco, 1990).

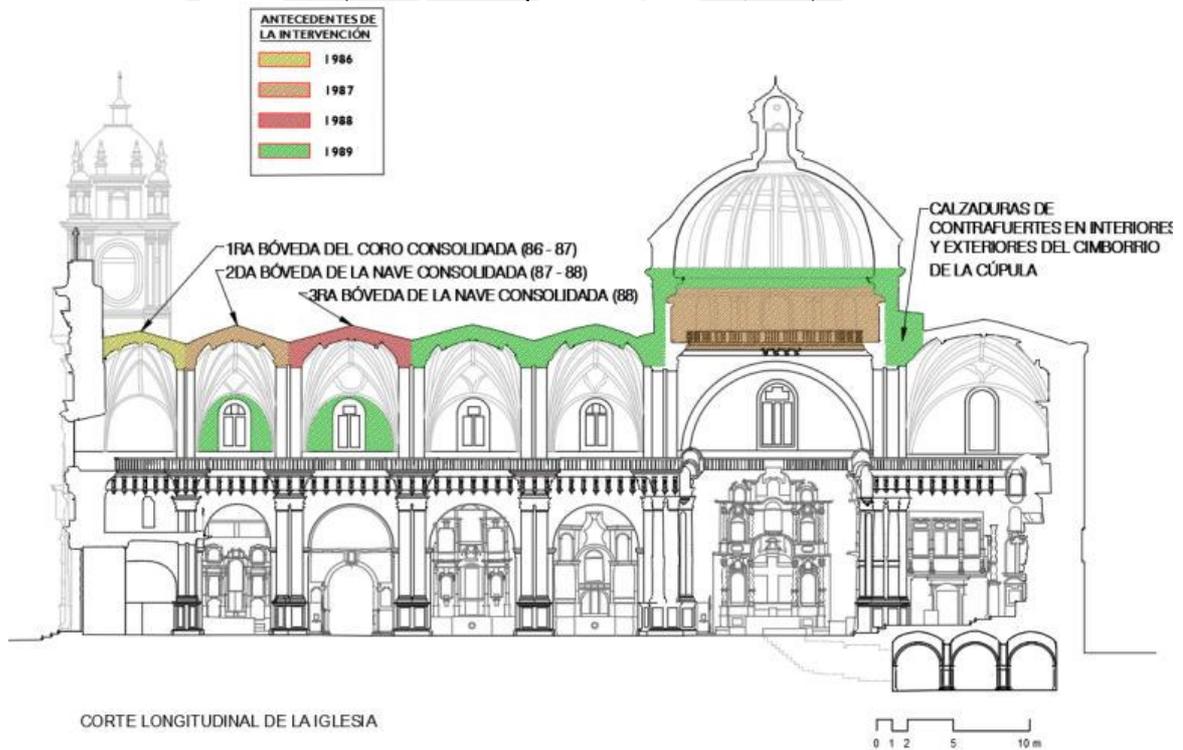


Figura 3.4 Vista en corte de las intervenciones realizadas entre 1986 y 1989 (información adaptada de INC-Cusco, 1990).

3.2 Sistema constructivo

3.2.1 Descripción arquitectónica

Durante la segunda mitad del siglo XVII, la arquitectura cusqueña se convirtió en un gran centro artístico de la zona andina, ya que impresionaba por la sencillez y esplendor de sus elementos (Luks, 1973). Luego del sismo de 1650, se construyeron las iglesias más importantes en Cusco adaptando un estilo barroco europeo e influencias de la cultura incaica. Las construcciones con mayor relevancia en la región andina han sido construidas en piedra por las grandes dimensiones que proyectan. En el caso de la iglesia de la Compañía de Jesús, se tomó como referencia inicial la iglesia del Gesù en Roma y a pesar de que se quiso mantener un estilo único para las iglesias, cada una adquirió características propias (Caja Municipal de Cusco, 2013).

La iglesia de la Compañía presenta una planta de cruz latina y una configuración unitaria. Entre los espacios de la iglesia se tiene un coro, una nave, un crucero, dos transeptos, el presbiterio y la sacristía, y tiene una capilla subterránea descubierta durante las exploraciones de 1986. El exterior de la iglesia está caracterizado por su imponente altura y su proporcionalidad respecto a las torres campanario y la fachada. Adicionalmente, la presencia de la cúpula y las dos capillas laterales constituyen un conjunto armónico y elegante (Caja Municipal de Cusco, 2013). La iglesia generó un nuevo estilo barroco en Cusco que sirvió como modelo para muchas iglesias de la región, tanto en la composición de la fachada, el diseño y distribución espacial y los motivos decorativos-ornamentales (Kubiak, 2012).

El barroco cusqueño con su tendencia monumental y volumétrica se presenta en la fachada de la iglesia de la Compañía (ver Figura 3.5). La fachada de la iglesia tiene una configuración de portada retablo que, según (Luks, 1973), se inspira en el arte de los tallistas de retablos y anticipa la visión del altar, por lo que guarda íntima relación con el interior de la iglesia. Las portadas retablo ofrecían una presentación artística que acentúa el carácter religioso y espiritual del lugar y dentro del paisaje (Kubiak, 2012).



Figura 3.5 Detalle arquitectónico de la fachada de la iglesia de la Compañía (Caja Municipal de Cusco, 2013).

La iglesia de la Compañía presenta tres cuerpos y tres calles y, entre sus elementos característicos, están presentes en la portada retablo: la cornisa abierta en arcos verticales, el remate superior curvo y el empleo de ejes de columnas de dimensiones iguales en cada cuerpo. El cuerpo de la torre-campanario presenta en el tercio inferior, ménsulas que soportan una cornisa. El techo de cada campanario reposa sobre una base cuadrada con un remate de tambores octogonales con “ojos de buey” y pequeños edículos en las esquinas.

Una descripción más detallada de los elementos arquitectónicos de la fachada es presentada por (Chara Zereceda y Caparó Gil, 1998). En esta investigación, se describió la gran cantidad de ornamentos que presenta. Por su composición, la fachada de la iglesia generó una notable influencia que se ve reflejada en otras iglesias construidas posteriormente tales como la iglesia de San Sebastián y la de San Pedro en Cusco y la iglesia de Ayaviri en Puno (Kubiak, 2012).

En el interior de la iglesia, el coro, ubicado detrás de la fachada, es un entresijo de un tramo sostenido por una bóveda de arista y un arco carpanel. Los muros de la nave central tienen cuatro arcos de medio punto y entre estos hay columnas adosadas que sostienen arcos fajones dobles. En el crucero, los arcos formeros están soportados por columnas y capiteles corintios que reposan sobre pedestales. Estos arcos junto con las pechinas sostienen el tambor y este, a su vez, sirve como apoyo de la cúpula de media naranja nervada en una linterna monóptera (Chara Zereceda y Caparó Gil, 1998). El tambor tiene un cimborrio, cuatro vanos y ocho contrafuertes. La iglesia de la Compañía de Jesús está compuesta por distintos tipos de bóvedas. Por ejemplo, en la nave principal, el transepto y la sacristía de la iglesia se localizan bóvedas nervadas; en cambio, en las capillas, se observan bóvedas de cañón con lunetos y una bóveda vaída en la Capilla de Loreto. Los coros de la iglesia y las capillas están conformados por bóvedas de arista y en el sagrario se ubica una bóveda de cañón.

3.2.2 Descripción estructural

Con relación al sistema de fundación, la iglesia primitiva se construyó en un terreno bastante blando y poco resistente. Este terreno es descrito en crónicas como tierra pantanosa y con presencia de manantiales (Gisbert y de Mesa, 1985). En los cimientos de la iglesia se encuentran restos del *Amarucancha* (ver Figura 3.6), los cuales fueron cubiertos por tierra y otros materiales de relleno. Esto hizo que la interacción suelo y estructura sea heterogénea y difícil de proyectar. Además, antiguamente el río Saphi pasaba cerca del *Amarucancha*; por lo tanto, existía un suelo saturado. La solución elegida al construir la iglesia fue cubrir el área con piedra menuda y colocar entablados de madera para sobreponer piedras más grandes. Luego del sismo de 1650, se aplicó un reforzamiento del suelo con una técnica muy similar para la reconstrucción de la iglesia (Gisbert y de Mesa, 1985).

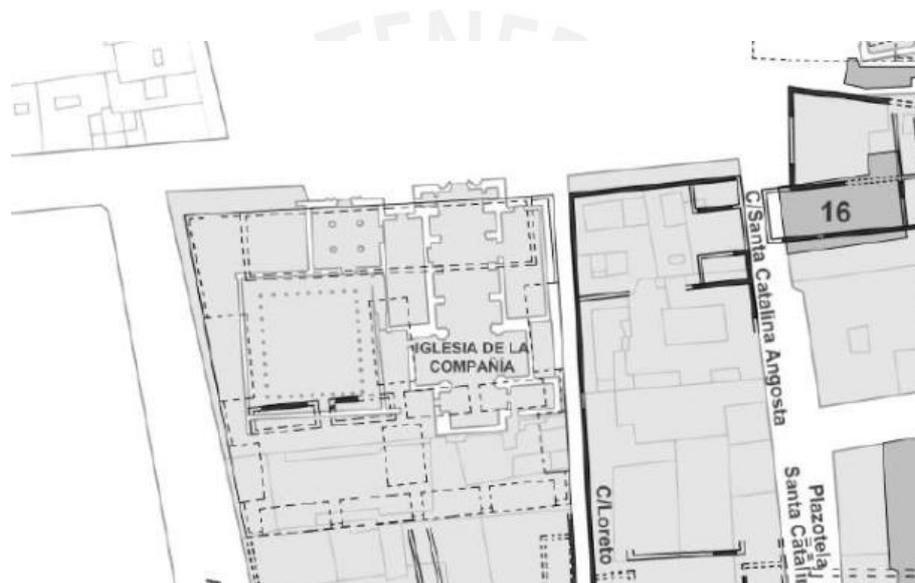


Figura 3.6 Diagrama de la ubicación proyectada del *Amarucancha* bajo la Iglesia de la Compañía (Beltrán Caballero, 2013).

La iglesia de la Compañía de Jesús fue construida con muros de mampostería de piedra de gran espesor, cuyo arreglo y composición varían según la importancia del lugar. Por ejemplo, el interior de la nave principal, el exterior de las torres y la fachada tienen un aparejo regular por ser la parte más visible de la iglesia. Los muros de las iglesias contiguas, así como gran parte del exterior de la iglesia, están contruidos de mampostería irregular compuesta de piedras redondas poco labradas y gran cantidad de mortero. Los muros de la nave principal poseen un espesor promedio de 2.00 m y los muros longitudinales poseen 2.20 m de espesor. En la parte externa de cada muro longitudinal de la nave principal de la iglesia existen tres contrafuertes que refuerzan los muros y se extienden hasta el techo con una altura aproximada de 18 m. Debido a su gran espesor, los muros, al igual que los pilares y contrafuertes, están compuestos por un relleno interior de piedra canteada y mezcla pobre de mortero. Respecto a los materiales, la piedra de la iglesia es roca ígnea y, al haber sido extraída de canteras cercanas, es en su gran mayoría andesita, mientras que el mortero es de cal y arena.

El sistema constructivo del techo empezó con estructuras de madera que se armaron para luego colocar la albañilería que conforman a los arcos fajones. Estos elementos soportan el peso de las bóvedas y por ello poseen columnas adosadas que están alineadas con los contrafuertes. Asimismo, se utilizaron como apoyo a los arcos y puntales y se armó una bóveda falsa de madera sobre la cual se aplicó una capa de yeso y arcilla que sirvió para el acabado. Debajo de esta capa se encontraron ladrillos de arcilla con mortero de argamasa (Chara Zereceda, 1992).

Posteriormente, se aplicó una capa de mortero fino compuesto por cal, arena y arcilla que unió la albañilería con el relleno de las bóvedas. Este relleno está compuesto por piedras, como canto rodado. Estas piedras se caracterizan por ser densas por lo que se colocaban cerca a los extremos y al llegar al centro se usaba piedra pómez que son más ligeras y se unían con un mortero de argamasa. La última capa consistió en ladrillos pasteleros y cerámica que se colocaron sobre una capa de teja andina (Chara Zereceda, 1992).

Las capillas laterales son estructuras más pequeñas que colindan con la iglesia. Su sistema estructural se compone de una nave, un crucero, transeptos, un altar mayor, una sacristía y capillas (ver Figura 3.7). Los muros de estas capillas presentan un espesor de 2.10 m en promedio y son de mampostería irregular, con excepción de la fachada que está construida con piedra labrada. Las capillas poseen bóvedas tipo cañón con lunetos y la iglesia posee bóvedas de crucería y aristas que están construidas por albañilería de ladrillo. Todas las capillas poseen un relleno sobre su extradós. Las cubiertas de las capillas están revestidas con yeso y presentan un mayor uso de albañilería de piedra para algunos de los elementos del techo como los arcos formeros.

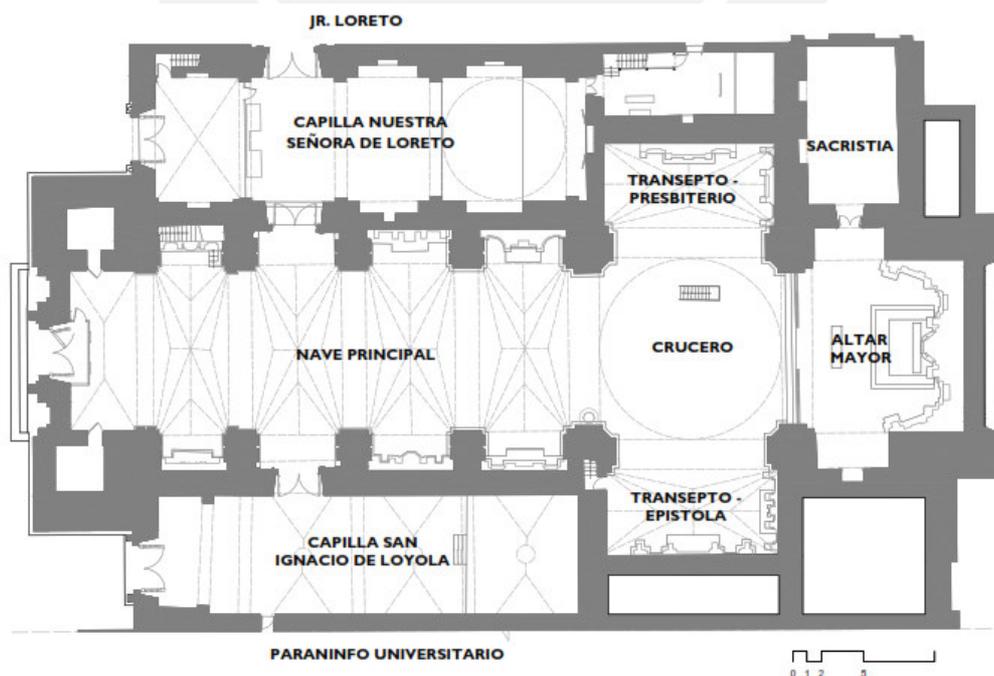


Figura 3.7 Planta del complejo de la Compañía de Jesús



CAPÍTULO 4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL IN-SITU

4.1 Levantamiento geométrico

Se logró obtener información importante de la geometría de la iglesia mediante el escaneo láser terrestre y la fotogrametría aérea. Es preciso enfatizar que el escaneo láser terrestre brindó información un levantamiento geométrico de los elementos estructurales de la iglesia como la nave principal, el coro, los campanarios, la capilla subterránea y el interior de las capillas. Mientras que la fotogrametría aportó información complementaria de la zona exterior como los contrafuertes, el tambor, la cúpula, etc.

Las sesiones de escaneo láser se llevaron a cabo en el interior del templo con el escáner Leica ScanStation C10. En esta investigación, se realizaron 44 sesiones que consistieron en un escaneo de resolución media de 360°. La información de la nube de puntos obtenida del levantamiento geométrico fue procesada y unida con el software Leica (Leica Geosystems, 2017). Una vez realizado este procedimiento, se exportó el archivo al software Autodesk Recap Pro (Autodesk, 2021) con la finalidad de extraer las dimensiones y formas geométricas de los elementos estructurales de la iglesia. Es importante mencionar que se filtró la nube de puntos para eliminar el ruido con el fin de reducir la cantidad de información y obtener un procesamiento más rápido.

Asimismo, se realizó un levantamiento fotogramétrico en base a fotos aéreas obtenidas con un dron modelo Phantom 4 Pro. En total, se tomaron 281 fotos en tres secuencias de vuelo a diferentes alturas y ángulos de inclinación de la cámara. Para realizar el levantamiento, se colocaron tres puntos de control con un sistema de coordenadas UTM-WGS84 con el fin de mejorar la precisión de las imágenes. Finalmente, para generar la nube de puntos y la malla triangular se utilizó el programa Agisoft Metashape Professional (AgiSoft LLC, 2018).

Posteriormente, mediante el programa Geomagic (3D Systems, 2018) se realizó la hibridación o unión de la nube de puntos de ambos ensayos. Se importaron los datos del escaneo láser terrestre y la fotogrametría al programa y se ajustó el nivel de referencia para que el punto de origen coincidiera con ambos conjuntos de datos. Con la unión de ambas nubes de puntos, se obtuvo una mejor medición de los elementos geométricos. El resultado de la hibridación se muestra en la Figura 4.1a, para la vista exterior y en la Figura 4.1b para la parte interior de la iglesia.



Figura 4.1 Nube de puntos híbrida de (a) la fotogrametría aérea y (b) el escaneo láser terrestre.

4.2 Inspección de anomalías

La inspección visual tiene la finalidad de identificar el deterioro y daño de la estructural. Esto sirve para dirigir adecuadamente las investigaciones futuras y determinar si existen riesgos inmediatos que necesiten medidas urgentes (ICOMOS, 2003). Toda construcción patrimonial presenta patologías que nos permiten entender sus cambios a través del tiempo y las causas del deterioro. En el caso de la iglesia de la Compañía, gran parte de las patologías existentes son efecto de condiciones perennes del ambiente como el clima lluvioso, el efecto del suelo y los daños de sismos pasados, particularmente el sismo de 1950.

La inspección visual empezó por el reconocimiento del lugar con una visita de exploración organizada con la generación de planos en planta y corte, una planificación del recorrido y la obtención de los permisos de los encargados del lugar. Luego de la visita, se elaboró una leyenda de anomalías (ver Figura 4.2) para las grietas en los muros, el desprendimiento de material, la humedad, y la contaminación biológica debido a las lluvias de la zona, etc.

LEYENDA	
 Contaminación biológica de muros	 Grietas
 Humedad por capilaridad	 Desconexión de muros
 Desprendimiento de mortero	 Erosión de la piedra
 Desprendimiento de piedra	 Manchas en paredes

Figura 4.2 Leyenda de anomalías encontradas en la iglesia.

Además, se realizó un plano de anomalías interior de la planta (Figura 4.3a) y la fachada de la iglesia y la Capilla de Loreto, como se muestra en la Figura 4.3b. En términos generales, existen elementos estructurales con daños moderados, como en la parte alta de los campanarios y los muros de la nave

principal de la iglesia. La mayor parte de estos daños se deben a la ocurrencia de eventos sísmicos en la zona.

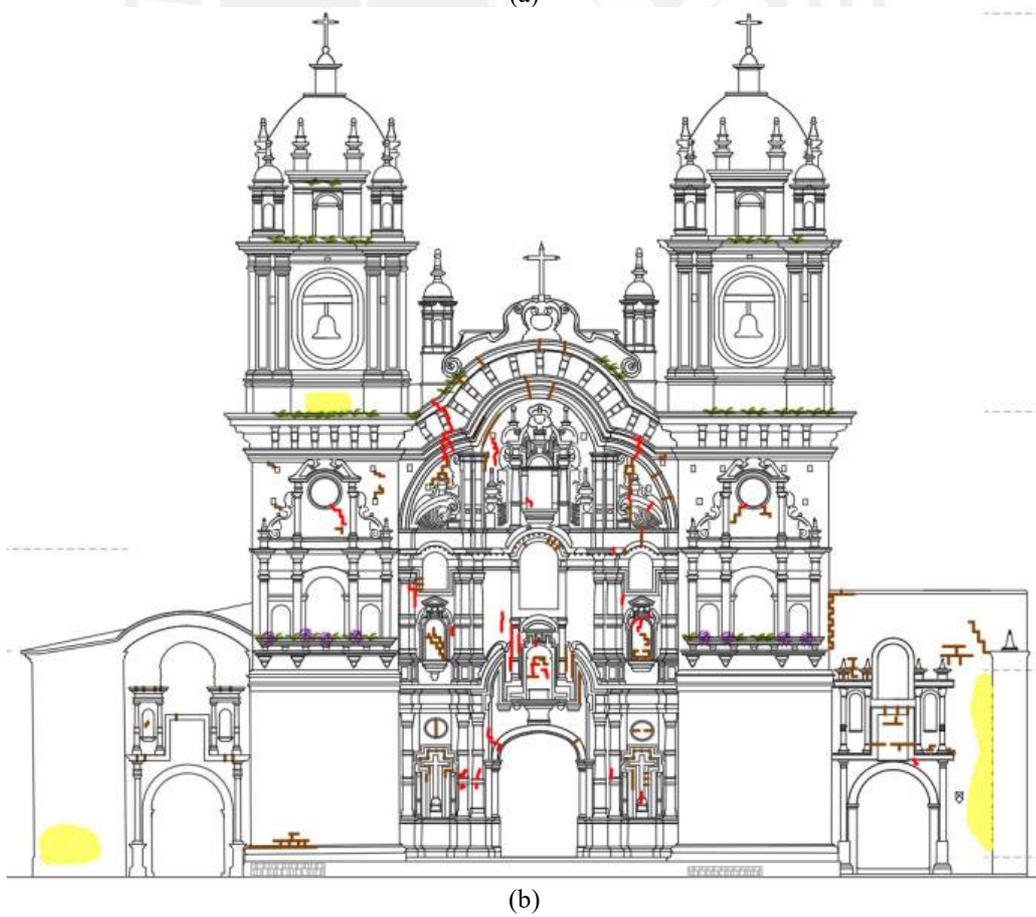
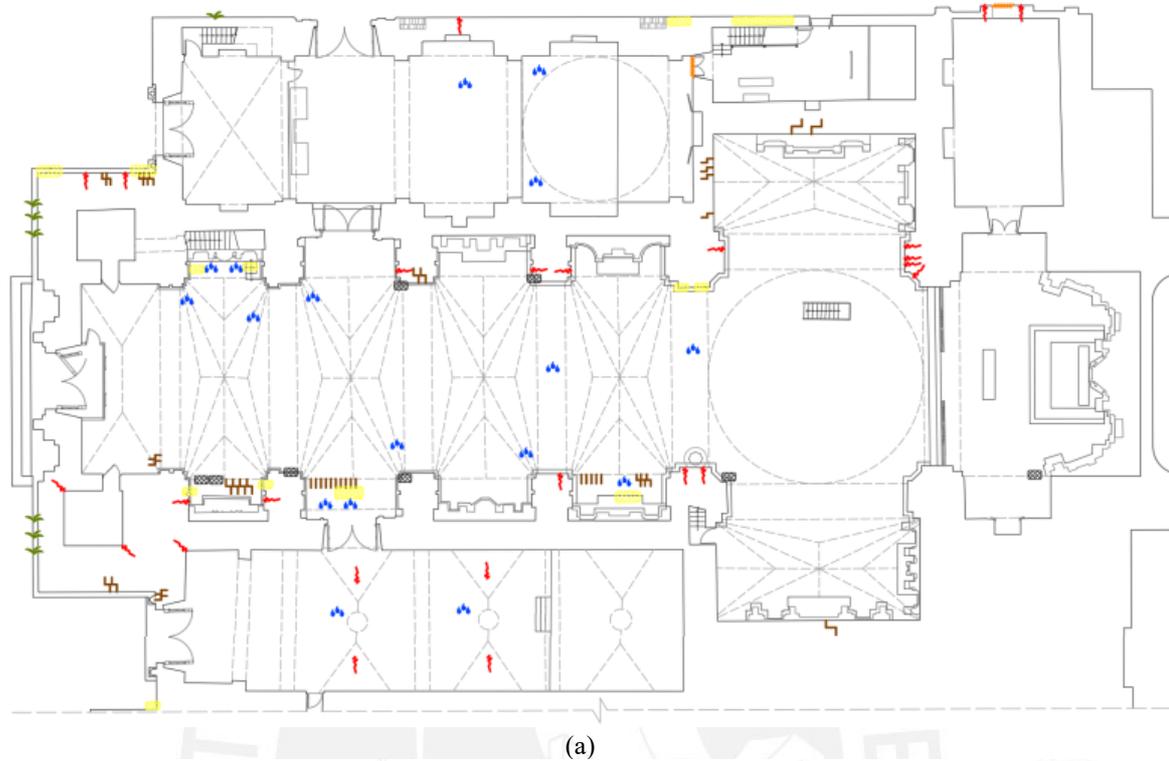


Figura 4.3 Diferentes anomalías localizadas en el (a) interior y la (b) fachada de la iglesia.

a) Grietas

En cuanto a la inspección de daños en la iglesia, se pudieron medir a escala algunas grietas que se encontraron. Se detectaron un gran número de grietas, que se encontraban en las partes más elevadas como de la portada retablo y el exterior de ambas torres campanario. Debido al difícil acceso, solo se tomaron algunas mediciones de las grietas en la zona del coro y el interior de las torres campanario, como se muestra en la Figura 4.4a. Asimismo, se pudo observar que existen elementos en la iglesia que muestran un daño severo, como es el caso de la portada retablo (ver la Figura 4.4b).

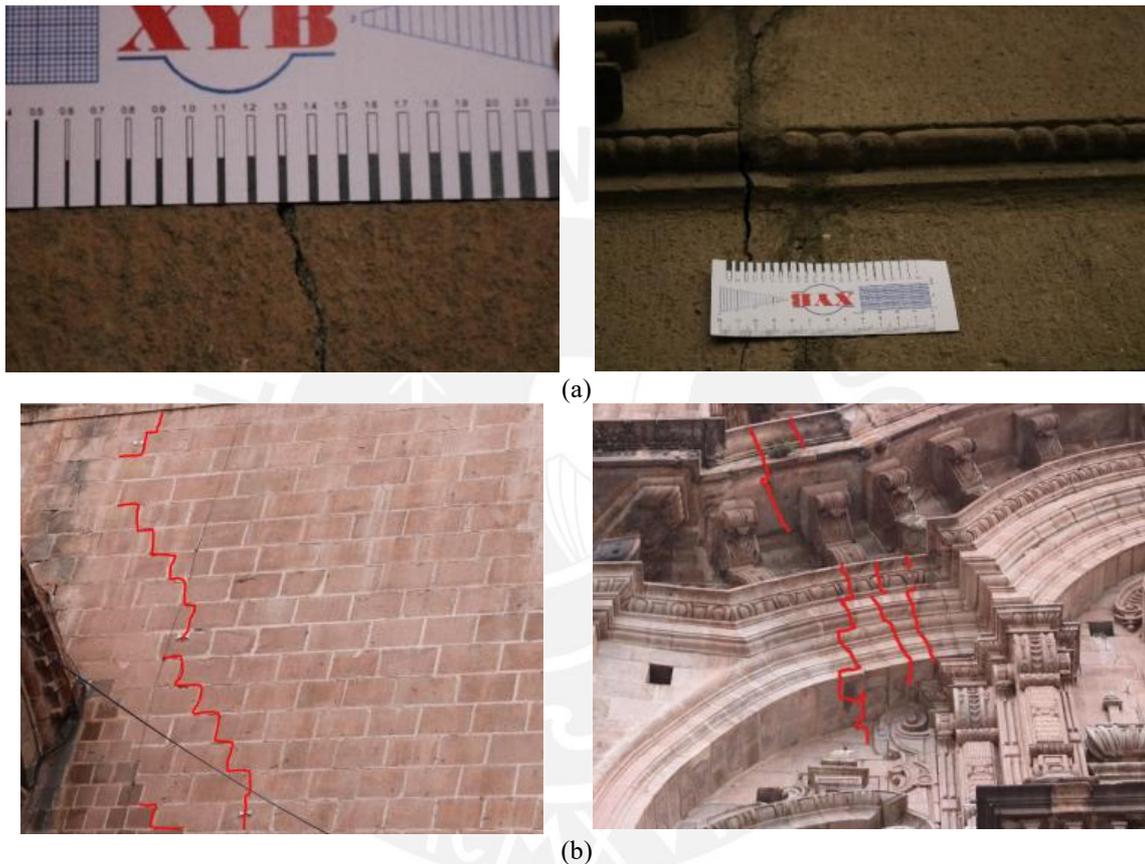


Figura 4.4 (a) Identificación del patrón de agrietamiento de la iglesia y (b) Grietas en elementos importantes de la iglesia en la torre del campanario y la portada retablo.

b) Humedad

La humedad se generó por capilaridad ya que en los techos de la iglesia no se dispone de un sistema adecuado para canalizar el agua de la lluvia y; por tanto, esta se filtró en sus interiores. Gran parte de las bóvedas y los muros internos de la iglesia presentaron problemas de humedad que se identificaron por la eflorescencia. Se evidenció esta anomalía por las manchas blanquecinas de aspecto irregular. Se apreciaron diversos elementos que presentaban filtraciones como la sacristía (ver Figura 4.5a), la torre campanario (ver Figura 4.5b), los arcos de la nave (ver Figura 4.5c) y las bóvedas de la Capilla de Loreto (ver Figura 4.5d).

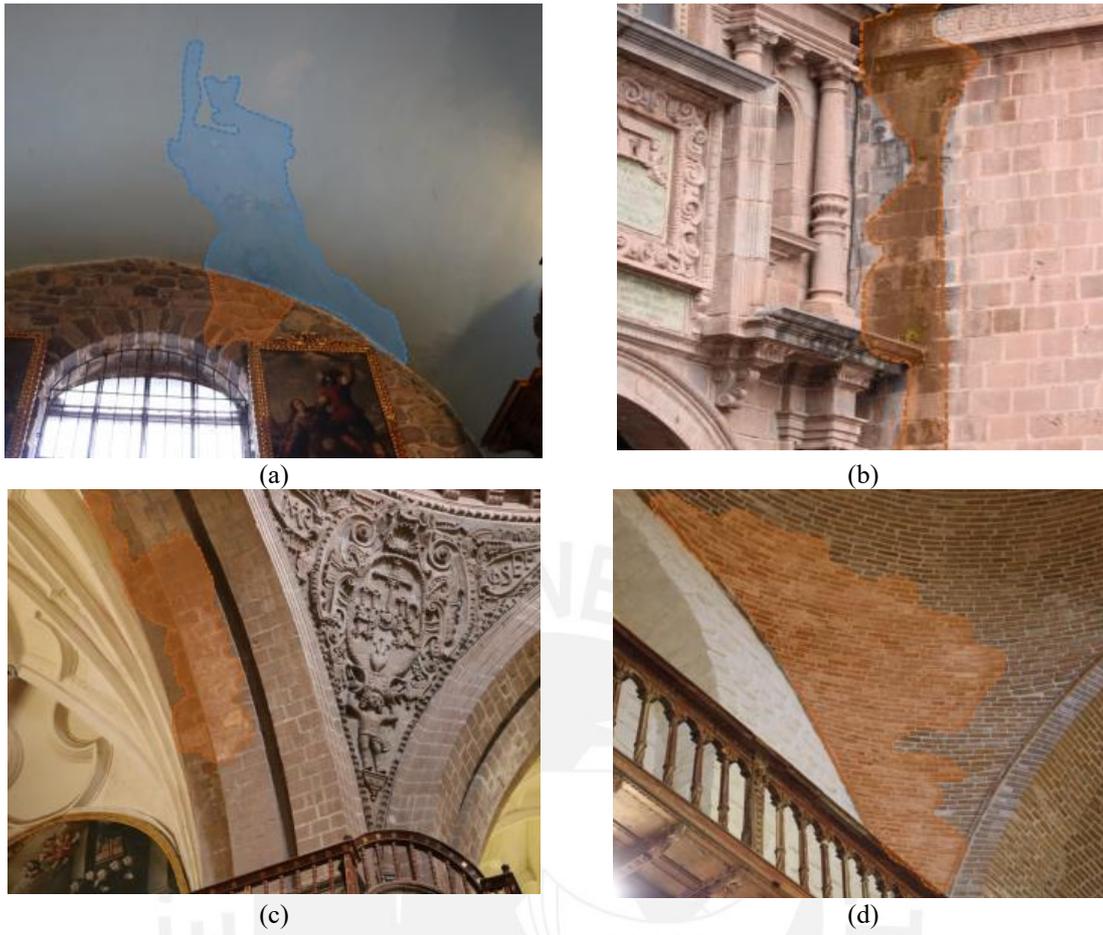


Figura 4.5 Manchas en elementos de la iglesia debido a la humedad: (a) sacristía, (b) torre del campanario (c) arco de la nave y (d) bóveda de la Capilla de Loreto.

Otras anomalías ocasionadas por la humedad de las lluvias intensas de la zona fueron identificadas en la cara exterior del muro de la Capilla de Loreto. En este elemento estructural, la humedad originó otros problemas como patologías biológicas (hongos, algas, líquenes, musgos y plantas) que generaron dilataciones de volumen, pérdidas de color (Figura 4.6a), desprendimiento, erosión (Figura 4.6b), y apariciones de manchas oscuras en la piedra y el mortero.



Figura 4.6 Presencia de patologías biológicas en la cara exterior del muro de la Capilla de Loreto, (a) decoloración y (b) erosión en la piedra.

4.3 Ensayos de termografía infrarroja

Los ensayos de termografía infrarroja se complementaron con la inspección visual de anomalías para comprobar la presencia de grietas y humedad en algunas zonas de la iglesia. Estos ensayos se realizaron dentro y fuera de la iglesia con una cámara termográfica FLIR Systems modelo ThermaCAM T440 (FLIR System, 2018) con una sensibilidad térmica de 0.04 °C a 30 °C. Para la identificación de anomalías estructurales en muros con un grosor considerable y muros con capas de mortero, se aplicaron ensayos de termografía infrarroja activa mediante el aumento de la temperatura con el uso de un reflector alógeno de 500 W. El post-procesamiento de las termografías se llevó a cabo utilizando el software FLIR Tools (FLIR System, 2018).

Por un lado, el ensayo de termografía infrarroja activa (ver Figura 4.7a) permitió detectar grietas que no fueron identificadas en la inspección visual. Asimismo, la diferencia térmica, obtenida mediante la aplicación de calor, ayudó a detectar la presencia de humedad en los bloques de piedra y el mortero. En la Figura 4.7b, los colores más claros indicaron las zonas donde el yeso está separado de la piedra por la excesiva humedad.

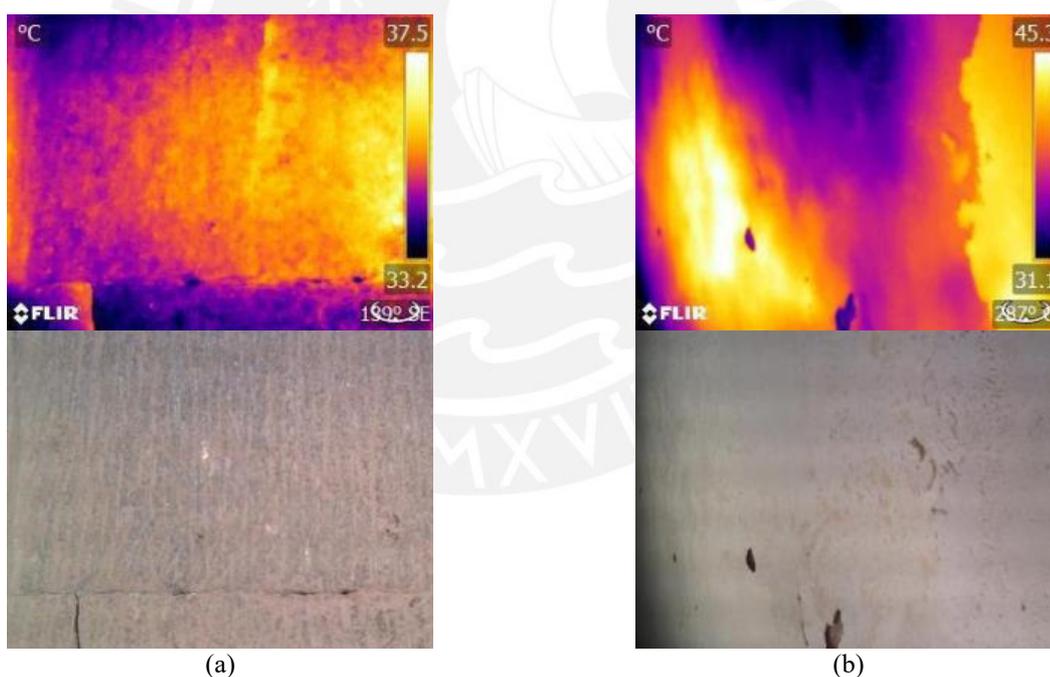


Figura 4.7 Identificación de anomalías estructurales en el ensayo de termografía infrarroja activa: (a) grietas verticales en un bloque de piedra, (b) abombamiento del yeso de una pared causado por la presencia de humedad.

Por otro lado, el ensayo de termografía infrarroja pasiva (ver Figura 4.8a) evidenció un cambio de material en la torre campanario debido a la reconstrucción después del terremoto de 1950. Además, se evidenciaron áreas de humedad (zonas oscuras de las imágenes) en la fachada exterior (ver Figura 4.8b) y se mejoraron la visualización de las grietas. También, se observó que en las bóvedas de crucería (ver Figura 4.8c) de la nave principal había zonas de humedad.

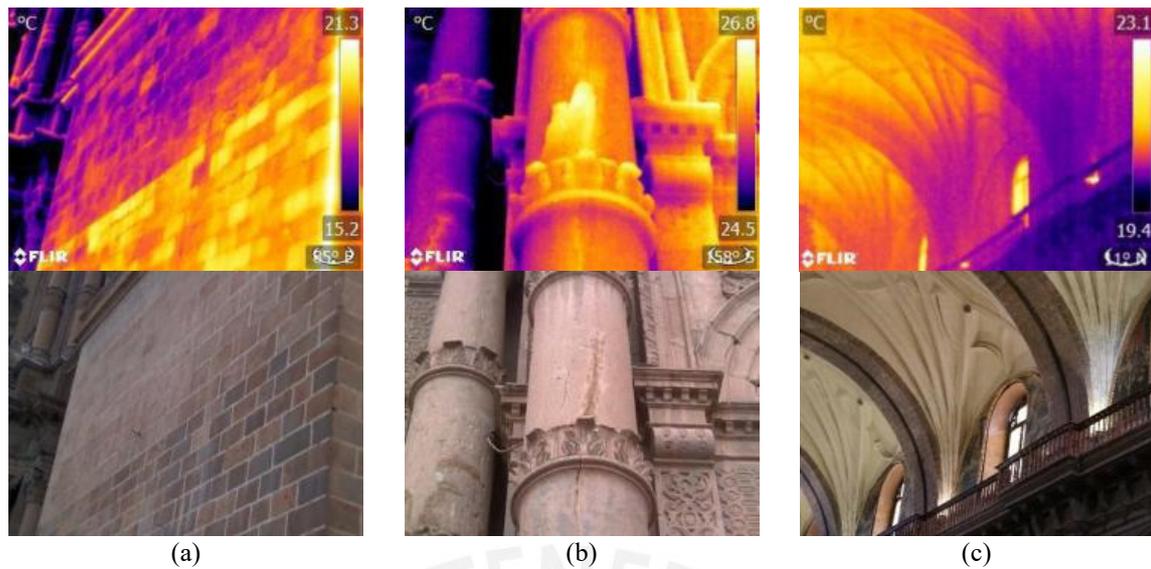


Figura 4.8 Identificación de anomalías estructurales en el ensayo de termografía infrarroja inactiva: (a) fachada exterior de la torre campanario, (b) grietas y desprendimiento de un pilar, (c) intradós de la bóveda de crucería de la nave principal.

4.4 Ensayo de vibración ambiental

El ensayo de medición de vibraciones ambientales consistió en la colocación de tres transductores o acelerómetros triaxiales de modelo ETNA2 (ver Figura 4.9a) con una sensibilidad de 10 V/g y un rango dinámico de ± 0.5 g. Dos de ellos sirvieron como puntos de referencia y fueron colocados en el acceso más elevado de las torres campanario. Además de estos, el tercero, sirvió como punto móvil y fue ubicado en las bases de las bóvedas de la Capilla de Loreto. Como se muestra en la Figura 4.9b, se establecieron en total tres configuraciones. A pesar de la importancia del movimiento del sistema de techos en la estructura, no fue posible colocar transductores en el parte superior de la iglesia debido a que no fue permitido el acceso en los días de la campaña experimental.

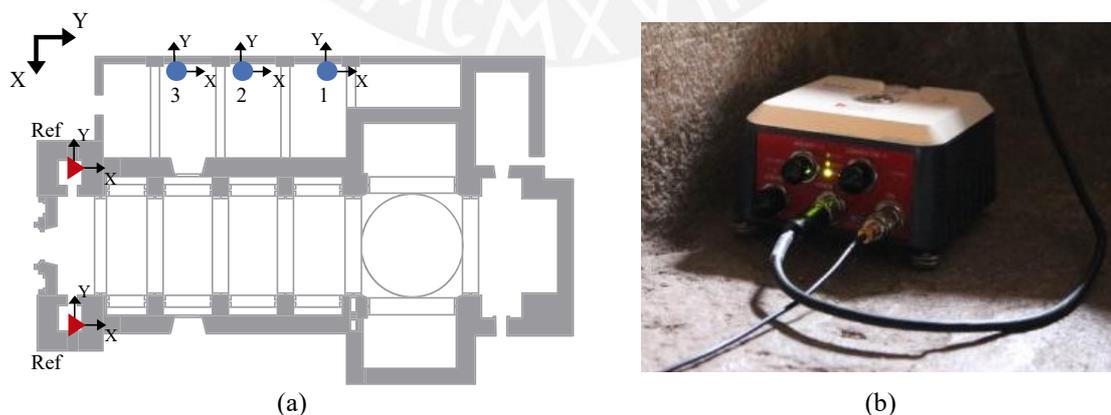


Figura 4.9 Ensayo de identificación modal: (a) Ubicaciones de los acelerómetros para el ensayo de vibración ambiental, (b) Acelerómetros utilizados.

La duración en cada toma de datos fue 25 minutos con una frecuencia de muestreo de 200Hz. Posteriormente, el procesamiento de las vibraciones ambientales registradas se llevó a cabo

utilizando el software ARTEMIS SVS (2015) mediante la técnica Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD). Debido a la baja excitación de la estructura, con el método EFDD fue posible identificar tres principales modos de vibración de la iglesia. La Figura 4.10 muestra la gráfica del espectro de densidad de potencia obtenida al aplicar el método EFDD. En esta gráfica, fue posible identificar las tres primeras frecuencias de la estructura, las cuales se encuentran en el rango 2 Hz a 5 Hz. En el caso del SSI, se obtuvieron los dos primeros modos similares al EFDD; sin embargo, existe una diferencia en el tercer modo de vibración ya que se obtuvieron muchos polos de ruido que no permitieron identificarlo correctamente.

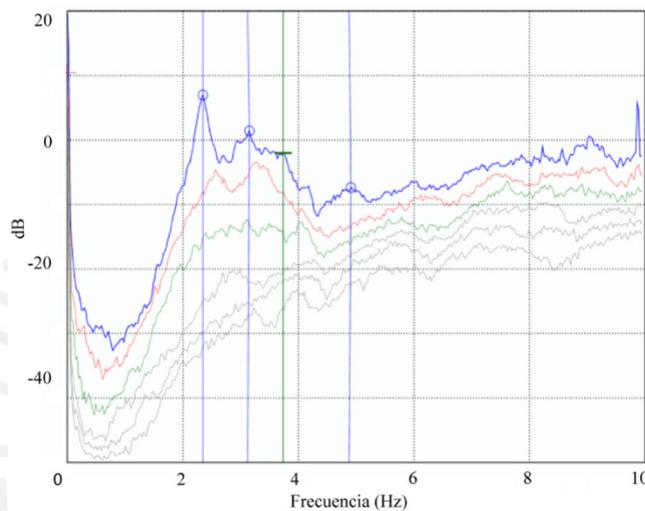


Figura 4.10 Gráfica de densidad espectral obtenida con el método EFDD.

Con la identificación de los picos en el diagrama de densidad espectral de potencia, fue posible obtener los modos de vibración correspondientes a las tres primeras frecuencias de la estructura. De los resultados al utilizar el método EFDD, se puede apreciar que el primer (Figura 4.11a) y el segundo modo de vibración (Figura 4.11b) corresponden claramente a un movimiento traslacional de las torres campanario a lo largo del eje X-X y el eje Y-Y, respectivamente y un pequeño desplazamiento en el muro lateral de la Capilla de Loreto. En el tercer modo (Figura 4.11c), se puede apreciar que el muro lateral de la Capilla de Loreto presenta un movimiento de traslación significativo.

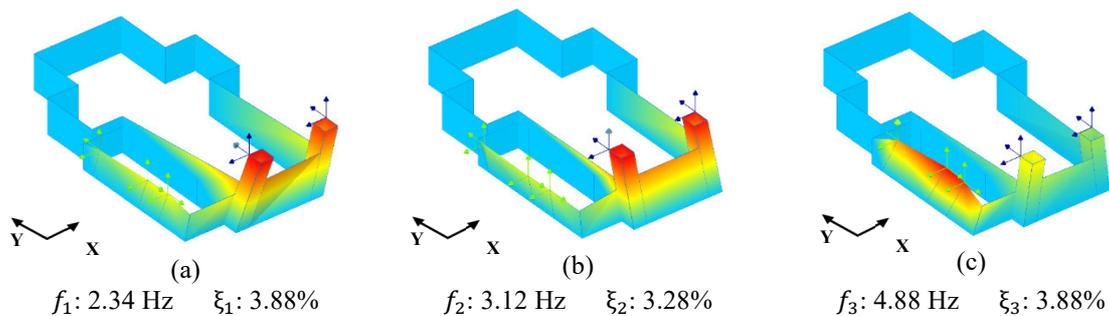


Figura 4.11 Formas modales, valores de frecuencias y coeficientes de amortiguamiento del ensayo de vibración ambiental para el: (a) primer modo, (b) segundo modo y (c) tercer modo.



**CAPÍTULO 5. CALIBRACIÓN DEL MODELO
NUMÉRICO**

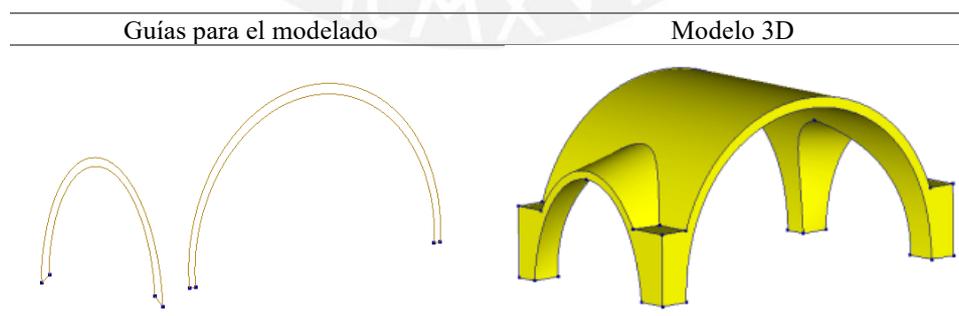
5.1 Modelado numérico

El modelo numérico de la iglesia de la Compañía de Jesús de Cusco fue generado utilizando el software DIANA (DIANA FEA BV., 2020). Para realizar el modelo, se utilizó la información de la nube de puntos híbrida del escaneo láser terrestre y la fotogrametría aérea. Una vez obtenida esta información, la construcción del modelo inició por adquirir las dimensiones de los muros perimetrales y luego con ellas generar volúmenes de los elementos sólidos mediante operaciones booleanas. Más adelante, se modelaron los elementos estructurales como los contrafuertes, las torres campanario, las bóvedas y rellenos; sin embargo, los detalles arquitectónicos no fueron considerados ya que estos cumplen una función decorativa. Además, los elementos modelados se crearon con una geometría regular para evitar inconvenientes en la generación de la malla de elementos finitos.

En la iglesia de la Compañía de Jesús, el modelado de las bóvedas presentó una elevada complejidad a diferencia de los demás elementos estructurales. El procedimiento de la generación de sus formas geométricas inició con la obtención de líneas guía, que definieron su perímetro. A partir de estas guías, se realizó el modelado de los volúmenes mediante operaciones booleanas. Las bóvedas en la iglesia, dependiendo de su tipología, presentaron diferentes métodos para su modelado.

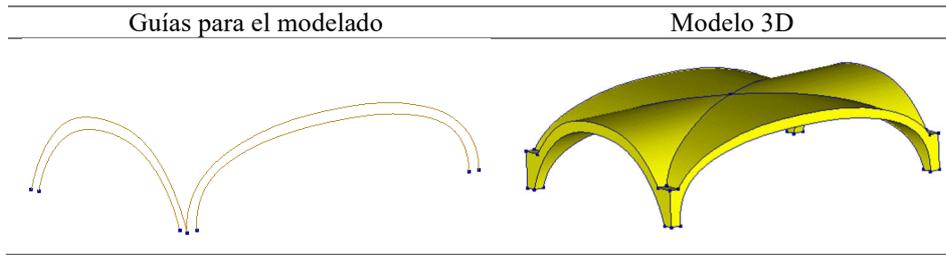
- Las bóvedas de cañón presentaron un procedimiento de modelado sencillo que consistió en la extrusión de un medio cilindro en sentido recto. El procedimiento de modelado es el mismo para los arcos de la iglesia y las capillas. Por otro lado, las bóvedas de cañón, como se muestra en la Tabla 5.1, con lunetos fueron generadas aumentando vanos laterales de forma semicilíndrica de menor dimensión y; posteriormente, estos elementos se intersecaron de manera ortogonal con una pendiente a las bóvedas de cañón.

Tabla 5.1 Guías para el modelado de las bóvedas de cañón con lunetos y su modelo 3D.



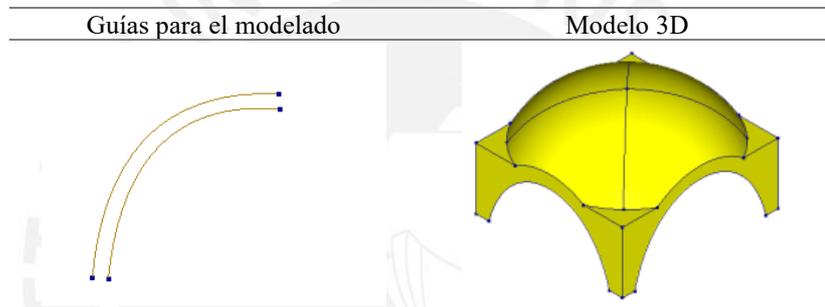
- Las bóvedas de arista fueron generadas mediante la intersección ortogonal de dos bóvedas de cañón (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Guías para el modelado de las bóvedas de arista y su modelo 3D.



- La bóveda vaída se modeló mediante la revolución de una sección determinada, la cual es normalmente en forma de arco. Como resultado de esta revolución, se generó un casquete semiesférico y luego el elemento obtenido fue cortado por cuatro planos verticales y perpendiculares entre sí, como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Guías para el modelado de las bóvedas vaída y su modelo 3D.



- Las bóvedas de crucería requirieron un modelado más sofisticado debido a la alta complejidad de su construcción. Este procedimiento partió con la creación de las líneas guía para el modelado de los nervios los cuales cumplen una función estructural importante en el comportamiento global de este tipo de bóvedas. Las dimensiones de la sección de los nervios (ver Figura 5.1) son determinadas por la información de la nube de puntos del intradós de la bóveda. Luego, los plementos o paños son generados mediante una solevación (*loft*) entre las caras de los nervios (cruceos, terceletes y ligaduras). El espesor de los plementos fue asumido como 25 cm ya que no fue posible una intrusión en las bóvedas; por tanto, se utilizó un valor referencial de la dimensión de los ladrillos cocidos.

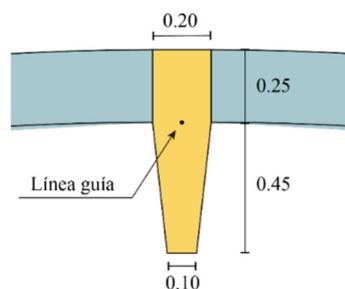
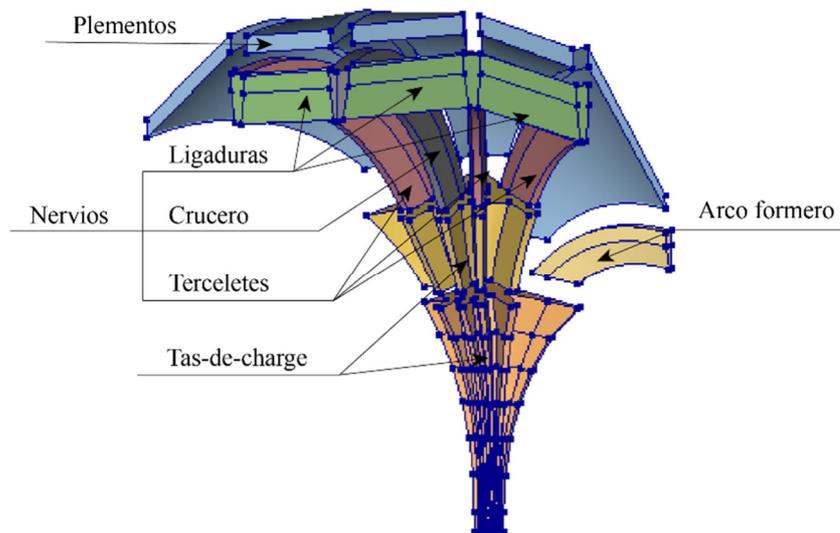
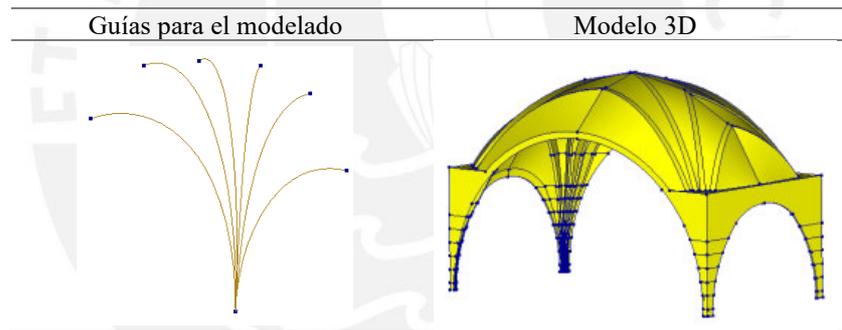


Figura 5.1 Sección típica de los nervios barrida en las líneas guía de la bóveda de crucería y plementos generados mediante solevación.

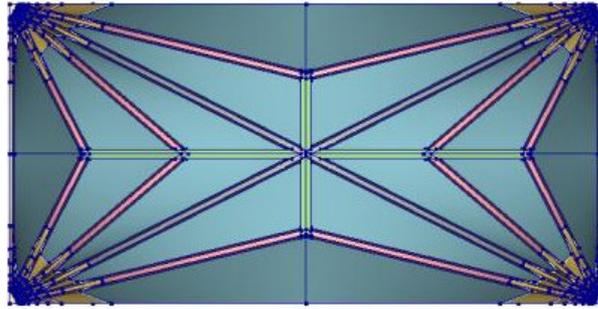
La bóveda de crucería de la iglesia de la Compañía de Jesús presenta cinco nervios que parten desde un mismo origen y; en el modelado, llegan a superponerse con los plementos, lo cual ocasiona inconvenientes en la generación de la malla de elementos finitos. Por tanto, para solucionar este problema fue necesario agregar un elemento que permita realizar una simplificación de la zona inferior de la bóveda. Para ello, se definen los *tas-de-charge* los cuales fueron volúmenes creados a diferentes alturas que permiten la transición de una zona superior a una zona inferior.

El procedimiento descrito para este tipo de bóvedas permitió generar un cuarto del modelo completo. En la Figura 5.2a, se muestran los detalles de los nervios, los plementos y los *tas-de-charge*. Para simplificar el modelado, se asumió que las partes restantes presentan una geometría similar. Por ello, se utilizaron dos veces la herramienta espejo (*mirror*) a la sección construida y luego se unieron los elementos generados para obtener el modelo completo de la bóveda de crucería (ver Tabla 5.4). Además, en la Figura 5.2b, se muestra una vista inferior de la bóveda para una mejor visualización del resultado final.

Tabla 5.4 Guías para el modelado de las bóvedas de crucería y su modelo 3D.



(a)



(b)

Figura 5.2 (a) Elementos de la bóveda de crucería y (b) Vista inferior de la bóveda de crucería.

De acuerdo a la inspección visual, diferentes materiales (albañilería de piedra regular, albañilería de piedra irregular, albañilería de ladrillo cocido y el material de relleno) fueron identificados en la iglesia de la Compañía de Jesús. Por ejemplo, en las bóvedas de la iglesia y las capillas se encontró una albañilería de ladrillo cocido; asimismo, este material fue identificado en la cúpula de la iglesia y en los arcos de la Capilla de Loreto. Además, se apreció que los muros de la iglesia y las capillas presentan una albañilería de piedra irregular. También, este material fue presenciado en los contrafuertes, las fachadas de las capillas, los arcos de la iglesia y la Capilla de San Ignacio. En la fachada de la iglesia y las torres campanario, se contempló una albañilería de piedra regular. El material de relleno se fue identificado en el extradós de las bóvedas de la iglesia y las capillas. En la Figura 5.3, se muestra la diferencia de materiales utilizados en el modelo numérico.

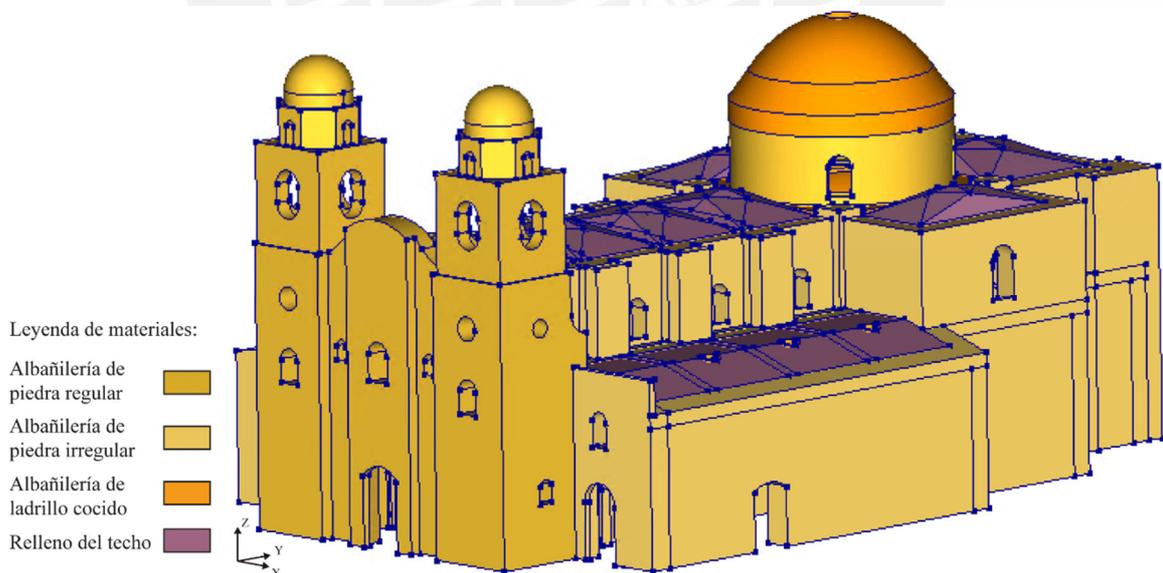


Figura 5.3 Perspectiva axométrica del modelo numérico con la identificación de los diferentes materiales.

En el presente caso de estudio, la mampostería de la iglesia se asumió como un medio continuo y homogéneo (macro modelo), y también se consideró que este tipo de material presenta una naturaleza isótropa. Las propiedades mecánicas de los materiales (albañilería de piedra regular, albañilería de piedra irregular, albañilería de ladrillo cocido) utilizadas adoptan valores obtenidos recomendados

por el NTC (2008). En el caso de la rigidez del material de relleno, se utilizó el valor de Milani et al. (2014) y la densidad como un valor intermedio de los adoptados en Saloustros et al. (2020) y Angjeliu et al. (2019). La Tabla 5.5 presenta los valores de las propiedades mecánicas lineales utilizadas en el modelo numérico.

Tabla 5.5 Propiedades mecánicas lineales de los materiales del modelo numérico.

Referencias	Tipo de material	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
NTC (2008)	Albañilería de piedra regular	1.75	0.20	2100
NTC (2008)	Albañilería de piedra irregular	1.10	0.20	1900
NTC (2008)	Albañilería de ladrillo cocido	1.20	0.20	1800
Milani et al. (2014) Saloustros et al. (2020) Angjeliu et al. (2019)	Relleno del techo	0.75	0.20	1700

Una vez culminado el modelo de la iglesia, se asignaron dos tipos de condiciones de borde. La primera condición fue definida en la base para simular la interacción que tiene la estructura con el suelo en el que se apoya. Esta restricción se asumió que era ideal; es decir que todos los grados de libertad de los nodos de la base estaban restringidos en todas las direcciones. Por otro lado, el segundo tipo de condición (ver Figura 5.4) presentó como objetivo simular el aporte de la construcción adyacente (parainfo universitario) al comportamiento global de la iglesia. No se modeló geoméricamente esta construcción, debido a la escasa de información y el costo computacional adicional que requería, y en su lugar fue necesario la introducción de elementos de interface.

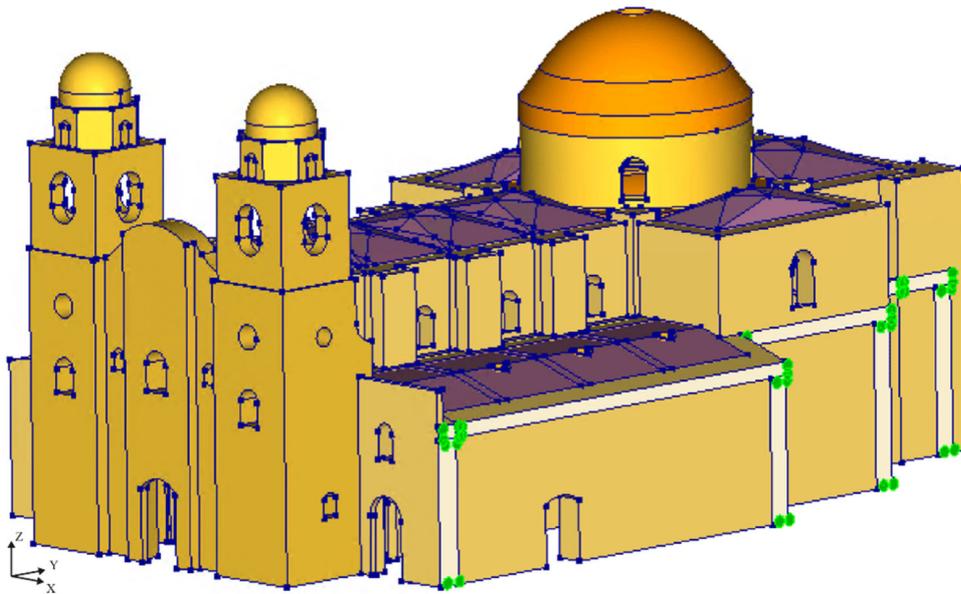


Figura 5.4 Ubicación de las condiciones de borde en el modelo numérico.

Para obtener resultados adecuados, la malla de elementos finitos no debe poseer elementos con ángulos extremadamente agudos ya que posiblemente aparezcan inconvenientes en los resultados durante los análisis (Lourenço y Pereira, 2018).

Como se muestra en la Figura 5.5, en el modelo numérico de la iglesia se utilizaron únicamente elementos sólidos lineales de tipo tetraédrico TE12L para la iglesia y T18IF para los elementos de interface (DIANA FEA BV., 2020). Los elementos tetraédricos permitieron una discretización más adecuada de los elementos sólidos debido a la complejidad geométrica de algunos elementos estructurales. Además, la discretización de los elementos finitos se realizó en distintos tamaños según la geometría de los elementos estructurales. Por ejemplo, los muros, los contrafuertes, los arcos, las torres campanario de mampostería piedra fueron modelados utilizando elementos tetraédricos con un tamaño de malla de 0.60 m. Por otro lado, las bóvedas de crucería y relleno se modelaron con elementos tetraédricos, en su mayoría, con un tamaño de malla de 0.10 m. En total, el modelo numérico posee 5 394 848 elementos discretos y de todos ellos las bóvedas de crucería poseen 1 956 345 elementos discretos; es decir, el 36%.

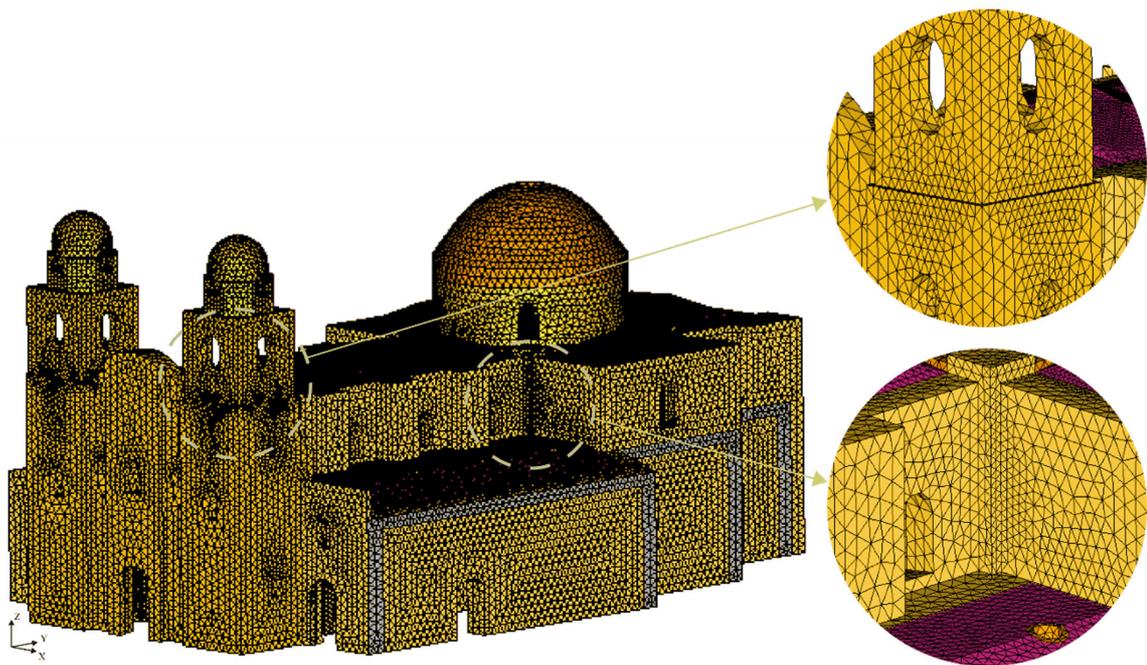


Figura 5.5 Vista de la malla del modelo y algunos detalles.

Para poder identificar las frecuencias naturales y las formas modales del modelo numérico, se ejecutó un análisis modal en el software DIANA. Los resultados de la estructura, en términos de frecuencias naturales y formas modales, se presentan en la Figura 5.6. Es importante mencionar que estos primeros resultados fueron obtenidos sin considerar los elementos de interface. De acuerdo a los resultados del análisis modal, se observó que el primer y el segundo modo de vibración se asocian a un movimiento local de las torres campanario en las direcciones X-X y Y-Y, respectivamente. Por

el otro lado, el tercer modo de vibración corresponde a un movimiento de la iglesia, el cual está definido principalmente por las formas modales de las bóvedas. Con estos resultados, se verificó que los modos de vibración experimental del EFDD fueron más precisos que los modos obtenidos por el SSI.

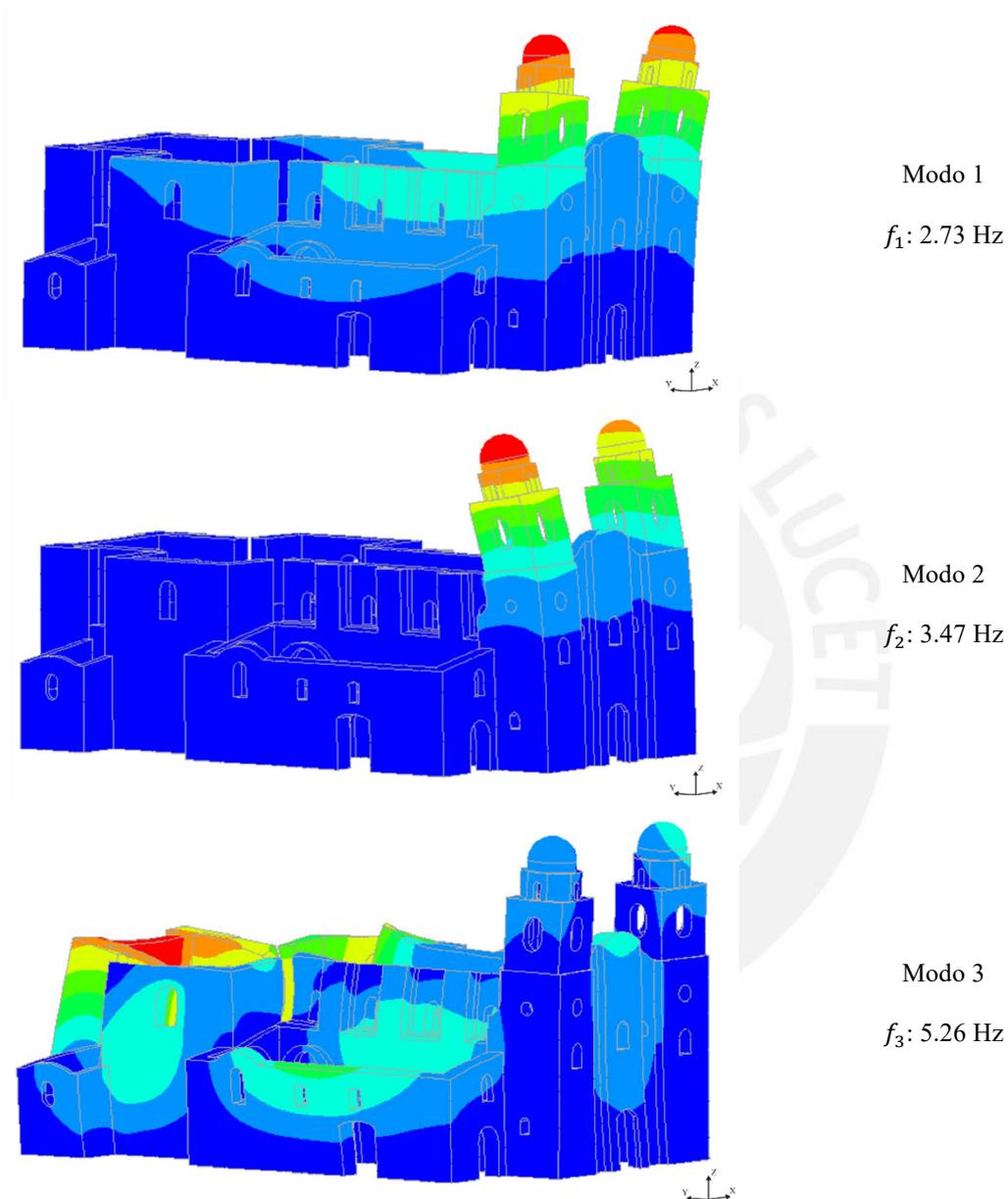


Figura 5.6 Formas modales del modelo numérico.

El indicador de comparación de las formas modales numéricas y experimentales se obtiene utilizando el criterio de exactitud modal, denominado MAC (Modal Assurance Criterion) por sus siglas en inglés. Este método fue propuesto por Allemang (2003) y establece una relación entre las formas modales de ambas respuestas y su rango varía desde 0 a 1. Esto quiere decir que mientras el valor del MAC sea más cercano a la unidad, la correlación entre las formas modales numéricas y experimentales es más precisa. Las formas modales numéricas se obtienen en los análisis modales

del modelo numérico y las formas modales experimentales en los resultados del ensayo de identificación modal. La expresión usada para calcular el MAC está definida en la ecuación (1):

$$\text{MAC} = \frac{|\{\varphi_{exp}\}^T \{\varphi_{num}\}|^2}{(\{\varphi_{exp}\}^T \{\varphi_{exp}\}) (\{\varphi_{num}\}^T \{\varphi_{num}\})} \quad (1)$$

Donde $\{\varphi_{exp}\}$ y $\{\varphi_{num}\}$, son los vectores que contienen las formas modales experimentales y numéricas, respectivamente.

La Tabla 5.6 presenta la comparación de las frecuencias experimentales y numéricas y los resultados del MAC. Los indicadores demuestran que se necesitan realizar cambios en los parámetros del modelo numérico para lograr una mejor aproximación en el comportamiento de la estructura real. Por tanto, se optó por desarrollar un análisis de sensibilidad y luego aplicar el enfoque de Douglas Reid para optimizar la comparación entre las frecuencias y el MAC.

Tabla 5.6 Comparación entre las frecuencia experimental y numérica del modelo inicial.

Modo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	Error (%)	MAC
1	2.34	2.73	16.50	0.88
2	3.12	3.47	11.25	0.93
3	4.88	5.26	7.85	0.82

5.2 Análisis de sensibilidad

Se realizaron dos análisis de sensibilidad para identificar los parámetros que presentan una mayor influencia en la respuesta dinámica de la estructura. El primer análisis de sensibilidad estuvo enfocado en los elementos de interface y el segundo estuvo relacionado en las propiedades mecánicas de los materiales.

En primer lugar, se evaluaron los valores de las propiedades de los elementos de interface los cuales simulan la interacción con la construcción adyacente. Para ello, se restringieron los movimientos de traslación de los elementos de interface en las tres direcciones, pero los movimientos de rotación se mantuvieron libres. Con la finalidad de realizar este análisis, se definieron la rigidez normal y cortante con altas propiedades elásticas para luego ir disminuyendo hasta lograr los valores óptimos.

Para empezar el análisis de sensibilidad del elemento de interface, se redujo el valor de la rigidez cortante, mientras se mantenía constante la rigidez normal; es decir, la construcción se volvía más flexible en la dirección longitudinal. Las combinaciones presentan los rangos indicados en la Tabla 5.7 ya que no existía una influencia significativa si se aumentaban o disminuían los parámetros de la rigidez cortante de la interface.

Tabla 5.7 Modificación de los valores de la rigidez cortante del elemento de interface en el modelo numérico.

	Normal (MN/m^3)	Cortante (MN/m^3)
Combinación 1	100	100
Combinación 2	100	10
Combinación 3	100	1

Cuando se comparan los resultados de las combinaciones y el modelo inicial (modelo sin considerar los elementos de interface) con los valores de la frecuencia experimental, se aprecia una mejor aproximación a los resultados reales a medida que se reduce la rigidez de la cortante (ver Tabla 5.8).

Tabla 5.8 Valores de frecuencia (Hz) y MAC para las distintas combinaciones de la rigidez cortante del elemento de interface en el modelo numérico.

		Combinación 1		Combinación 2		Combinación 3	
Modelo inicial		100 MN/m^3		10 MN/m^3		1 MN/m^3	
f_{num}	MAC	f_{num}	MAC	f_{num}	MAC	f_{num}	MAC
2.73	0.88	2.72	0.91	2.71	0.91	2.71	0.91
3.47	0.93	3.11	0.92	3.08	0.93	3.08	0.94
5.26	0.82	4.97	0.83	4.92	0.81	4.91	0.81

La combinación con el menor error entre la frecuencia numérica y la frecuencia experimental es la tercera. La Tabla 5.9 resume la comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas y el MAC de la tercera combinación.

Tabla 5.9 Comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas con el valor óptimo de la rigidez cortante del elemento de interface.

Modo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	Error (%)	MAC
1	2.34	2.71	15.60	0.91
2	3.12	3.08	-1.38	0.94
3	4.88	4.91	0.59	0.81

Luego, el paso siguiente consistió en mantener fijo el parámetro de la rigidez cortante escogido en el análisis anterior y variar los valores de la propiedad de la rigidez normal (ver Tabla 5.10) para observar los cambios en el comportamiento de la estructura.

Tabla 5.10 Modificación de los valores de la rigidez normal del elemento de interface en el modelo numérico.

	Normal (MN/m^3)	Cortante (MN/m^3)
Combinación 1	100	1
Combinación 2	10	1
Combinación 3	1	1

En estas combinaciones, las diferencias entre los valores de MAC no son relevantes; sin embargo, se puede apreciar una disminución de los valores de las frecuencias numéricas, lo cual mejora la diferencia con la comparación de los valores de las frecuencias experimentales (ver Tabla 5.11). La combinación 2 presenta los valores óptimos en frecuencia y MAC.

Tabla 5.11 Valores de frecuencia (Hz) y MAC para las distintas combinaciones de la rigidez normal del elemento de interface en el modelo numérico.

		Combinación 1		Combinación 2		Combinación 3	
Modelo inicial		100 MN/m ³		10 MN/m ³		1 MN/m ³	
<i>f</i> _{num}	MAC						
2.73	0.88	2.71	0.91	2.52	0.90	2.45	0.90
3.47	0.93	3.08	0.94	3.08	0.92	3.08	0.93
5.26	0.82	4.91	0.81	4.82	0.93	4.79	0.69

La combinación con el menor error entre la frecuencia numérica y la frecuencia experimental es la segunda. La Tabla 5.12 resume la comparación entre la frecuencias experimentales y numéricas y el MAC de la segunda combinación. Por tanto, los valores finales de la rigidez cortante y normal de los elementos de interface son 1 MN/m³ y 10 MN/m³.

Tabla 5.12 Comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas con el valor óptimo de la rigidez normal del elemento de interface.

Modo	<i>f</i>_{exp} (Hz)	<i>f</i>_{num} (Hz)	Error (%)	MAC
1	2.34	2.52	7.56	0.90
2	3.12	3.08	-1.48	0.92
3	4.88	4.82	-1.23	0.93

En segundo lugar, se evaluaron las influencias de las propiedades mecánicas de los diferentes materiales como el módulo de elasticidad y la densidad. En estos análisis, se observó que la rigidez de la mampostería de piedra regular y la mampostería de piedra irregular fueron los parámetros con mayor influencia en el comportamiento de la estructura.

5.3 Calibración del modelo

Además de los parámetros determinados en el análisis de sensibilidad, se apreció que la geometría de la iglesia presenta un desnivel en el terreno cuya altura, medida desde el imafrente hasta la parte posterior del complejo, es de 2.00 m. Para representar esta inclinación en el modelo numérico, se consideró un desnivel constante en toda la estructura. Es importante mencionar que incrementar el desnivel de la base de la estructura influye en su respuesta dinámica; por este motivo, fue considerada una profundidad equivalente para el proceso de optimización.

Con estas tres propiedades identificadas (la elasticidad de la mampostería de piedra irregular (E1), la elasticidad de la mampostería de piedra irregular (E2) y la profundidad equivalente de la base (E3)), se procedió a realizar la calibración del modelo mediante el método de Douglas Reid. Este método (Douglas y Reid, 1982) se basa en la minimización de la diferencia que existe entre la respuesta numérica y la experimental mediante la identificación de valores óptimos para cada una de las propiedades escogidas en el análisis de sensibilidad. Los resultados experimentales fueron determinados mediante el procesamiento del ensayo de vibración ambiental mediante el método EFDD ya que el método SSI brindó muchos polos de ruido.

Por tanto, el método de Douglas Reid presenta como objetivo encontrar los valores óptimos de las variables que más influyen en el comportamiento de la estructura. Para ello, se sugiere el uso de la siguiente expresión (3):

$$f_i^N(X_1, X_2, \dots, X_n) = C_i + \sum_{k=1}^n [A_{ik}X_k + B_{ik}(X_k)^2] \quad (3)$$

Donde f_i^N representa las frecuencias del modelo numérico, $X_k (k = 1, 2, \dots, n)$ son las variables desconocidas, el subíndice i se refiere a los modos de vibración que se desean calibrar y A_{ik}, B_{ik} y C_i son constantes de segundo grado.

La aplicación de este enfoque requiere de la definición de valores inferior, medio y superior de los parámetros que se desean optimizar. Los valores base para todas las propiedades son determinados en el análisis de sensibilidad anterior. En el caso de los valores máximos y mínimos, para la mampostería de piedra regular fueron determinados como el +/- 30 % del valor base. En el caso de la mampostería de piedra irregular, para definir los valores máximos y mínimos se utilizaron el extremo superior e inferior del rango de valores de elasticidad recomendados por el NTC (2008). Por último, el máximo valor de la profundidad equivalente de la base se consideró como 2.00 m, el cual es la medida desde el imafrente hasta la parte posterior del complejo y la medida mínima definida es 0.00 m. Los valores base (B), máximos (U) y mínimos (L) asignados para cada parámetro se presentan en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13 Valores máximos y mínimos de los módulos de elasticidad y la profundidad equivalente de la base.

	Propiedades de los materiales	Mínimo	Base	Máximo
E1	Elasticidad de la mampostería de piedra regular (GPa)	1.25	1.75	2.35
E2	Elasticidad de la mampostería de piedra irregular (GPa)	1.00	1.10	1.35
E3	Profundidad equivalente de la base (m)	0.00	1.00	2.00

Una vez definidos estos valores, se generan una serie de combinaciones con la finalidad de encontrar las relaciones que más se aproximen a la respuesta experimental. El número de combinaciones que se requiere para el proceso de calibración de la ecuación (3) es igual a $2n+1$, siendo n el número de parámetros a optimizar. Por tanto, para la presente investigación, fue necesario generar siete combinaciones para estimar el valor óptimo como se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Frecuencias obtenidas de las combinaciones establecidas.

	Modo 1 f_1 (Hz)	Modo 2 f_2 (Hz)	Modo 3 f_3 (Hz)
Experimental	2.34	3.12	4.88
E1B-E2B-E3B	2.52	3.08	4.82
E1L-E2B-E3B	2.36	2.86	4.64
E1U-E2B-E3B	2.61	3.17	5.02
E1B-E2L-E3B	2.46	3.01	4.70
E1B-E2U-E3B	2.64	3.21	5.08
E1B-E2B-E3L	2.62	3.14	4.87
E1B-E2B-E3U	2.37	2.98	4.65

Sovero y Martel (2014) modificaron la ecuación (3) para realizar una comparación de las formas modales en función a los valores del indicador MAC. La solución para esta nueva ecuación son matrices diagonales de ponderación que dependen de los resultados de la ecuación (3). Luego, se formula una función objetivo para el proceso de optimización. Esta función busca la minimización del error entre las frecuencias numéricas y experimentales y la relación entre los valores MAC y la unidad. La Tabla 5.15 muestra los resultados obtenidos en el proceso de calibración.

Tabla 5.15 Resultados obtenidos de los parámetros más influyentes en el proceso de calibración.

Elasticidad de la mampostería de piedra regular (GPa)	Elasticidad de la mampostería de piedra irregular (GPa)	Profundidad equivalente de la base (m)
1.40	1.16	1.00

Finalmente, se presentan la Tabla 5.16 y la Tabla 5.17 las cuales resumen las propiedades de los materiales utilizados en el modelo numérico, los resultados de error y el MAC al comparar los valores de frecuencias numéricas con las experimentales.

Tabla 5.16 Valores de las propiedades de los materiales después del proceso de optimización.

Tipo de material	E (GPa)	v	ρ (kg/m³)
Albañilería de piedra regular	1.40	0.20	2100
Albañilería de piedra irregular	1.16	0.20	1900
Albañilería de ladrillo cocido	1.20	0.20	1800
Relleno del techo	0.75	0.20	1700

Tabla 5.17 Comparación entre las frecuencias experimentales y numéricas y MAC después del proceso de optimización.

Modo	f_{exp} (Hz)	f_{num} (Hz)	Error (%)	MAC
1	2.34	2.45	4.57	0.95
2	3.12	2.93	-6.15	0.88
3	4.88	4.78	-1.99	0.96

Se observa que el segundo modo de vibración supera el error de 5% y el valor del MAC disminuye de 0.93 a 0.88. Este resultado puede ocurrir por los escasos puntos de medición en la iglesia y las capillas. Mientras mayores puntos de medición se utilicen, la calibración será más adecuada y brindará una mayor validación al modelo numérico.

Los resultados finales se muestran en las gráficas FMAC inicial (ver Figura 5.7a) y FMAC final (ver Figura 5.7b), las cuales muestran la comparación entre los modos de vibración y las frecuencias naturales antes y después de la calibración. En este criterio, el MAC está representado en forma de círculo y su tamaño indica el valor de semejanza entre las formas modales experimentales y numéricas. Además, si el círculo, se aproxima más a la línea inclinada de 45° quiere decir que existe una adecuada relación entre las frecuencias experimentales y numéricas.

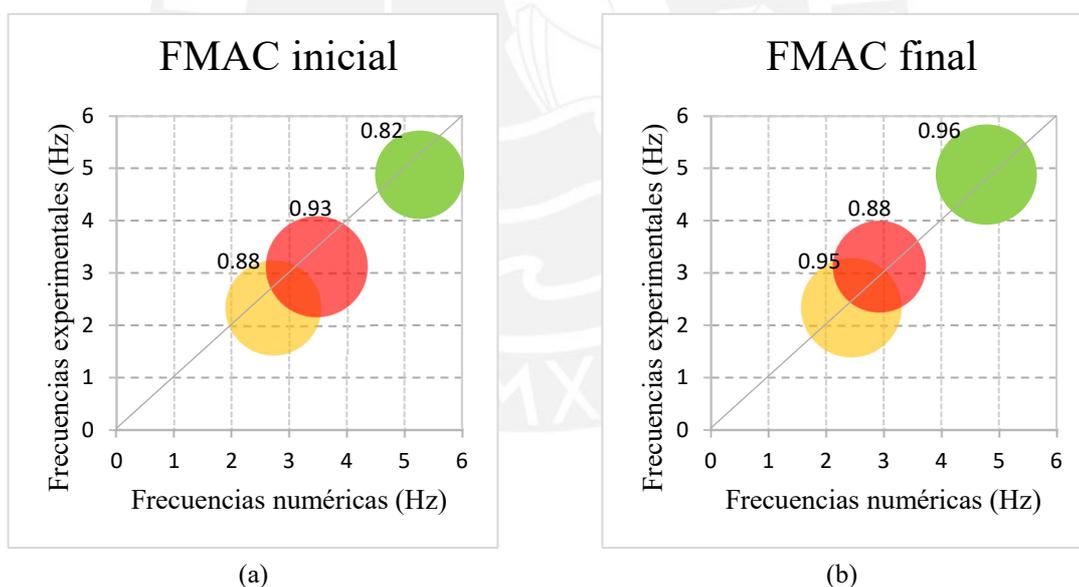
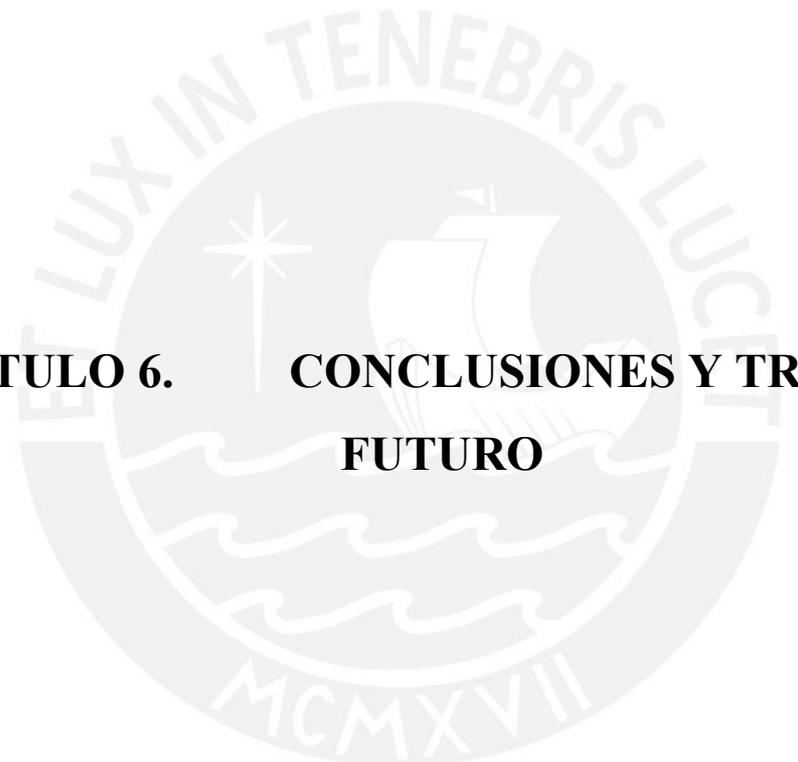


Figura 5.7 FMAC (a) antes de la calibración y (b) después del proceso de optimización.



**CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO
FUTURO**

6.1 Conclusiones

El estudio de las construcciones históricas presenta una elevada relevancia debido a que se puede brindar un diagnóstico estructural adecuado a partir de la aplicación de ensayos no destructivos realizados en la campaña experimental complementado con el modelado numérico.

Con respecto a la campaña experimental, la combinación del escaneo láser terrestre y la fotogrametría aérea permitió un levantamiento geométrico preciso ya que se adquirieron datos de la zona interna y las zonas elevadas de la construcción histórica. Además, se evidenciaron anomalías como grietas, humedad, vegetación mediante la inspección visual y el ensayo de termografía infrarroja, y se concluyó que la estructura presenta un nivel moderado de conservación. Asimismo, se identificó la respuesta dinámica de la iglesia de la Compañía de Jesús (formas modales y frecuencias naturales) mediante el ensayo de medición de vibraciones ambientales. A pesar del número reducido de puntos de medición, la ubicación de los transductores en la iglesia permitió la identificación de los principales modos de vibración. Se evidenció un movimiento traslacional en las torres campanario en la dirección X-X en el primer modo y un movimiento traslacional en la dirección Y-Y en el segundo modo. Además, en el tercer modo, se apreció un movimiento de traslación significativo en el muro lateral de la Capilla de Loreto.

La construcción del modelo numérico de la iglesia fue complicada debido a la escasa información de las propiedades mecánicas de los materiales, accesos no permitidos a algunas zonas de la iglesia, limitado conocimiento de los espesores de los muros de la iglesia que colindan con las construcciones aledañas, posibles construcciones subterráneas, etc. Además, existió una dificultad en conocer el espesor de las bóvedas y el material de relleno, ya que el intradós de las bóvedas fue la única geometría visible.

Finalmente, en el análisis de sensibilidad se identificaron las propiedades con mayor influencia en el comportamiento de la estructura. Con estas, se realizó un proceso de calibración y se obtuvo que los resultados analíticos presentaron una buena correlación con los resultados experimentales ya que se en promedio se obtuvo un error de 5% en la estimación de frecuencias y un valor mínimo de MAC de 0.88. Se observó que disminuyó el valor del MAC en el segundo modo de vibración; sin embargo, este resultado puede ser más preciso con un aumento de puntos de medición en el muro lateral de la capilla de Loreto.

6.2 Trabajo futuro

Una actividad que debería realizarse corresponde a una campaña experimental más extensa que considere un mayor número de transductores en los muros del transepto y presbiterio para verificar que las formas modales numéricas se asemejen a las formas modales experimentales. También, se deberían aumentar los transductores en las torres campanario para detectar un movimiento de traslación o de torsión. Por último, se evidenció en las formas modales numéricas que el tercer modo está gobernado por el movimiento de las bóvedas. Por tanto, es importante también considerar un mayor número de puntos de medición en las partes más elevadas de la iglesia y las capillas con la finalidad de conseguir una calibración más adecuada y brindar una mayor validación al modelo numérico.

Debido que las propiedades mecánicas de los materiales fueron definidas según referencias bibliográficas, es importante realizar una caracterización apropiada de los elementos en la estructura con ensayos no destructivos. Asimismo, se recomienda utilizar el ensayo de georradar en la cubierta del techo de la iglesia y las capillas para determinar los espesores de las bóvedas y el relleno en su extradós.

También, se recomienda incluir en el modelo numérico la interacción suelo-estructura para brindar un comportamiento más representativo. Se pueden realizar ensayos geofísicos no destructivos como el Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés Multichannel Analysis of Surface Waves), para realizar una caracterización geológica, geotécnica y geomecánica alrededor y al interior de la iglesia de la Compañía de Jesús. Con ello, se pueden definir las propiedades de rigidez cortante y normal en la interacción del suelo con la base de la iglesia.

Con respecto al análisis numérico, se recomienda realizar un análisis límite y un análisis estático no lineal (pushover) para identificar los posibles mecanismos de falla y determinar la capacidad máxima de la estructura.



CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- 3D Systems. (2018). *Geomagic Design X user's manual*.
- AgiSoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition (1.4)*.
https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf
- Aguilar, R. (2010). *Dynamic Structural Identification using Wireless Sensor Networks* (Número August). Tesis de Doctorado, Universidade do Minho, Portugal.
- Aguilar, R., Marques, R., Sovero, K., Martel, C., Trujillano, F. y Boroschek, R. (2015). Investigations on the structural behaviour of archaeological heritage in Peru: From survey to seismic assessment. *Engineering Structures*, 95, 94–111.
- Aguilar, R., Noel, M. F. y Ramos, L. F. (2019). Integration of reverse engineering and non-linear numerical analysis for the seismic assessment of historical adobe buildings. *Automation in Construction*, 98(July 2018), 1–15.
- Aguilar, R., Ramos, L. F., Torrealva, D. y Chácara, C. (2013). Experimental modal identification of an existent earthen residential building. *5th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2013, July 2017*, 1–10.
- Aguilar, Rafael, Karim, S., Carol, M., Carolina, B. y Boroschek, R. (2014). Ensayos experimentales de identificación modal para la protección sísmica del patrimonio histórico de tierra. *Rehabend, April*, 563–570.
- Alcalá, L. E. (2002). *Fundaciones Jesuíticas en Iberoamérica* (El Viso, p. 408).
- Alessandri, C. y Brebbia, C. A. (1987). Strength of masonry walls under static horizontal loads: boundary element analysis and experimental tests. *Engineering Analysis*, 4(3), 118–134.
- Allemang, R. (2003). The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration*, 37(8), 14–21.
- Angelillo, M. (1994). A finite element approach to the study of no-tension structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 17(1), 57–73.
- Angjeliu, G., Cardani, G. y Coronelli, D. (2019). Digital modelling and analysis of masonry vaults. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W11), 83–89.
- Arayici, Y. (2007). An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction*, 16(6), 816–829.

- Arce, D., Retamozo, S., Aguilar, R. y Castañeda, B. (2016). A mixed methodology for detailed 3D modeling of architectural heritage. *Structural Analysis of Historical Constructions Constructions: Anamnesis, diagnosis, therapy, controls*, 104–110.
- Armesto González, J., Riveiro Rodríguez, B., González Aguilera, D. y Rivas Brea, M. T. (2010). Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. *Journal of Archaeological Science*, 37(12), 3037–3047.
- ARTeMIS SVS. (2015). *User's Manual* (8.4). Structural Vibration Solution.
- Asteris, P. G., Moropoulou, A., Skentou, A. D., Apostolopoulou, M., Mohebkah, A., Cavaleri, L., Rodrigues, H. y Varum, H. (2019). Stochastic vulnerability assessment of masonry structures: Concepts, modeling and restoration aspects. En *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Número 2).
- Asteris, P. G., Plevris, V., Sarhosis, V., Papaloizou, L., Mohebkah, A. y Komodromos, P. (2015). Numerical modeling of historic masonry structures. En *Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures* (Número June 2021).
- Autodesk. (2021). *Recap - Reality Capture and 3D Scanning Software for Intelligent Model Creation*. Autodesk Inc.
- Baggio, C. y Trovalusci, P. (1998). Limit analysis for no-tension and frictional three-dimensional discrete systems. *Mechanics of Structures and Machines*, 26(3), 287–304.
- Balaras, C. A. y Argiriou, A. A. (2002). Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, 34(2), 171–183.
- Balsa Barreiro, J. y Fritsch, D. (2017). Generation of visually aesthetic and detailed 3D models of historical cities by using laser scanning and digital photogrammetry. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 8, 57–64.
- Beltrán Caballero, J. A. (2013). *Agua y forma urbana en la América precolombina: el caso del Cusco como centro del poder inca*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Berti, M., Salvatori, L., Orlando, M. y Spinelli, P. (2017). Unreinforced masonry walls with irregular opening layouts: reliability of equivalent-frame modelling for seismic vulnerability assessment. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(3), 1213–1239.
- Betti, M. y Vignoli, A. (2011). Numerical assessment of the static and seismic behaviour of the basilica of Santa Maria all'Impruneta (Italy). *Construction and Building Materials*, 25(12),

4308–4324.

- Bićanić, N., Stirling, C. y Pearce, C. J. (2003). Discontinuous modelling of masonry bridges. *Computational Mechanics*, 31(1-2 SPEC.), 60–68.
- Binda, L., Modena, C., Baronio, G. y Abbaneo, S. (1997). Repair and investigation techniques for stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 11(3), 133–142.
- Binda, L. y Saisi, A. (2005). Research on historic structures in seismic areas in Italy. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 71–85.
- Binda, L., Saisi, A. y Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14(4), 199–233.
- Brincker, R., Zhang, L. y Andersen, P. (2000). Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA*, 625–630.
- Brincker, R., Zhang, L. y Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), 441–445.
- Bruggi, M. y Taliercio, A. (2015). Analysis of no-tension structures under monotonic loading through an energy-based method. *Computers and Structures*, 159, 14–25.
- Bui, T. T., Limam, A., Sarhosis, V. y Hjiáj, M. (2017). Discrete element modelling of the in-plane and out-of-plane behaviour of dry-joint masonry wall constructions. *Engineering Structures*, 136, 277–294.
- Caja Municipal de Cusco. (2013). *Por la ruta del barroco Cusqueño*. Caja Municipal de Ahorro y Crédito Cusco S.A.
- Çaktı, E., Saygılı, Ö., Lemos, J. V. y Oliveira, C. S. (2016). Discrete element modeling of a scaled masonry structure and its validation. *Engineering Structures*, 126, 224–236.
- Caliò, I., Marletta, M. y Pantò, B. (2012). A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures*, 40, 327–338.
- Ceravolo, R., Pistone, G., Fragonara, L. Z., Massetto, S. y Abbiati, G. (2016). Vibration-based monitoring and diagnosis of cultural heritage: A methodological discussion in three examples. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(4), 375–395.
- Chara Zereceda, L. Ó. (1992). *Arquitectura religiosa española en la ciudad del Cusco en los siglos*

XVI-XVII. *Tebeto: Anuario del Archivo Histórico Insular de Fuerteventura*, 5, 367–388.

Chara Zereceda, L. Ó. y Caparó Gil, V. (1998). *Iglesias del Cusco: Historia y arquitectura*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Cimellaro, G. P., Piantà, S. y De Stefano, A. (2012). Output-Only Modal Identification of Ancient L'Aquila City Hall and Civic Tower. *Journal of Structural Engineering*, 138(4), 481–491.

Ciocchi, M. P., Sharma, S. y Lourenço, P. B. (2017). Engineering simulations of a super-complex cultural heritage building: Ica Cathedral in Peru. *Meccanica*, 53(7), 1931–1958.

Compan, V., Pachón, P. y Cámara, M. (2017). Ambient vibration testing and dynamic identification of a historical building. Basilica of the Fourteen Holy Helpers (Germany). *Procedia Engineering*, 199, 3392–3397.

Croci, G. (1996). The Colosseum: safety evaluation and preliminary criteria of intervention. *Structural Analysis of Historical Constructions*, 154–165.

Cuenca, J. H. (1991). Investigación de la actividad sísmica en la Región Inka: Rol de la Universidad en la mitigación de desastres. En *Tricentenario: n° 2*. Instituto de Investigación Universidad y Región.

Cundall, P. A. y Hart, P. (1971). A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, I(II), 8.

Dawe, J. L., Seah, C. K. y Liu, Y. (2001). A computer model for predicting infilled frame behaviour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(1), 133–148.

de Acevedo, P. O. D. (1982). Cusco, Ciudad histórica: continuidad y cambio. En *Ediciones PEISA*.

De Oliveira Neto, L., John Masia, M., Taguti, Y. y Carlos Rigitano, A. (2013). An anisotropic linear elastic boundary element formulation for masonry wall analysis. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 37(2), 434–440.

De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Van Meirvenne, M. y De Clercq, W. (2013). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science*, 40(2), 1108–1121.

Diaferio, M., Foti, D. y Giannoccaro, N. I. (2015). Identification of the modal properties of a building

- of the greek heritage. *Key Engineering Materials*, 628, 150–159.
- DIANA FEA BV. (2020). *User's Manual* (10.4). <https://dianafea.com/manuals/d104/Diana.html>
- Douglas, B. M. y Reid, W. H. (1982). Dynamic Tests and System Identification of Bridges. *Journal of the Structural Division*, 108(10), 2295–2312.
- F. Laefer, D., Truong-Hong, L. y Fitzgerald, M. (2011). Processing of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud Data for Computational Modelling of Building Facades. *Recent Patents on Computer Science*, 4(1), 16–29.
- Ferris, M. C. y Tin-Loi, F. (2001). Limit analysis of frictional block assemblies as a mathematical program with complementarity constraints. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(1), 209–224.
- FLIR System. (2018). *User's manual FLIR Tools/ Tools+* (5.13).
- Fonseca Ferreira, C. y D' Ayala, D. (2012). Seismic Assessment and Retrofitting of Peruvian Earthen Churches by Means of Numerical Modelling. *15 Wcee*, 10.
- Fortunato, G., Funari, M. F. y Lonetti, P. (2017). Survey and seismic vulnerability assessment of the Baptistery of San Giovanni in Tumba (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 26, 64–78.
- Foti, D., Vacca, V. y Facchini, I. (2018). DEM modeling and experimental analysis of the static behavior of a dry-joints masonry cross vaults. *Construction and Building Materials*, 170, 111–120.
- Foti, Dora, Diaferio, M., Giannoccaro, N. I. y Mongelli, M. (2012). Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower. *NDT and E International*, 47, 88–95.
- Gambarotta, L. y Lagomarsino, S. (1997). Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: The mortar joint model and its applications. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(4), 423–439.
- Gentile, C. y Saisi, A. (2007). Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1311–1321.
- Gentile, Carmelo, Saisi, A. y Cabboi, A. (2015). Structural identification of a masonry tower based on operational modal analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(2), 98–110.
- Gilbert, M., Casapulla, C. y Ahmed, H. M. (2006). Limit analysis of masonry block structures with

- non-associative frictional joints using linear programming. *Computers and Structures*, 84(13–14), 873–887.
- Giordano, A., Mele, E. y De Luca, A. (2002). Modelling of historical masonry structures: Comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24(8), 1057–1069.
- Gisbert, T. y de Mesa, J. (1985). *Arquitectura andina: Historia y análisis*. Embajada de España en Bolivia.
- Gordon, P. y Toth, C. K. (2008). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. En J. Shan & C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning* (Vol. 01, pp. 01–28). CRC Press.
- Grinzato, E., Vavilov, V. y Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29(1), 1–9.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T. y Ringle, K. (2008). Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings C3 - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. *2008 21st ISPRS International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing*, 37(January), 213–218.
- Hendrickx, M., Gheyle, W., Bonne, J., Bourgeois, J., de Wulf, A. y Goossens, R. (2011). The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage - An example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay. *Journal of Archaeological Science*, 38(11), 2968–2978.
- Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera, Madrid.
- Hum-Hartley, S. (1978). Nondestructive Testing for Heritage Structures. *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, 10(3), 4–20. <https://doi.org/10.2307/1493664>
- ICOMOS. (1931). *La Carta de Atenas para la Restauración de Monumentos Históricos*. I Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos.
- ICOMOS. (1964). *La Carta de Venecia para la Restauración de Monumentos Históricos*. II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos.
- ICOMOS. (2003). Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del

patrimonio arquitectónico. *International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage*.

INC-Cusco. (1990). *Informe Final 1990: Restauración Iglesia de la Compañía de Jesús*. Instituto Nacional de Cultura.

Kaamin, M., Idris, N. A., Mohd Bukari, S., Ali, Z., Samion, N. y Anjang Ahmad, M. (2017). Visual Inspection of Historical Buildings Using Micro UAV. *MATEC Web of Conferences*, 103.

Kappos, A. J., Penelis, G. G. y Drakopoulos, C. G. (2002). Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings. *Journal of Structural Engineering*, 128(7), 890–897.

Karanikoloudis, G. y Lourenço, P. B. (2018). Structural assessment and seismic vulnerability of earthen historic structures. Application of sophisticated numerical and simple analytical models. *Engineering Structures*, 160, 488–509.

Komodromos, P. (2005). A simplified updated Lagrangian approach for combining discrete and finite element methods. *Computational Mechanics*, 35(4), 305–313.

Kordatos, E. Z., Exarchos, D. A., Stavrakos, C., Moropoulou, A. y Matikas, T. E. (2013). Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. *Construction and Building Materials*, 48, 1261–1265.

Kubiak, E. (2012). La iglesia de los Jesuitas en Cusco como un modelo para la arquitectura de la región. *Sztuka Ameryki Łacińskiej Arte de la América Latina*, 2, 35–66.

Kubler, G. (1952). Cuzco: Reconstrucción de la Ciudad y Restauración de Sus Monumentos, Informe de la Misión enviada por la Unesco en 1951. En *UNESCO* (p. 64).

Kylili, A., Fokaidis, P. A., Christou, P. y Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, 531–549.

Lacanna, G., Ripepe, M., Marchetti, E., Coli, M. y Garzonio, C. A. (2016). Dynamic response of the Baptistery of San Giovanni in Florence, Italy, based on ambient vibration test. *Journal of Cultural Heritage*, 20, 632–640.

Laefer, D. F., Gannon, J. y Deely, E. (2010). Reliability of Crack Detection Methods for Baseline Condition Assessments. *Journal of Infrastructure Systems*, 16(2), 129–137.

Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A. y Cattari, S. (2013). TREMURI program: An equivalent

- frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. *Engineering Structures*, 56, 1787–1799.
- Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S. y Hanusch, T. (2007). Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*, 34(10), 1702–1712.
- Lehmann, B., Ghazi Wakili, K., Frank, T., Vera Collado, B. y Tanner, C. (2013). Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Applied Energy*, 110, 29–43.
- Leica Geosystems. (2017). *Leica Cyclone Basic User Manual* (9.1).
- Lemos, J. V. (2007). Discrete Element Modeling of Masonry Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(2), 190–213.
- Lercari, N. (2019). Monitoring earthen archaeological heritage using multi-temporal terrestrial laser scanning and surface change detection. *Journal of Cultural Heritage*, 39(June), 152–165.
- Lotfi, H. R. y Shing, P. B. (1991). An appraisal of smeared crack models for masonry shear wall analysis. *Computers and Structures*, 41(3), 413–425.
- Lourenço, P. B. (1996). Computational Strategies for Masonry Structures. En *PhD Thesis* (Vol. 70, Número 08). Tesis de Doctorado, Delft University of Technology, Netherlands.
- Lourenço, P. B. (2002). Computations on historic masonry structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319.
- Lourenço, P. B. (2006). Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney. *Construction and Building Materials*, 20(4), 239–251.
- Lourenço, P. B. (2009). Recent Advances in Masonry Modelling: Micromodelling and Homogenisation. *Multiscale Modeling in Solid Mechanics*, 251–294.
- Lourenço, P. B., Mendes, N., Ramos, L. F. y Oliveira, D. V. (2011). Analysis of masonry structures without box behavior. *International Journal of Architectural Heritage*, 5(4–5), 369–382.
- Lourenço, P. B. y Pereira, J. (2018). *Seismic Retrofitting Project: Recommendations for Advanced Modeling of Historic Earthen Sites*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute. Guimarães, Portugal.
- Lourenço, P. B. y Rots, J. (1997). Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures.

Journal of Engineering Mechanics, 123(7), 660–668.

- Lourenço, Paulo B. (2013). Computational strategies for masonry structures : multi-scale modeling, dynamics, engineering applications and other challenges. *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, 451–472.
- Lubowiecka, I., Armesto, J., Arias, P. y Lorenzo, H. (2009). Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*, 31(11), 2667–2676.
- Luks, I. (1973). Tipología de la escultura decorativa hispánica en la Arquitectura Andina del siglo XVIII. *Boletín del Centro de Investigaciones Históricas y Estéticas*, 17.
- Luna, U., Rivero, P. y Vicent, N. (2019). Augmented reality in heritage apps: Current trends in Europe. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(13).
- Maccarini, H., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Ortega, J. y Lourenço, P. (2018). Out-of-plane behavior of stone masonry walls: Experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 179, 430–452.
- Macchi, G., Ruggeri, M., Eusebio, M. y Moncecchi, M. (1993). Structural assessment of the leaning tower of Pisa. *Structural preservation of the architectural heritage: IABSE, Zürich, Switzerland*, 401–408.
- Maier, G. y Nappi, A. (1990). A theory of no-tension discretized structural systems. *Engineering Structures*, 12(4), 227–234.
- Maldague, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* (W. & Sons (ed.); 1a ed.).
- Maldague, X. (2002). Introduction to NDT by active infrared thermography. *Materials Evaluation*, 60(9), 1060–1073.
- Martínez, I., Castillo, A., Martínez, E. y Castellote, M. (2013). Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention. *Construction and Building Materials*, 40, 352–360.
- Meli, R. (1998). *Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos* (Fundación). Fundación ICA. A.C. México.
- Meli, R. y Sánchez Ramírez, A. R. (1995). Structural aspects of the rehabilitation of the Mexico City

- Cathedral. En *Structural analysis of historical constructions I* (pp. 123–140). CIMNE.
- Mendes, N. (2012). *Seismic Assessment of Ancient Masonry Buildings: Shaking Table Tests and Numerical Analysis*. Tesis de Doctorado, Universidade do Minho, Portugal.
- Meola, C. y Carlomagno, G. M. (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, 15(9).
- Mercuri, F., Zammit, U., Orazi, N., Paoloni, S., Marinelli, M. y Scudieri, F. (2011). Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 104(2), 475–485.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S. y McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry* (Wiley (ed.); 19a ed.).
- Milani, G., Lourenço, P. B. y Tralli, A. (2006). Homogenised limit analysis of masonry walls. Part I: failure surfaces. *Computers & structures*, 84(3–4), 166–180.
- Milani, G., Simoni, M. y Tralli, A. (2014). Advanced numerical models for the analysis of masonry cross vaults: A case-study in Italy. *Engineering Structures*, 76(1), 339–358.
- Milani, G. y Valente, M. (2015). Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events : Possibilities of non-linear finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms. *Engineering Failure Analysis*, 47, 129–161.
- Moropoulou, A., Apostolopoulou, M., Moundoulas, P., Karoglou, M., Delegou, E., Lampropoulos, K., Gritsopoulou, M. y Bakolas, A. (2015). The combination of NDTs for the diagnostic study of historical buildings: The case of Kaisariani monastery. *COMPADYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, May, 2321–2336.
- NTC. (2008). Norme tecniche per le costruzioni—Il Capo del Dipartimento della Protezione Civile. *Decreto Ministeriale 14/1/2008*.
- Orduña, A. (2017). Non-linear static analysis of rigid block models for structural assessment of ancient masonry constructions. *International Journal of Solids and Structures*, 128(July 2017), 23–35.
- Owen, D. R. J., Peric, D., Petrinic, N., Smokes, C. y James, P. J. (1998). Finite/discrete element models for assessment and repair of masonry structures. En *Proceedings of the 2nd*

International Conference on Arch Bridges: History, Analysis, Assessment, Maintenance and Repair (SinopoliA).

- Page, A. W. (1978). Finite Element Model for Masonry. *Journal of the Structural Division*, 104(8), 1267–1285.
- Pantò, B., Cannizzaro, F., Calì, I. y Lourenço, P. B. (2017). Numerical and Experimental Validation of a 3D Macro-Model for the In-Plane and Out-Of-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls. *International Journal of Architectural Heritage*, 11(7), 946–964.
- Park, H. S., Lee, H. M., Adeli, H. y Lee, I. (2007). A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 19–30.
- Parrinello, F., Failla, B. y Borino, G. (2009). Cohesive-frictional interface constitutive model. *International Journal of Solids and Structures*, 46(13), 2680–2692.
- Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V. y Chamzas, C. (2007). Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 93–98.
- Pegon, P., Pinto, A. V. y Gérardin, M. (2001). Numerical modelling of stone-block monumental structures. *Computers and Structures*, 79(22–25), 2165–2181.
- Penelis, G. G. G. (2006). An efficient approach for pushover analysis of unreinforced masonry (URM) structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(3), 359–379.
- Pieraccini, M., Guidi, G. y Atzeni, C. (2001). 3D digitizing of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2(1), 63–70.
- Portioli, F., Cascini, L., Casapulla, C. y D’Aniello, M. (2013). Limit analysis of masonry walls by rigid block modelling with cracking units and cohesive joints using linear programming. *Engineering Structures*, 57, 232–247.
- Quagliarini, E., Maracchini, G. y Clementi, F. (2017). Uses and limits of the Equivalent Frame Model on existing unreinforced masonry buildings for assessing their seismic risk: A review. *Journal of Building Engineering*, 10(March), 166–182.
- Quelhas, B., Cantini, L., Guedes, J. M., da Porto, F. y Almeida, C. (2014). Characterization and Reinforcement of Stone Masonry Walls. *Structural Rehabilitation of Old Buildings*, 2, 131–155.

- Ramírez, R. (2016). *Structural analysis of the church of the Monastery of São Miguel de Refojos*. Tesis de Maestría, Universidade do Minho, Portugal.
- Ramos, A. (2015). *Caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Ramos, L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. Universidade do Minho, Portugal.
- Rashed, Y. F., Abdalla, M. H. y Youssef, M. A. R. (1997). Boundary element analysis of masonry structures. En *Transactions on Modelling and Simulation* (Vol. 18). WIT Press.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138.
- Remondino, F. y El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: A review. *Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291.
- Riveiro, B., González-Jorge, H., Conde, B. y Puente, I. (2016). Laser scanning technology: Fundamentals, principles and applications in infrastructure. En Belén Riveiro & M. Solla (Eds.), *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure* (1st Editio, Número Collis 1965, pp. 7–33). CRC Press.
- Rivieccio, P. G. (2006). Homogenization Strategies and Computational Analyses for Masonry Structures Via Micro-mechanical Approach. En *Engineering Faculty*. University of Napoli Federico II.
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G. y Pelà, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions . Classical and Advanced Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299–325.
- Rocha, Mateus, Fernández y Ferreira. (2020). A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 3(1), 47–67.
- Rodrigues, J. (2004). *Identificação Modal Estocástica - Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil*. Tesis de Doctorado, Universidade do Porto, Portugal.
- Ruiz Valero, L., Flores Sasso, V. y Prieto Vicioso, E. (2019). In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00228.

- Saloustros, S., Pelà, L. y Roca, P. (2020). Nonlinear Numerical Modeling of Complex Masonry Heritage Structures Considering History-Related Phenomena in Staged Construction Analysis and Material Uncertainty in Seismic Assessment. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(5), 1–17.
- Sánchez Aparicio, L. J., Riveiro, B., González Aguilera, D. y Ramos, L. F. (2014). The combination of geomatic approaches and operational modal analysis to improve calibration of finite element models: A case of study in Saint Torcato Church (Guimarães, Portugal). *Construction and Building Materials*, 70, 118–129.
- Sarhosis, V. (2012). *Computational modelling of low bond strength masonry*. University of Leeds.
- Shi, G.-H. (1992). Discontinuous Deformation Analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of deformable block structures. *Engineering Computations*, 9(2), 157–168.
- Shimpi, V., Sivasubramanian, M. V. R. y Singh, S. B. (2019). System identification of heritage structures through AVT and OMA: A review. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 13(1), 1–40.
- Shults, R. (2017). New opportunities of low-cost photogrammetry for culture heritage preservation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(5W1), 481–486.
- Sovero, S. K. y Martel, C. (2014). *Herramienta para el proceso de calibración de modelos numéricos*.
- Standoli, G., Giordano, E., Milani, G. y Clementi, F. (2020). Model Updating of Historical Belfries Based on OMA Identification Techniques. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(1), 132–156.
- Stavridis, A. y Shing, P. B. (2010). Finite-Element Modeling of Nonlinear Behavior of Masonry-Infilled RC Frames. *Journal of Structural Engineering*, 136(3), 285–296.
- Thavalingam, A., Bicanic, N., Robinson, J. I. y Ponniah, D. A. (2001). Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges. *Computers and Structures*, 79(19), 1821–1830.
- Theodorakeas, P., Cheilakou, E., Ftikou, E. y Kouli, M. (2015). Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 655(1).

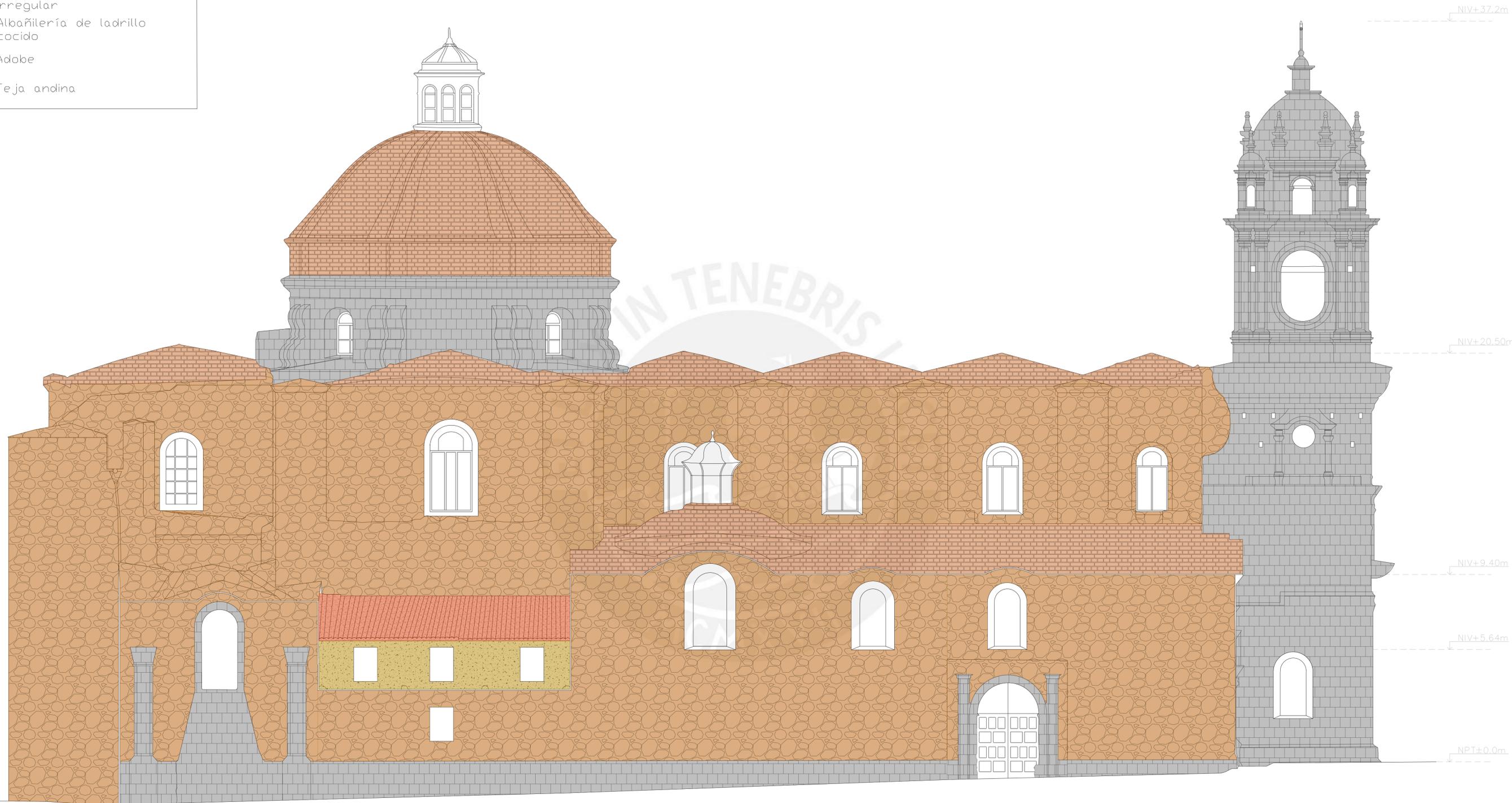
- Tiberti, S. y Milani, G. (2020a). 3D voxel homogenized limit analysis of single-leaf non-periodic masonry. *Computers and Structures*, 229, 106186.
- Tiberti, S. y Milani, G. (2020b). Fast brick-based homogenized limit analysis for in- and out-of-plane loaded periodic masonry panels. *Computers and Structures*, 231, 106206.
- Titman, D. J. (2001). Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *NDT and E International*, 34(2), 149–154.
- Tomažević, M. (1978). The computer program POR, Report ZRMK. *Institute for Testing and Research in Materials and Structures*.
- Torrealva, D. y Blanco, A. (2002). *La Intervención Estructural en Monumentos Históricos. El Caso de la Reconstrucción de la Catedral de Arequipa*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Tralli, A., Alessandri, C. y Milani, G. (2014). Computational Methods for Masonry Vaults: A Review of Recent Results. *The Open Civil Engineering Journal*, 8(1), 272–287.
- Turek, M., Ventura, C. E. y Placencia, P. (2002). Dynamic characteristics of a 17th century church in Quito, Ecuador. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4753 II(March 2015), 1259–1264.
- UNESCO. (1983). *City of Cuzco*. <https://whc.unesco.org/en/list/273/documents/>
- Verhoeven, G. (2011). Taking ComputerVisionAloft-Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographswith PhotoScan. *Archaeological Prospection*, 18, 67–73.
- Yastikli, N. (2007). Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 423–427. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.003>
- Zanotti, S. (2015). *Seismic Analysis of the Church of Kuño Tambo (Peru)*. Tesis de Maestría, Universidade do Minho, Portugal.
- Zini, G., Betti, M., Bartoli, G. y Chiostri, S. (2018). Frequency vs time domain identification of heritage structures. *Procedia Structural Integrity*, 11, 460–469.
- Zucchini, A. y Lourenço, P. B. (2006). Mechanics of masonry in compression: Results from a homogenisation approach. *Computers and Structures*, 85(3–4), 193–204.



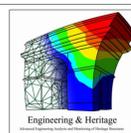
CAPÍTULO 8. ANEXOS

LEYENDA

-  Albañilería de piedra regular
-  Albañilería de piedra irregular
-  Albañilería de ladrillo cocido
-  Adobe
-  Teja andina



Elevación Jr. Loreto



Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácará Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO
Plano: Materiales Existentes 1
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco
Propietario:

Escala: 1/100

Fecha: julio 2021

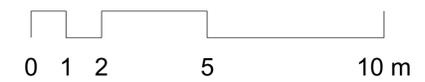
E-1

LEYENDA

-  Albañilería de piedra regular
-  Albañilería de piedra irregular



Elevación Frontal

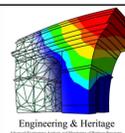
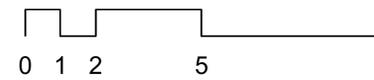
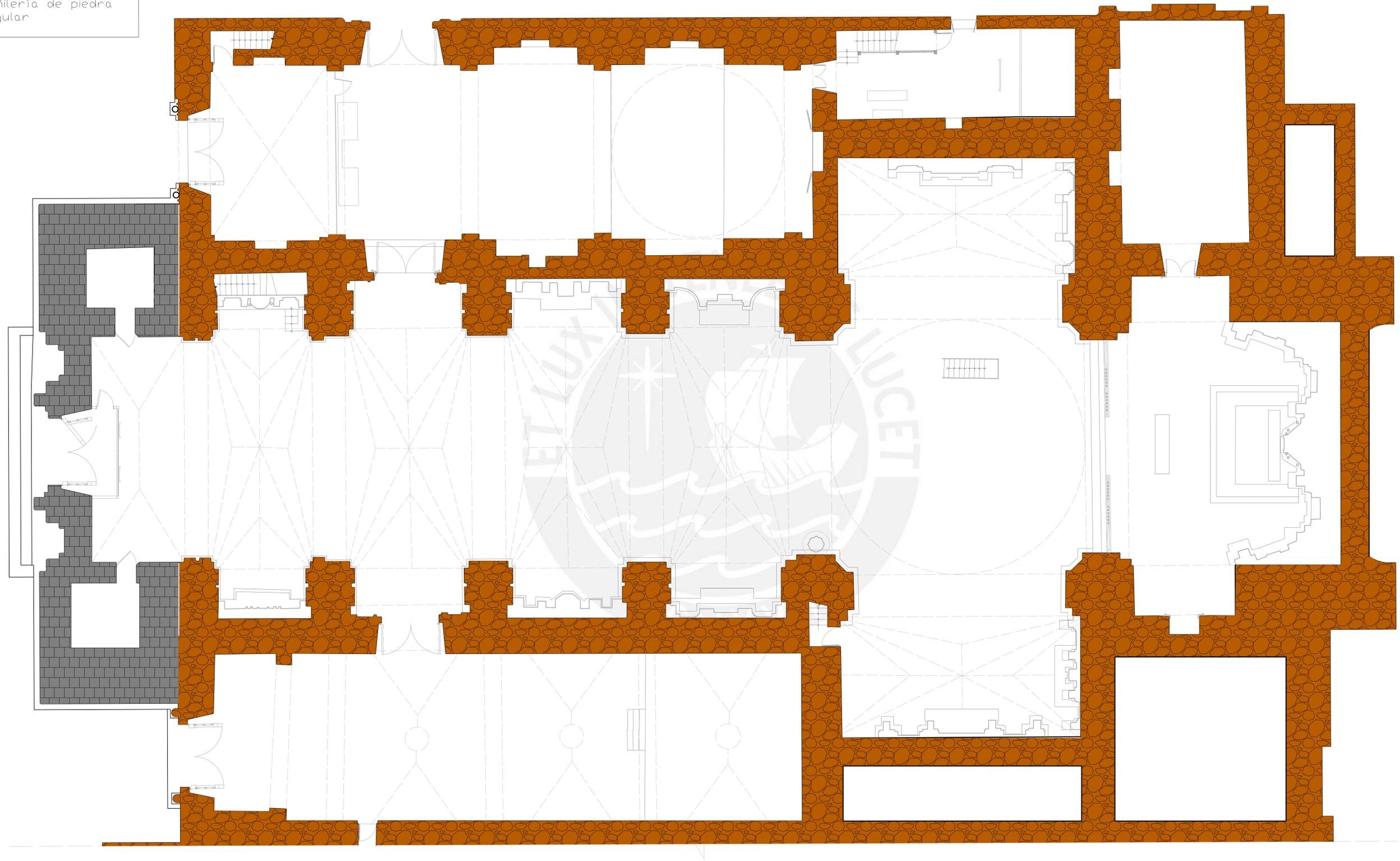


Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácaras Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO	
Plano: Materiales Existentes 2	
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco	Propietario:
Escala: 1/100	Fecha: julio 2021

LEYENDA

-  Albañilería de piedra regular
-  Albañilería de piedra irregular



Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácará Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

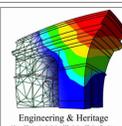
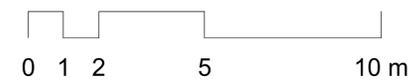
Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO
Plano: Materiales existentes en planta
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco Propietario:
Escala: 1/100 Fecha: julio 2021

LEYENDA

-  Contaminación biológica de muros
-  Degradación superficial
-  Humedad por capilaridad
-  Desprendimiento de mortero
-  Desprendimiento de piedra
-  Grietas
-  Desconexión de muros
-  Erosión de la piedra
-  Manchas en paredes



Elevación Jr. Loreto



Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácara Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

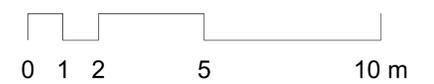
Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO
Plano: Anomalías en elevación
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco Propietario:
Escala: 1/100 Fecha: julio 2021

LEYENDA

-  Contaminación biológica de muros
-  Degradación superficial
-  Humedad por capilaridad
-  Desprendimiento de mortero
-  Desprendimiento de piedra
-  Grietas
-  Desconexión de muros
-  Erosión de la piedra
-  Manchas en paredes

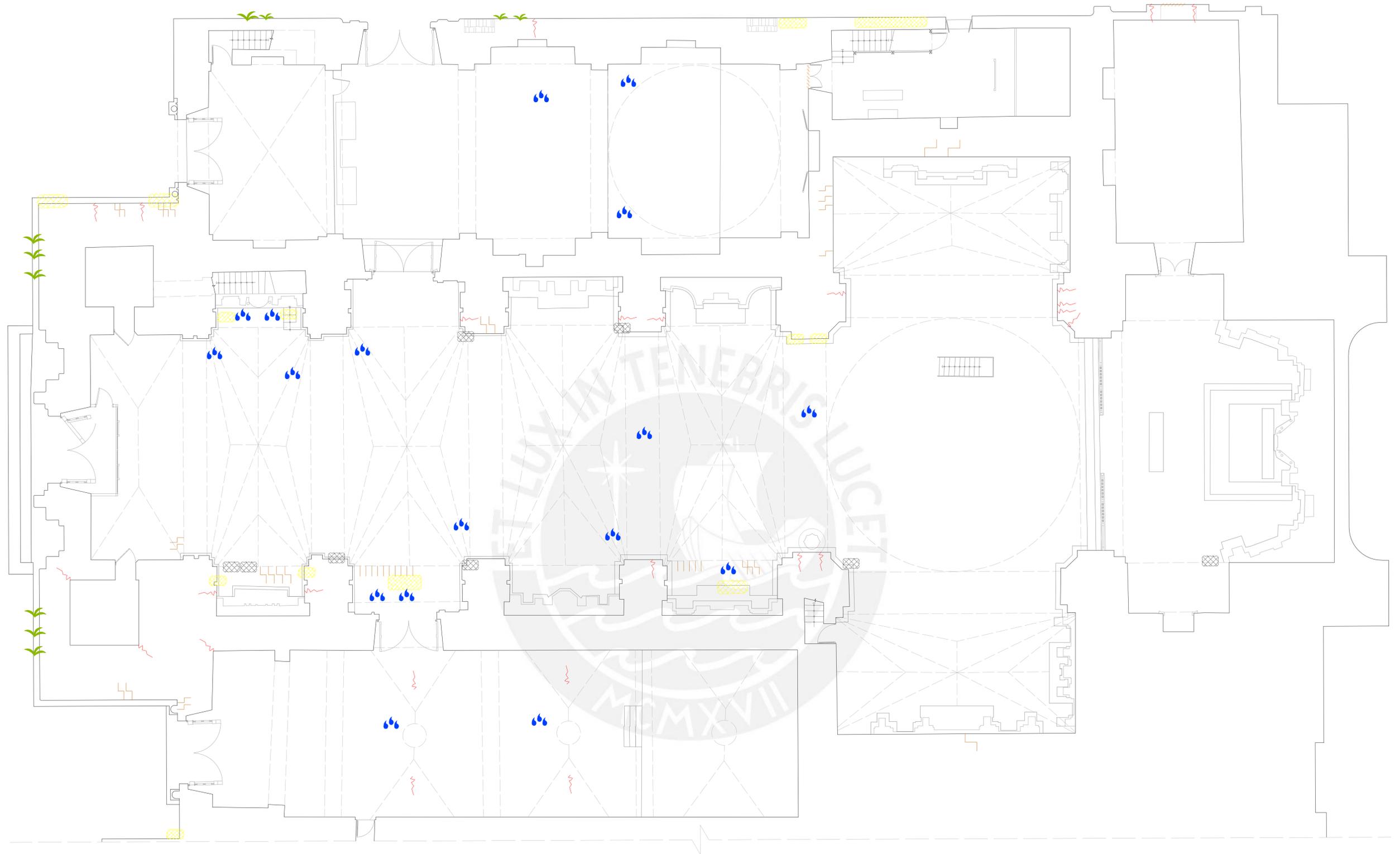


Elevación Frontal



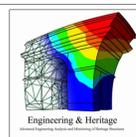
Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácara Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO
Plano: Anomalías en la fachada
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco Propietario:
Escala: 1/100 Fecha: julio 2021



LEYENDA

 Contaminación biológica de muros	 Grietas
 Humedad por capilaridad	 Desconexión de muros
 Desprendimiento de mortero	 Erosión de la piedra
 Desprendimiento de piedra	 Manchas en paredes



Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
 Coordinador del proyecto:
 Dr. César Chácará Espinoza
 Dibujo:
 Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

Proyecto: **CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO**
 Plano: **Anomalías en planta**
 Ubicación: **Plaza de Armas, Cusco** Propietario:
 Escala: **1/100** Fecha: **julio 2021**

ANTECEDENTES DE LA INTERVENCIÓN

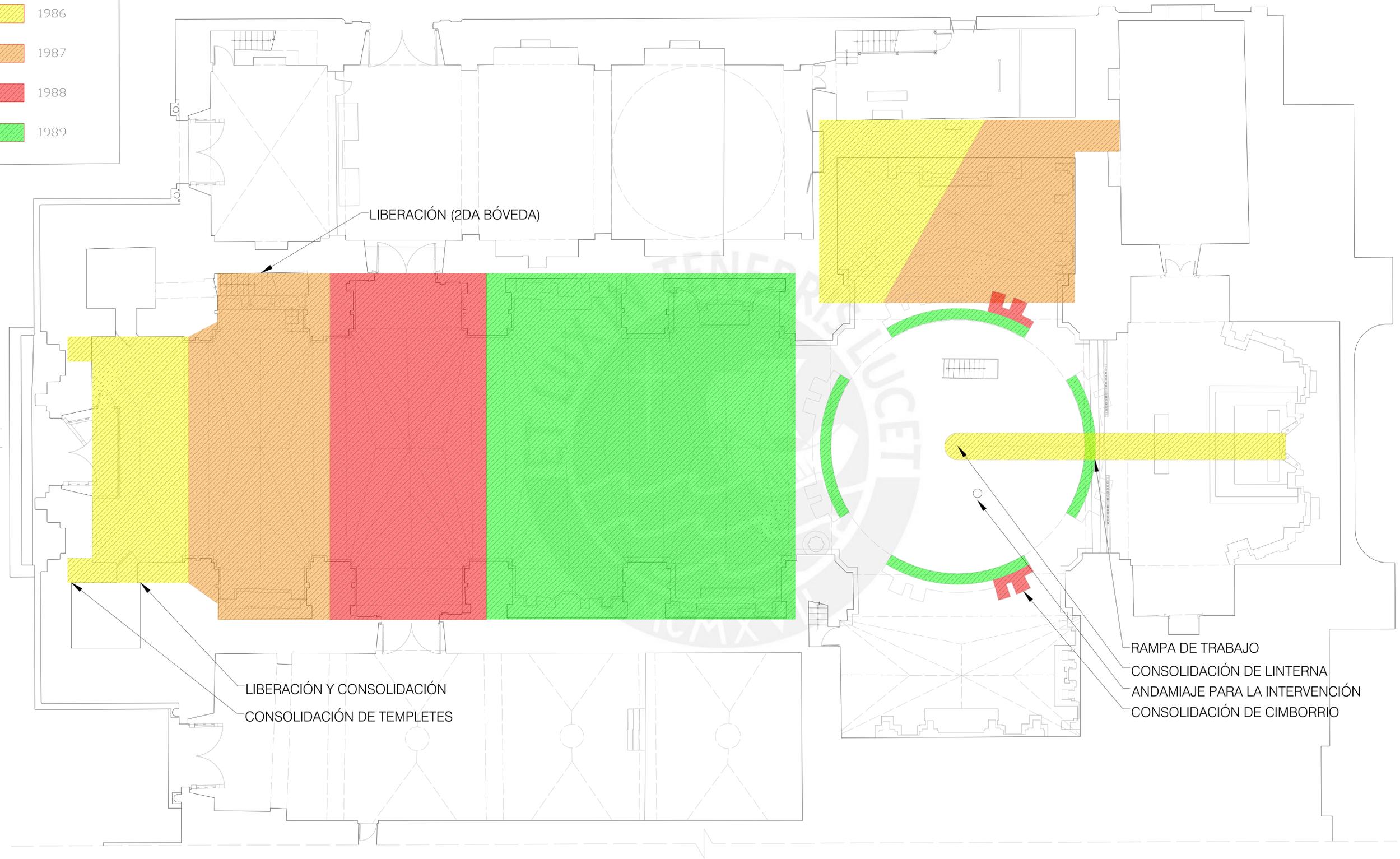
- 1986
- 1987
- 1988
- 1989

A
A'

B'
B

A
A'

B'
B

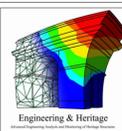


LIBERACIÓN (2DA BÓVEDA)

LIBERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN
CONSOLIDACIÓN DE TEMPLETES

RAMPA DE TRABAJO
CONSOLIDACIÓN DE LINTERNA
ANDAMIAJE PARA LA INTERVENCIÓN
CONSOLIDACIÓN DE CIMBORRIO

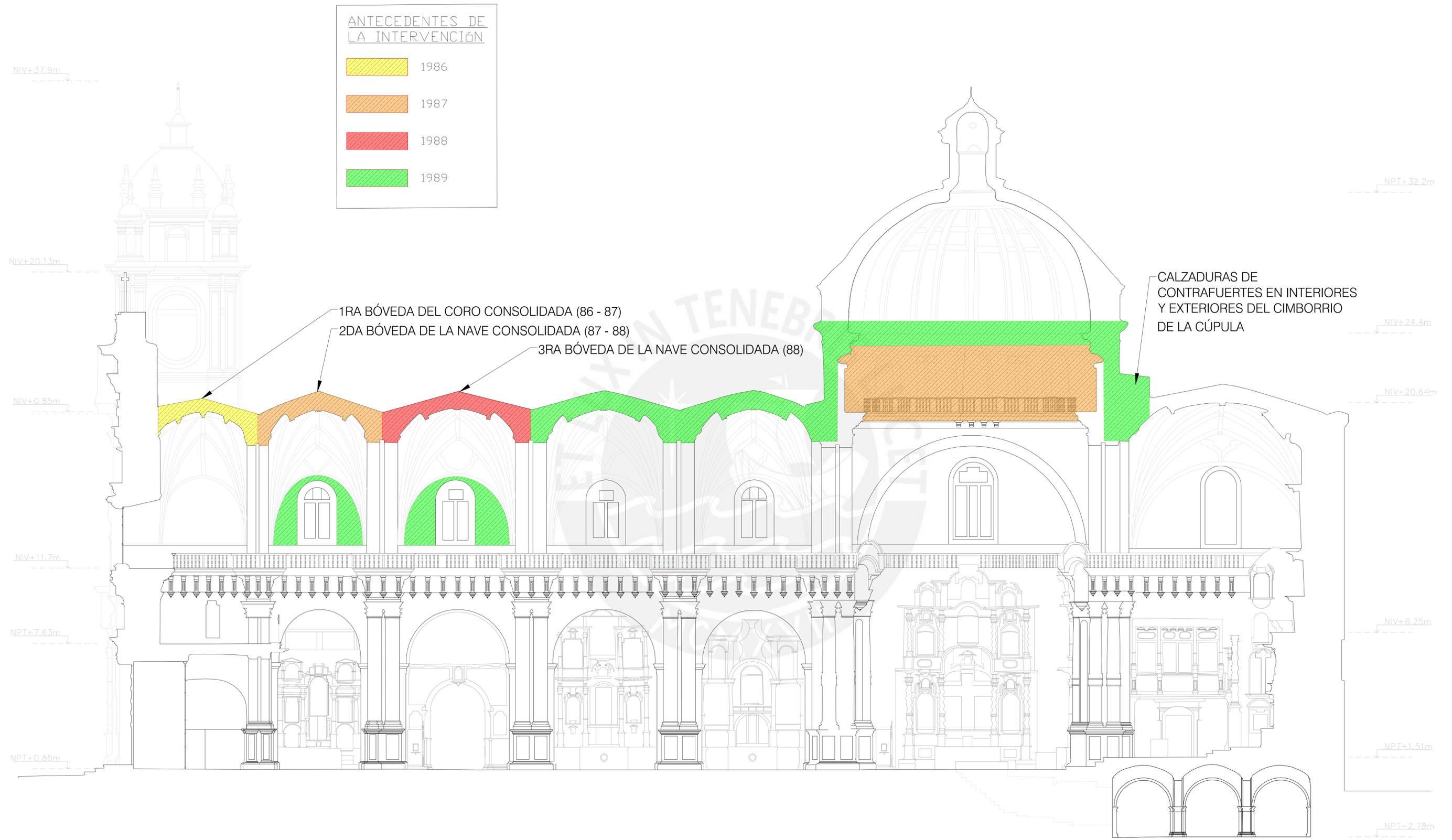
0 1 2 5



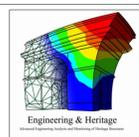
Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácarra Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO
Plano: Intervenciones de restauración
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco
Propietario:

Escala: 1/100
Fecha: julio 2021



Corte A'



Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
 Coordinador del proyecto:
 Dr. César Chácará Espinoza
 Dibujo:
 Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

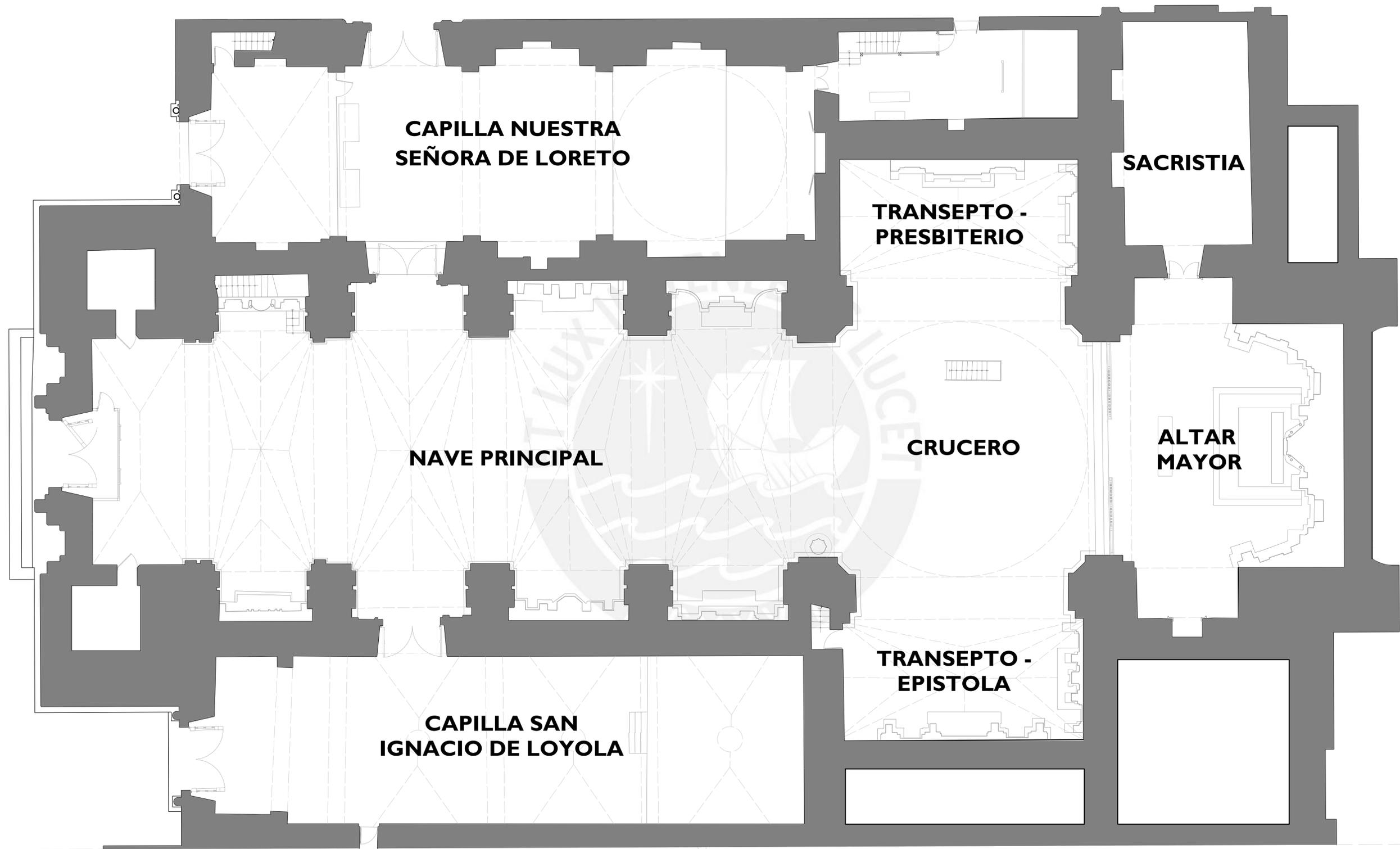
Proyecto: **CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO**

Plano: **Intervenciones de restauración**

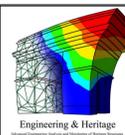
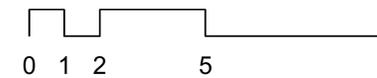
Ubicación: **Plaza de Armas, Cusco** Propietario:

Escala: **1/100** Fecha: **julio 2021**

JR. LORETO

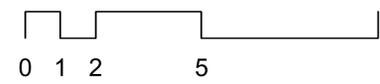
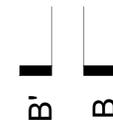
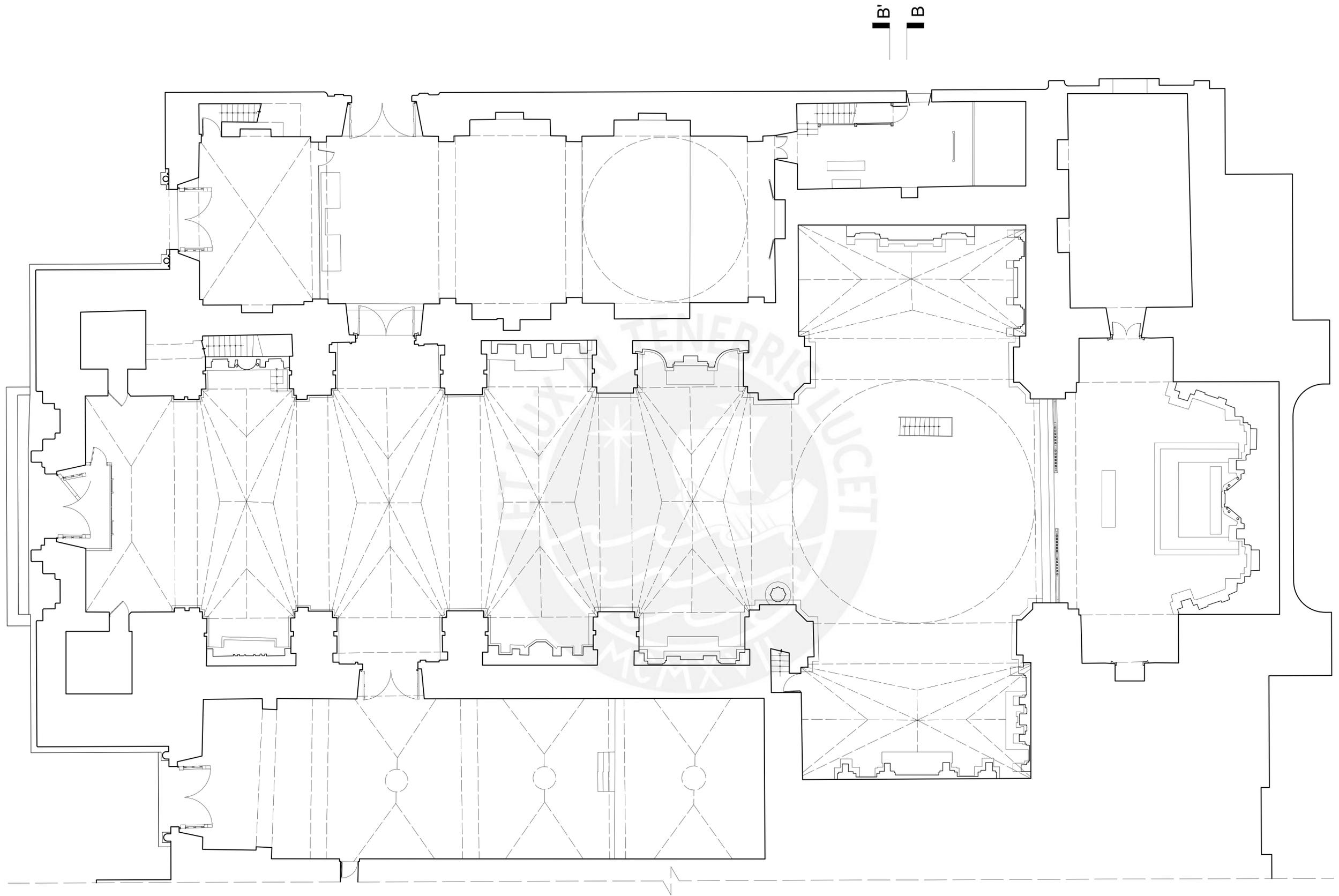


PARANINFO UNIVERSITARIO



Grupo de investigación
ENGINEERING & HERITAGE PUCP
Coordinador del proyecto:
Dr. César Chácará Espinoza
Dibujo:
Percy Suárez C. / Alvaro Oré E.

Proyecto: CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO EN ELEMENTOS FINITOS DE LA IGLESIA DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS DE LA CIUDAD DE CUSCO
Plano: Plano en planta de la iglesia
Ubicación: Plaza de Armas, Cusco
Propietario:
Escala: 1/100
Fecha: julio 2021



Grupo de investigación
 PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP
 Coordinadora:
 Arq. Adriana Scaletti C.
 Dibujo:
 Sebastián Cisneros M. | Natalia Villanueva C. | Andrea Avendaño C.

Proyecto:
 Plano:
 Ubicación: Plaza de Armas, Cusco

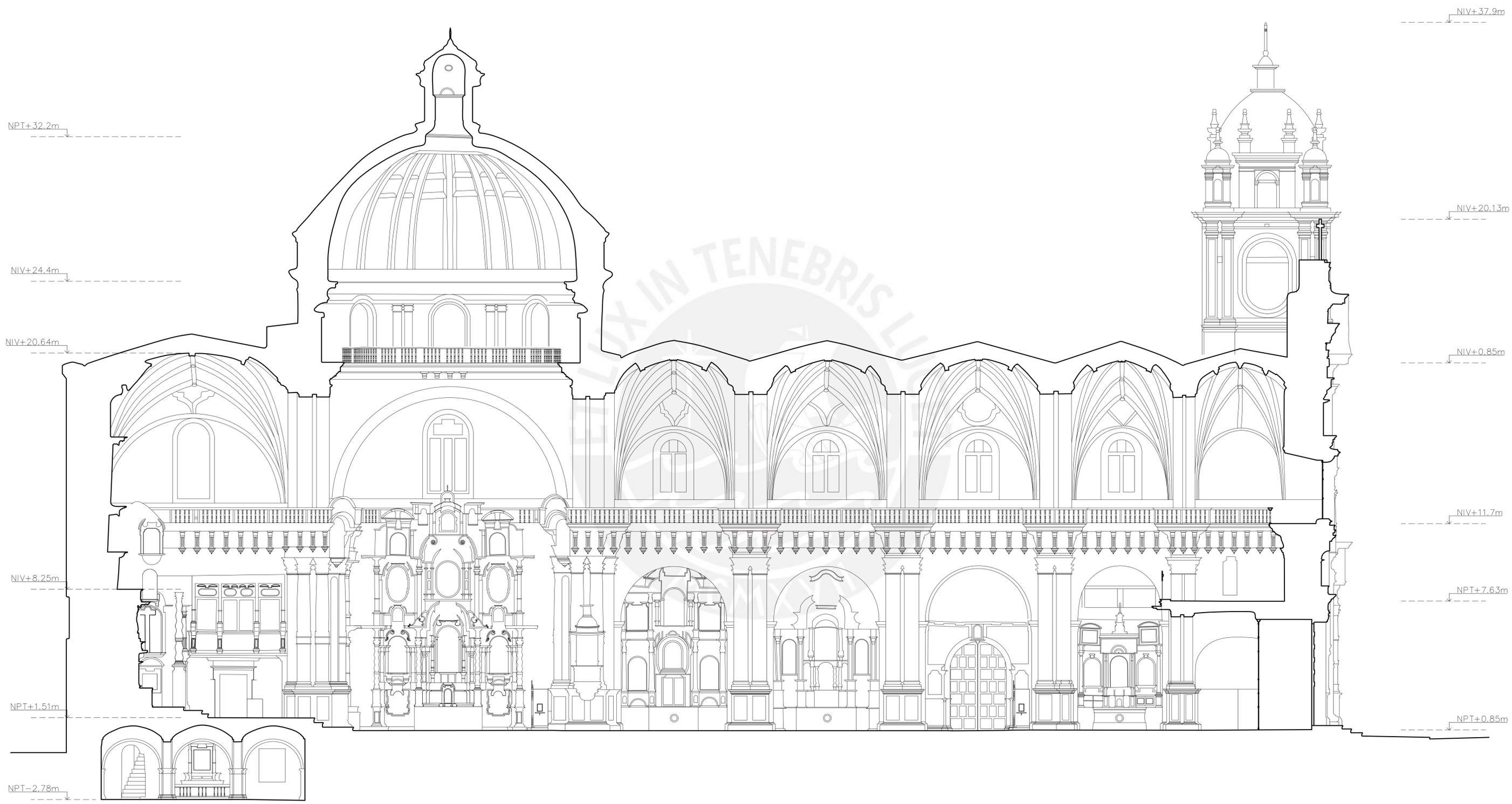
Propietario:

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS

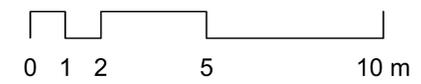
Primer nivel - Arquitectura

Escala: 1/100

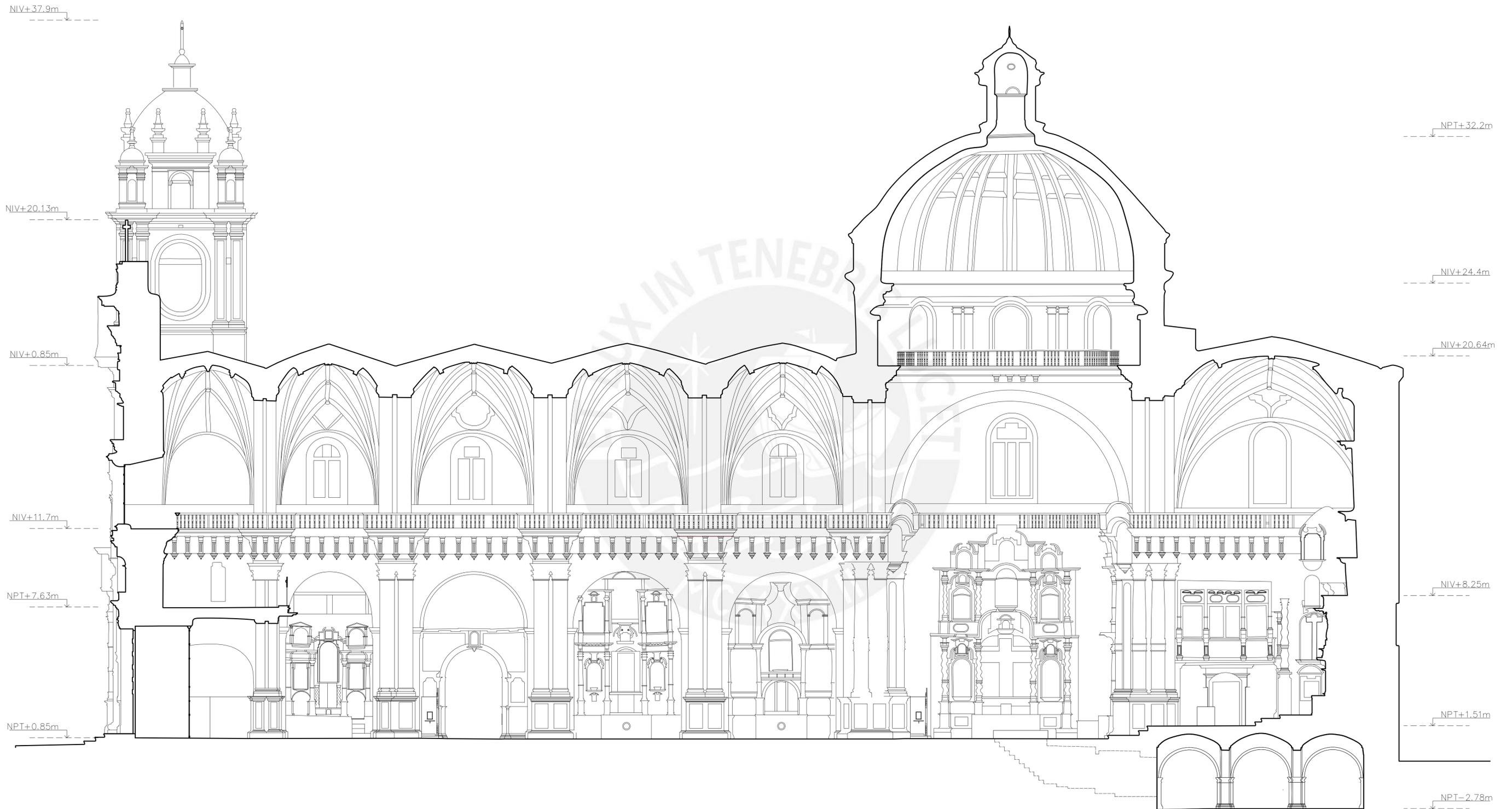
Fecha: Agosto 2020



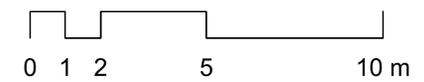
Corte A



 <p>Grupo de investigación PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP Coordinadora: Arq. Adriana Scaletti C. Dibujo: Sebastián Cisneros M. Natalia Villanueva C. Andrea Avendaño C.</p>	<p>Proyecto: LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS</p>			<p>Fecha: Agosto 2020</p>
	<p>Plano: Corte A - Arquitectura</p>		<p>Propietario:</p>	
<p>Ubicación: Plaza de Armas, Cusco</p>		<p>Escala: 1/100</p>		



Corte A'



Grupo de investigación
 PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP
 Coordinadora:
 Arq. Adriana Scaletti C.
 Dibujo:
 Sebastián Cisneros M. | Natalia Villanueva C. | Andrea Avendaño C.

Proyecto:
 Plano:
 Ubicación:
 Plaza de Armas, Cusco

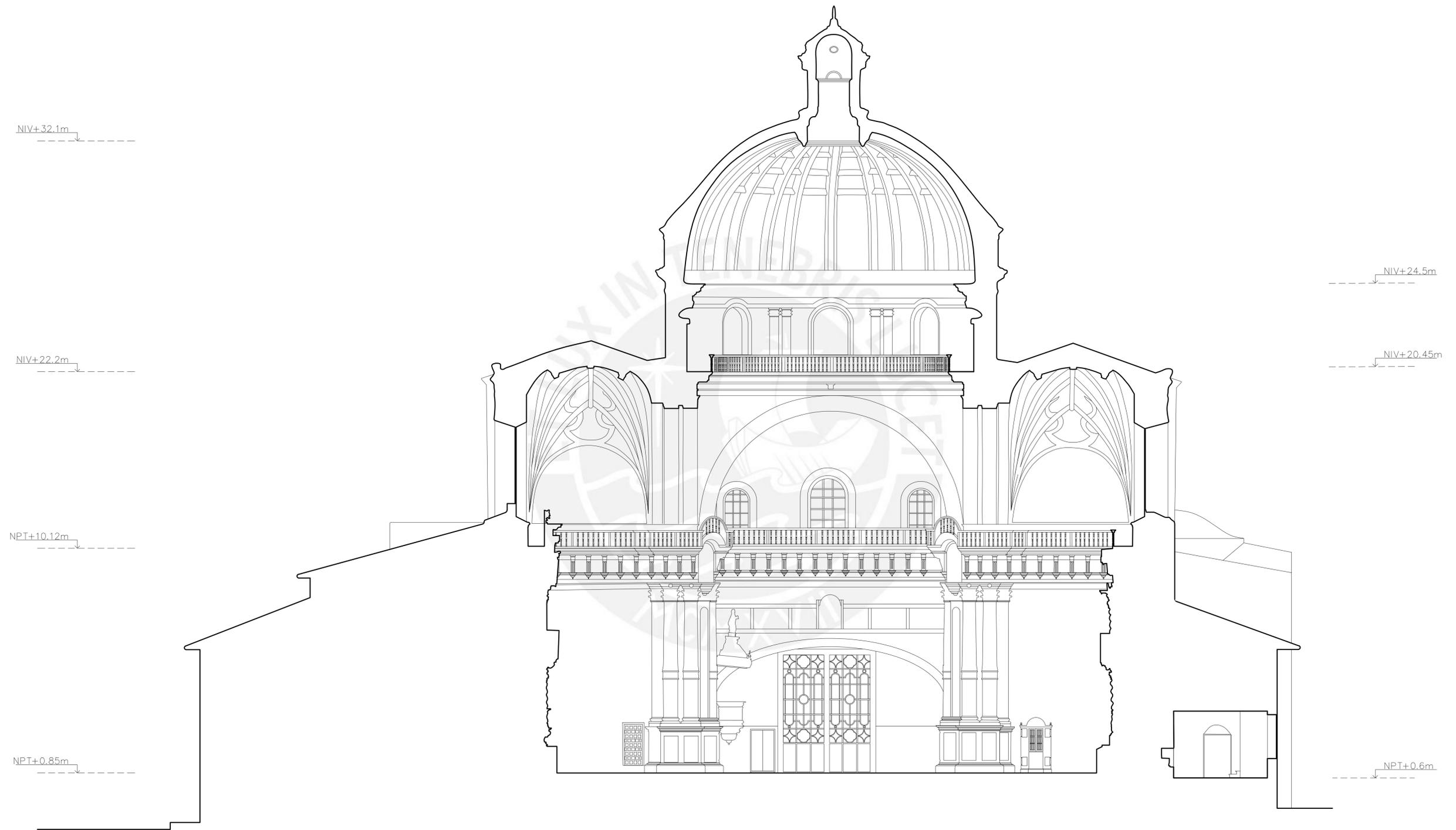
Propietario:

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS

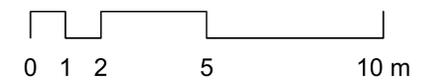
Corte A - Arquitectura

Escala:
 1/100

Fecha:
 Agosto 2020



Corte B



Grupo de investigación
 PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP
 Coordinadora:
 Arq. Adriana Scaletti C.
 Dibujo:
 Sebastián Cisneros M. | Natalia Villanueva C. | Andrea Avendaño C.

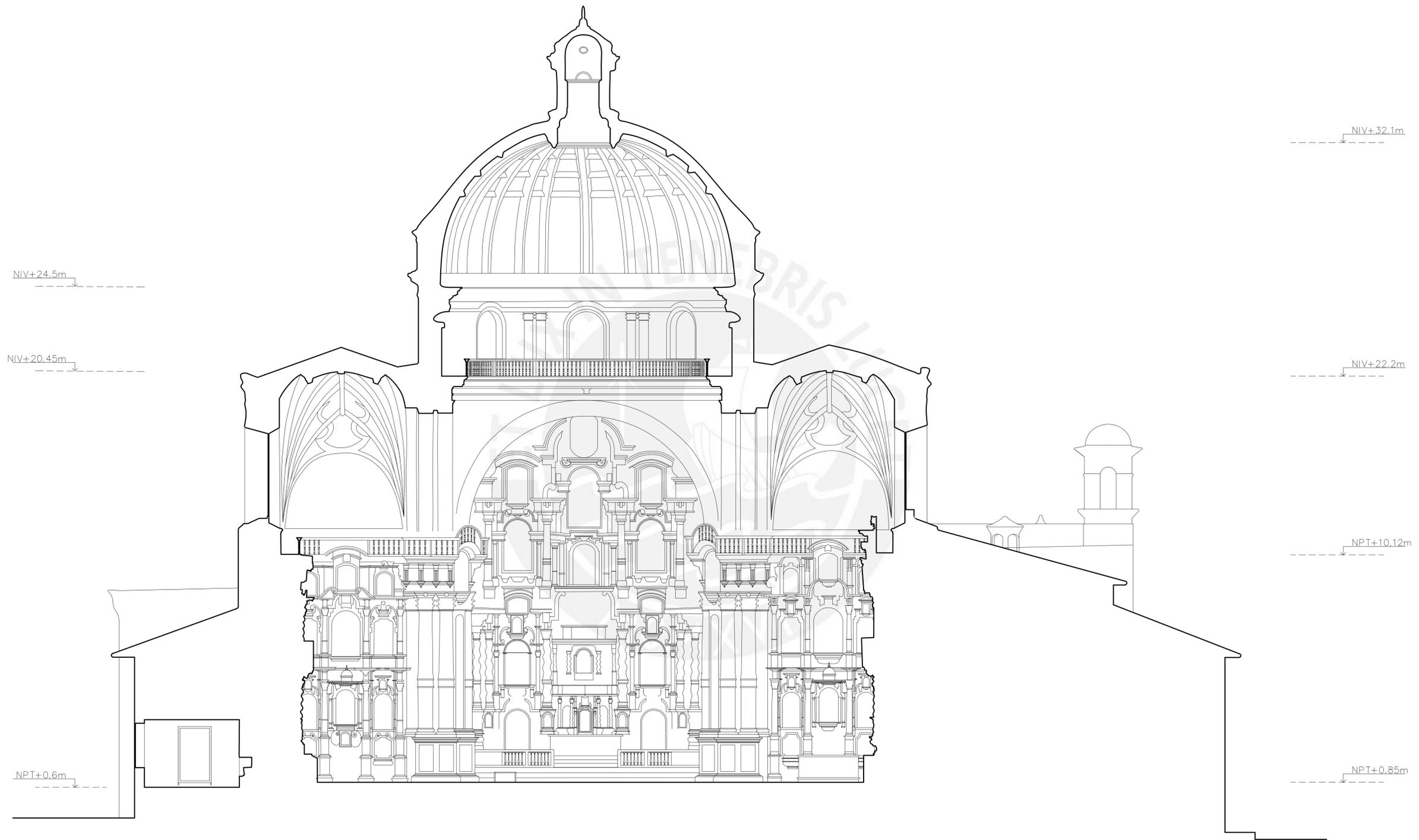
Proyecto:
 Plano:
 Ubicación:
 Plaza de Armas, Cusco

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS
 Corte transversal B - Arquitectura

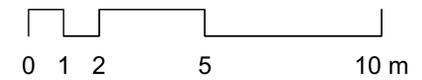
Propietario:

Escala:
 1/100

Fecha:
 Agosto 2020



Corte B'



Grupo de investigación
 PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP
 Coordinadora:
 Arq. Adriana Scaletti C.
 Dibujo:
 Sebastián Cisneros M. | Natalia Villanueva C. | Andrea Avendaño C.

Proyecto:

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS

Plano:

Corte transversal B - Arquitectura

Ubicación:

Plaza de Armas, Cusco

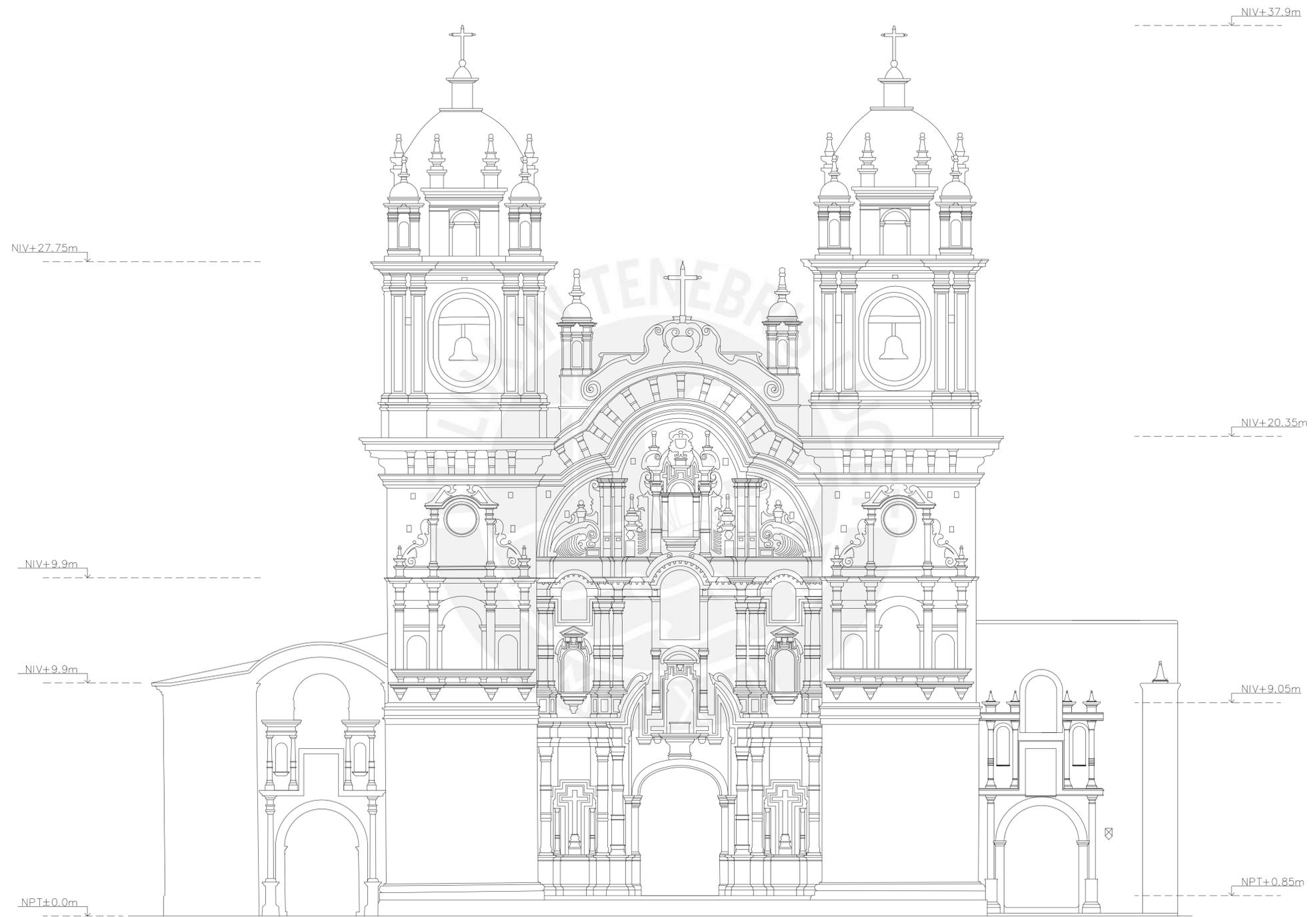
Propietario:

Escala:

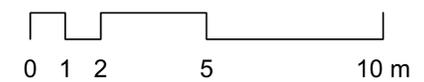
1/100

Fecha:

Agosto 2020



Elevación Frontal



Grupo de investigación
 PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP
 Coordinadora:
 Arq. Adriana Scaletti C.
 Dibujo:
 Sebastián Cisneros M. | Natalia Villanueva C. | Andrea Avendaño C.

Proyecto:

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS

Plano:

Elevación frontal - Arquitectura

Ubicación:

Plaza de Armas, Cusco

Propietario:

Escala:

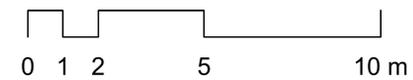
1/100

Fecha:

Agosto 2020



Elevación Jr. Loreto



Grupo de investigación
 PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PUCP
 Coordinadora:
 Arq. Adriana Scaletti C.
 Dibujo:
 Sebastián Cisneros M. | Natalia Villanueva C. | Andrea Avendaño C.

Proyecto:
 Plano:
 Ubicación:
 Plaza de Armas, Cusco

Propietario:

LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO DE IGLESIA LA COMPAÑÍA DE JESÚS

Elevación jirón Loreto - Arquitectura

Escala:
 1/100

Fecha:
 Agosto 2020