



# Aplicación de herramientas de Ingeniería Modernas para la protección del Patrimonio Histórico

**Autor:** Rafael Aguilar, Veliz PhD / raguilar@puccp.pe  
Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería, Sección de Ingeniería Civil, Director del Grupo y Laboratorio de Investigación Engineering & Heritage / Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP

## INTRODUCCIÓN

Las construcciones patrimoniales (históricas y arqueológicas) están expuestas a una serie de peligros como por ejemplo sismos, incendios, derrumbes, lluvias, ataque de insectos e incluso a su inadecuado mantenimiento en el tiempo. Debido a la complejidad y amplitud de las áreas de estudio, las medidas de protección y conservación deben utilizar tecnología moderna y ser diseñadas por equipos multidisciplinarios integrados por propietarios, arqueólogos, arquitectos e ingenieros. El presente artículo muestra la aplicación de algunas herramientas modernas para el diagnóstico estructural de dos casos de estudio: uno del sitio arqueológico de Chokepunkio y otro de la iglesia de Andahuaylillas en Cusco.

## DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL CON ENSAYOS DE IDENTIFICACIÓN MODAL: EL CASO DEL SITIO ARQUEOLÓGICO DE CHOKEPUNKIO, CUSCO

El sitio arqueológico de Chokepunkio se encuentra a 30 km al sur de la ciudad del Cusco. Este complejo corresponde a un vestigio de la cultura Lucre y se estima que fue construido entre los años 900 y 1300 D.C; presenta una arquitectura especial, con paredes que forman recintos alrededor de espacios abiertos. Esta configuración espacial mantiene calles y callejones estrechos que conectan el acceso a los recintos. Además, en general, los muros perimetrales todavía existentes tienen de 10 a 12 m de alto, y nichos trapezoidales y rectangulares a diferentes alturas. Por otro lado, la mampostería que se encuentra es de piedra redondeada y dispuesta en varias capas, con juntas irregulares de barro y mortero de paja que varía entre 25 y 100 mm [3]. Desgraciadamente, el complejo está gravemente dañado debido a los movimientos sísmicos acontecidos en la zona y la falta de acciones de mantenimiento adecuado. Los daños consisten en la destrucción total o parcial de la mayor parte del complejo, la pérdida de elementos de soporte/conexión y la presencia de vegetación. Como se muestra en la Figura 1, actualmente se puede encontrar en el sitio al menos 6 sectores que se diferencian por el estado de conservación de las construcciones remanentes.

Como se observa en la Figura 1, en este estudio se analizó el comportamiento estructural de una de las paredes corres-

## ABSTRACT

Las experiencias recientes de terremotos como el de Chile en 2010 y el de Bam en Irán, en 2003, evidencian la fragilidad del patrimonio edificado. Lamentablemente, su destrucción y desaparición implicarían la pérdida efectiva de la memoria de los pueblos y de monumentos que muchas veces constituyen la esencia más importante de la sociedad. En este artículo, se explica la aplicación de tecnología innovadora para el diagnóstico estructural de dos construcciones patrimoniales de tierra ubicadas en la ciudad del Cusco. Se presenta, inicialmente, el caso del sitio arqueológico preinca de Chokepunkio, construido entre los siglos X y XIV, en el cual se usaron ensayos experimentales de identificación modal y análisis numérico en elementos finitos para evaluar su seguridad sísmica. El segundo corresponde al estudio de la iglesia de San Pedro Apóstol de Andahuaylillas, construida a finales del siglo XVI, en donde se aplicaron ensayos de termografía infrarroja para identificar materiales y anomalías estructurales.

## Palabras claves

Ensayos no destructivos, diagnóstico estructural, protección sísmica, construcciones patrimoniales

pondientes al sector mejor conservado. La estructura estudiada consiste en una pared con una geometría irregular, de más de 20 m de largo y 9 m de altura, y cuyo espesor varía de 1.20 m – 1.80 m en la base y 0.60 m – 0.80 m en la parte superior. Las diferentes disposiciones de la mampostería de piedra que se utilizaron evidencian que en la base se utilizó una estructura más consolidada con piedras grandes y juntas pequeñas de mortero de barro, y que la parte superior de la pared se hizo de piedras más pequeñas y juntas más gruesas.

De igual modo, tal como lo demuestra la Figura 1, se realizaron ensayos de identificación modal in situ que consistieron en la instrumentación de la estructura con equipos disponibles en el laboratorio de investigación Engineering & Heritage de la PUCP; estos fueron sensores de aceleración de alta sensibilidad y equipos de adquisición de alta resolución capaces de percibir microvibraciones incluso por excitación ambiental. Así, con los ensayos realizados, se consiguieron determinar experimentalmente las siete primeras frecuencias naturales y modos de vibración que se encontraban en el rango de 1.9 - 9.2 Hz.

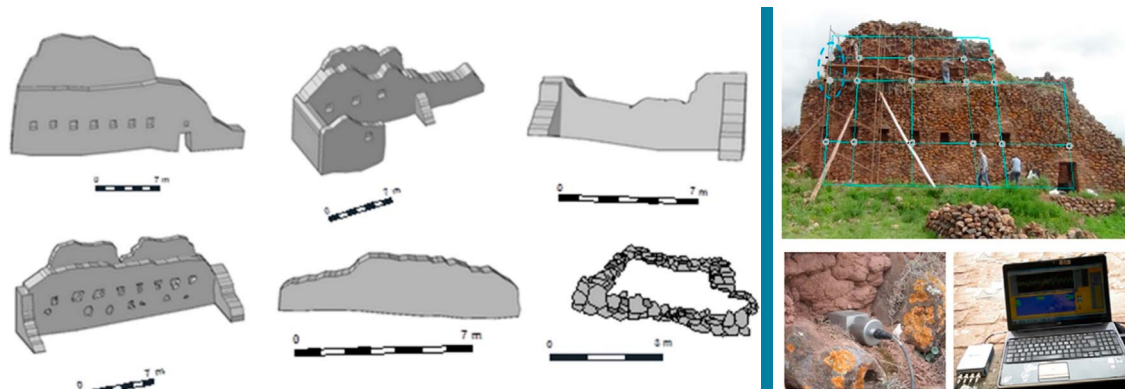


Figura 1: Área estudiada en el sitio arqueológico de Choquepunkio

Luego, se procedió a implementar un modelo en elementos finitos utilizando sólidos con propiedades homogéneas, y se realizó un procedimiento automatizado de optimización de tal manera que las cuatro primeras frecuencias del modelo y de los ensayos coincidan. Este proceso de optimización se llevó a cabo usando solo los resultados de las primeros cuatro modos de vibración; la optimización se desarrolló mediante el planteamiento de una función objetivo, cuya finalidad era la de minimizar la diferencia entre los resultados experimentales y analíticos. Por su parte, la función objetivo se construyó utilizando el método de Douglas Reid [2], para lo cual se estipularon valores límite inferiores y superiores para los parámetros variables.

Los resultados del análisis de sensibilidad mostraron que los parámetros más importantes para la optimización eran el módulo de Elasticidad -E- (afectaba los resultados de las frecuencias naturales), y la geometría y peso

específico del material (afectaba las formas modales). Con el objetivo de obtener un modelo numérico más refinado y, por lo tanto, mejores resultados en el proceso de calibración, se consideró la posibilidad de que los dos sistemas existentes de mampostería (uno en la parte inferior y uno en la parte superior, coincidiendo con el cambio en la sección) fueran de materiales distintos. Como se muestra en la Figura 2, el proceso de calibración permitió obtener un modelo que replicaba adecuadamente lo registrado en campo. Tal como se aprecia en la Tabla 1, los valores finales obtenidos para los parámetros que caracterizan el material evidencian una diferencia en la calidad de la mampostería inferior y superior de la pared, lo cual verifica lo que se observó en el campo. Finalmente, el modelo numérico validado experimentalmente permitirá después realizar un análisis sísmico, y evaluar con mayor certeza posibilidades de refuerzo e intervención estructural.

Tabla 1: Valores iniciales y finales obtenidos en el proceso de calibración del modelo de elementos finitos

Parámetros de calibración	$E_{\text{parte inferior de la pared}}$ [MPa]	$E_{\text{parte superior de la pared}}$ [MPa]	$\gamma_{\text{parte inferior de la pared}}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\text{parte superior de la pared}}$ [N/mm <sup>3</sup> ]
Valores iniciales	800	800	269E-3	269E-3
Valore finales	644	427	343E-3	317E-3

1<sup>er</sup> Modo de Vibración  
Frecuencia = 1.98 Hz

2<sup>do</sup> Modo de Vibración  
Frecuencia = 3.18 Hz

3<sup>er</sup> Modo de Vibración  
Frecuencia = 4.33 Hz

4<sup>to</sup> Modo de Vibración  
Frecuencia = 5.02 Hz

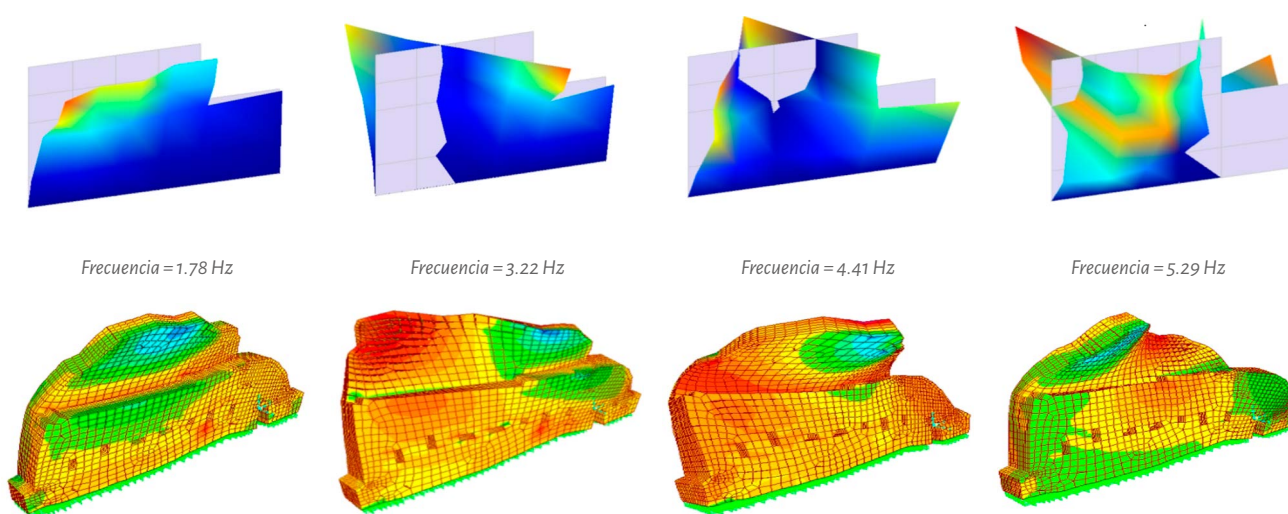


Figura 2: Resultados finales del proceso de calibración del modelo numérico en Choquepunkio

## DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL CON TERMOGRAFÍA INFRARROJA: EL CASO DE LA IGLESIA DE ANDAHUAYLILLAS, CUSCO

Andahuaylillas es un pequeño pueblo ubicado a 40 km de la ciudad del Cusco; presenta el típico trazado de principios de la colonia con calles estrechas de piedra y casas de adobe principalmente de un piso. La iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas está ubicada en la plaza principal de este poblado y es una construcción que se inició alrededor de 1610 a partir de una capilla de pequeñas dimensiones. La arquitectura del templo presenta características renacentistas con una influencia del estilo manierista principalmente en la decoración mural [1]. Este último es un estilo artístico difundido por Europa en el siglo XVI, caracterizado por la expresividad y la artificiosidad. Asimismo, la iglesia cuenta con una nave principal de planta rectangular de 10 m x 55 m y 13 m de altura, una torre donde se ubica el campanario de 5 x 5 m en planta y 18 m de altura, y una serie de capillas laterales; ambas están constituidas principalmente de muros de adobe de 2 m de espesor. Por su parte, la cimentación es de mampostería de piedra con mortero de barro y tiene una profundidad de 0.50 m. Existen, además, sobrecimientos con la misma mampostería de piedra que llegan aproximadamente hasta 1 m de altura. Finalmente, el techo es una estructura de madera tipo par y nudillo debajo de la cual se ubica el cielo raso decorado; su cobertura es de teja de arcilla cocida tradicional en la zona [4]. La Figura 3 muestra una reconstrucción 3D de la iglesia, una foto interior y las herramientas utilizadas en el presente estudio.



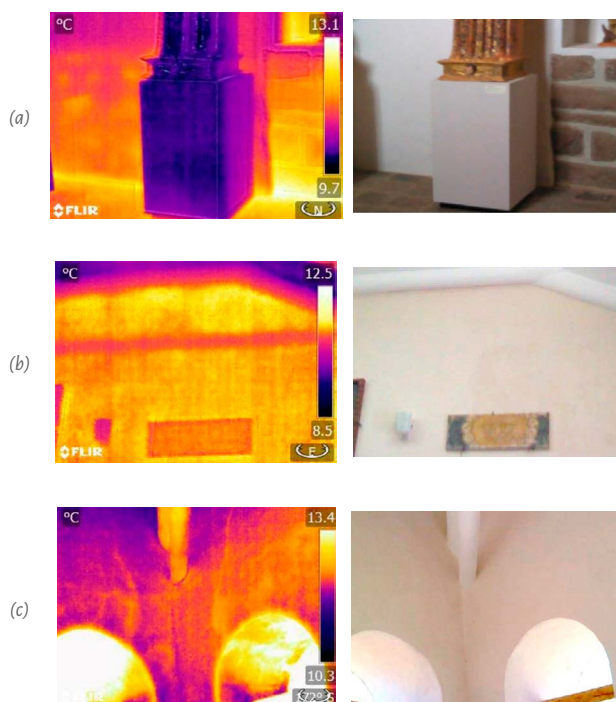
Figura 3: Iglesia de Andahuaylillas y herramientas utilizadas en el presente estudio

En los últimos 40 años, la iglesia ha pasado por una gran cantidad de trabajos de conservación principalmente estéticos. En la actualidad, algunos muros de adobe, en especial en las zonas del presbiterio, arco triunfal y capillas, poseen fisuras; además, las estructuras de madera de soporte del coro, la fachada y el balcón presentan daños. Adicionalmente, se observa que los tensores originales de madera en el techo se encuentran severamente deteriorados.

El proyecto que se viene desarrollando en la iglesia tiene un amplio alcance y pretende evaluar su vulnerabilidad sísmica; para ello, se está utilizando una serie de herramientas modernas tales como aeronaves no tripuladas (como la que se

muestra en la Figura 3) y escáner láser para levantamiento geométrico, ensayos modales similares a los mostrados en la anterior sección, ensayos de geofísica para determinar condiciones de fundación, ensayos de termografía infrarroja (con la cámara que se muestra en la Figura 3) y análisis numérico avanzado. A continuación, se muestra los resultados de los ensayos de termografía.

Debido a que las recientes intervenciones en la iglesia han enmascarado de alguna manera las anomalías estructurales presentes, en este estudio se está utilizando la técnica de termografía infrarroja, la cual consiste en la medición de la radiación superficial de los elementos estructurales. Esta técnica permite la identificación cualitativa de materiales y sistemas estructurales, así como la identificación de anomalías como humedades y fisuras. En la Figura 4, se presentan algunos termogramas que muestran claramente la existencia de sobrecimientos que no se ven por la cobertura de yeso (Figura 4a), soleras de madera insertas en los muros de adobe (Figura 4b) y fisuras en las paredes de la torre (Figura 4c).



### BIBLIOGRAFÍA

- » [1] Castillo, M., Kuon E. y Aguirre C.; San Pedro Apóstol de Andahuaylillas: Guía de Visita, Asociación Jesús Obrero, 2012
- » [2] Douglas-Reid, B.M., W.H.; Dynamic tests and system identification of bridges, Journal Structural Division, ASCE, 108, 2295-2312, (1982)
- » [3] McEwan, G., Gibajab A., Chatfield, M.; Arquitectura Monumental en Cuzco del Período Intermedio Tardío: Evidencias de Continuidades en la Reciprocidad Ritual y el Manejo Administrativo entre lo Horizontes Medio y Tardío, Boletín de Arqueología PUCP N.º 9, pp. 257-280, 2005
- » [4] Vargas, J., Aguilar, R., Gonzales, M., Briceño, C.; Intervención Estructural en La Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas en Cusco, Perú, 13º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT), Valparaíso, Chile, 2013