



Received: 21/06/2023  
Accepted: 27/09/2023

Anales de Edificación  
Vol. 9, Nº2, 13-22 (2023)  
ISSN: 2444-1309  
DOI: 10.20868/ade.2023.5364

## Aplicación del método de los elementos finitos para el análisis del comportamiento sísmico de la mezquita-catedral de Córdoba.

## Application of the finite element method for the analysis of the seismic behaviour of the mosque-cathedral of Córdoba.

María-Victoria Requena-García-Cruz<sup>a</sup>; Emilio Romero-Sánchez<sup>b</sup>; Antonio Morales-Esteban<sup>b,c</sup>;  
Natalia Fernández-Pérez<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Universidad de Cádiz. España.  
[maria victoria.requena@uca.es](mailto:maria victoria.requena@uca.es)

<sup>b</sup> Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno. Universidad de Sevilla. España. [eromero13@us.es](mailto:eromero13@us.es);  
[natalia.fdez@msn.com](mailto:natalia.fdez@msn.com)

<sup>c</sup> Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla. España. [ame@us.es](mailto:ame@us.es)

---

**Resumen**-- El objetivo principal de este trabajo es aplicar el método de los elementos finitos para el modelado del sector de Abd' al-Rahman I de la Mezquita-Catedral de Córdoba. Este edificio es de un gran valor cultural y patrimonial. Por ello, fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1984. El monumento se encuentra al sur de la península ibérica. Este área se caracteriza por una actividad sísmica moderada. Debido a ello, de cara a su preservación y al análisis de su seguridad, es importante analizar su comportamientos estructural y sísmico. En este trabajo, se ha desarrollado un modelo en 3D en el software abierto OpenSees. Para ello, se han realizado ensayos no destructivos sobre el edificio. Para el análisis de su comportamiento, se han realizado análisis estáticos verticales y horizontales (tipo pushover). Como resultado, se ha obtenido que el edificio presenta un peor comportamiento sísmico en la dirección perpendicular a las arcadas.

**Palabras clave**— Método de los elementos finitos, edificios históricos, comportamiento sísmico, pushover, patrimonio cultural.

**Abstract**— The main objective of this work is to apply the finite element method to the modelling of the sector of Abd' al-Rahman I of the Mosque-Cathedral of Cordoba. This building is of great cultural and heritage value. For this reason, it was declared a World Heritage Site by UNESCO in 1984. The monument is located in the south of the Iberian Peninsula. This area is characterised by moderate seismic activity. For this reason, it is important to analyse the structural and seismic behaviour of the monument for its preservation and safety analysis. In this work, a 3D model has been developed in the open software OpenSees. For this purpose, non-destructive tests have been carried out on the building. For the analysis of its behaviour, vertical and horizontal static analyses (pushover type) have been carried out. As a result, it has been obtained that the building has a worse seismic behaviour in the direction perpendicular to the arches.

**Index Terms**— Finite element method, historical buildings, seismic behaviour, pushover, cultural heritage.

---

## I. INTRODUCCIÓN

EL patrimonio cultural representa la identidad y la sociedad de las diferentes regiones del mundo. Así, proporciona información sobre la evolución tecnológica y cultural de un periodo de tiempo o de una región o población específica. Estas cualidades son características de la Mezquita-Catedral de Córdoba (España). Según la UNESCO, este edificio es único por la amplitud del espacio, su riqueza artística e histórica y el empleo de técnicas constructivas avanzadas. Además, el edificio representa un momento importante de la historia de la arquitectura islámica y, concretamente, de la arquitectura islámica en la península ibérica. Así, las técnicas constructivas y los estilos artísticos empleados en este edificio han influenciado considerablemente la arquitectura islámica y cristiana (World Heritage Committee, 1984). Por ello, fue declarado “Patrimonio de la Humanidad” por la UNESCO en 1984, junto con los alrededores del centro histórico de la ciudad de Córdoba. Posteriormente, el reconocimiento de este monumento fue ampliado a “Bien de Valor Universal Excepcional”. El monumento se comenzó a construir en el siglo VIII y fue ampliado en varias ocasiones, pasando de ser un edificio religioso islámico a cristiano.

El edificio se encuentra al sur de la península ibérica, en Andalucía. Esta zona se caracteriza por tener una actividad sísmica moderada (Amaro-Mellado *et al.*, 2017a) y está afectada por dos tipos de fuentes sísmicas (Amaro-Mellado *et al.*, 2017b), (Amaro-Mellado *et al.*, 2017c) terremotos lejanos, con epicentro marino y de gran magnitud debido al contacto entre las placas tectónicas euroasiática y africana (Fazendeiro Sá *et al.*, 2021); y, por otro lado, terremotos terrestres y cercanos debido a la sismicidad intraplaca. Concretamente, la Mezquita-Catedral de Córdoba se vio afectada por el famoso terremoto-maremoto de Lisboa de 1755 (Mw=8,5) y el de Carmona de 1504 (Mw=6,8). Debido a la peligrosidad sísmica de la zona, y de cara a su preservación y seguridad, es importante analizar su comportamiento estructural y sísmico.

En los últimos años, han ocurrido numerosos terremotos en Europa. Pese a que no han sido de una magnitud importante (Mw=5-6,2), los edificios históricos han mostrado poseer una vulnerabilidad sísmica alta. De hecho, el fenómeno del sismo ha sido el desastre natural que históricamente ha dañado más las construcciones y, concretamente, las patrimoniales (Altunişik, *et al.*, 2021). Esto se debe a que la mayor parte de estos edificios fueron construidos con muros de fábrica, que es uno de los sistemas estructurales más vulnerable a los movimientos horizontales (Kaya *et al.*, 2023). Esto es fundamentalmente debido a: la falta de conexión horizontal entre elementos estructurales; la baja resistencia a tracción de la fábrica y su heterogeneidad; y el envejecimiento de los materiales constructivos. Además, los edificios históricos se construyeron en diversas fases y han tenido varias extensiones y, normalmente, en su diseño, no se consideró la acción horizontal. Por ello, el análisis de la seguridad estructural y sísmica de edificios históricos se ha convertido en uno de los retos de mayor importancia que han asumido las autoridades

públicas europeas, principalmente en regiones con un riesgo sísmico considerable.

En este sentido, el análisis estructural y sísmico avanzado es un aspecto clave para la comprensión del comportamiento de este tipo de edificios y para identificar su vulnerabilidad. Para ello, y debido a la complejidad constructiva y estructural de los edificios históricos, particularmente para el caso de la Mezquita-Catedral de Córdoba, es necesaria la investigación y el empleo de técnicas sofisticadas y precisas para analizar su comportamiento correctamente. En este contexto, el método de los elementos finitos (EF) es una de las técnicas de modelado más implementada para el análisis de edificios históricos, ya que permite obtener resultados precisos y robustos (D’Altri *et al.*, 2020); (Cattari *et al.*, 2021); (S. Cattari and G. Magenes, 2022).

Para el empleo del método de los elementos finitos, es necesario validar y calibrar los modelos de cálculo. En el caso de los edificios históricos, es difícil realizar ensayos destructivos. Por ello, generalmente, se emplean campañas de análisis in situ basadas en ensayos no destructivos (END). El ensayo más empleado es el análisis modal operacional (OMA). Este permite obtener los parámetros elásticos y densidades de los sistemas estructurales (Dinani, *et al.*, 2021), (O. Ozcelikrt *et al.*, 2022). Para el estudio del comportamiento sísmico, se pueden realizar análisis estáticos o dinámicos, siendo principalmente, no lineales. Comparado con los análisis dinámicos, los estáticos consumen menos tiempo de cálculo y preparación del análisis, pero llevan consigo una serie de simplificaciones y limitaciones. Pese a ello, los análisis estáticos se han empleado para el análisis del comportamiento sísmico de edificios históricos para obtener una primera aproximación del mismo (Endo *et al.*, 2016). En cuanto a la evaluación de la seguridad sísmica, generalmente, se ha empleado el método de desempeño. Este consiste en la determinación de varios comportamientos objetivo para cada estado de daño de acuerdo a una acción sísmica determinada, generalmente según la normativa sísmica del país (Lagomarsino *et al.*, 2011).

Dada la peligrosidad sísmica de la zona y el valor histórico, artístico y cultural de la Mezquita-Catedral de Córdoba, este trabajo tiene como objetivo el analizar el comportamiento estructural y sísmico de la misma. Dada la complejidad del edificio, este trabajo se ha centrado en la aplicación del método de los elementos finitos para el modelado de uno de los sectores en los que se divide, el sector de Abd’ al-Rahman I. Esta es la parte más antigua del edificio que data del siglo VIII. Para ello, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos y macro-mecánico, basado en los resultados obtenidos de una campaña experimental realizada sobre el monumento. Para el análisis de su comportamiento estructural y sísmico, se han llevado a cabo análisis estáticos no lineales. El modelado y el análisis se han realizado en el software específico para ingeniería sísmica y de código abierto denominado OpenSees. Para la valoración de la

seguridad sísmica, se ha empleado el método del desempeño. Además, se ha analizado el daño sísmico a través de la obtención de planos de daño por tracción y compresión excesivas.

Es importante recalcar que, según el análisis del estado del arte, no existen trabajos sobre el comportamiento estructural y sísmico sobre este edificio. Además, no se han empleado hasta la fecha técnicas avanzadas de modelado del edificio como las que se presentan en este trabajo.

## II. LA MEZQUITA-CATEDRAL DE CÓRDOBA

La Mezquita-Catedral de Córdoba está compuesta por dos áreas diferenciadas (figura 1 (a)): el patio o sahn con un pórtico perimetral y un minarete (que a día de hoy es un alminar renacentista) y la sala de la oración o haram. El área interior está compuesta de columnas y arcadas (figura 1 (b) y (c)). Los diferentes sectores en los que se divide el edificio se corresponden con las distintas extensiones llevadas a cabo a lo largo de los años. Originalmente, la Mezquita adoptó la orientación de una iglesia primitiva. Además, esta orientación era más conveniente, ya que se situaba perpendicularmente al río Guadalquivir. El resto de extensiones que ha sufrido el edificio han seguido la misma configuración, resultando en una mezquita con orientación suroeste.

### 1. El sector de Abd' al-Rahman I

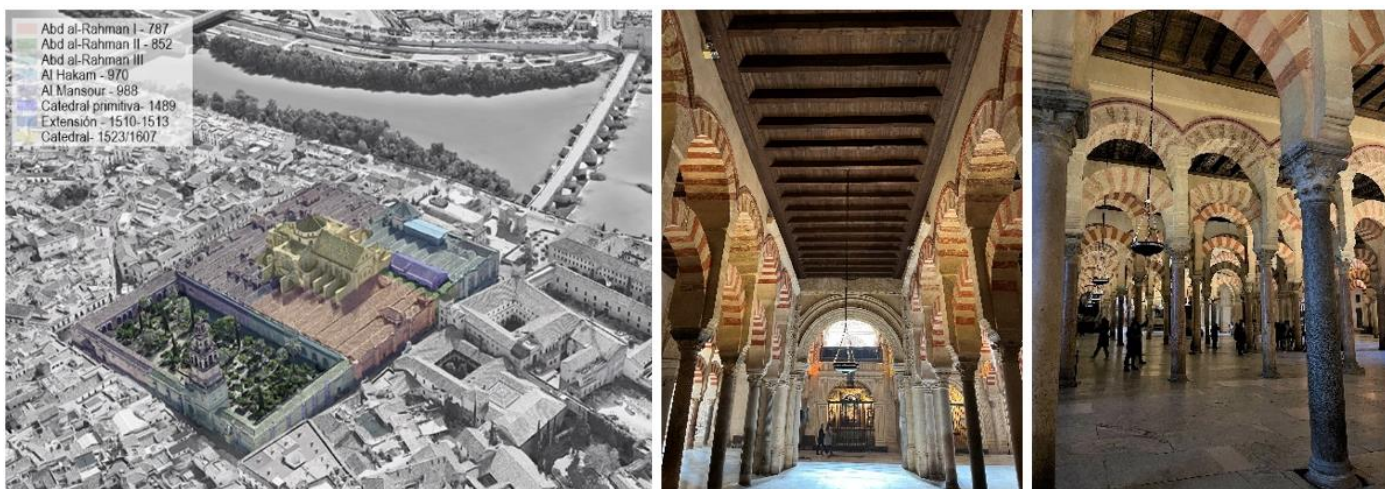
La Mezquita-Catedral de Córdoba destaca por su tamaño y, fundamentalmente, por su complejidad debida a la superposición de diferentes estilos arquitectónicos y extensiones (Herrero Romero, 2015). Por ello, este trabajo se ha centrado en el análisis en exhaustividad de uno de los sectores en los que se divide: el sector de Abd al-Rahman I (figura 2 (a)). Este sector se compone de 11 naves longitudinales, con una dimensión de 20 m de largo y 90 m de ancho. El sector data del siglo VIII y es la parte más antigua de todo el edificio. Además, este sector se construyó

fundamentalmente a partir de materiales reutilizados de otras obras. La configuración estructural, como el resto del edificio, se basa en la generación de arcadas formadas por dobles arcos de herradura. Esta es una de las principales características de este edificio. Supone un avance tecnológico y constructivo para la época y ha influenciado numerosos edificios religiosos islámicos posteriores. En este caso, los arcos están compuestos por la basa, el fuste, el capitel y una pieza adicional llamada cimacio, que recoge las cargas de los arcos. Las arcadas funcionan como acueductos para la recogida de agua de las cubiertas a dos aguas de las naves. Las arcadas en su parte superior son de fábrica de ladrillo no reforzada y mortero de cal (Figura 2 (b)). La cubierta está formada por cerchas de madera. En algunos casos, estas han sido sustituidas por cerchas metálicas durante las renovaciones llevadas a cabo durante el siglo XX. Bajo las cerchas, se encuentra un falso techo artesonado compuesto por vigas de madera ligeramente embebidas en el muro de las arcadas. Los muros perimetrales están compuestos de piedra caliza y mortero de cal y algunos de los huecos han sido cegados con la misma fábrica (pero con menor espesor) durante el paso de los años.

## III. METODOLOGÍA

### 1. Modelado numérico

El modelado numérico se ha realizado en 3D a partir del método de elementos finitos y el enfoque macro-mecánico (figura 3 (a)). Debido a la complejidad de la geometría del edificio y heterogeneidad de los materiales constructivos, se ha optado por este método frente al micro-modelado (D'Altri *et al.*, 2020). Este método de modelado ha sido utilizado en edificios patrimoniales análogos y para análisis del comportamiento similares. Además, el macro-modelado permite reducir el tiempo y la capacidad de cálculo y modelado al realizar análisis de edificios patrimoniales complejos como es el caso de la Mezquita-Catedral de Córdoba (Asteris *et al.*, 2013). El modelo en 3D ha sido realizado en el software



(a)

(b)

Fig. 1. (a) Vista general de la Mezquita-Catedral de Córdoba y su orientación con respecto al río Guadalquivir. Identificación de las diferentes extensiones y fechas orientativas. (b) y (c) Vistas interiores del edificio donde se observa la configuración de las naves basada en el doble arco de herradura y el falso techo de madera artesonado.

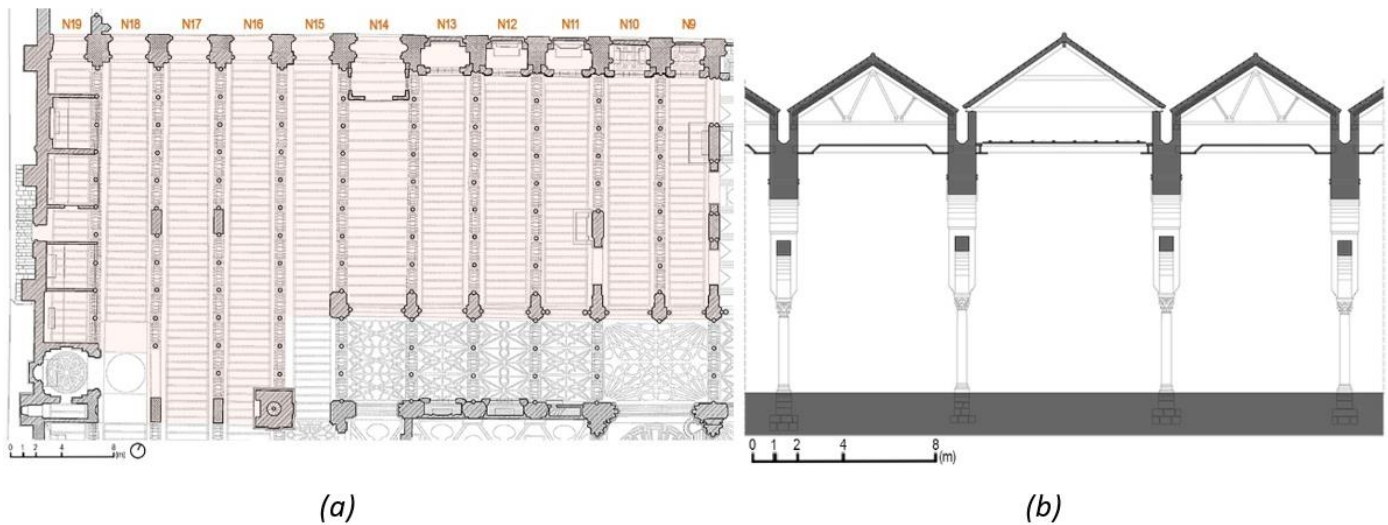


Fig. 2. (a) Planta del sector de Abd 'al-Rahman I, indicando el número de nave (N). (b) Detalle constructivo de la solución de cubierta: con cerchas de madera originales y metálicas del siglo XX.

OpenSees (McKenna *et al.* 2000). Previamente, la geometría se ha desarrollado en el software Rhinoceros (Rhino - Rhinoceros 3D, 2022). Para el modelado, se han empleado elementos de tipo sólido frente a otros elementos tipo barra o lámina que han sido empleados en otros trabajos similares para el modelado de edificios patrimoniales (Altunişik, *et al.* 2021), (Rossi *et al.*, 2015), (Cosgun, *et al.*, 2023). Los elementos tipo sólido han sido empleados en este trabajo porque permiten obtener un comportamiento preciso y exhaustivo de la relación tensión-deformación de los elementos y de los materiales.

El mallado, basado en el método de los elementos finitos, ha sido desarrollado en el software STKO (Petracca, *et al.*, 2020), un pre- y pos-procesador de OpenSees. Se ha realizado un mallado refinado para preservar lo máximo posible la configuración real del edificio en el modelo analítico (figura 3 (b)). El tamaño de la malla se ha definido a partir de la obtención de un compromiso aceptable entre el trabajo, el

tiempo computacional, la fiabilidad y la estabilidad de los resultados. Para ello, se han seguido las recomendaciones establecidas en (Vuoto, *et al.*, 2022), (D'Altri, *et al.*, 2022), seleccionando un tamaño de malla de 0.30 m para los elementos de los muros perimetrales y 0.20 m para los elementos interiores e irregulares. Debido a las irregularidades del edificio, se han tenido que emplear elementos sólidos de tipo tetraedro con 4 puntos de integración sobre el volumen. Este es el único elemento de tipo tetra que existe en OpenSees hasta la fecha. En total, el modelo numérico del sector contiene 1.124.353 elementos de tipo sólido y 306.386 nudos. Para simular el efecto de los edificios adyacentes, se han empleado elementos de contacto en 3D de cero longitud (figura 3 (a)), que han sido calibrados con los resultados experimentales del OMA.

## 2. Comportamiento no lineal

En este trabajo, se ha empleado un material de tipo daño-

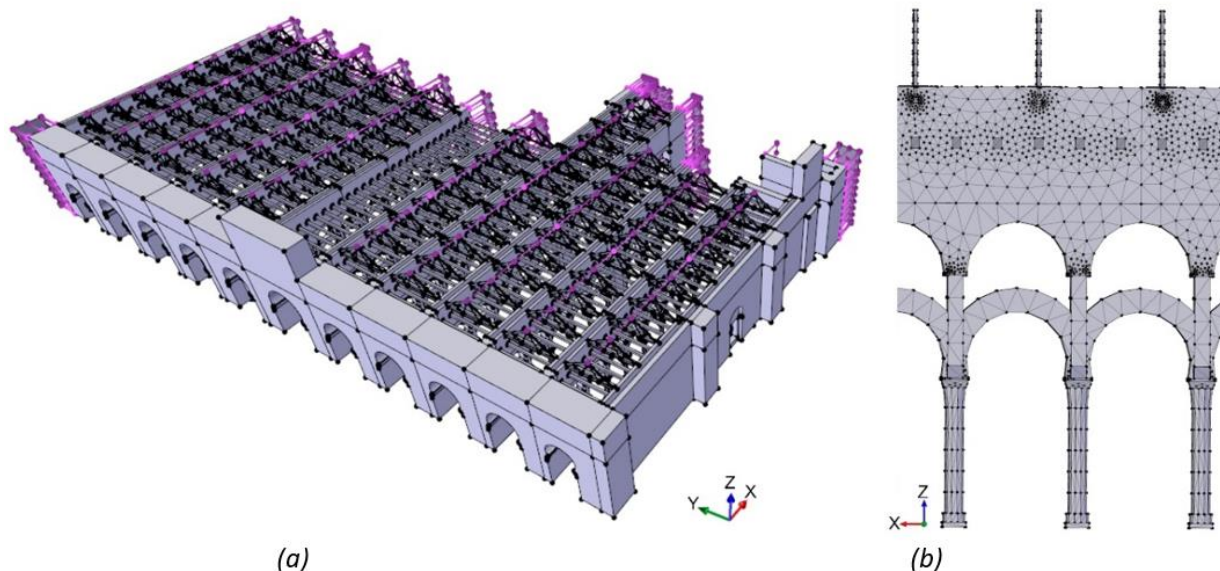


Fig. 3. Modelo numérico en 3D del sector (a). Detalle del mallado llevado a cabo (b).

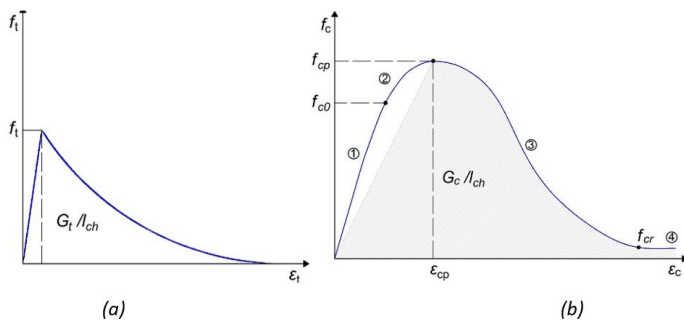


Fig. 4. Leyes constitutivas a tracción (a) y compresión (b) del material empleado, adaptado de [25].

plasticidad para simular el comportamiento no lineal del sistema. Este material, presentado en (Petracca, et al., 2017), ha sido empleado a partir del método macro-mecánico. Además, este material está recomendado para la simulación de materiales casi frágiles como la fábrica. Como se puede observar en la figura 4, el material presenta dos leyes constitutivas independientes en compresión y tracción. Estas han sido definidas según los diferentes parámetros mecánicos: la resistencia a compresión pico ( $f_{cp}$ ), la elástica ( $f_{c0}$ ) y la residual ( $f_{cr}$ ); la deformación para la resistencia a compresión pico ( $\epsilon_{cp}$ ); y la resistencia pico a tracción ( $f_t$ ). Como se establece en (Cattari *et al.*, 2021),  $f_{c0}$  y  $f_{cr}$  se definen como  $0,8f_{cp}$  y  $0,5f_{cp}$ , respectivamente.  $\epsilon_{cp}$  ha sido definida según los valores establecidos en (Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), 2012) para cada tipo de material constructivo identificado en el edificio. El comportamiento a tracción ha sido definido a partir de  $f_t$ . Los parámetros elásticos del módulo de elasticidad ( $E$ ) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) también son necesarios. Estos han sido obtenidos para cada material constructivo a partir de los ensayos experimentales y la revisión de la bibliografía disponible. La energía en compresión ( $G_c$ ) y en tracción ( $G_t$ ) se han calculado con las ecuaciones propuestas en (Petracca, et al., 2017). Estas energías son automáticamente

divididas por la longitud característica del elemento ( $l_{ch}$ ) para obtener una respuesta estructural que sea independiente del tamaño de la malla.

TABLA I

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MÁXIMA (MAX), MÍNIMA (MIN) AND MEDIA (MED) OBTENIDA CON LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL ESCLERÓMETRO, INCLUYENDO LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR ( $\sigma$ ).

MATERIAL	$f_{c,max}$ (MPa)	$f_{c,min}$ (MPa)	$f_{c,med}$ (MPa)	$\sigma$
Mármol	84	35	67	$\pm 7,90$
Granito	89	35	63	$\pm 8,16$
Caliza	89	59	75.5	$\pm 4,16$
Muros de fábrica de ladrillo cerámico	28,5	25	27	$\pm 1,10$
Muros de fábrica de piedra caliza	46	22	30.20	$\pm 4,70$

### 3. Campaña experimental y parámetros mecánicos

En el modelado de edificios históricos existen numerosas incertidumbres como las propiedades mecánicas y las dimensiones de los elementos o el proceso de construcción. Esto es particularmente importante en el caso de los edificios de fábrica, siendo una de las dificultades más complejas del análisis estructural (Cattari and Magenes, 2022). Además, el modelado se complejiza aún más debido a la imposibilidad de realizar ensayos destructivos en edificios patrimoniales. Por ello, como se indica en el estado del arte, para el calibrado de este tipo de modelos se hace uso de ensayos no destructivos como el OMA, para obtener resultados fiables.

En este trabajo, la campaña experimental sobre el edificio se ha basado en la realización de ensayos con: i) el esclerómetro de baja y alta percusión para obtener la resistencia a compresión de los elementos estructurales (figura 5 (a)); y, ii) acelerómetros triaxiales para medir las vibraciones ambientales sobre el edificio (figura 5 (b)), para posteriormente realizar un OMA y obtener el comportamiento dinámico global del edificio. En el



Fig. 5. (a) Realización de un ensayo con el esclerómetro sobre una de las columnas del sector. (b) Medición de las vibraciones ambientales con acelerómetros triaxiales sobre las arcadas para el posterior OMA.

TABLA II  
 PARÁMETROS MECÁNICOS CONSIDERADOS PARA EL CÁLCULO NUMÉRICO TRAS LA CALIBRACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

MATERIAL	$\rho$ (T/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	G (GPa)	$\nu$	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
Fábrica de ladrillo cerámico y mortero de cal	1,8	2,0	0,55	0,2	3,57	0,21
Fábrica de caliza y mortero de cal	1,8	1,8	0,42	0,3	2,78	0,10
Mármol	2,8	16	6	0,25	60-83,5	3-4,17
Granito	2,8	42	14	0,25	61-80	3,05-4
Piedra caliza	2,7	10	2	0,25	75,5-78	3,77-3,9
Madera (antiguas cerchas)	0,45	11	4	0,4	40	10
Acero (nuevas cerchas)	78	210	81	0,3	410	275

caso i), para cada elemento estructural, se han realizado 9 pruebas. Se ha obtenido que las columnas están compuestas principalmente de mármol (69%), granito (26%) and piedra caliza (5%). El valor máximo, medio y mínimo de la resistencia a la compresión simple ( $f_c$ ) obtenida para cada material se lista en la Tabla 1.

En el caso ii), se ha realizado la medición sobre las arcadas del sector y se han obtenido frecuencias que varían entre 2,38 y 4,72 Hz, para el primer y el segundo modo de vibración. Tras la calibración de los materiales, se ha obtenido un error en las frecuencias obtenidas de alrededor de  $\pm 3\%$ , al comparar los resultados experimentales con los analíticos. El coeficiente de complejidad obtenido al obtener las frecuencias experimentales es inferior al 10%. Tras la campaña experimental y la calibración, se han definido la  $f_c$ , el E y la densidad ( $\rho$ ). El resto de parámetros mecánicos han sido definidos según los valores propuestos en (Kržan, *et al.*, 2015), de acuerdo a los valores de  $f_c$ , E y  $\rho$ . En este caso, se trata del módulo de cortante (G), la  $f_t$  y  $\nu$ . En la tabla 2, se muestran los valores de los parámetros mecánicos que se han empleado para el cálculo numérico.

4. Análisis del daño sísmico

Para la evaluación de la demanda sísmica, se ha empleado el método N2 (Kržan *et al.*, 2000), que es el procedimiento

establecido en el Eurocódigo-8 parte-1 (EC8-1) (European Union, Eurocode 8, 2004). Además, se ha empleado el espectro de respuesta del EC8-1. La aceleración pico del suelo (PGA) se ha empleado como medida de referencia. Esta se ha definido de acuerdo a la actualización de los valores de la normativa sísmica española (Ministerio de Fomento de España, 2012), que determina que, para el municipio de Córdoba, la PGA es de 0,09g. Esta PGA está expresada para una probabilidad de superación del 10%, es decir, para un periodo de retorno de 475 años. Como se indica en el Eurocódigo-8 parte-3 (EC8-3) (European Union, Eurocode-8, 2005), esta probabilidad representa el estado de daño severo (DL3).

IV. RESULTS

1. Análisis estático no lineal vertical

El análisis estático no lineal vertical se ha realizado a partir del método incremental-iterativo aplicando las cargas verticales. Estas se han calculado considerando la densidad de los materiales (obtenidas en la calibración) y aplicadas como "VolumeForces", según el comando disponible en OpenSees. Para la aplicación de este patrón de carga, se ha empleado el integrador de tipo "load-control". En cuanto al tipo de análisis, se ha usado el método de "Penalty" para controlar los elementos

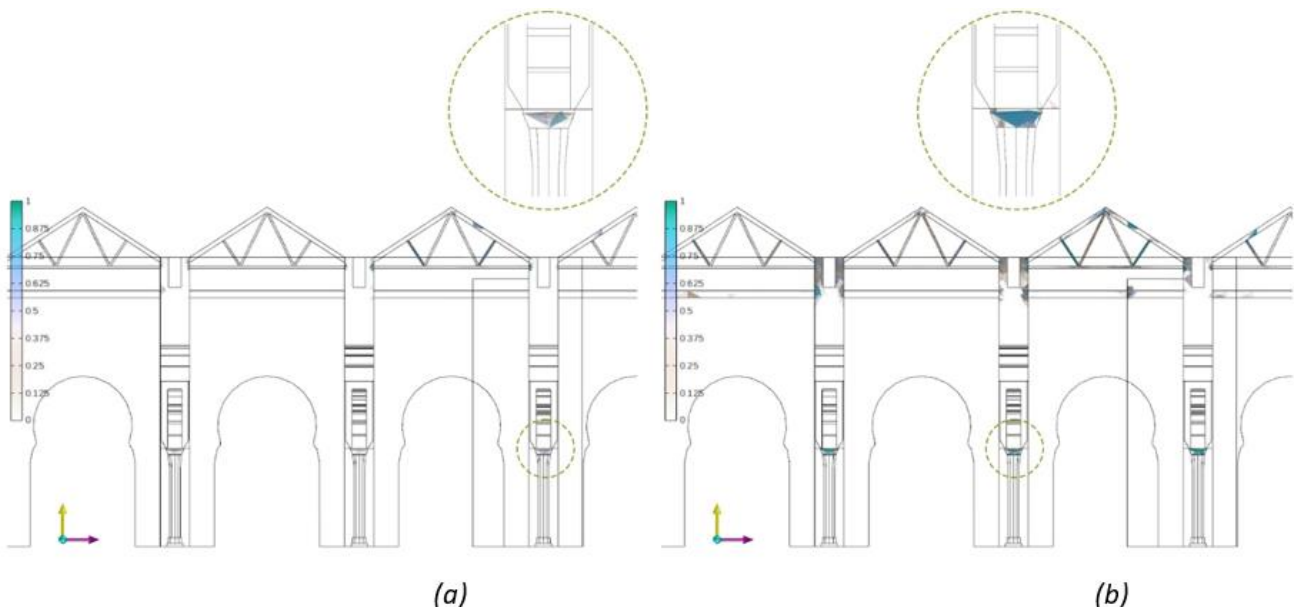


Fig. 6. Daño en compresión (d-) (a) y en tracción (d+) (b) tras la aplicación de las cargas verticales.

de contorno. Debido al tamaño del modelo, se han realizado los análisis en paralelo.

En la figura 6, se muestran los planos de daño en tracción (d+) y en compresión (d-) tras la aplicación de las cargas verticales (peso propio de los elementos estructurales y constructivos). El daño en los elementos estructurales varía de 0 a 1, siendo 0 sin daño y 1 daño completo. Como se puede observar, no existen elementos con daño completo tras la aplicación de estas cargas. Esta es la situación en la que se encuentra el edificio en la actualidad. Sin embargo, se observa que el daño se concentra en la mayor parte de los cimacios y llega a valores cercanos al 0,7 y 0,9 en compresión y en tracción, respectivamente. Esto puede ser debido a la configuración estructural del doble arco y capitel de las arcadas. En este caso, como se puede observar, los cimacios concentran las cargas que les llegan de ambos lados de los arcos y, por tanto, son las piezas más demandadas de todo el sistema. También se observa que el daño en tracción en los soportes de la cubierta varía entre 0,3-0,5.

## 2. Análisis estático no lineal horizontal

Para realizar el análisis estático no lineal horizontal, se ha empleado un único patrón de cargas proporcional a la masa del sistema estructural. Este patrón de cargas es generalmente aceptado para el análisis sísmico de edificios históricos (Vuoto, *et al.*, 2022), (Lagomarsino and Cattari, 2015). Este patrón de cargas, a diferencia del gravitacional, ha sido aplicado con el integrador de tipo “displacement-control”. El resto de parámetros del análisis son similares a los empleados en el análisis vertical. La carga se aplica en las dos direcciones principales del edificio, en la X (norte-sur) y en la Y (este-oeste), para los sentidos positivo y negativo. El desplazamiento último se ha obtenido considerando el 20% de la caída con respecto a la resistencia máxima de la curva de capacidad, como se sugiere en (Malcata *et al.*, 2020) y en el EC8-1.

En la figura 7, se muestran las curvas de capacidad obtenidas tras el análisis estático no lineal horizontal. Estas han sido normalizadas por un factor de carga (cortante basal,  $V_b$ , dividido por el peso propio,  $W$ , total de la estructura) y considerando el desplazamiento horizontal del nodo de control situado en la cubierta ( $d_{top}$ ). El punto de control se encuentra situado en el centro de masas (obtenido tras un análisis modal). Las curvas de capacidad se expresan para un sistema de un solo grado de libertad (SDOF). Como se puede observar, la rigidez inicial de las curvas es prácticamente similar. Sin embargo, el sistema presenta una capacidad resistente superior en la dirección X (norte-sur) comparada con la Y (este-oeste). Esto puede ser debido al efecto de arriostramiento producido en la dirección X de las arcadas.

Tras el análisis estático no lineal, se realiza la evaluación del desempeño sísmico. En este trabajo, se ha empleado el método propuesto en (Lagomarsino and Cattari, 2015) para el análisis del daño global en edificios patrimoniales. En total, se han determinado cuatro estados de daño, que se corresponden con diferentes límites de daño (DL): DL1, sin daño; DL2, limitación de daño; DL3, daño severo; y DL4, cercano al colapso o colapso. Cada DL se ha obtenido de la siguiente forma:

$DL1 \geq 0,5V_b$ ;  $DL2 = 0,95V_b$ ;  $DL3 = 0,8V_b$ ; and  $DL4 = 0,7V_b$ . Como se puede observar en la figura 7, el desplazamiento obtenido para la demanda sísmica (dtb), en ambas direcciones, se encuentra entre los límites de daño DL2-DL3. Como se define en (Lagomarsino and Cattari, 2015), este representa el estado de daño leve. Esto se refiere a que algunas de las partes del edificio serán dañadas levemente pero su reparación es sencilla. Además, también se puede observar que el daño esperado en la dirección Y (norte-sur) es mayor que en la dirección X (norte-sur).

## 3. Planos de daños

En este apartado, se presentan los planos de daños en 3D obtenidos para la demanda sísmica de la zona en las dos direcciones principales del edificio. Solo se presenta el daño en tracción puesto que no se ha observado daño excesivo en compresión. Como puede observarse en la figura 8(a) para la dirección +X, el daño a tracción se encuentra concentrado en: las partes bajas del muro norte del edificio y el contacto entre el muro norte y la primera fila de arcos. Para la dirección +Y, en la figura 8(b), se puede observar que el muro oeste podría resultar bastante dañado y, principalmente, en su parte baja. Además, el muro norte podría dañarse notablemente en su contacto con las arcadas transversales a este.

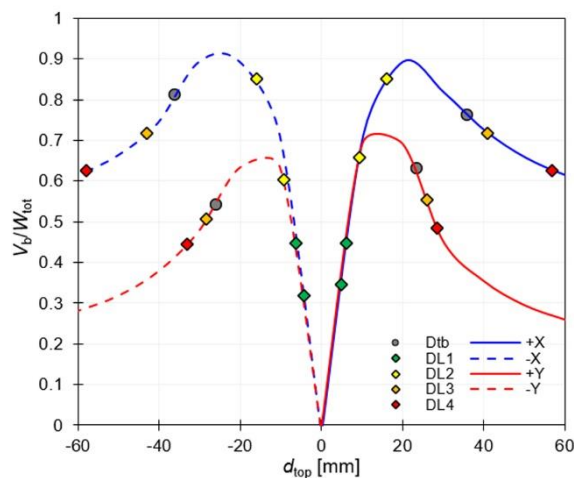


Fig. 7. Curvas de capacidad obtenidas y expresadas para un sistema SDOF, indicando los límites de daño.

## V. CONCLUSIONS

Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo numérico basado en la aplicación del método de los elementos finitos para determinar el comportamiento estructural y sísmico de un edificio patrimonial relevante, la Mezquita-Catedral de Córdoba. Dada la complejidad del edificio, este trabajo se ha centrado en el estudio del sector de Abd ‘al-Rahman I, que data del siglo VIII, siendo la parte más antigua de todo el monumento. La importancia de este trabajo radica en la peligrosidad sísmica moderada que existe en la zona donde se encuentra el edificio, el sur de la península ibérica. Además, este edificio ha sido declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO por su valor cultural, histórico y artístico. Por ello, el estudio detallado de su comportamiento sísmico y estructural

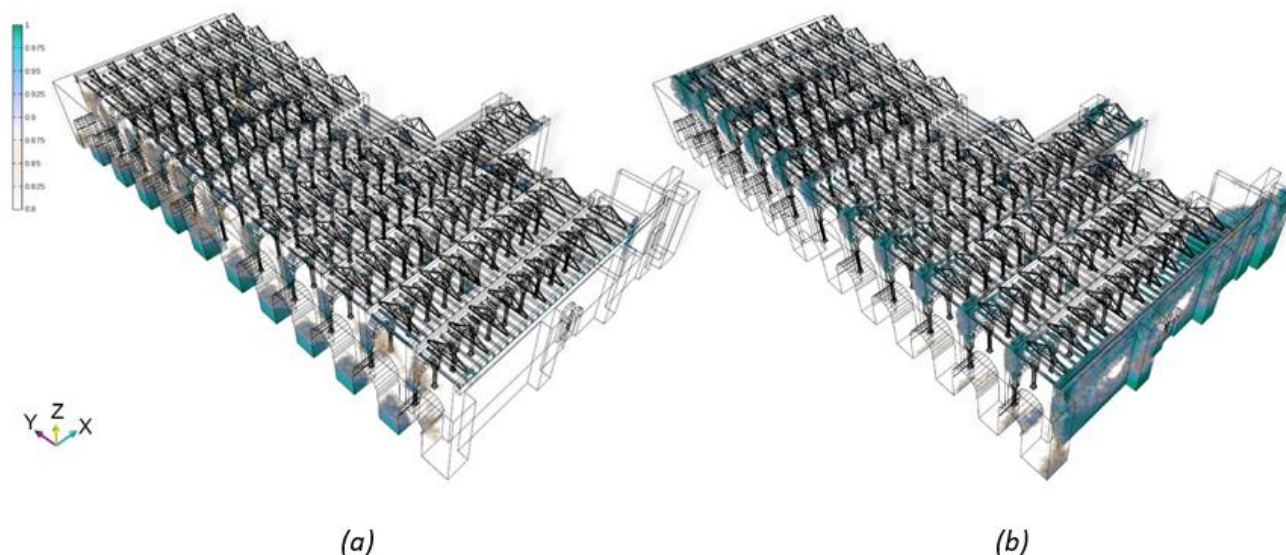


Fig. 8. Patrones de daño en tracción para las direcciones +X (a) y +Y (b).

es necesario. Además, no se habían realizado estudios de este tipo sobre el edificio y tampoco se han empleado técnicas avanzadas de modelado estructural.

En este trabajo, el modelo numérico en 3D se ha calibrado mediante ensayos no destructivos y de medición de las vibraciones ambientales del edificio a partir del OMA. Se ha obtenido que las columnas del sector están fundamentalmente compuestas de mármol (69%) y, en menor medida, de granito (26%) y piedra caliza (5%). Los resultados del análisis de cargas gravitacionales muestran que el daño obtenido se corresponde con la situación real del edificio: no existe daño, dado que ha sido reparado constantemente cuando lo ha habido. Se concluye que los elementos más demandados son los cimacios, ya que el daño adquiere valores cercanos a 1, fundamentalmente a tracción. El análisis no lineal horizontal ha resultado en la obtención de curvas de comportamiento diferentes para cada dirección analizada. En este caso, se han obtenido una mayor capacidad en la dirección +X (norte-sur), que puede ser debido al efecto de arriostramiento de las arcadas. De acuerdo con el daño obtenido, para la demanda sísmica de Córdoba según la normativa sísmica española, el daño esperado es leve y puede ser reparado fácilmente. El sector estudiado presenta un comportamiento sísmico peor en la dirección Y (este-oeste), por tanto, en esta dirección, el daño esperado es mayor.

Este trabajo presenta el análisis preliminar realizado por los autores para analizar el comportamiento estructural y sísmico de la Mezquita-Catedral de Córdoba. El objetivo de este trabajo es obtener un primer resultado y conclusiones sobre las cualidades de este monumento. Pese a las ventajas que supone el empleo de los análisis estáticos no lineales, estos llevan consigo ciertas simplificaciones y limitaciones. Por ello, para el análisis de edificios tan complejos como el caso de estudio, el empleo de este tipo de análisis no es suficiente para obtener una evaluación sísmica detallada. Por ello, como futuro desarrollo de este trabajo, se realizará un análisis exhaustivo del comportamiento dinámico del edificio, incluso considerando

los posibles efectos de la interacción suelo-estructura, que se ha probado que puede afectar notablemente al comportamiento de los edificios (Requena-García-Cruz *et al.*, 2022), (Requena-García-Cruz *et al.*, 2022).

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FEDER\_US-1380730, Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Los autores de este trabajo quieren agradecer el apoyo y facilidad en el acceso al Cabildo Catedralicio de Córdoba y, especialmente, al Profesor Gabriel Rebollo Puig, arquitecto encargado del edificio. Además, los autores quieren agradecer el apoyo ofrecido por el Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción.

#### REFERENCIAS

- Altunişik, A. C.; Sunca, F.; Genç, A.F.; Tavşan, C. "Post-Earthquake Damage Assessments of Historic Mosques and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses," *International Journal of Architectural Heritage*, pp. 1–36, Dec. 2021, doi: 10.1080/15583058.2021.2011475.
- Amaro-Mellado, J. L.; Morales-Esteban, A.; Asencio-Cortés, G.; Martínez-Álvarez, F. "Comparing seismic parameters for different source zone models in the Iberian Peninsula," *Tectonophysics*, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.tecto.2017.08.032.
- Amaro-Mellado, J. L.; Morales-Esteban, A.; Martínez-Álvarez, F., "Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system," *Cent Eur J Oper Res*, 2017, doi: 10.1007/s10100-017-0506-7.
- Asteris, P. G.; Cotsovos, D. M.; Chrysostomou, C. Z.; Mohebkhah, A.; Al-Chaar, G. K. "Mathematical micromodeling of infilled frames: State of the art," *Eng Struct*, vol. 56, pp. 1905–1921, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.08.010.
- Cattari S. et al., Nonlinear modeling of the seismic response of

- masonry structures: critical review and open issues towards engineering practice, no. 0123456789. Springer Netherlands, 2021. doi: 10.1007/s10518-021-01263-1.
- Cattari, S.; Camilletti, D.; D'Altri, A. M.; Lagomarsino, S. "On the use of continuum Finite Element and Equivalent Frame models for the seismic assessment of masonry walls," *Journal of Building Engineering*, vol. 43, no. January, p. 102519, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102519.
- Cattari S.; Magenes, G. "Benchmarking the software packages to model and assess the seismic response of unreinforced masonry existing buildings through nonlinear static analyses," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 1901–1936, Mar. 2022, doi: 10.1007/S10518-021-01078-0.
- Cattari S.; Magenes, G. "Benchmarking the software packages to model and assess the seismic response of unreinforced masonry existing buildings through nonlinear static analyses," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 1901–1936, Mar. 2022, doi: 10.1007/s10518-021-01078-0.
- Cosgun, T.; Akan, A. E.; Uzdil, O.; Örmecioglu, A. Er, H. T.; Sayin, B. "Post-restoration seismic performance assessment of a historic hypostyle mosque in Anatolia (13th century AD)," *Case Studies in Construction Materials*, p. e01849, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01849.
- D'Altri A. M. et al., "Modeling Strategies for the Computational Analysis of Unreinforced Masonry Structures: Review and Classification," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 1153–1185, 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09351-x.
- D'Altri, A. M.; Cannizzaro, F.; Petracca, M.; Talledo, D. A. "Nonlinear modelling of the seismic response of masonry structures: Calibration strategies," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 1999–2043, Mar. 2022, doi: 10.1007/S10518-021-01104-1.
- Dinani, A. T.; Bisol, G. D.; Ortega, J.; Lourenço, P. B. "Structural Performance of the Esfahan Shah Mosque," *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, no. 10, p. 05021006, Jul. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003108.
- Endo, Y.; Pelà, L.; Roca, P. "Review of Different Pushover Analysis Methods Applied to Masonry Buildings and Comparison with Nonlinear Dynamic Analysis," <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1210055>, vol. 21, no. 8, pp. 1234–1255, Nov. 2016, doi: 10.1080/13632469.2016.1210055.
- European Union, Eurocode-8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Brussels, Belgium, 2005. [Online]. Available: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/en.1998.3.2005.pdf>
- European Union, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Belgium, 2004.
- Fajfar, P. "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design," *Earthquake Spectra*, vol. 16, no. 3, pp. 573–592, 2000, doi: <https://doi.org/10.1193/1.1586128>.
- Fazendeiro Sá, L.; Morales-Esteban, A.; Durand, P. "A Seismic Risk Simulator for Iberia," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 106, no. 3, pp. 1198–1209, 2016, doi: 10.1785/0120150195.
- Herrero Romero, S. "Teoría y práctica de la restauración de la Mezquita-Catedral de Córdoba durante el siglo XX," Universidad Politécnica de Madrid, 2015. doi: 10.20868/UPM.thesis.39987.
- Kaya, A. et al., "Post-earthquake damage assessments of unreinforced masonry (URM) buildings by shake table test and numerical visualization," *Eng Fail Anal*, vol. 143, p. 106858, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106858.
- Kržan, M.; Gostič, S.; Cattari, S.; Bosiljkov, V. "Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 203–236, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10518-014-9686-x.
- Lagomarsino S. et al., "Classification of cultural heritage assets and seismic damage variables for the identification of performance levels," *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 118, pp. 697–708, Sep. 2011, doi: 10.2495/STR110581.
- Lagomarsino S.; Cattari, S. "PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 13–47, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10518-014-9674-1.
- Malcata, M.; Ponte, M.; Tiberti, S.; Bento, R.; Milani, G. "Failure analysis of a Portuguese cultural heritage masterpiece: Bonet building in Sintra," *Eng Fail Anal*, vol. 115, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2020.104636.
- McKenna, F.; Fenves, G. L.; Scott, M. H. OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center. Berkeley, CA: University of California, 2000. Accessed: Nov. 21, 2019. [Online]. Available: <https://opensees.berkeley.edu/>
- Ozcelik, O.; Misir, I. S.; Yucel, U.; Durmazgezer, E.; Yucel, G.; Amaddeo, C. "Model updating of Masonry courtyard walls of the historical Isabey mosque using ambient vibration measurements," *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 2022, pp. 1–16, Jul. 2022, doi: 10.1007/S13349-022-00610-3.
- Petracca, M.; Caneloro, F.; Camata, G. "'STKO user manual'. ASDEA Software Technology," Pescara, Italy, 2017. Accessed: Jul. 08, 2020. [Online]. Available: <https://asdeasoft.net/pdf/STKOUUserManual.pdf>
- Petracca, M.; Pelà, L.; Rossi, R.; Oller, S.; Camata, G.; Spacone, E. "Multiscale computational first order homogenization of thick shells for the analysis of out-of-plane loaded masonry walls," *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 315, pp. 273–301, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.cma.2016.10.046.
- Petracca, M.; Pelà, L.; Rossi, R.; Zaghi, S.; Camata, G.; Spacone, E. "Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear

- walls,” *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 296–314, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.130.
- Requena-García-Cruz, M. V.; Romero-Sánchez, E.; Morales-Esteban, A. “Numerical investigation of the contribution of the soil-structure interaction effects to the seismic performance and the losses of RC buildings,” *Developments in the Built Environment*, vol. 12, p. 100096, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.dibe.2022.100096.
- Requena-García-Cruz, M. V.; Bento, R.; Durand-Neyra, P.; Morales-Esteban, A. “Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon,” *Structures*, vol. 38, pp. 599–617, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.02.024.
- “Rhino - Rhinoceros 3D.” <https://www.rhino3d.com/> (accessed Nov. 10, 2022).
- Rossi, M.; Cattari, S.; Lagomarsino, S. “Performance-based assessment of the Great Mosque of Algiers,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 369–388, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10518-014-9682-1.
- Spanish Ministry of Public Works [Ministerio de Fomento de España], Update of the seismic hazard maps [Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España]. Spain, Spain, 2012.
- Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), SIA 266/2; SN 505266/2 (in German). Zürich, Switzerland, 2012. Accessed: Nov. 30, 2022. [Online]. Available: [http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/266-2\\_2012\\_d/D/Product](http://shop.sia.ch/normenwerk/ingenieur/266-2_2012_d/D/Product)
- Vuoto, A.; Ortega, J.; Lourenço, P. B.; Javier Suárez, F.; Claudia Núñez, A. “Safety assessment of the Torre de la Vela in la Alhambra, Granada, Spain: The role of on site works,” *Eng Struct*, vol. 264, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114443.
- Word Heritage Committee. United Nations Educational, “Inscription: The Mosque of Cordoba (Spain) (08COM IXA),” in Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage, 1984.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.