



Monitoring and diagnosis of historical masonry buildings and future perspective

Monitoreo y diagnóstico de edificios históricos de mampostería y perspectiva futura

ADOLFO PRECIADO

Profesor-investigador, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), Departamento de Ingeniería Civil, Anillo Periférico Sur Manuel Gómez Morín 8585, 45604, Tlaquepaque, Jalisco, México.
adolfopreciado@iteso.mx

FABIOLA COLMENERO

Profesora-investigadora, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), Departamento de Ingeniería Civil, Anillo Periférico Sur Manuel Gómez Morín 8585, 45604, Tlaquepaque, Jalisco, México.
fcolmenero@iteso.mx

Historical buildings still existing in different parts of the world were constructed with unreinforced masonry and have an acceptable capacity to transmit vertical loading, but they are very vulnerable against horizontal loading induced by earthquakes. In order to protect these buildings belonging to the patrimony of the humanity from this hazard, we need to understand the construction materials, structural elements and loading transmission mechanism. Moreover, to rehabilitate or retrofit them, it is necessary to develop an understanding process of the structure through monitoring and in-situ/laboratory experimental tests to establish a diagnosis. The structural monitoring campaigns are helpful to investigate the mechanical and dynamic properties of the building. The use of installed thermal cameras and micro-sensors at strategic parts of the historical buildings represent a very interesting and non-destructive option to measure different parameters constantly and for long periods of time. The present paper aims at briefly describing the different involved processes in the monitoring and structural diagnosis of historical buildings which is fundamental in order to preserve them against the effects of earthquakes by means of rehabilitation works and strengthening. Moreover, it is presented a future perspective about non-destructive and non-invasive experimental tests and diagnosis with the use of new technologies.

Unreinforced masonry; earthquakes; historical buildings; experimental tests; diagnosis; preservation assessment.

Los edificios históricos que aún existen en diferentes partes del mundo fueron construidos con mampostería no reforzada y tienen capacidad aceptable para transmitir cargas verticales, pero son muy vulnerables ante cargas laterales inducidas por sismos. Para proteger de esta amenaza a estas edificaciones que forman parte del patrimonio de la humanidad, debemos de entender los materiales constructivos, elementos estructurales y su mecanismo de transmisión de cargas. Para decidir entre rehabilitar o reforzar, se debe de realizar un proceso de entendimiento de la estructura a través de un monitoreo y pruebas experimentales in situ y en laboratorio que permitan generar un diagnóstico. Los monitoreos estructurales sirven para investigar sus propiedades mecánicas y dinámicas. El uso de cámaras térmicas y micro-sensores en puntos estratégicos de los edificios históricos representan una opción muy interesante y no destructiva para medir diferentes parámetros de forma constante y por largos periodos de tiempo. El presente artículo tiene como objetivo describir de forma puntual los diferentes procesos involucrados en el monitoreo y diagnóstico estructural de edificios históricos que resulta fundamental para poder conservarlos ante los efectos de los sismos por medio de trabajos de rehabilitación y refuerzo. Además, se presenta una perspectiva futura sobre pruebas experimentales y diagnósticos no destructivos ni invasivos con el uso de nuevas tecnologías.

Mampostería no reforzada; sismos; edificios históricos; pruebas experimentales; diagnóstico; conservación.

1. CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

Los edificios históricos aún existentes en diferentes partes del mundo son considerados patrimonio de la humanidad (ver Figs. 1, 2, 5 y 8). Esto se debe a su historia y los retos estructurales que en su momento se tuvieron que superar para su construcción, así como por su belleza, corriente arquitectónica y estilo (e.g. medieval, gótico, colonial, etc.), tipo de materiales y sistemas constructivos. Además, del valor

cultural y religioso que estos edificios representan para los diferentes países y la humanidad en general, así como el beneficio económico que pueden aportar al tener usos como museos, monumentos, mausoleos, teatros, edificios icónicos, etc. Los materiales más comunes con los que fueron construidos estos edificios son mampostería y madera. La mampostería se encuentra conformada por una gran variedad de materiales como lo son los tabiques de barro rojo recocido (ladrillos), adobe (i.e. ladrillos de barro secados al sol en adoberas),

pedra natural y labrada de diferentes tipos (ver Fig. 1a) unidos entre sí por medio de un aglutinante. Las componentes de los aglutinantes (morteros) más antiguos eran agua, yeso, cal, y arcillas en el caso del adobe. La cal era extraída de la piedra caliza sometida a altas temperaturas y posteriormente se trituraba. Al combinar la cal con el agua se genera un mortero que era muy utilizado en la antigüedad para construir elementos de mampostería en combinación con los tipos de unidades/piezas mencionadas anteriormente.

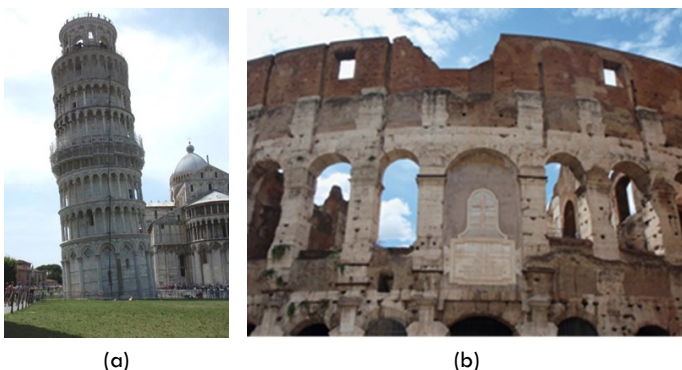


Fig. 1. Algunos edificios históricos existentes de mampostería no reforzada en Italia [1]: (a) la torre inclinada de Pisa, Italia y (b) Coliseo Romano.

Los Romanos fueron la primera civilización en agregar cenizas volcánicas a sus morteros elaborados con cal. Esta adición la realizaban con el objetivo de mejorar la resistencia y durabilidad de sus obras magistrales de mampostería tal y como se muestra en el aún existente Coliseo Romano (ver Fig. 1 b). Este anfiteatro fue construido hace ya más de dos mil años a base de piedra labrada. Conforme fueron transcurriendo los siglos se fue dañando el monumento debido a la constante sismicidad de la región, y las piedras colapsadas fueron hurtadas para construir otros monumentos o edificaciones. Por esta razón se observa en la parte superior de los muros perimetrales la presencia de mampostería de tabique de barro rojo recocido. Con la revolución industrial (i.e. a finales del siglo XIX) surgió el cemento Portland, el cual tiene resistencias superiores al Romano, pero en cuanto a su durabilidad se refiere a través de los siglos de este cementante en comparación con el Romano, aún queda mucho por investigar. Es muy común encontrar la presencia de morteros de cemento Portland en edificios de mampostería no reforzada en México y en otras partes del mundo. La adición de morteros de este tipo y elementos de concreto reforzada en edificios históricos ha sido una práctica muy común alrededor del mundo en rehabilitaciones y reforzamientos posteriores al siglo XIX. En México la mayoría de las iglesias y catedrales han sido reforzadas con elementos de concreto. Estos elementos son difíciles de identificar a simple vista ya que la mayoría de las veces los elementos de fachadas y otras partes del edificio como torres campanario y domos son ocultados con el uso de aplanados de cemento Portland o de cal y con pintura vinílica (ver Fig. 8).

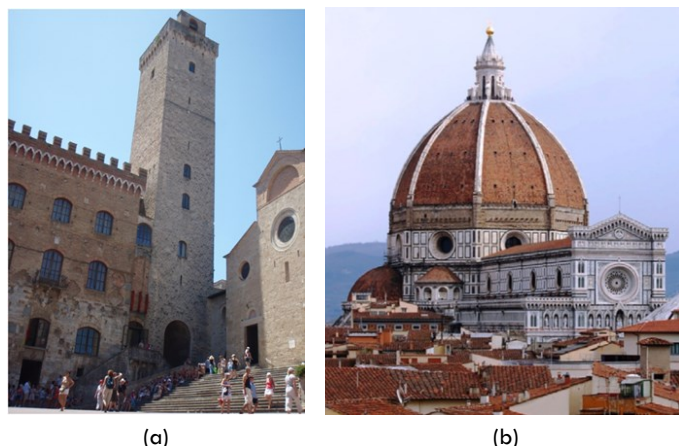


Fig. 2. Sistemas estructurales más comunes en edificios históricos: (a) la torre medieval Torre Grossa de San Gimignano, Italia [2] y (b) Catedral de Santa María del Fiore en Florencia, Italia [3].

En cuanto al arreglo/patrón (acomodo) de la mampostería entre unidades y el aglutinante para conformar el elemento de mampostería, [4] afirma que podemos encontrar una extensa variedad de tipologías, como la desarreglada o que no sigue ningún patrón, y la arreglada que sigue un patrón de traslapes e hiladas bien definidas. Por otro lado, en Europa, principalmente en Italia, era una técnica constructiva muy común la generación de elementos estructurales por medio de mampostería de saco (i.e. de tres capas). Este tipo de arreglo se encuentra conformado por tres capas de diferentes materiales. En la capa exterior usualmente se usaba piedra labrada de mármol de mayor costo y difícil de conseguir, pero de mayor belleza, color y brillo. En la capa interior del edificio se usaba piedra labrada o ladrillo. Estas dos capas (la interior y la exterior) servían de cimbra para vaciar entre ellas restos de otros edificios (i.e. escombros producto de demoliciones o colapsos por sismo) en combinación con mortero pobre, para construir de una forma más rápida muros de mampostería de gran espesor. Estos espesores llegaban a superar en algunos casos los 3 m, convirtiéndose en estructuras monumentales extremadamente pesadas y masivas.

Los sistemas estructurales resistentes más comunes de los edificios históricos son los muros, contrafuertes, arcos, domos y bóvedas. La combinación entre estos elementos estructurales se usaba para construir torres de mampostería (e.g. campanario, cívicas y medievales) (Figs. 1a, 2a y 5), castillos, muros de defensa, palacios, teatros y catedrales (Figs. 2 y 8). Estos sistemas constructivos tienen la característica similar de ser elementos con capacidad para transmitir cargas de forma vertical ([5] y [6]), es decir, para soportar su peso propio en condiciones estáticas. Los edificios históricos de mampostería a base de estos elementos estructurales fueron diseñados solo para resistir cargas de compresión debido a las limitantes de este material constructivo, su peso, incapacidad para generar una integridad estructural entre elementos, limitantes técnicas, etc. Al romperse este equilibrio de transmisión de cargas verticales por la acción de un sismo, se generan enormes fuerzas

de inercia debido al gran peso de estas estructuras y las vibraciones del suelo, generando empujes laterales que ponen en riesgo su estabilidad. Los empujes laterales (*i.e.* fuerzas de inercia) generan zonas de tensión que agrietan a la mampostería, inclusive ante esfuerzos pequeños y sismos de mediana intensidad ([7]). Las grietas se propagan de forma muy rápida, y por falta de una integridad estructural, los elementos constructivos se separan en macro-bloques que fallan de forma frágil o casi-frágil dependiendo de la dirección y magnitud de la carga.

En conclusión, se puede resaltar el hecho de que la mampostería tiene una resistencia aceptable para soportar cargas de compresión, pero una resistencia casi nula a tensión. Es inaceptable la pérdida de estos edificios históricos, por lo tanto, es de suma importancia su protección ante efectos catastróficos como los sismos. Esto representa un gran reto, debido a las limitantes de la mampostería para transmitir y disipar empujes laterales, así como la gran masa y falta de buena conectividad entre elementos estructurales. Lo anterior se complejiza aún más debido a la heterogeneidad de la mampostería al estar conformado por diferentes materiales para las unidades y el mortero, así como las variaciones en el tipo de mampostería en el espesor del elemento (*e.g.* mampostería de saco), construcción en diferentes etapas, restauraciones, etc. El presente artículo tiene como objetivo describir brevemente los diferentes procesos involucrados en el monitoreo y diagnóstico estructural de edificios históricos para poder conservarlos ante los efectos de los sismos.

2. IDENTIFICACIÓN ESTRUCTURAL Y PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

Para poder proteger un edificio histórico o monumento por medio de una intervención debemos de entender/caracterizar los materiales usados en su construcción, tipo de elemento estructural y su mecanismo de transmisión de cargas entre elementos. Esta transmisión de cargas se puede estudiar a través del análisis de su comportamiento ante cargas verticales y laterales en el rango estático y dinámico. Estas etapas iniciales son fundamentales para poder proponer las medidas de rehabilitación y refuerzo que permita protegerlos ante amenazas generadas por la naturaleza (*e.g.* viento, incendios y sismos) o cualquier otra generada por el hombre (*e.g.* explosiones, incendios, etc.).

Para poder rehabilitar o reforzar una estructura antigua se debe de realizar todo un proceso de entendimiento del edificio a través de una inspección y monitoreo por medio de pruebas experimentales en sitio y en laboratorio para poder generar un diagnóstico. Una etapa fundamental en el proceso de monitoreo, inspección y diagnóstico consiste en la realización de estudios bibliográficos (*e.g.* libros, periódicos, manuscritos antiguos, reportes, fotografías, etc.) y explorativos por medio de entrevistas y otras fuentes en cuanto a su historia, daños, reparaciones realizadas y los materiales que fueron

empleados en estas. Además, la realización de un reconocimiento de los diferentes sistemas estructurales y sus mecanismos de transmisión de cargas (*i.e.* vertical y horizontal en caso de estar intervenido), así como una caracterización de materiales. Esta caracterización de materiales y sistemas estructurales se recomienda sea semi-destructiva o de preferencia no destructiva, con el objetivo fundamental de conservar la belleza y valor arquitectónica del edificio. Los monitoreos estructurales del edificio se realizan en periodos cortos de tiempo o de forma permanente para investigar sus propiedades mecánicas y dinámicas. Esta técnica explorativa es de gran utilidad para la detección de algunos problemas de asentamientos diferenciales (*e.g.* Catedral Metropolitana en la Ciudad de México), medición de incremento en tamaño de grietas con testigos de yeso, así como la concentración de esfuerzos y humedad. Toda esta información recabada sobre la concepción estructural, historia de daños y reparaciones, en combinación con los trabajos de inspección, caracterización y monitoreo permiten realizar un diagnóstico sobre el estado actual del edificio histórico o monumento bajo estudio.

Como ejemplo de diagnóstico y propuestas de intervención en edificaciones históricas podemos destacar el realizado en la torre medieval de San Gimignano, Italia (Fig. 2a) por [8]; [9]; [10]; [1] y [2]. El monumento fue sometido a investigaciones experimentales y numéricas para poder proponer un sistema de refuerzo sísmico a base de cables postensados que le permita resistir la sismicidad de la región. La Catedral de Florencia (ver Fig. 2b) también ha sido un monumento intensamente estudiado por investigadores de la Universidad de Florencia y la Universidad de Venecia (*e.g.* [11] y [3]), con el objetivo de entender los materiales que la conforman, comportamiento y zonas de concentración de esfuerzos, principalmente en el domo y columnas soportantes. El gran peso y deformación de la cúpula está generando diferentes concentraciones de esfuerzos en la base de la misma y en la parte baja de las columnas que la soportan y pueden generar que fallen debido a la superación de la resistencia de compresión intrínseca del material.

3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Los estudios de caracterización mecánica tienen el objetivo fundamental de investigar mediante pruebas experimentales las características físicas y mecánicas de los materiales componentes del edificio histórico bajo estudio. Estas pruebas se realizan en sitio y en laboratorio y pueden ser destructivas y semi-destructivas. Como ejemplo de pruebas destructivas vale la pena observar la Figura 3a, en la que se extrajeron núcleos de tres partes de una fachada de piedra labrada. Estas muestras son probadas en laboratorio con la ayuda de una prensa universal y sometidas a compresión axial para conocer su módulo de elasticidad, resistencia última, deformación y otras características como la densidad, materiales constituyen-

tes, etc. Sin embargo, por el tamaño de la muestra los resultados obtenidos con la extracción de núcleos son poco confiables, ya que como se puede observar no se incluye la interacción de la piedra con el mortero. Esta interacción juega un papel muy importante en la resistencia a compresión del elemento, esto se debe a que la resistencia de la unidad puede ser hasta cuatro veces mayor que la presentada ya como elemento de mampostería. Como ejemplo de lo anteriormente mencionado puede ser de utilidad indicar que un tabique de barro rojo recocido probado a la compresión puede presentar una resistencia promedio de 60 kg/cm^2 y si se prueba ya como elemento de mampostería unido con mortero cemento-arena reduce hasta 15 kg/cm^2 .



Fig. 3. Pruebas experimentales destructivas para conocer las propiedades mecánicas: (a) extracción de núcleos [12] y (b) compresión diagonal [13].

Para obtener resultados representativos de la resistencia a compresión del elemento estructural de mampostería se requieren muestras más grandes y representativas. Estas muestras se pueden obtener por medio de la extracción de muretes (e.g. $1 \times 1 \text{ m}$) en edificios históricos que serán demolidos o que se encuentren extremadamente dañados, o que han presentado colapsos parciales. Estas muestras extraídas se prueban en laboratorio ante compresión axial y diagonal (cortante) por medio de una prensa universal como se muestra en la Figura 3b. Estas pruebas tienen el objetivo de determinar la resistencia última a compresión, módulo de elasticidad, resistencia última a cortante, deformación última y módulo de resistencia a cortante. El único problema que representan estas pruebas experimentales es que tanto la extracción de núcleos como de muretes son representativos de pruebas destructivas, lo cual es inaceptable en edificios históricos. Estos edificios no se pueden intervenir de forma deliberada. La extracción de muestras representativas de gran tamaño se debe de realizar solo en el caso de existir elementos colapsados, que estén por demolerse o de edificios similares. Estas restricciones representan un gran reto y dificultan la obtención de resultados representativos.

Estas limitantes mencionadas y la necesidad de monitoreo y diagnóstico de edificios históricos han llevado a hacer uso de la tecnología y nuevas estrategias para realizar pruebas semi-destructivas y no destructivas. Como pruebas semi-destructivas podemos destacar el uso del doble gato plano

como se muestra en la Figura 4a. El doble gato plano tiene el objetivo de investigar el módulo de elasticidad de la mampostería del elemento estructural, su resistencia a la compresión y los niveles de esfuerzos bajo los que se encuentran sometidos para identificar la vulnerabilidad ante la falla de los mismos en diferentes partes del edificio (e.g. [14]; [15] y [16]).

Las Figuras 4a-b muestran la vista general de la prueba completa en la que se puede observar las inserciones en las juntas de mortero para colocar las placas metálicas y el gato hidráulico para regresar al elemento estructural a su deformación original. La Figura 4 corresponde con la implementación del doble gato plano en la Catedral de Siena por [14] para investigar in situ el nivel de esfuerzos a los que se encuentra sometido el domo y evitar que se exceda la resistencia propia del material y colapse. Una vez terminada la prueba experimental semi-destructiva in situ se remueven las placas metálicas y se rellenan los cortes con mortero de características similares.



Fig. 4. Pruebas experimentales semi-destructivas in-situ para conocer el estado de esfuerzos [14]: (a) medición con doble gato plano y (b) vista general.

4. IDENTIFICACIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN Y DAÑO

La investigación del estado de conservación y daño en edificios históricos se lleva a cabo principalmente in situ, por medio de observación directa para detectar grietas, humedad, vegetación invasiva y envejecimiento del material. La Figura 5a muestra los patrones de agrietamiento observado en la torre medieval Torre Grossa de San Gimignano, Italia.

Esta investigación en la Torre Grossa la desarrolló la Universidad de Siena en participación con la Universidad de Florencia (e.g. [8] y [9]). Más recientemente, [1] y [2], realizaron diferentes estudios en esta torre medieval con el objetivo de entender su estado actual, comportamiento y protegerla de la sismicidad local. En las etapas iniciales de reconocimiento se observó la presencia de múltiples micro-agrietamientos debidos a la vegetación invasiva como se muestra en la Figura 5b. Estas micro-grietas pueden ser un punto inicial de falla crítica en caso de la ocurrencia de un evento sísmico de mediana o alta intensidad, poniendo en riesgo la integridad de la estructura completa. Para la representación gráfica de los patrones de agrietamientos se recomienda la combinación de fotogra-

fías con las mediciones de la extensión y espesor de las mismas representadas en cortes transversales, longitudinales y tridimensionalmente por medio de herramientas CAD. Estos planos son de gran ayuda para el monitoreo del incremento de las grietas por medio de testigos de yeso.

Estas técnicas gráficas y explorativas permiten conocer el estado actual y la tasa de propagación de grietas generadas por la vibración ambiental en el entorno en el que se encuentra el edificio histórico (i.e. viento, tráfico, visitas excesivas de turistas, etc.). Además, permiten monitorear los asentamientos diferenciales u otras causas relacionadas con el suelo (e.g. torre de Pisa, Italia y la Catedral Metropolitana de Ciudad de México). Estas observaciones facilitan la generación de un diagnóstico en el que se recomienda como paso inicial la rehabilitación del edificio. Estos trabajos incluyen la remoción de vegetación y un sellado de grietas por medio de inyección de morteros de características similares al original, así como reposición de piezas dañadas con materiales compatibles. Una de las pruebas experimentales in-situ no destructivas que está teniendo mucho éxito en la inspección y monitoreo del patrimonio histórico es la imagen térmica. Esta técnica no destructiva consiste en la toma de fotografías en diversas partes de la estructura con el objetivo de identificar la presencia de humedad en muros y cubiertas de los edificios, así como la inserción de materiales diferentes a los originales como producto de remodelaciones o restauraciones. Además, son de gran utilidad para identificar huecos de ventanas o puertas que han sido cubiertos para dar continuidad a muros o cerrar espacios. La imagen térmica detecta las temperaturas de los diferentes materiales y es posible apreciar humedad y huecos cubiertos como se puede observar en la Figura 6a.

En la misma Figura 6a se observa que la distribución de humedad se encuentra en diferentes partes del muro y en la zona del arco de la ventana, con temperaturas promedio de entre 30 y 32 °C, en comparación con las zonas sin humedad que son mayores (i.e. alrededor de los 33-34 °C).

En contraste, podemos observar la fotografía térmica de la Figura 6b, en donde el edificio presenta temperaturas constantes sin problemas de humedad en su fachada de alrededor de los 25-29 °C, y los huecos de puertas y ventanas coinciden con las mediciones observadas. Este edificio de la Figura 6b se encuentra en Tlajomulco, México y no presenta problemas de humedad, ni tiene puertas y ventanas selladas aparentemente. Las pruebas no destructivas con imágenes térmicas son de gran utilidad para identificar la presencia de humedad en cubiertas de madera con segmentos empotrados a muros. Esto permite un diagnóstico más acertado en las estructuras de madera, ya que no es fácil de observar la degradación del material externamente.

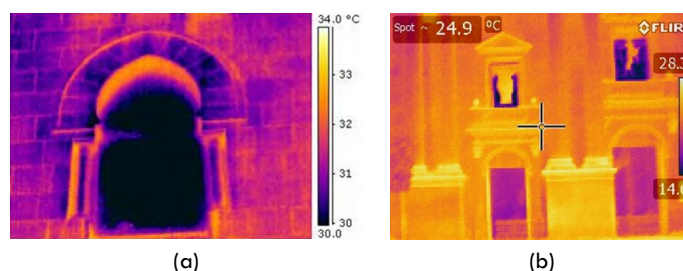


Fig. 6. Pruebas experimentales no destructivas in-situ con imágenes térmicas: (a) identificación de humedad en una fachada principal [17] y (b) fachada en buen estado de una iglesia en el centro histórico de Tlajomulco, Jalisco, México.

Los sistemas de piso a base de viguetas y cubiertas son los más susceptibles a presentar problemas de humedad en la zona de apoyo con el muro y debido a la degradación de la madera puede fallar de forma frágil sin previo aviso de deformaciones visuales. Este tipo de pruebas no destructivas también se pueden emplear para identificar el filtrado de agua de lluvia y otro tipo de fugas en sistemas de cubierta, piso y muros de edificios históricos. La prevención y detección temprana de humedad es fundamental para evitar problemas de degradación de resistencias debido a estas filtraciones y envejecimiento de la piedra de los muros. Aunado a la humedad de la piedra, esta puede llegar a presentar exfoliación/desfragmentación principalmente en fachadas exteriores debido al sol, viento, contaminación y vibraciones ambientales (i.e. tráfico, viento y otras vibraciones).

5. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA

Otra de las pruebas experimentales in-situ no destructivas consiste con la medición de la vibración de la estructura por medio de equipo de alta precisión como los acelerómetros

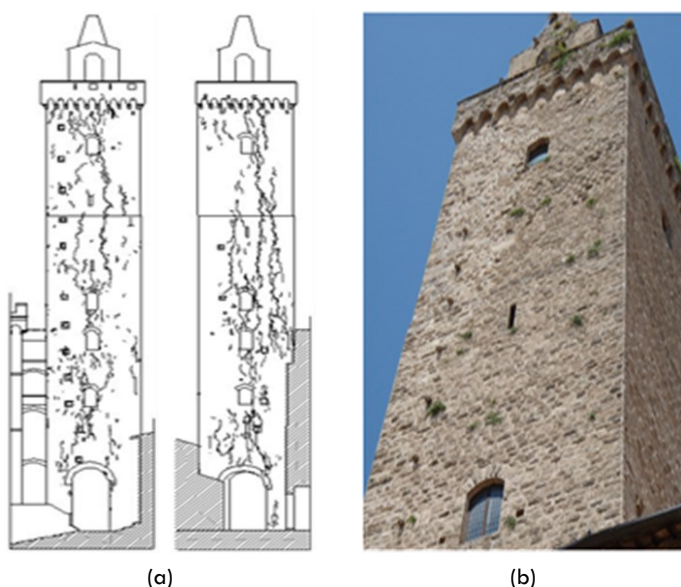


Fig. 5. Identificación del estado de conservación actual: (a) patrones de agrietamiento y estado de daño ([8] y [9]) y (b) presencia de vegetación invasiva ([1] y [2]).

que se muestran en la Figura 7. Hace una década, los equipos convencionales tenían la forma y tamaño similar al de una caja de zapatos (ver Fig. 7a) y se encontraban conformados principalmente por dos piezas, el sistema de adquisición de datos y el sensor. Más recientemente, los equipos se han reducido de tamaño y peso como el que se muestra en la Figura 7b. Estos equipos portátiles triaxiales tienen la gran ventaja de ser livianos y de fácil colocación, inclusive en los puntos más inaccesibles. La adquisición de datos se puede visualizar de forma directa e inmediata en la computadora portátil gracias a la interface y software de manejo de la información. Para poder medir la vibración en los edificios históricos (Fig. 8a) es necesario de una excitación inducida generada por algún tipo de movimiento. Esta vibración puede ser medida en un instante de tiempo (i.e. minutos o algunas horas) por medio de vibración ambiental generada por viento y tráfico o también dejando caer alguna masa en la base del edificio (e.g. [18]; [19] y [20]).

Otra estrategia para generar vibración en los edificios históricos se puede realizar por medio de un instrumento mecánico (i.e. dinamómetro) oscilando a distintas frecuencias y posicionado en puntos estratégicos de la base, sistemas de piso y azotea. Los monitoreos de larga duración (i.e. semanas o meses) tienen el objetivo de tratar de medir la vibración en el edificio generada por un sismo real de mediana o alta intensidad, pero esto es muy complicado de obtener, inclusive en zonas de alta sismicidad como Colima, México. Tanto la Ciudad y el Estado se llaman Colima y la sismicidad es constante debido a diferentes fuentes como el volcán de Colima y la zona de subducción en las costas del Pacífico generada por la interacción de las placas de Cocos, Rivera y Norteamericana. En la zona de Colima-Jalisco se han generado a lo largo de la historia sismos de gran magnitud e intensidades importantes en diferentes ciudades (e.g. [21]; [22]; [23]; [1]; [24] y [25]).

medio de micro-sensores. La Figura 8b muestra la medición de vibración por ruido ambiental en una iglesia a nivel de cubierta en el sistema abovedado. Esta información sobre las características dinámicas del edificio histórico permite determinar su periodo fundamental y frecuencia de vibración. Enseguida, con la ayuda de un software se construye el modelo tridimensional del edificio y se calibra/actualiza con la información mecánica y dinámica recabada (i.e. módulos de elasticidad, densidades, corrección de geometría, frecuencias, etc.). Una vez construido y calibrado/actualizado el modelo tridimensional del edificio, se realizan algunos análisis iniciales en el rango elástico lineal para conocer la capacidad del edificio para transmitir su peso propio (i.e. carga vertical) e identificar zonas de concentración de esfuerzos de compresión y tensión. Los análisis dinámicos lineales son de gran ayuda para calibrar y validar el modelo, así como para conocer las diferentes formas de vibrar del edificio y de algunos elementos estructurales en particular. Tanto el periodo fundamental/natural (i.e. primer periodo en ambas direcciones ortogonales X y Y) como los superiores y los modos de vibración son de gran ayuda para entender en el rango dinámico como vibraría el edificio ante excitación inducida principalmente por un sismo. Las formas de vibrar ayudan a interpretar si el edificio en su primer modo natural presentaría flexión, torsión, vibración de alguna parte en particular debido a concentración de masas u otro tipo de efectos.

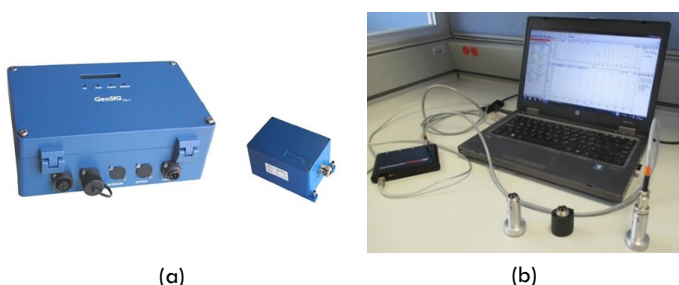


Fig. 7. Equipo experimental para obtención de frecuencias naturales en estructuras: (a) acelerómetro convencional portátil [1] y (b) acelerómetro portátil ligero.

Para tener éxito en este tipo de mediciones de vibración ambiental de larga duración, se necesita implementar el sistema de monitoreo mínimo por un año o más, lo cual se vuelve complicado con equipo convencional. Para incrementar las probabilidades de registrar un sismo de mediana o alta intensidad, resultan de gran ayuda las redes de monitoreo remoto por



Fig. 8. Obtención de frecuencias naturales con acelerómetros: (a) vista general de una iglesia en Tlajomulco y (b) medición de vibración ambiental a nivel de bóvedas.

Además, estas pruebas experimentales no destructivas en el rango dinámico por medio de vibración son de gran ayuda para identificar problemas de transmisión de cargas entre elementos estructurales, asentamientos diferenciales, concentración de esfuerzos, daño local, etc. Con esta información es posible realizar algunos trabajos de rehabilitación estructural para corregir deficiencias locales y globales. Sin embargo, la rehabilitación no mejora el comportamiento sísmico ni asegura la protección del monumento, para esto se recomienda reforzar sísmicamente. Para poder reforzar el edificio se necesita además de lo requerido para la rehabilitación, de la realiza-

ción de análisis sísmicos detallados en el modelo tridimensional del edificio. Para estos análisis se requiere de aproximaciones numéricas como el de elementos finitos u otra técnica numérica en combinación de modelos representativos de la mampostería. Una vez realizados los análisis sísmicos detallados, se proponen diferentes tipos de refuerzos con materiales y técnicas que sigan los principios requeridos de durabilidad, reversibilidad y compatibilidad, respetando siempre el valor arquitectónico y cultural del monumento.

Antes de realizar la intervención física del refuerzo sísmico en el edificio, este se analiza nuevamente por medio de software para comprobar que efectivamente se mejora su comportamiento sísmico original.

6. PERSPECTIVA FUTURA EN EL MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

En las secciones anteriores se describieron los principales métodos y herramientas para de inspección y monitoreo de edificios históricos de mampostería y madera por medio de pruebas experimentales en sitio y en laboratorio para poder generar un diagnóstico. Se mencionó la dificultad y la falta de representatividad global de muestras extraídas de reducido tamaño y que son de elementos independientes como morteros o piezas. Además, de que estas pruebas tanto de extracción de muestras pequeñas como representativas de mayor tamaño son destructivas. Los edificios históricos no deben de ser dañados, ni alterados en ningún aspecto, lo que dificulta enormemente la realización de pruebas experimentales para conocer las propiedades mecánicas de los materiales componentes de los distintos elementos estructurales. En este sentido, las pruebas experimentales semi-destructivas como el doble gato plano han demostrado ser una técnica práctica y que genera poco daño a la estructura para conocer el nivel de esfuerzos a los que se encuentra sometido el elemento estructural y evitar así su posible colapso súbito. Sin embargo, esta prueba daña en cierta forma la estructura de forma mínima, pero no ha tenido una aceptación total entre restauradores y encargados de la protección del patrimonio histórico (e.g. INAH en México).

Actualmente, la estimación de las propiedades mecánicas se está comenzando a realizar con técnicas no destructivas que involucran transmisión de sonido y temperatura en el elemento estructural. Estas técnicas ayudan a estudiar los diferentes elementos estructurales (e.g. trabes, losas, muros, arcos, etc.) al estar sometidos a diferentes cargas, agrietamientos, envejecimiento del material, diferentes materiales, capas, etc. (e.g. [26] y [27]). Sin embargo, este tipo de pruebas experimentales por medio del sonido y temperatura aún no has sido muy investigadas debido a que resulta muy difícil la transmisión efectiva en el elemento y la interpretación de resultados, por lo que se ha reducido a pequeños elementos probados en laboratorio bajo condiciones controladas. El reto consiste en

poder implementar esta prueba experimental por medio de transmisión de sonido y temperatura en edificios completos y en sitio. Otra opción que necesita ser investigada más a fondo es la posibilidad de utilizar la imagen térmica, pero en vez de detectar humedades y huecos en el edificio, ayudar a detectar el estado de esfuerzos en el elemento estructural, muy similar a lo obtenido con el doble gato plano, pero debido a transmisión de temperatura.

Con respecto a las pruebas experimentales dinámicas, el uso de micro-sensores y actuadores en cables de fibra óptica está siendo investigada alrededor del mundo para usar esto en el estudio de edificios patrimoniales por medio de medición de temperatura, georreferenciación, medición de asentamientos diferenciales, etc. Esta técnica no ha tenido mucho impacto debido al gran costo de la fibra óptica y la cantidad enorme de metros lineales necesarios para cubrir en su totalidad a un edificio monumental (e.g. [28]; [29] y [30]). Además, el cable tiene un impacto visual en las fachadas del edificio con lo que no ha sido muy aceptado por los restauradores y personas encargadas de la protección de estos monumentos debido a que afecta el valor arquitectónico y cultural a pesar de que se removible. Esta técnica es difícil de instalar y mantener, así como la necesidad de monitoreo a distancia. En el caso de la obtención de propiedades dinámicas del edificio, el uso de micro-sensores remotos instalados en puntos estratégicos del edificio de forma permanente puede ser de gran ayuda para el monitoreo del edificio. Estos dispositivos de micro-electrónica pueden albergar también micro-acelerómetros que podrían ser de gran ayuda para la detección de periodos/frecuencias triaxiales de vibrar del edificio en las dos direcciones ortogonales y la vertical (i.e. X, Y y Z). Además, se podría lograr un monitoreo a distancia de la vibración inducida por sismos y el daño generado en el edificio por medio de una comparativa entre la información de vibración del estado original y agrietado, tomando en cuenta los cambios en los periodos de vibración.

7. CONCLUSIONES

La presente investigación literaria y resumen de investigaciones propias realizadas en Europa y México por el autor de este artículo se enfoca en el entendimiento de los materiales y sistemas constructivos de los edificios históricos, y sus mecanismos naturales de transmisión de carga vertical, horizontal y las diferentes fallas posibles ante cada una de estas acciones. Como etapa inicial en la protección de monumentos es de suma importancia la realización de un análisis histórico del edificio para entender su concepción estructural, modificaciones y daños sufridos a lo largo del tiempo y los materiales usados en su reparación. Posteriormente al análisis histórico, se realizan diferentes etapas que incluyen la inspección del edificio para identificar los diferentes sistemas estructurales y sus materiales, así como la capacidad de transmisión de car-

ga vertical de cada uno de estos elementos. El monitoreo de larga o corta duración en el edificio complementa la inspección en sitio de la estructura, con el objetivo de caracterizar los materiales en cuanto a sus propiedades mecánicas, estado de daño actual, zonas de concentración de esfuerzos y características dinámicas. El análisis histórico, la inspección y el monitoreo permiten establecer un diagnóstico que es de gran utilidad para proponer una rehabilitación, refuerzo sísmico o una combinación entre ambas técnicas para corregir deficiencias globales y locales.

Antes de decidir entre rehabilitar o reforzar, o la aplicación de ambas técnicas en un edificio, se debe de analizar la estructura por medio de su representación con modelos numéricos representativos tridimensionales, calibrados con la información obtenida de forma experimental en sitio o en laboratorio. El objetivo es otorgar atributos y características al modelo numérico similares a las del edificio real y verificar que su comportamiento de transmisión de cargas en condiciones estáticas y comportamiento dinámico elástico-lineal sea similar. Con estos análisis elásticos iniciales se identifican zonas vulnerables de tensión y compresión ante condiciones de transmisión de cargas principalmente verticales, así como frecuencias naturales de vibración. Una vez realizados los análisis sísmicos detallados en combinación con un modelo constitutivo que permita representar el comportamiento no lineal de la mampostería, es posible proponer diferentes refuerzos y soluciones estructurales. Se busca que los materiales implementados no sean muy diferentes a los originales y que sean compatibles en deformaciones y aumenten exitosamente su capacidad para transmitir cargas horizontales. Se recomienda que estos materiales sigan el principio de durabilidad, reversibilidad y compatibilidad, y que mejoren efectivamente el comportamiento del edificio y no lo perjudiquen en ningún aspecto. El edificio se somete nuevamente a diferentes análisis por medio de software para comprobar que realmente se mejora su comportamiento sísmico. Esta medición se realiza de forma cuantitativa midiendo la disipación de energía sísmica, así como la capacidad de transmisión de cargas horizontales entre elementos y formas de falla más dúctiles que las originales. Esta combinación de técnicas y análisis numéricos avanzados ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad en la protección sísmica del patrimonio histórico. Además, el refuerzo sísmico se debe combinar con diferentes técnicas de rehabilitación. Estas técnicas buscan mejorar el aspecto del edificio, como por ejemplo sellado de grietas, reposición de unidades/piezas dañadas en la mampostería, evitar filtraciones de agua de lluvia, reposición de elementos de madera humedecidos y a punto de fallar, disminución de masas concentradas, remoción de vegetación invasiva, etc.

En cuanto a la perspectiva futura en el monitoreo y diagnóstico de edificios patrimoniales podemos concluir que las técnicas semi-destructivas están perdiendo interés por los investigadores y autoridades encargadas de la protección del pa-

trimonio histórico. Se están buscando herramientas y metodologías que permitan analizar las propiedades mecánicas de los materiales que conforman un elemento estructural y el nivel de esfuerzos al que se encuentra sometido por medio de la transmisión de sonido y calor, pero aún es necesario seguir investigando aún más. La gran problemática de estas pruebas es de que se desarrollan en laboratorio bajo condiciones controladas y en elementos estructurales pequeños. Se propone investigar más sobre la opción de usar la cámara térmica para medir esfuerzos por medio de la conversión de la temperatura inducida y distribuida en el elemento estructural dependiendo del material y nivel de esfuerzos/agrietamientos bajo los que se encuentre. Los micro-sensores instalados en puntos estratégicos representan una opción muy interesante y no destructiva para medir diferentes parámetros en el edificio de forma constante y por largos periodos de tiempo. Estos dispositivos permiten monitorear el edificio o conjunto de edificios a distancia y detectar el efecto dinámico

8. REFERENCIAS

- [1] A. Preciado (2011). "Seismic vulnerability reduction of historical masonry towers by external prestressing devices." Doctoral thesis, Technical University of Braunschweig, Germany and University of Florence, Italy.
- [2] A. Preciado, G. Bartoli and A. Ramirez-Gaytan (2017a). "Earthquake Protection of the Torre Grossa Medieval Tower of San Gimignano, Italy by Vertical External Prestressing." *Engineering Failure Analysis*, Vol. 71, pp. 31-42.
- [3] P. Foraboschi (2016). "The central role played by structural design in enabling the construction of buildings that advanced and revolutionized architecture." *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 956-976.
- [4] R. Meli (1998). "Ingeniería estructural de los edificios históricos." Fundación ICA. A. C., Mexico.
- [5] A. Preciado (2015). "Seismic vulnerability and failure modes simulation of ancient masonry towers by validated virtual finite element models." *Engineering Failure Analysis*, Vol. 57, pp. 72-87.
- [6] A. Preciado (2018). "Analysis of Behavior and Failure Mechanisms of Old Unreinforced Masonry Constructions Under Strong Earthquakes." Volume 1, Chapter 1 (pp. 1-25). *Masonry: Design, Materials and Techniques*, Nova Science Publishers, Inc.
- [7] A. Preciado and S.T. Sperbeck (2019). "Failure analysis and performance of compact and slender carved stone walls under compression and seismic loading by the FEM approach." *Engineering Failure Analysis*, Vol 96, pp. 508-524.
- [8] G. Bartoli, C., Casamaggi, and P. Spinelli (2000). "Numerical modelling and analysis of monumental buildings: A case study." Department of Civil Engineering, University of Florence, Italy.
- [9] G. Bartoli, M., Betti, P. Spinelli and B. Tordini (2006). "An innovative procedure for assessing the seismic capacity of historical tall buildings: The Torre Grossa masonry tower." *Proceedings of the 5th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC)*, New Delhi, India.
- [10] M.E. Stavroulaki, G. Bartoli, M. Betti and G.E. Stavroulakis (2009). "Strengthening of masonry using metal reinforcement: A parametric numerical investigation."

Proceedings of the International Conference on Protection of Historical Buildings (PROHITECH), June 21-24, Rome, Italy.

[11] G. Bartoli, C. Blasi, N. De Robertis and P. Foraboschi (1991). "Monitoring system of Brunelleschi's Dome in Florence, interpretations of the recorded data". Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings, Seville, Spain, Vol. 14-16, pp. 209-221.

[12] BGS (2009). British Geological Survey, Centre for Sustainable Mineral Development. Building Stones. <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/buildingStones/background.html>. Último acceso el 16 de junio de 2017.

[13] J. Tejeda y C. Silva (2002). "Estudio de resistencias a compresión diagonal (cortante), de muretes de mampostería fabricados con materiales de la zona conurbada Colima-Villa de Álvarez." Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, SMIE, Puebla, México.

[14] G. Bartoli, M., Betti, M. Orlando and P. Spinelli (2008). "In situ testing and structural assessment of an historic masonry dome." Proceedings of the 12th International Conference on Structural Faults and Repair, Edinburgh, Scotland.

[15] A. Carpinteri, S. Invernizzi and G. Laciogna (2009). "Historical brick-masonry subjected to double flat-jack test: Acoustic emissions and scale effects on cracking density." Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 2813-2820.

[16] S. Parivallal, K. Kesavan, K. Ravisankar, B. Arun-Sundram and A.K. Farvaze-Ahmed (2011). "Evaluation of in-situ stress in masonry structures by flat jack technique." Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE), India.

[17] D.S.P. Rao (2007). "Investigations on ancient masonry structures using infrared thermography." Proceedings of the Conference of InfraMation, USA.

[18] S. Ivorra and F.J. Pallares (2006). "Dynamic investigations on a masonry bell tower." Engineering structures, Vol. 28, pp. 660-667.

[19] C. Gentile and A. Saisi (2007). "Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment." Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 1311-1321.

[20] A. Preciado, H. Budelmann and G. Bartoli (2016). "Earthquake protection of colonial bell towers in Colima, Mexico with externally prestressed FRPs." International Journal of Architectural Heritage, Vol.10(4), pp. 499-515.

[21] UCOL (1997). "The macro-earthquake of Manzanillo occurred on October 9th, 1995 (in Spanish)." University of Colima (UCOL), Government of the state of Colima and the Mexican Society of Seismic Engineering.

[22] V.M. Zobin (2004). "The earthquakes and their hazards: How to survive to them? (in Spanish)." University of Colima, Mexico.

[23] H. Rodriguez-Lozoya, L. Quintanar, C. Rebolgar, J. Gomez, Y. Yagi, T. Dominguez, G. Reyes, C. Javier and L. Alcantara (2007). "Source characteristics of the 22nd January 2003 Mw 7.5 Tecoman, Mexico, earthquake and its rupture process." Journal of Geophysical Research.

[24] M. Chavez, S. Garcia, E. Cabrera, M. Ashworth, N. Perea, A. Salazar, E. Chavez, J. Saborio-Ulloa and J. Saborio-Ortega (2014). "Site Effects and Peak Ground Accelerations Observed in Guadalajara, Mexico, for the 9 October 1995 Mw 8 Colima-Jalisco, Earthquake." Bulletin of the Seismological Society of America, 104, 1-26.

[25] A. Preciado, A. Ramirez-Gaytan, S. Lazzano, I. Preciado, N. Gutiérrez y J.C. Santos (2017b). "Vulnerabilidad de edificios ante resonancia sísmica en Guadala-

ra y Zapopan por el sismo del 11 de mayo de 2016 Mw=4.9." Memorias del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (SMIS), Septiembre 20-23, Guadalajara, México.

[26] R. Cherif and N. Atalla (2015). "Experimental investigation of the accuracy of a vibroacoustic model for sandwich composite panels". The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 137(3), pp. 1541-1550.

[27] A. Santoni, P. Fausti and P. Bonfiglio (2018). "Experimental setup for acoustic and mechanical characterisation of lightweight building elements." Proceedings of the Euronoise 2018, the 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering, May 27-31, Crete, Greece.

[28] B. Glisic, D. Inaudi, D. Posenato, A. Figini and N. Casanova (2007). "Monitoring of heritage structures and historical monuments using long-gage fiber optic interferometric sensors: an overview." Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. November 13-16, Vancouver, British Columbia, Canada.

[29] M. De Fino and G. De Tommasi (2008). "Structural health monitoring of historical buildings using fibre optic sensors." Proceedings of the 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, May 11-14, Istanbul, Turkey.

[30] X.W. Ye, Y.H. Su and J.P. Han (2014). "Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review." Scientific World Journal: 652329, doi: 10.1155/2014/652329.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at bm.edificacion@upm.es. Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.