

Relevancia de la modelización de grietas en el comportamiento estructural de torres de tapia

Significance of crack modeling in the structural performance of rammed earth towers

Fernando Ávila^{*, a}, Esther Puertas^b, Celia Torrús^c, Rafael Gallego^d

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia. Profesor Ayudante Doctor. favila@mes.upv.es

^b Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Profesora Titular de Universidad. epuertas@ugr.es

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada. Egresada. tc.celia@gmail.com

^d Dr. Ingeniero Industrial. Universidad de Granada. Catedrático de Universidad. gallego@ugr.es

RESUMEN

La presencia de grietas en edificios históricos resulta frecuente, y aún más en estructuras de tapia. Aunque el uso de técnicas de análisis numérico para evaluar estructuras históricas está ampliamente extendido, pocos estudios consideran la existencia de grietas y su posible propagación ante nuevas cargas. Este estudio utiliza el método de los elementos finitos extendido (XFEM) para modelar y analizar estructuras de tapia, tomando como caso de estudio la Torre de Muhammad de la Alhambra de Granada. Se realizan análisis frente a cargas gravitacionales y sísmicas (*pushover*), demostrando la capacidad del XFEM para predecir la propagación del daño y el efecto de las grietas en el comportamiento estructural de la torre.

ABSTRACT

The presence of cracks in historical buildings is common, particularly in rammed earth structures. Although numerical analysis techniques for assessing historical structures are widely used, few studies take into account the existence of cracks and their potential propagation under new load conditions. This study applies the extended finite element method (XFEM) to model and analyze rammed earth structures, using the Tower of Muhammad at the Alhambra of Granada as a case study. Analyses under gravitational and seismic loads (*pushover*) are conducted, demonstrating the ability of XFEM to predict damage propagation and the impact of cracks on the tower's structural behavior.

PALABRAS CLAVE: tapial, propagación de grietas, XFEM, análisis pushover, torre, Alhambra.

KEYWORDS: rammed earth, crack propagation, XFEM, pushover analysis, tower, Alhambra.

1. Introducción

El uso de técnicas numéricas para analizar el fallo de estructuras basado fundamentalmente en criterios de tensiones y deformaciones, ampliamente extendido en el análisis estructural [1], resulta en ocasiones insuficiente, especialmente los materiales que componen la estructura son frágiles o cuasi-frágiles. Este es el caso de las estructuras de tapia, cuya elevada masa y reducida resistencia a tracción las hace

potencialmente vulnerables a la acción sísmica [2,3], que puede conllevar la formación de grietas que modifiquen de manera sustancial su configuración estructural, y por tanto su resistencia [4,5].

Diversos estudios apuntan a que, frente a la acción sísmica, el fallo de los elementos de tapial está frecuentemente inducido por la concentración de tensiones tangenciales que

deriva en la formación y posterior propagación de grietas en el material, siendo precisamente su resistencia frente a estas tensiones tangenciales determinante en su comportamiento sísmico [6,7].

Pese a la relevancia de la formación y propagación de las grietas en el comportamiento estructural y sísmico de las estructuras de tapia, su estudio en la literatura científica actual se ha limitado principalmente a la realización de ensayos de laboratorio de compresión diagonal [8–10] y de fractura [11]. Se detecta una carencia, en este sentido, de modelos de estructuras complejas de tapia que tengan en consideración la presencia de grietas para el análisis estructural de las mismas, especialmente en condiciones sísmicas.

En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de la modelización de las grietas presentes en la tapia para el comportamiento estructural de torres realizadas con este material, presentes en numerosas zonas del Sur y Levante español [12], sin olvidar numerosos ejemplos en otros lugares del mundo. En concreto, y a través de técnicas de modelización numérica, se busca analizar el efecto que en la carga última y en la rigidez de las torres de tapia tiene la consideración o no del sistema de grietas presente en la estructura.

El trabajo realizado toma como caso de estudio la Torre de Muhammad de la Alhambra de Granada (España), construida con tapia

estabilizada con cal durante el siglo XIII y que ha sufrido varios episodios sísmicos a lo largo de su historia. De este modo, se ha realizado un modelo tridimensional de la torre y se ha sometido a cargas gravitatorias y sísmicas, estas últimas a través de un análisis de tipo *pushover*. El modelo se ha analizado de dos formas: mediante el método de los elementos finitos (MEF) y mediante el método extendido de los elementos finitos (*extended finite element method*, XFEM), que permite caracterizar la propagación de grietas mediante funciones de interpolación añadidas al campo de desplazamientos [13].

2. Caracterización de la Torre de Muhammad

2.1 Contexto histórico

La Torre de Muhammad de la Alhambra (**Figura 1**) data del siglo XIII, a comienzos del periodo Nazarí, ordenada construir probablemente durante el mandato de Muhammad II, emir de Granada entre los años 1273 y 1302 [14]. También es conocida como Torre de las Gallinas, por su uso como gallinero durante el siglo XIX, y como Torre de Hontiveros, por un soldado que residió en ella a finales del siglo XVI. Situada en el muro norte de la fortaleza, la torre ocupa una posición defensiva estratégica entre la Alcazaba y los Palacios Reales.

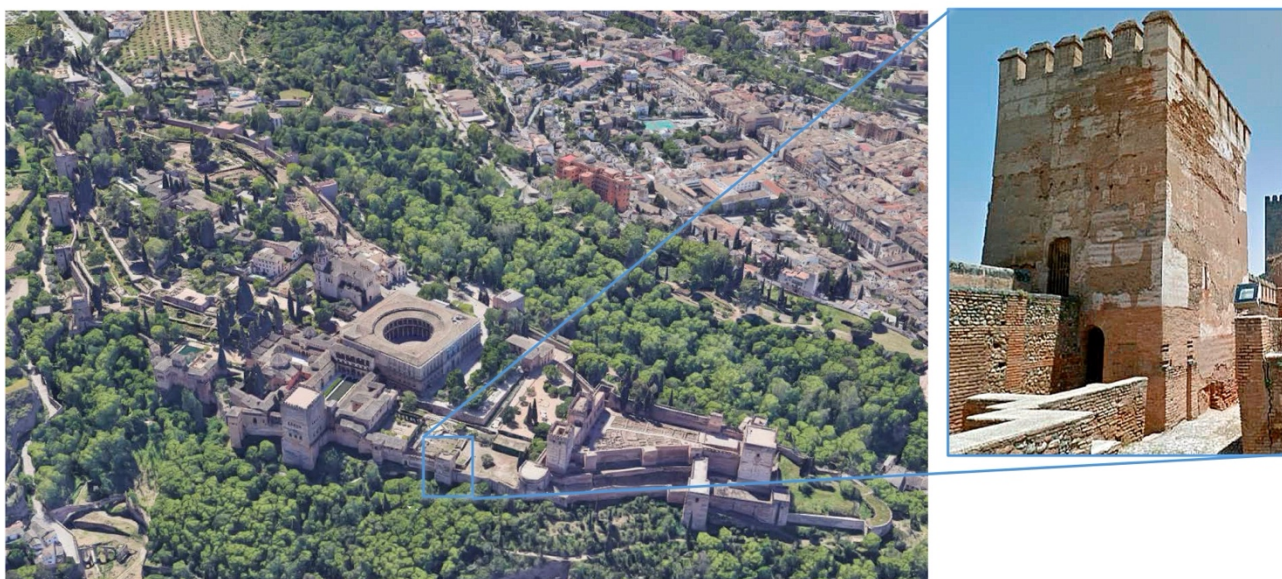


Figura 1. Situación de la Torre de Muhammad y vista desde el interior de la Alhambra.

La torre se construyó inicialmente mediante la técnica del tapial, compactando sucesivas capas de tierra entre encofrados recuperables y empleando cal como estabilizante. Desde entonces, a lo largo de los siglos, ha sufrido numerosas alteraciones y modificaciones, incluidos los efectos derivados el gran terremoto de julio de 1941, la explosión de una fábrica de pólvora cercana en 1590 y los efectos del abandono y falta de mantenimiento en los años sucesivos.

El colapso de la torre sólo pudo evitarse gracias a las intervenciones realizadas primero en 1929 por el arquitecto Torres Balbás [15] y posteriormente, en 1974, por el arquitecto Prieto-Moreno y Pardo [16]. Pese a ello, la estructura se encuentra en una situación vulnerable, con grietas y pérdidas de revestimiento en la tapia que son claramente visibles en sus muros, y que se han visto

agravadas por los últimos eventos sísmicos sucedidos en enero de 2021 [17,18].

2.1 Geometría y materiales

La Torre de Muhammad, de 15.9 m de altura (incluyendo las almenas de 1.2 m), tiene planta trapezoidal, con 9.0 m de longitud en sus caras sur y norte, 6.6 m en la cara oeste y 6.0 m la este. El espesor de los muros es variable, de los 1.45 m a los 1.80 m. En altura, la torre se divide en dos plantas más una terraza. Las dos plantas interiores se dividen en dos estancias aproximadamente rectangulares y cuentan con dos aspilleras cada una en el muro norte. La segunda planta tiene bóvedas de cañón que sujetan la terraza superior. Escaleras en el muro sur permiten la conexión entre plantas, mientras que otra escalera en la primera planta permite el acceso a la muralla a través de una apertura en el muro oeste. La geometría de la torre se muestra en detalle en la **Figura 2**.

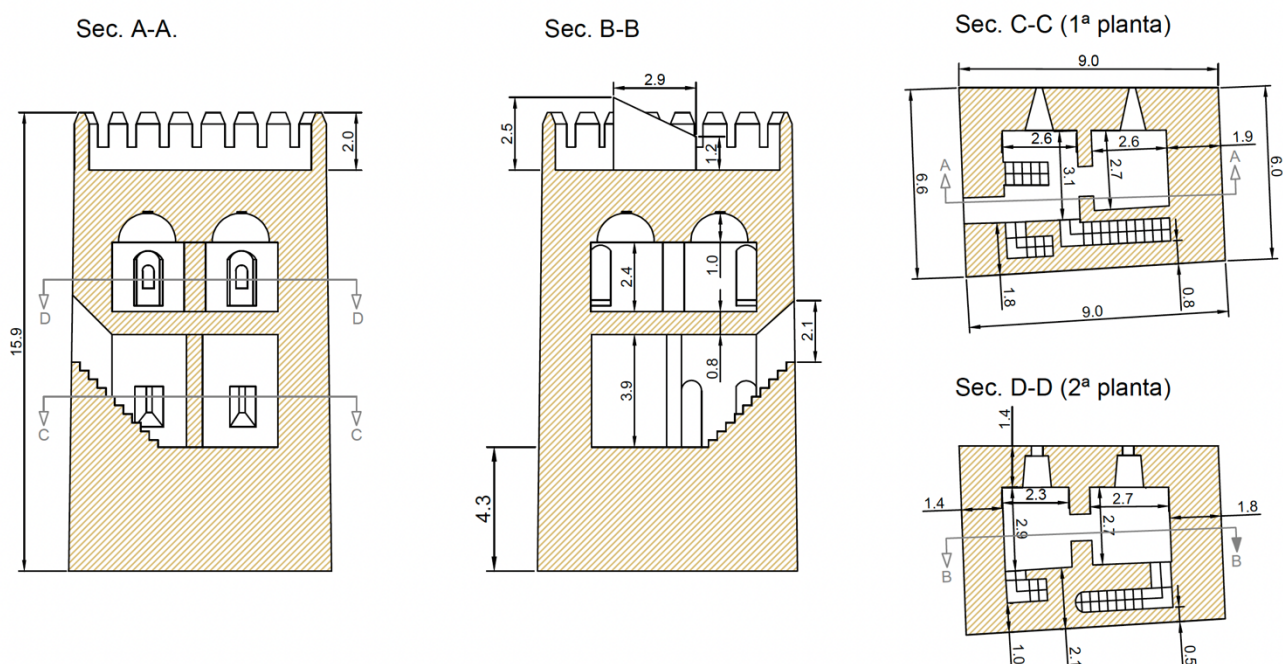


Figura 2. Geometría de la Torre de Muhammad. Principales dimensiones (en metros).

La estructura de la torre está realizada en tapia estabilizada con cal, técnica ampliamente extendida en la construcción de la época e identificable en numerosos edificios de la Alhambra. La tapia empleada se compone de una mezcla de arena con arcilla ferruginosa y grava fina, junto con un porcentaje significativo de cal, que ronda el 20% [19,20].

Ante la ausencia de investigaciones específicas sobre las características mecánicas de los materiales de la Torre de Muhammad, tiene sentido atender a los estudios realizados por González Limón [19] para la vecina torre de Comares, construida unas décadas más tarde con las mismas técnicas y materiales [21]. Las propiedades obtenidas por dicho autor, que han sido validadas por estudios posteriores que han desarrollado modelos de elementos finitos de la Torre de Comares [22,23], junto con los valores de cohesión, ángulo de rozamiento interno y ángulo de dilatación definidos en consonancia con la literatura existente para tapia estabilizada [24] se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la tapia empleadas en el presente estudio.

Propiedad	Valor
Densidad	2250 kg/m ³
Módulo elástico	920 MPa
Coefficiente de Poisson	0.30
Resistencia a compresión	2.45 MPa
Resistencia a tracción	0.30 MPa
Cohesión	0.23 MPa
Ángulo de rozamiento interno	42°
Ángulo de dilatación	12°

Estudios recientes [18] han detectado degradación del material de tapia de la torre en los muros externos, con zonas afectadas por la erosión y la pérdida del calicostado, especialmente en la mitad superior de los muros. Asimismo, se observan grietas significativas en los muros sur y este, desarrollándose en diagonal desde la base de las almenas centrales hasta las aristas de la torre. La fachada norte presenta un mejor estado, aunque se detecta erosión en su parte inferior y junto a las ventanas de la segunda planta, mientras que el muro oeste presenta

grietas verticales más cortas pero abundantes en su tramo superior.

3. Modelo de cálculo y métodos de análisis

La evaluación del comportamiento sísmico de la estructura se realiza sobre dos modelos tridimensionales, de igual geometría, realizados en el software de cálculo con elementos finitos Abaqus v22.

El primer modelo, que no incluye grietas, cuenta con una malla de 107118 elementos tetraédricos de cuatro nodos, y está refinada en la zona cercana a las ventanas y en las bóvedas (Figura 3). El segundo modelo, por su parte emplea el llamado XFEM o método extendido de los elementos finitos para modelizar la presencia de grietas en el material y permitir su propagación ante situaciones incrementales de carga.

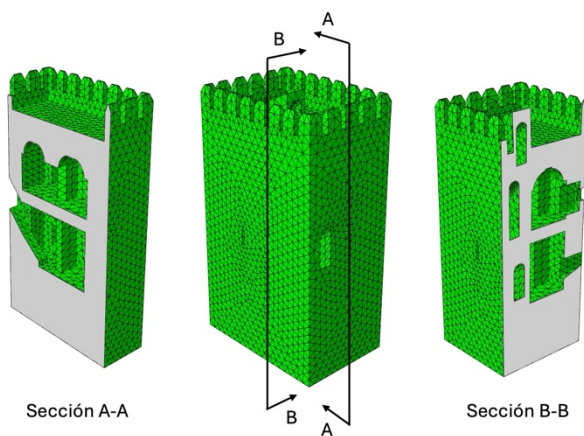


Figura 3. Modelo de elementos finitos de la torre. Vista sureste y secciones.

Para este segundo modelo, se introducen desde el inicio del análisis en la estructura las grietas presentes en la torre y que corresponden a un nivel de daño 3 (pérdida parcial de recubrimiento, grietas y pérdida de masa moderada) y 4 (pérdida total de recubrimiento, grietas, rotaciones y pérdida de masa significativa), según se define en [25]. La profundidad media considerada es de 10 cm, atendiendo a las mediciones realizadas. Las

grietas introducidas en el estado inicial del modelo se muestran en la Figura 4. La presencia de las grietas obliga a refinar la malla en amplias zonas de la torre, por lo que se opta por aplicar una malla más fina a la totalidad del modelo.

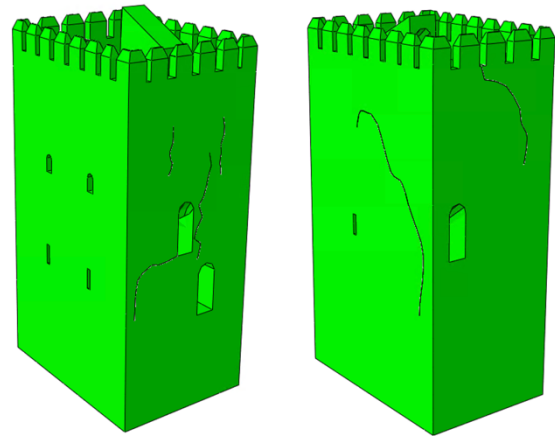


Figura 4. Grietas iniciales introducidas en el modelo XFEM. Vista noroeste (izq.) y sureste (dcha.).

Tanto para el modelo sin grietas como para el modelo XFEM, la torre se considera empotrada en su base, y el comportamiento del material se modeliza mediante el modelo de comportamiento plástico de Mohr-Coulomb [26], con las propiedades del material descritas en el apartado anterior. Adicionalmente, para la propagación de grietas es necesario indicar un valor de la energía de fractura, que según algunos estudios [9,27] puede estimarse como $0.029f_t$, siendo f_t la resistencia a tracción del material. De este modo, se obtiene un valor de la energía de fractura de 9 N/mm.

Ambos modelos se someten en primer lugar, para una primera caracterización dinámica y como paso previo al análisis sísmico, a un análisis modal a peso propio. A continuación el estudio en situación sísmica se simula a través de un análisis *pushover*. Este tipo de análisis estáticos no lineales basados en desplazamientos son ampliamente empleados para la evaluación sísmica de edificios, con diversos ejemplos de su uso en estructuras de tapia [28–30]. La ventaja de los análisis *pushover* radica en su capacidad para ofrecer una aproximación de la respuesta sísmica de la estructura con un coste computacional

significativamente inferior al de un análisis dinámico.

El análisis *pushover* se realiza en la dirección norte-sur, por ser la más vulnerable para la torre debido a la presencia del Tajo de San Pedro, de precaria estabilidad, en la base del muro norte. El espectro elástico empleado para definir el análisis corresponde al indicado por la Norma de Construcción Sismorresistente española (NCSE-02) [31] para la ubicación de la torre, en el centro de Granada, y un periodo de retorno de 500 años. La aceleración sísmica básica en la zona de estudio es de 0.23g, que –con un suelo tipo II ($V_s = (519 \pm 8) \text{ m/s}$) [32] y considerando la estructura como de especial interés– da lugar a una aceleración de cálculo de 0.31g.

4. Resultados y discusión

Los resultados del análisis modal preliminar realizado en la torre muestran ya los efectos de la inclusión de las grietas en el modelo de la estructura. Como se observa en la Tabla 2, la presencia de las grietas reduce las frecuencias naturales de los tres primeros modos de vibración de la estructura entre un 5 y un 13 %, aproximadamente. Los dos primeros modos corresponden a la flexión en la dirección norte-sur y este-oeste, respectivamente, mientras que el tercer modo es de torsión.

Tabla 2. Frecuencias naturales (f) de los tres primeros modos de vibración de la torre.

Modo	Sin grietas	Con grietas	Δf
1	3.40 Hz	3.10 Hz	8.8 %
2	4.59 Hz	3.97 Hz	13.5 %
3	6.74 Hz	6.41 Hz	4.9 %

En ausencia de datos experimentales con los que validar el modelo, los resultados modales obtenidos pueden compararse con los obtenidos mediante la formulación propuesta en la NCSE-02:

$$f[\text{Hz}] = \frac{\sqrt{L}}{0.06H\sqrt{H/(2L+H)}} \quad (1)$$

Donde H y L , en metros, son la altura del edificio por encima del nivel del suelo y su longitud total en la dirección de oscilación, respectivamente. De este modo, se obtiene un valor de 3.2 Hz para el primer modo de vibración y 4.1 Hz para el segundo. Pese a que esta fórmula está inicialmente diseñada para edificios de mampostería, los resultados orientativos que ofrece son razonablemente similares a los obtenidos en el presente estudio para la Torre de Muhammad.

Si comparamos los resultados de los modos naturales de flexión con los de otras torres de la Alhambra, podemos considerar que son razonablemente similares teniendo en cuenta las diferencias geométricas y de conservación entre las torres. Así, por ejemplo, estudios previos indican como dos primeras frecuencias fundamentales 3.1 Hz y 3.7 Hz para la Torre de la Vela [33], o 3.1 Hz y 3.5 Hz para la Torre del Homenaje [34].

A continuación, como se ha indicado, se realiza el análisis estático no lineal de tipo *pushover* para la evaluación del comportamiento sísmico de ambos modelos, con y sin grietas. Los principales resultados pueden verse resumidas en la curva *pushover* (fuerza-desplazamiento) de la

Figura 5.

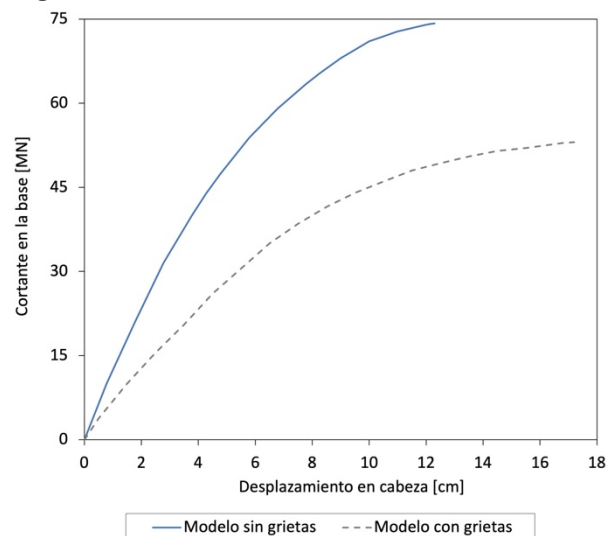


Figura 5. Curva *pushover*: cortante en la base frente a desplazamiento horizontal en cabeza.

Es posible observar que la presencia de las grietas y su propagación en el modelo conllevan una reducción del máximo cortante en la base del 28%, pasando de los 74 MN a unos 53 MN. Además, se aprecia una notable pérdida de rigidez de la estructura, que llega a alcanzar desplazamientos horizontales en cabeza de hasta 17 cm para cortante máximo en el caso de la estructura con grietas frente a los menos de 12 cm cuando la estructura sin grietas alcanza la fuerza de empuje máxima.

Atendiendo a los resultados del análisis y teniendo en cuenta que el peso de la torre es de aproximadamente 1415 toneladas, se obtiene que la aceleración equivalente alcanzada es de 5.2g y 3.7g para las situaciones sin y con grietas, respectivamente. Estos valores son muy superiores al sismo esperable en la zona con periodo de retorno de 500 años según la normativa española (0.31g).

La capacidad última de la torre –muy por encima del sismo de proyecto en la zona incluso considerando la presencia de grietas– muestra que, pese al delicado estado de conservación de la estructura, ésta aún se encuentra lejos del fallo. Esto es prueba de la notable capacidad resistente frente a cargas horizontales de las torres de tapia, gracias a su masividad y pese a la reducida resistencia a tracción del material, como previamente han indicado diversos estudios previos sobre otras torres de la Alhambra [22,33,35,36].

Adicionalmente, el modelo XFEM realizado en la torre permite evaluar la propagación de las grietas principales observadas en la torre, y compararla con los patrones de grietas y zonas dañadas observados en los muros del edificio. La **Figura 6** permite apreciar la propagación de las grietas en la estructura mediante el análisis de la variable de Abaqus STATUSXFEM, que indica el estado de los elementos enriquecidos, adoptando valores entre 0 (si el elemento no tiene ninguna grieta) y

1 (si el elemento está completamente fracturado).

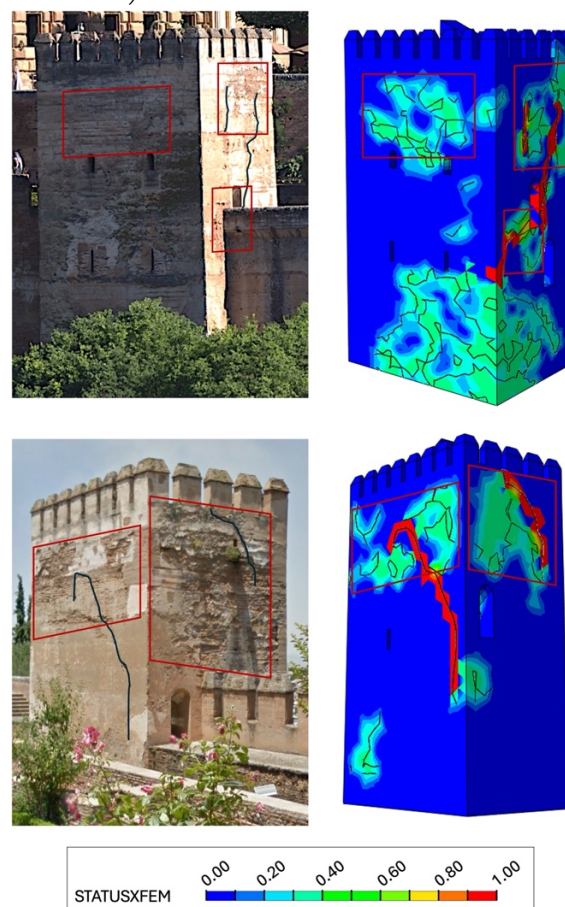


Figura 6. Propagación de grietas: estado actual de la torre y resultado del análisis *pushover*.

Se observa una importante presencia de daño en la parte inferior de la torre por propagación de grietas, especialmente en la esquina noroeste. La presencia de grietas es también notable en la parte superior de la torre, en todas las fachadas. El resultado contrasta con lo observado en el modelo sin grietas, donde el deterioro del material (llegando a la plastificación) se limita a la mitad inferior de la estructura, y concuerda con el daño realmente presente en los muros de la torre. Estos resultados permiten afirmar la capacidad del modelo XFEM creado para predecir la propagación del daño por agrietamiento de la tapia.

5. Conclusiones

Las estructuras de tapia son potencialmente vulnerables los eventos sísmicos, debido a la gran masa movilizada y a su escasa resistencia a tracción y cortante. Esto, junto a otros factores de degradación, da lugar a la aparición de fisuras y grietas en el material que modifican la respuesta estructural del edificio y pueden comprometer su resistencia frente a terremotos posteriores. Es por ello que la inclusión de las grietas ya presentes en estas estructuras se antoja esencial en la elaboración de modelos de análisis numérico.

En el presente estudio, y con el objetivo de evaluar el efecto y relevancia de la consideración de estas grietas en los modelos estructurales, se llevan a cabo análisis modales y sísmicos (mediante el método pseudo-estático del análisis *pushover*) en dos modelos de una misma estructura, con y sin grietas. La estructura elegida para el estudio es la Torre de Muhammad de la Alhambra de Granada (España) y el análisis se realiza mediante el método de los elementos finitos, utilizando el llamado método extendido de los elementos finitos (XFEM) para el caso de la inclusión de las grietas.

Los resultados muestran que la inclusión de las grietas reduce en hasta una media del 10% las tres primeras frecuencias fundamentales de la estructura y en un 28% la máxima capacidad de carga horizontal de la torre, asociada esta disminución con una significativa pérdida de rigidez del sistema. Es posible concluir, atendiendo a los resultados del caso analizado, que la presencia de grietas resulta efectivamente perjudicial para el comportamiento sísmico de la estructura, siendo relevante considerar su inclusión en los modelos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de torres de tapia. Los resultados obtenidos, además, apuntan a la capacidad del modelo XFEM para predecir correctamente la propagación de las grietas y, por tanto, del deterioro de la estructura asociado.

Las conclusiones del presente estudio apuntan a la necesidad de que las evaluaciones de vulnerabilidad del patrimonio en tapia contemplen la presencia de las grietas existentes a la hora de desarrollar los modelos numéricos, pudiendo así tomar decisiones de conservación ajustadas a la capacidad estructural real de estas construcciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado mediante una Ayuda para la Formación de Profesorado Universitario (FPU18/03607) del Ministerio de Universidades del Gobierno de España a Fernando Ávila. El estudio se ha desarrollado dentro del marco de la Unidad Científica de Excelencia “Ciencia en la Alhambra”, y se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Estructural Sostenible (SES-Lab) del Grupo de Investigación TEP167.

Referencias

- [1] J.L. Curiel-Sosa, R. Brighenti, M.C. Serna Moreno, E. Barbieri, Computational techniques for simulation of damage and failure in composite materials, in: Struct. Integr. Durab. Adv. Compos., Elsevier, 2015: pp. 199–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100137-0.00008-0>.
- [2] F. Ávila, Mechanical, structural and seismic behavior of rammed earth constructions, PhD thesis, University of Granada and University of Florence, 2023. <https://hdl.handle.net/10481/80013>.
- [3] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada, (2004).
- [4] Q.B. Bui, T.T. Bui, Seismic behaviour of rammed earth walls: a time history analysis, Springer Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_19.

- [5] A. Preciado, A. Ramirez-Gaytan, J.C. Santos, O. Rodriguez, Seismic vulnerability assessment and reduction at a territorial scale on masonry and adobe housing by rapid vulnerability indicators: The case of Tlajomulco, Mexico, *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 44 (2020) 101425. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101425>.
- [6] L. Miccoli, A. Drougkas, U. Müller, In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: Experimental testing and finite element modelling, *Eng. Struct.* 125 (2016) 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.010>.
- [7] T.T. Bui, Q.B. Bui, A. Limam, S. Maximilien, Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications, *Constr. Build. Mater.* 51 (2014) 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.053>.
- [8] F. Ávila, M. Fagone, R. Gallego, E. Puertas, G. Ranocchiai, Experimental and numerical evaluation of the compressive and shear behavior of unstabilized rammed earth, *Mater. Struct.* 56 (2023) 118. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02206-9>.
- [9] L. Miccoli, D. V Oliveira, R.A. Silva, U. Müller, L. Schueremans, Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 3443–3456. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0411-7>.
- [10] G.S. Pavan, S.N. Ullas, K.S. Nanjunda Rao, Shear behavior of cement stabilized rammed earth assemblages, *J. Build. Eng.* 27 (2020) 100966. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100966>.
- [11] I. Arto, R. Gallego, H. Cifuentes, E. Puertas, M.L. Gutiérrez-Carrillo, Fracture behavior of rammed earth in historic buildings, *Constr. Build. Mater.* 289 (2021) 123167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123167>.
- [12] F. Vegas, C. Mileto, V. Cristini, L. García Soriano, La tapia en la Península Ibérica, in: C. Mileto, F. Vegas (Eds.), *La Restauración La Tapia En La Península Ibérica. Criterios, Técnicas, Result. y Perspect.*, Argumentum - TC Cuadernos, Lisbon, Portugal, 2014: pp. 32–51. https://resarquitectura.blogs.upv.es/?page_id=258.
- [13] Z. Zhuang, Z. Liu, B. Cheng, J. Liao, Fundamental Concept and Formula of X-FEM, in: *Ext. Finite Elem. Method*, Elsevier, 2014: pp. 51–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407717-1.00004-2>.
- [14] J.A. Vilar Sánchez, *Murallas, torres y dependencias de la Alhambra*, 1st ed., Editorial Comares S.L., 2016.
- [15] L. Torres Balbás, *Proyecto de obras complementarias de la Torre de Comares*, (1932).
- [16] A. Romero Gallardo, Prieto-Moreno, arquitecto conservador de la Alhambra (1936-1978): razón y sentimiento, Patronato de la Alhambra y Generalife, Granada, Spain, 2014.
- [17] A. Santos, J.M. Martínez, J.L. Salinas, Caracterización geotécnica de las condiciones de cimentación de los edificios y estabilidad de las laderas del conjunto monumental de la Alhambra y Generalife, *Rev. Digit. Del Cedex* 96 (1994) 77–86. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/1019>.
- [18] J.M. López Osorio, *Proyecto de urgencia técnica para la consolidación de merlones y paramentos de la Torre de las Gallinas - I. Memoria*, Granada, Spain, 2021.
- [19] T. González Limón, M. Álvarez de Buergo, A. de las Casas Gómez, *Estudio*

- de los materiales y de las fábricas de la Torre de Comares de la Alhambra, Cuad. La Alhambra 33–34 (1997) 95–104.
- [20] V. Cuéllar Mirasol, Caracterización dinámica de los materiales, Cuad. La Alhambra 33–34 (1997) 105–114. <https://cuadernosdelaalhambra.alhambra-patronato.es/index.php/cdalhambra/issue/view/29/34>.
- [21] A. Orihuela Uzal, Casas y palacios nazaríes. Siglos XIII-XV, Barcelona, Spain, 1996.
- [22] M.Á. Astiz, The importance of earthquake - The case of the Comares tower in the Alhambra palace of Granada, in: P. Roca, J.L. Gonzáles, E. Oñate, P.B. Lourenço (Eds.), Struct. Anal. Hist. Constr. II, CIMNE, Barcelona, Spain, 1998: pp. 19–37. <http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/1998/19.pdf>.
- [23] J. Martínez, F. Ávila, E. Puertas, A. Burgos, R. Gallego, Historical and architectural study for the numerical modeling of heritage buildings: the Tower of Comares of the Alhambra (Granada, Spain), Inf. La Construcción 74 (2022) e429. <https://doi.org/10.3989/ic.86683>.
- [24] F. Ávila, E. Puertas, R. Gallego, Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth: A review, Constr. Build. Mater. 325 (2022) 126693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126693>.
- [25] J.M. López Osorio, Proyecto MURALH: Fábricas históricas del recinto amurallado de la Alhambra, 2019.
- [26] Dassault Systèmes, Mohr-Coulomb plasticity. Abaqus Analysis User's Manual, Abaqus Anal. User's Man. (2010). <http://130.149.89.49:2080/v6.10/books/usb/default.htm?startat=pt05ch20s03abm31.html>.
- [27] R.A. Silva, D. V Oliveira, L. Miccoli, L. Schueremans, Modelling of Rammed Earth Under Shear Loading, SAHC2014 - 9th Int. Conf. Struct. Anal. Hist. Constr. (2014) 14–17.
- [28] Q.B. Bui, T.T. Bui, A. Limam, Assessing the seismic performance of rammed earth walls by using discrete elements, Cogent Eng. 3 (2016) 1200835. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1200835>.
- [29] E. Giordano, F. Clementi, A. Nespeca, S. Lenci, Damage assessment by numerical modeling of Sant'Agostino's Sanctuary in Offida during the Central Italy 2016-2017 seismic sequence, Front. Built Environ. 4 (2019) 1–17. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00087>.
- [30] R. El Nabouch, Q.B. Bui, O. Plé, P. Perrotin, Assessing the in-plane seismic performance of rammed earth walls by using horizontal loading tests, Eng. Struct. 145 (2017) 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.027>.
- [31] Ministerio de Fomento (Spain), NCSE-02. Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación, (2009). https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf.
- [32] M. Navarro, A. García-Jerez, F. Vidal, M. Feriche, T. Enomoto, G. Alguacil, Análisis de los efectos de sitio en la ciudad de Granada (sur de España) a partir de medidas de ruido ambiental, in: 4o Congr. Nac. Ing. Sísmica, Granada, 2011. https://www.researchgate.net/publication/259198963_ANALISIS_DE_LOS_EFECTOS_DE_SITIO_EN_LA_CIUDAD_DE_GRANADA_SUR_DE_ESPANA_A_PARTIR_DE_MEDIDAS_DE_RUIDO_AMBIENTAL.
- [33] A. Vuoto, J. Ortega, P.B. Lourenço, F. Javier Suárez, A. Claudia Núñez, Safety

- assessment of the Torre de la Vela in la Alhambra, Granada, Spain: The role of on site works, *Eng Struct* 264 (2022) 114443. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114443>.
- [34] D. Villegas Cerredo, Análisis estructural del patrimonio histórico. Torre del Homenaje de la Alhambra, M.Sc. Thesis, University of Granada, 2012. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30827/Digibug.25169>.
- [35] A. Santos, V. Cuéllar, J.M. Martinez, L. Salinas, Ground-structure interaction analysis of the Tower of Comarès, Alhambra of Granada, Spain, in: 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., ISSMGE, Hamburg, Germany, 1997: pp. 1025–1028. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/31/1997_02_0065.pdf.
- [36] D. Villegas, M. Cámara, V. Compán, Assessment of procedures for the structural analysis of “Homenaje Tower” in the Alhambra in Granada (Spain), *Informes de La Construcción* 66 (2014) m017. <https://doi.org/10.3989/ic.13.101>.