

LIDIAR CON LA INCERTIDUMBRE EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO

DEALING WITH UNCERTAINTY IN BUILT HERITAGE STRUCTURAL ASSESSMENT

Javier Ortega^a, Federica Greco^a, Marieta Núñez García^a, Chrysl Aranha^a y Savvas Saloustros^a

^aFENEC, C/Cavanilles 32, 28007 Madrid. fenecforheritage@gmail.com

How to cite: Javier Ortega, Federica Greco, Marieta Núñez García, Chrysl Aranha y Savvas Saloustros. 2022. Lidar con la incertidumbre en la evaluación estructural del patrimonio construido. En libro de actas: II Simposio de Patrimonio Cultural ICOMOS España. Cartagena, 17 - 19 de noviembre de 2022. <https://doi.org/10.4995/icomos2022.2022.15406>

Resumen

Trabajar en proyectos que lidien con estructuras históricas conlleva una serie de desafíos específicos que resultan de tratar de encontrar un equilibrio entre el respeto a los principios de conservación del patrimonio y garantizar la seguridad estructural. El principal problema es que, en muchas ocasiones, la información existente sobre la estructura es poca o ninguna. Las incógnitas e incertidumbres sobre la estructura existente pueden estar relacionados con muchos aspectos, desde los materiales de construcción hasta las conexiones entre elementos estructurales. El éxito de cualquier intervención en el edificio patrimonial sea una medida de refuerzo local o rehabilitación más extensa, dependerá en gran medida del buen entendimiento de las incógnitas y problemas específicos de la estructura. Con ese fin, es esencial conocer las herramientas disponibles para obtener información relevante sobre la estructura que, dadas las características patrimoniales, deben ser poco o nada invasivas. Este artículo presenta algunas preguntas comunes relacionadas con el diagnóstico estructural que suelen surgir en un proyecto de conservación. Usando casos de estudio, el artículo analiza la aplicabilidad de diferentes herramientas, específicamente varios tipos de ensayos no destructivos y varios métodos de análisis estructural, para tratar de contestar a dichas preguntas.

Palabras clave: *Análisis estructural, ensayos no destructivos, método de elementos finitos, ensayos sísmicos, georradar, identificación dinámica, análisis modal, estructuras de albañilería, madera*

Abstract

Working on projects that involve historic structures comes with a unique set of challenges, that try to keep a balance between respecting the principles of heritage conservation and ensuring structural safety, while having little to no information on the existing structure. The unknowns and uncertainties can range from the level of construction materials, to connections between components of entire structural systems. For the success of any restoration, or rehabilitation measures, it is imperative to understand the unknowns and problems you are dealing with, and what tools are available to fill in the information gaps in a way that is less invasive to the structure. This paper highlights some of the questions that need to be answered during this diagnostic process, and addresses the applicability of non-destructive and analytical tools through a list of case studies.

Keywords: *Structural analysis, nondestructive tests, Finite Element Method, sonic tests, GPR, dynamic identification tests, modal analysis, masonry, timber*

1. Introducción

La evaluación estructural del patrimonio cultural construido es un proceso complejo que requiere de una serie de suposiciones relacionadas con aspectos como la geometría, propiedades de los materiales o condiciones de frontera. La incertidumbre en la definición de dichos aspectos tiene un gran impacto en la simulación de su comportamiento estructural y, por consiguiente, en la definición de si sería necesaria o no una intervención estructural y sobre cuál podría ser su alcance. Este hecho es particularmente importante cuando lidiamos con estructuras históricas, donde el criterio de mínima intervención prevalece y debe respetarse.

La fiabilidad de la evaluación estructural es directamente proporcional a la cantidad y calidad de la información que se puede obtener de la estructura existente. Por ese motivo, una actividad clave y primaria de cualquier proyecto de conservación del patrimonio construido debe ser la investigación y toma de datos.

Las herramientas que han desarrollado durante los últimos años nos permiten obtener un levantamiento geométrico detallado y de gran precisión de las estructuras históricas. Técnicas como el láser escáner o la fotogrametría nos permiten realizar estos levantamientos con un coste relativamente bajo y rápidamente (Kassotakis et al., 2020; Riveiro et al., 2011). Sin embargo, estas técnicas aportan información de la parte de la estructura que es visible y no extraen información de la estratigrafía o de la morfología interior de los elementos estructurales. Es por ello que necesitamos apoyarnos en otras herramientas complementarias que nos aporten datos cuantitativos sobre el interior de los elementos constructivos y/o sus propiedades (Binda et al., 2000; Conde et al., 2017). Por otra parte, los proyectos de conservación del patrimonio construido están comúnmente sujetos a estrictos requisitos que limitan el uso de determinados ensayos más destructivos (p.ej. apertura de catas o extracción de testigos), dada la importancia de la conservación del material histórico. En dicho escenario, se evidencia cómo el uso de ensayos no destructivos puede jugar un papel fundamental para la reducción de la incertidumbre sobre diferentes aspectos constructivos y materiales de la estructura existente.

Además de los ensayos no destructivos, otro aspecto esencial en un proyecto de conservación del patrimonio construido que nos ayude a tomar decisiones de intervención es el análisis estructural. Sin embargo, existe una amplia gama de métodos que se pueden usar para la evaluación estructural de estructuras históricas (Roca et al., 2010). La elección del método dependerá del caso, pero en muchas ocasiones se podrán usar de manera complementaria. Por ejemplo, estos métodos pueden estar destinados a la evaluación de mecanismos de rotura locales (característicos de estructuras históricas donde suele existir una falta de comportamiento estructural solidario y falta de ligación entre diferentes partes de la estructura) o a la evaluación del comportamiento global de la estructura. Los métodos también se dividen en aquellos que consideran al material histórico como lineal y elástico (simplificación generalmente poco apropiada para materiales frágiles o cuasi-frágiles, como la obra de albañilería) y otros que se basan en modelos más complejos y sofisticados del material, atendiendo a su comportamiento no elástico y capaces de simular características esenciales de materiales resistentes con poca (o nula) capacidad a tracción (caso de la albañilería). Estos últimos métodos de análisis no lineal de estructuras históricas han ganado importancia en los últimos años dada la mayor capacidad computacional y la disponibilidad de software especializado, por ejemplo, en análisis por elementos finitos. Una revisión más completa de estos métodos se puede encontrar en (D'Altri et al., 2019; Roca et al., 2010). En cualquier caso, la preparación de modelos numéricos de elementos finitos complejos requiere hacer suposiciones sobre diferentes aspectos del edificio. La fiabilidad de nuestras simulaciones y los resultados dependerá en gran medida de la certidumbre que tengamos sobre estas suposiciones. Por ese motivo, la combinación de ensayos no destructivos con el análisis estructural avanzado basado en elementos finitos nos ofrece una gran oportunidad para ganar confianza en nuestros modelos estructurales.

Este artículo trata de responder a preguntas comunes relacionadas con incertidumbres que los profesionales en el campo del análisis estructural deben tratar de responder cuando tratan con estructuras históricas. Más específicamente, el artículo trata de mostrar cómo la asociación FENEC (www.fenecforheritage.com) ha tratado de responder a estas preguntas en el pasado en diferentes proyectos de conservación. Así, el artículo muestra algunas de las herramientas disponibles, cómo se puede sacar el máximo provecho de sus capacidades y cómo su máximo valor está en su uso combinado, a través de diferentes casos de estudio.

2. ¿Es mi albañilería de buena calidad? ¿Varía su calidad a lo largo del edificio?

La calidad de una estructura de albañilería depende de diferentes factores, tales como la ejecución de la obra, el estado de conservación, la morfología, alteraciones a lo largo del tiempo, o la calidad de los materiales individuales (piedra, ladrillo, mortero, etc.). Conocer la calidad del material que debemos evaluar (p.ej. sus propiedades mecánicas) es esencial para cualquier análisis estructural. Sin embargo, la información que podemos obtener de una estructura existente es extremadamente limitada. Además, cuando nos enfrentamos a la evaluación de una albañilería histórica, extraer material (particularmente testigos de dimensiones suficientes para ser representativos de la albañilería en su conjunto) podrá sernos limitado debido a la importancia de la preservación del material original. Así, resulta un desafío saber si la calidad de la albañilería es suficiente para aguantar los esfuerzos a los que está (o estará) sometida.

En estos casos, existen técnicas no destructivas que nos permiten obtener información cuantitativa sobre las propiedades mecánicas de la albañilería existente. Una de las técnicas más extendidas son los ensayos sínicos (Binda et al., 2001). Este ensayo consiste en la emisión de ondas acústicas que se propagan a través de un material. Generalmente, se mide la velocidad de propagación de la onda entre diferentes puntos del elemento constructivo, la cual se correlaciona con varios parámetros, tales como la densidad y el módulo de elasticidad del material. Además de la estimación de las propiedades elásticas del material, variaciones en la velocidad de propagación a lo largo, por ejemplo, de un muro nos pueden dar información sobre la presencia de vacíos, grietas y otras anomalías que puedan encontrarse en el interior del elemento (Schuller et al., 1994; Silva et al., 2014).

La Fig. 1 presenta los resultados de una campaña de ensayos sínicos realizada en un muro de una torre del castillo de Gjirokastra, Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. La realización de diferentes ensayos en diferentes localizaciones del muro nos permitió obtener información valiosa sobre la variación de la calidad de la mampostería. Los resultados coincidían con las observaciones hechas en campo, p.ej. los valores más altos se obtuvieron en zonas de mampostería que parecía posterior (reparada o inyectada). El uso de ensayos sínicos, técnica relativamente rápida, nos permite hacer una evaluación de áreas amplias de un edificio y nos puede ayudar a corroborar hallazgos de la investigación histórica (p.ej. áreas correspondientes a diferentes fases constructivas). Además, los datos cuantitativos obtenidos son particularmente útiles para introducir como propiedades mecánicas de nuestros modelos numéricos.

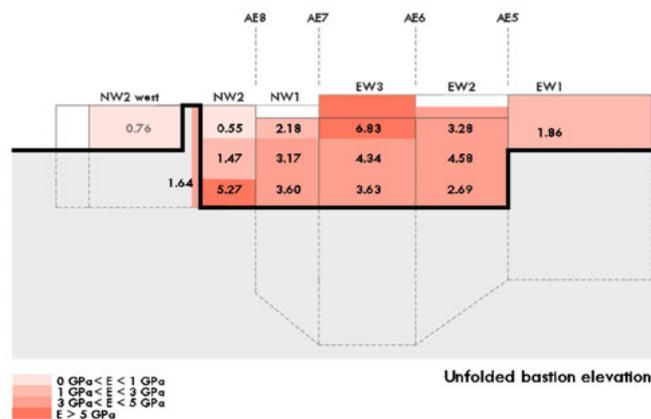


Fig. 1 Mapeado de valores estimados de módulo de elasticidad en diferentes áreas del muro de mampostería desplegado de una torre de la ciudadela de Gjirokastra que evidencian la discontinuidad en términos de calidad de la albañilería

3. ¿Podemos saber lo que hay en el interior de un muro de albañilería?

La morfología de la sección de un muro de albañilería tiene una gran influencia en su comportamiento estructural (Cardani & Binda, 2013; Alejo et al., 2017). Existen, de hecho, metodologías que tratan de evaluar la calidad de la albañilería basadas en inspecciones visuales simples (Borri et al., 2015). En dichas metodologías, evaluar la sección interna del muro y ver el grado de conexión entre las hojas de un muro es un parámetro clave y tiene especial importancia cuando queremos evaluar el comportamiento sísmico de dicho muro. Para conseguir una buena conexión entre las hojas, las construcciones

tradicionales e históricas suelen valerse de piedras que atraviesan el espesor total del muro (llaves). La existencia o no de estas llaves no es algo que pueda ser evaluado a simple vista.

Hay pues varias incógnitas sobre el interior de un muro de albañilería que tienen una importancia fundamental en su comportamiento estructural, por ejemplo: (1) ¿está mi muro compuesto de varias hojas?; (2) si fuera este el caso, ¿hay elementos en el interior del muro que conecten las hojas?; ó (3) ¿hay vacíos importantes en el interior del muro?

Los ensayos no destructivos vuelven a cumplir un rol fundamental para complementar a las inspecciones visuales y el conocimiento histórico y constructivo de un profesional en el campo de la conservación. En particular, el georradar es un ensayo que consiste en emitir ondas electromagnéticas en el muro. Dichas ondas son reflejadas en las interfaces entre diferentes materiales con propiedades electromagnéticas suficientemente diferenciadas, p.ej. entre una piedra y el aire o entre el hormigón y una barra de acero. Por este motivo, este ensayo es particularmente útil para investigar la morfología interna de muros y otros elementos constructivos de albañilería. Puede ayudar a determinar la espesura de un muro al que solo tenemos acceso desde un lado o detectar vacíos interiores y otras anomalías (objetos) que existan en el interior (p.ej. elementos metálicos). La Fig. 2a muestra un ejemplo de inspección realizada con el georradar en un muro de mampostería de varias hojas de la torre del castillo de Gjirokastra previamente mencionado. Se detectó la presencia de varias hojas que componen el muro y posibles vacíos (huecos o falta de mortero) entre las mismas.

Este ensayo puede ser también complementado con ensayos sísmicos (Fig. 2b). Estos ensayos se pueden realizar en un área específica del muro para mapear las variaciones locales de velocidades. Como resultado, podemos visualizar la heterogeneidad de la mampostería en un área específica del muro. En el caso de la imagen mostrada, los colores azules corresponden a velocidades significativamente más bajas que los colores amarillos y rojos. Por lo tanto, el área en azul intenso puede estar indicando la presencia de un vacío interior en la mampostería o un cambio en las propiedades del material (p.ej. un relleno de mortero).

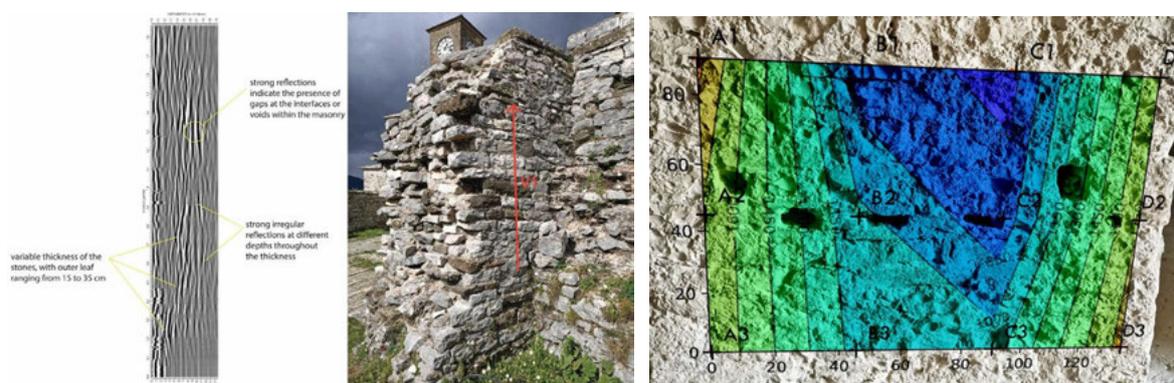


Fig. 2 (a) Inspección de georradar del interior de un muro de mampostería
(b) mapa de velocidades en un área de un muro

4. ¿Podemos complementar la clasificación visual de la madera con métodos cuantitativos sin dañar los elementos constructivos?

La madera es un material altamente variable debido a su origen orgánico y al amplio rango de características que presentan las distintas especies de madera. Debido a ello, y a la alta influencia que tienen la presencia de irregularidades (nudos, gemas, desviación de la fibra, etc.), distintos elementos de madera pueden tener propiedades resistentes muy variadas entre sí. Esto hace de la estimación de las propiedades resistentes uno de los grandes retos de la conservación del patrimonio en madera. Estimar dichas propiedades es clave a la hora de definir el grado de intervención en una estructura existente, pudiendo afectar notablemente a los valores de la estructura en caso de infravalorarlas conservadoramente, o incluso poner en riesgo su seguridad en caso de sobrevalorarlas inadvertidamente.

En la actualidad, existen normativas que correlacionan las observaciones de una detallada inspección visual con la capacidad resistente de un elemento de madera, para unas pocas especies (UNE 56544:2011, 2011). Esta clasificación visual de la madera requiere realizar una toma de muestra para identificar la especie y, en caso de ser satisfechos los

requerimientos de la inspección visual, se asigna unívocamente una clase resistente de las especificadas en la normativa. De esta manera, el tan frecuentemente encontrado pino silvestre tan sólo puede clasificarse visualmente dentro de una categoría resistente (C-22) con independencia de que puedan existir elementos de madera de pino silvestre con características mecánicas inferiores o superiores a dicha categoría. Además, en frecuentes ocasiones las caras del elemento de la madera no son accesibles para realizar la inspección visual, limitando la aplicación de dicha normativa.

Por lo tanto, en ocasiones puede ser deseable recabar información complementaria de la estructura de madera a evaluar que nos permita realizar una estimación cuantitativa de los parámetros resistentes y así reducir la ventana de incertidumbre habitual en el estudio de estructuras de madera existentes. Es posible recabar dicha información por medio de ensayos no destructivos (sin afección a la superficie), semi-destructivos (afección mínima a la superficie ensayada) o destructivos (afección notable y visible a la superficie ensayada).

Los ensayos destructivos para evaluar la resistencia, como pruebas de carga, toma de muestras y ensayos en laboratorio, estiman las propiedades resistentes de la madera ensayada pero dañan irreversible y visiblemente su superficie.

Los ensayos semi-destructivos, tales como la identificación de especie y los realizados con penetrómetros, resistógrafos, extracción de tornillos o micro-probetas, pueden obtener información correlacionable con las propiedades mecánicas de la madera (densidad, módulo de elasticidad y módulo resistente) así como información crucial para la interpretación de los ensayos por medio de técnicas no destructivas (especie).

Los ensayos no destructivos para caracterización resistente, tales como sónicos y ultrasónicos, permiten estimar aproximadamente algunas de las propiedades mecánicas de la madera (módulo de elasticidad y módulo resistente) realizando hipótesis sobre la especie de la madera investigada. En caso de desconocer la especie, se puede estimar un rango de valores mínimos y máximos acordes a la variabilidad de los parámetros desconocidos. Estos ensayos son de especial interés al evaluar maderas ornamentadas puesto que no dañan la superficie ensayada. Aún cuando se pueden realizar estimaciones de algunas propiedades mecánicas por medio de ensayos no destructivos, siempre es recomendable complementarlos con algunos ensayos semi-destructivos para incrementar la fiabilidad de sus resultados (Kasal & Anthony, 2004).

En resumen, es posible complementar la clasificación visual de la madera por medio de ensayos no destructivos que respeten la superficie de un elemento de madera. Sin embargo, es recomendable interpretarlos de manera conjunta con técnicas semi-destructivas, cuya afección a la superficie de madera es mínima y no visible a simple vista.



Fig. 3 Ensayos sónicos en la Iglesia de la Calandria, en La Granja de San Ildefonso (Segovia)

5. ¿Cómo puedo saber si diferentes partes de mi edificio están conectadas estructuralmente?

Otro ensayo no destructivo que nos permite obtener información esencial sobre el comportamiento estructural de un edificio es el ensayo de identificación dinámica. Este ensayo consiste en colocar varios acelerómetros en diferentes puntos de la estructura. Los acelerómetros miden de manera continuada las vibraciones que se producen en dichos puntos de la estructura durante un tiempo específico (p.ej. 30 minutos). Estas aceleraciones se producen bajo excitación ambiental (no controlada y debida a efectos del viento, el tráfico o las personas) y, aunque sean pequeñas, son detectables por acelerómetros de suficiente precisión y están directamente relacionadas con diferentes aspectos de la estructura que

afectan su comportamiento dinámico, como la rigidez y la masa. La rigidez de la estructura depende a su vez de varios aspectos, tales como su geometría, condiciones de frontera, propiedades materiales o la conectividad entre las diferentes partes.

El ensayo de identificación dinámica nos da como resultado las frecuencias naturales y los modos de vibración del edificio o de sus diferentes partes. Conocerlos nos permite en efecto detectar posibles desconexiones a nivel estructural que puedan suponer una debilidad. En el caso nuevamente de los ensayos realizados en la torre de Gjirokastra, estos ensayos nos permitieron determinar que algunas grietas existentes (evidentes y visibles) eran a su vez puntos de desconexión estructural que hacía que hubiera diferentes partes de la estructura que se comportan de manera prácticamente independiente (Fig. 4).

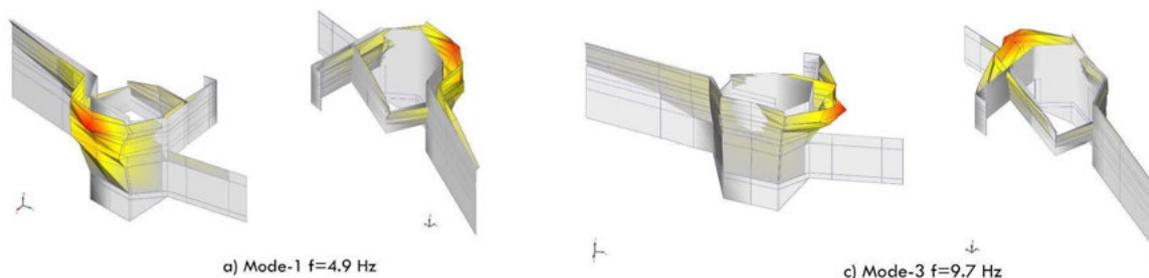


Fig. 4 Los modos de vibración obtenidos en los análisis de identificación dinámica de la torre de Gjirokastra revelaron que el comportamiento dependía de las grietas existentes

6. ¿Podemos simular el comportamiento de una estructura patrimonial de manera fiable? ¿Hay maneras de reducir la incertidumbre?

Aparte de darnos información directa sobre el comportamiento estructural de un edificio, los ensayos dinámicos tienen un gran papel en el análisis estructural. Las propiedades dinámicas de una estructura son información básica para calibrar modelos numéricos. La calibración de un modelo es un proceso iterativo. Después de preparar un modelo numérico podemos realizar un análisis modal que también nos da como resultados las frecuencias naturales y los modos de vibración del modelo. Así, podemos comparar los resultados numéricos con los experimentales. Si observamos discrepancias entre ambos resultados, podemos seleccionar varios parámetros relevantes que afectan al comportamiento dinámico de la estructura y modificarlos progresivamente hasta que los resultados numéricos coinciden con los resultados experimentales. Como hemos mencionado anteriormente, estos parámetros pueden ser las propiedades materiales, las condiciones de frontera o la conectividad entre las partes.

Este proceso iterativo es complejo ya que existen numerosos factores que pueden alterar el comportamiento dinámico de la estructura, pero obtener una buena correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales nos permite ganar confianza en que nuestro modelo numérico sea representativo de la estructura real y en que las posteriores simulaciones que haremos de su comportamiento estructural bajo diferentes acciones sean fiables. Por este motivo, la calibración de los modelos numéricos es considerado un aspecto fundamental del modelado estructural.

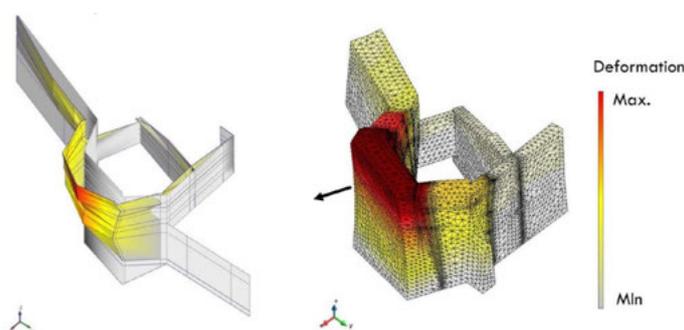


Fig. 5 Calibración del modelo numérico: (izq.) resultados experimentales; (der.) resultados numéricos

Como ejemplo, los resultados de los ensayos de identificación dinámica realizados en la torre de Gjirokastra (Fig. 4) fueron usados para la calibración de un modelo numérico. En este caso, dado que se habían realizado ya ensayos sónicos para obtener las propiedades elásticas de la albañilería, teníamos un modelo geométrico preciso obtenido de un levantamiento con láser escáner, nuestra principal incertidumbre radicaba en el nivel de conexión que existía entre los muros de las torres y el efecto de las grietas. Se simularon las diferentes grietas observadas y se varió el nivel de conexión entre los muros a través de las mismas hasta obtener una buena correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales (Fig. 5). El proceso nos permitió validar nuestro modelo y someterlo posteriormente a diferentes acciones para evaluar su comportamiento estructural bajo diferentes acciones (p.ej. sismos o asentamiento).

7. ¿Hay maneras de investigar las causas de los daños observados?

La existencia de daños (p.ej. grietas) es comúnmente la razón por la que los profesionales son contactados para evaluar la seguridad estructural del patrimonio construido. El objetivo de una reparación es reducir el progresivo deterioro del material histórico, siempre dirigiendo nuestras acciones hacia las raíces del problema y no a sus síntomas. Por eso, entender las causas del daño observado es fundamental. La causa puede ser un único factor (p.ej. asentamientos, sismo, deterioro material, etc.) o una combinación de ellos, que es lo más común en estructuras antiguas. Normalmente, la falta de mantenimiento de la estructura juega un papel fundamental en su deterioro pero también puede haber acciones estructurales que puedan estar llevando a la estructura a sufrir un daño progresivo.

Cuando nos enfrentamos a edificios con geometrías complejas, el cálculo a mano se torna insuficiente y el modelado con elementos finitos se convierte en una herramienta particularmente útil. Un modelo de elementos finitos nos permite someterlo a diferentes acciones (desde viento a terremotos) y aplicar varias simultáneamente. También nos permite aplicar cargas estáticas o dinámicas (variables en el tiempo), lo que sería complicado realizar usando otros métodos.

Continuando con el ejemplo de la torre de Gjirokastra, la Fig. 6 nos muestra las investigaciones llevadas a cabo junto con el equipo de proyecto para investigar el origen de las grietas observadas. La simulación de un proceso de asentamiento en un escenario previo al actual (sin daños) resultó en la aparición de grietas en localizaciones fisuradas en la realidad, lo que nos lleva a identificar esta acción como una plausible causa del daño observado.

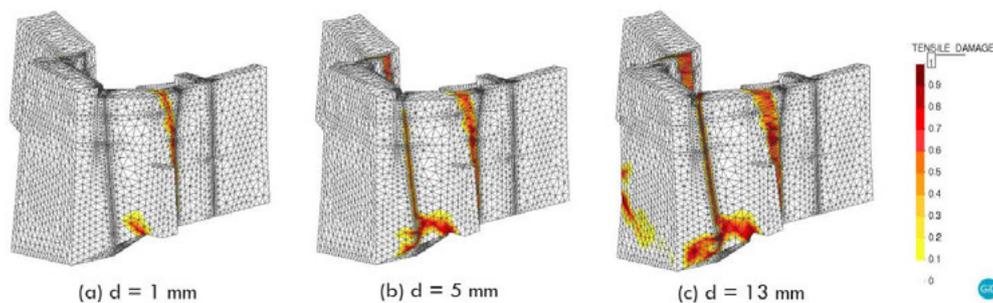


Fig. 6 Las grietas originadas en la simulación de un proceso de asentamiento de la torre aparecieron en localizaciones fisuradas en la estructura real

8. ¿Podemos predecir la respuesta de una estructura patrimonial a una carga específica?

Entre los diferentes métodos disponibles en la actualidad para la evaluación de la seguridad de estructuras históricas, el análisis por elementos finitos es uno de los más efectivos y que más se ha extendido entre profesionales y académicos, ya que es particularmente adecuado para grandes estructuras de geometrías complejas (Lourenço et al., 2007). Tales análisis pueden (y suelen) ser complementados con otros análisis más simplificados como el análisis cinemático (destinado al estudio de modos de colapso locales de la estructura, p.ej. el vuelco de una fachada) o la estática gráfica (cálculo basado en el equilibrio de fuerzas que es particularmente apropiado para estructuras abovedadas).

Como hemos comentado anteriormente, la calibración de modelo es un paso fundamental para tener confianza en los resultados. Una vez preparado el modelo, el tipo de análisis depende del tipo de carga impuesta (estática o dinámica) y

del modelo de material considerado. En el caso de estructuras de albañilería donde la resistencia a tracción del material es prácticamente nula, modelos materiales no lineales son los más adecuados, capaces de predecir la aparición de daño en la estructura durante el análisis y la consecuente pérdida de capacidad progresiva de la estructura. Este tipo de modelos fue el usado para las simulaciones de la Fig. 6 o de la Fig. 7, que muestra los modelos de elementos finitos preparados para el análisis sísmico de los castillos de Loutro y Agia Roumeli, en Creta (Grecia). El análisis numérico permitió estimar la capacidad de la estructura bajo una carga sísmica mediante un análisis estático no lineal (*pushover*).

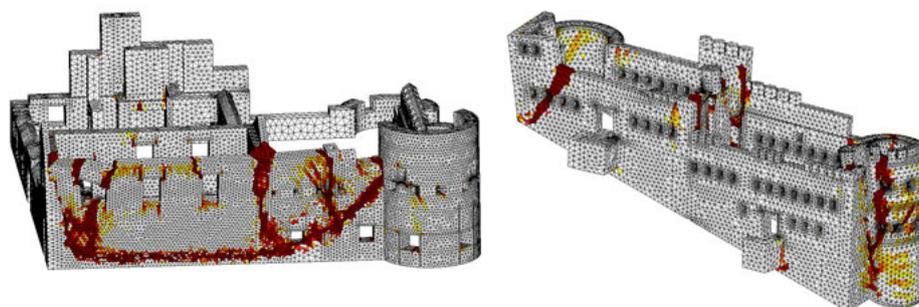


Fig. 7 Análisis numérico realizado para los castillos de Loutro (izq.) y Agia Roumeli (der.) que permitió determinar la capacidad máxima de la estructura y las áreas más probables donde se formarían grietas bajo la carga sísmica

9. ¿Cómo pueden ayudarnos estas herramientas a diseñar de manera segura respetando el criterio de mínima intervención?

El criterio de mínima intervención siempre debe prevalecer cuando se interviene en estructuras históricas. Las herramientas previamente discutidas nos permiten ampliar nuestro conocimiento de la estructura y ayudar a diseñar la intervención más adecuada para cada caso particular. La estrategia adoptada para conseguir una evaluación fiable de la seguridad estructural del patrimonio construido debería basarse en una combinación adecuada de ensayos no destructivos, monitorización y análisis estructural. Esto debería ayudar a asegurar que el diseño de la intervención es el óptimo (ni sobredimensionado ni faltando a la seguridad, que es el objetivo final). Cuanto más compleja sea la estructura patrimonial, más articulada deberá ser la estrategia a seguir.

Los modelos numéricos son una gran herramienta que también nos permite incorporar y evaluar la eficiencia de posibles intervenciones para tomar una decisión informada. Ese fue el caso de la torre de Gjirokastra, donde el equipo proyectista consideró la construcción de contrafuertes de diferentes tamaños para reforzar la estructura (Fig. 8).

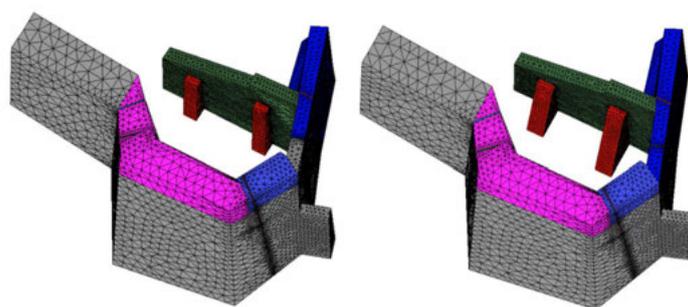


Fig. 8 Diferentes opciones de contrafuertes estudiadas y simuladas numéricamente

Los ensayos no destructivos también nos pueden ayudar al control posterior de la intervención. Por ejemplo, si el refuerzo tiene como objetivo mejorar la conexión entre elementos estructurales, realizar ensayos de identificación dinámica nos puede ayudar a evaluar la eficiencia de dicha conexión. Otro ejemplo es la evaluación de la eficiencia de una inyección realizada en un muro usando ensayos sísmicos y georradar. Los resultados de ambos ensayos después de llevar a cabo la inyección deberían evidenciar una mayor homogeneidad del muro (p.ej. valores más altos de velocidades sísmicas debido al relleno de los vacíos existentes).

10. Conclusiones

El artículo ha mostrado la aplicación de ensayos no destructivos y análisis estructural especializado en diferentes casos de estudio para su evaluación estructural. Las actividades ayudaron a reducir la incertidumbre en importantes aspectos materiales y constructivos que permitieron comprender mejor el comportamiento estructural de los diferentes bienes y ayudar a los profesionales a tomar decisiones de intervención más informadas. El uso de las herramientas mostradas requiere reflexión para la preparación de una estrategia de investigación adecuada para el edificio a estudiar. Este proceso se puede resumir en los siguientes pasos: (1) comprender las incertidumbres relevantes para la estructura con las que se está lidiando y el problema que se quiere resolver; (2) determinar qué ensayos y análisis pueden facilitarnos la información requerida para el problema identificado; (3) planear la campaña de ensayos en términos de cantidad y localización en la estructura, basado siempre en un análisis de coste, tiempo, practicabilidad (p.ej. posibles limitaciones de acceso) y limitaciones de cada técnica; (4) usar los datos de los ensayos no destructivos para ganar confianza en los modelos numéricos preparados y en los posteriores resultados de las simulaciones; (5) interpretar los datos obtenidos y entender cómo se pueden usar en pasos posteriores (p.ej. diseño de la intervención). Es importante no confiar ciegamente en los resultados obtenidos y corroborarlos con información obtenida por otros medios o actividades complementarias como inspecciones visuales, levantamientos geométricos o la investigación histórica.

Agradecimientos

Agradecemos a Proskene - Conservation & Cultural Heritage y a Domos la invitación a colaborar en los proyectos de conservación mencionados durante este artículo.

Referencias

- Alejo, L., Mendes, N., & Lourenco, P. B. (2017). The effect of morphology on the structural behaviour of masonry walls. Congreso de Métodos Numéricos En Ingeniería, 268–286.
- Binda, L., Saisi, a., & Tiraboschi, C. (2001). Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures. *NDT and E International*, 34(2), 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00037-2)
- Binda, L., Saisi, A., & Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00018-0)
- Borri, A., Corradi, M., Castori, G., & De Maria, A. (2015). A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(9), 2647–2665. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9731-4>
- Cardani, G., & Binda, L. (2013). Guidelines for the masonry quality evaluation in built heritage. In *Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management* (pp. 107–115).
- Conde, B., Ramos, L. F., Oliveira, D. V., Riveiro, B., & Solla, M. (2017). Structural assessment of masonry arch bridges by combination of non-destructive testing techniques and three-dimensional numerical modelling: Application to Vilanova bridge. *Engineering Structures*, 148, 621–638. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.011>
- D’Altri, A., Sarhosis, V., Milani, G., Rots, J., Cattari, S., Lagomarsino, S., Sacco, E., Tralli, A., Castellazzi, G., & de Miranda, S. (2019). Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Issue 0123456789). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>
- Kasal, B., & Anthony, R. W. (2004). Advances in situ evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(2), 94–103. <https://doi.org/10.1002/pse.170>
- Kassotakis, N., Sarhosis, V., Riveiro, B., Conde, B., D’Altri, A. M., Mills, J., Milani, G., de Miranda, S., & Castellazzi, G. (2020). Three-dimensional discrete element modelling of rubble masonry structures from dense point clouds. *Automation in Construction*, 119(February), 103365. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103365>
- Lourenço, P. B., Krakowiak, K. J., Fernandes, F. M., & Ramos, L. F. (2007). Failure analysis of Monastery of Jerónimos, Lisbon: How to learn from sophisticated numerical models. *Engineering Failure Analysis*, 14(2), 280–300. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.02.002>

- Riveiro, B., Morer, P., Arias, P., & De Arteaga, I. (2011). Terrestrial laser scanning and limit analysis of masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1726–1735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.094>
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pelà, L. (2010). Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299–325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- Schuller, M., Berra, M., Fatticioni, A., Atkinson, R., & Binda, L. (1994). Use of tomography for diagnosis and control of masonry repairs. *Int. Brick/Block Masonry Conf.*, 438–447.
- Silva, B., Dalla Benetta, M., da Porto, F., & Valluzzi, M. R. (2014). Compression and Sonic Tests to Assess Effectiveness of Grout Injection on Three-Leaf Stone Masonry Walls. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(3), 408–435. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.826300>
- UNE 56544:2011. (2011). Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas.