

Caracterización estructural y evaluación numérica del daño sísmico del Cortijo del Fraile en Níjar (Almería, España)

Structural characterisation and numerical assessment of seismic damage of the Cortijo del Fraile farmhouse in Níjar (Almería, Spain)

María Paz Sáez-Pérez y Luisa María García-Ruiz
Universidad de Granada (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9582>

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras históricas de mampostería no reforzada están muy extendidas en España, incluyendo las áreas mediterráneas del sur y este de la península, donde el riesgo sísmico es mayor [1]. Por lo que los deja expuestos a daños de cualquier gravedad, pudiendo alcanzar el colapso. A pesar de las investigaciones realizadas a sus estructuras, su estudio sigue siendo complejo, debido al desconocimiento de sus características mecánicas y al estado de las uniones. Esto hace que su evaluación requiera modelos geométricos muy precisos que conlleven un elevado esfuerzo computacional [2-4].

Existen numerosos trabajos que describen los métodos de estimación para evaluar estas estructuras [5], siendo los más utilizados los análisis lineales [6], los análisis no lineales [7], el análisis pushover [8] y con menor frecuencia, el limit analysis [9].

Aunque el análisis no lineal ofrece resultados más precisos, su complejidad computacional hace que sea menos utilizado que el análisis lineal, el cual realiza una evaluación fiable de forma más simple [10, 11]. Los modelos elásticos lineales aportan información relevante para el análisis, como modos y períodos de vibración, así como de las áreas más vulnerables ante fallo mecánico [10]. Por ello, resulta interesante aplicar esta última estrategia en edificios ubicados en zona sísmica y en los que resulta imposible obtener datos experimentales acerca de su estructura [12-13].

La presente comunicación aborda el estudio del Cortijo del Fraile (fig. 1a), bien de interés cultural, erigido en Níjar (Almería, España) dentro del Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar. En la figura 1b se muestra su distribución en planta y las superficies de las áreas funcionales.

Por el momento las publicaciones y estudios sobre esta construcción son escasos, y la información que aportan es similar. Ello resta visibilidad al cortijo y a la situación de alarma en la que se encuentra. La investigación tiene como objetivo dar a conocer el estudio llevado a cabo, consistente en un acercamiento a su

estado de deterioro y condiciones reales, así como proponer una intervención viable en su contexto actual. Centrada en enfatizar la capacidad de las arquitecturas históricas, se pretende, a través de un enfoque basado en el criterio profesional, destacar que el desarrollo de actividades diferentes a las originales, tratando de mantener las características estructurales es posible, ofreciendo una mayor accesibilidad al público y abundando en su aprovechamiento y disfrute.

2. LEYES CONSTITUTIVAS DE LOS MATERIALES

Los muros de la estructura del cortijo son de mampostería compuesta por piedra caliza y mortero de cal. Las características mecánicas de dichos materiales requeridas por el análisis son la densidad, el módulo de elasticidad longitudinal y el coeficiente de Poisson. Debido a la declaración del conjunto como bien de interés cultural, las condiciones de accesibilidad y muestreo son limitadas, esto impide la toma de muestras de sus materiales y, en consecuencia, obtener los mencionados datos de forma empírica. Por ello, se determinan sus valores

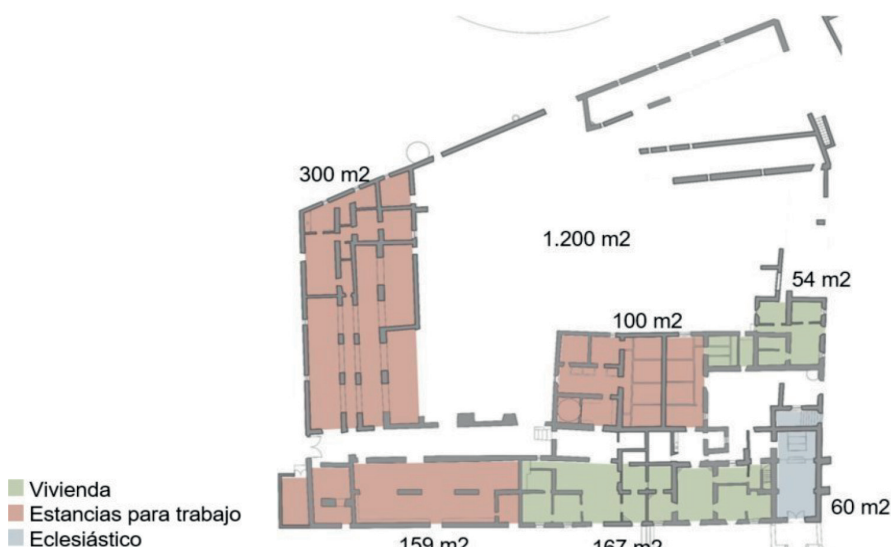


Fig. 1. a (superior) Estado actual del Cortijo del Fraile. Fachadas suroeste y sureste. b (inferior) Superficies generales de áreas funcionales

a partir de fuentes normativas y basadas en la experiencia [14–18]. Siendo para la piedra caliza las siguientes: densidad de 28.000 N/m³, módulo de elasticidad longitudinal de 7*10¹¹ N/m² y coeficiente de Poisson de 0,25. En el caso del mortero de cal, se trabaja con una densidad de 15.876 N/m³, un módulo de elasticidad longitudinal de 1,50*10¹⁰ N/m² y un coeficiente de Poisson de 0,10.

A nivel geométrico, en el presente análisis únicamente se trabaja con el citado sistema murario, al que se le asigna una acción de 1,30*10⁴ N/m². Además se consideran las acciones ejercidas por los dos tipos de cubierta existentes, de 1,05*10³ N/m² la cubierta plana y 8,00*10² N/m² la cubierta inclinada, y la cimentación del conjunto que se introducen posteriormente en el programa "Abaqus" (versión 2018) como condiciones de contorno.

3. METODOLOGÍA.
EL MODELO MULTIESCALA

Un fuerte condicionante de la longevidad de los edificios es el riesgo sísmico, es decir, la probabilidad de que las consecuencias sociales o económicas producidas por un terremoto igualen o excedan valores predeterminados, para una localización o área geográfica dada. Esta importancia se evalúa en función del impacto que ejerce sobre la población que lo sufre.

Puesto que los terremotos son fenómenos aleatorios, el riesgo sísmico se cuantifica mediante métodos probabilísticos en los que intervienen un gran número de parámetros. Se define el riesgo sísmico como el producto de tres factores:

"Riesgo sísmico = Peligrosidad sísmica * Pérdidas sísmicas * Vulnerabilidad sísmica"

Donde la peligrosidad sísmica hace referencia a las pérdidas, ya sean personas, inmuebles u otras infraestructuras y depende únicamente de su localización geográfica. Las pérdidas sísmicas las conforma la suma de pérdidas humanas y la valoración de los costes. Por último la vulnerabilidad sísmica es el grado de daño que se espera que sufra una estructura sometida a la acción sísmica de una determinada intensidad.

Tras el análisis de la documentación disponible y la consideración de las acciones correspondientes, se realiza el levantamiento de un modelo tridimensional de la estructura del cortijo, en el que se representa la estructura vertical como sólido único, los paños de cubierta, que según se observa en algunos casos es

plana y en otros inclinada, así como su cimentación, consistente una zapata corrida, siendo añadidos posteriormente al modelo en el programa Abaqus (versión 2018) como condiciones de contorno, es decir, cargas aplicadas en la coronación de los tramos de muro correspondientes y empotramiento en su base. Para optimizar el esfuerzo computacional, se efectúa una simplificación de la geometría de manera que algunos elementos quedan excluidos en los análisis posteriores, siendo estos los paños de forjado que han sufrido un desprendimiento parcial y les impide desarrollar su función de cubrición y los elementos no estructurales, como la tabiquería y los pocos elementos ornamentales que han llegado hasta nuestros días.

Dicho modelo es la herramienta principal para el estudio de la vulnerabilidad sísmica de la estructura actual del edificio, mediante un cálculo por elementos finitos, método que se ha empleado y desarrollado en varios trabajos previos [10, 11, 14–16, 19]. Llevándose a cabo con el software "Abaqus" (versión 2018).

Debido a la gran escala del cortijo y a la heterogeneidad matérica de su estructura, se estudia su estabilidad empleando un modelo multiescala. Para ello, se realiza un proceso de homogeneización de la estructura vertical, es decir, una unificación de las propiedades mecánicas de la mampostería en un único material ideal con un comportamiento estructural similar al elemento real. Se realiza tomando una porción idealizada de muro en el que aparecen las piedras unidas por el mortero. La relación entre ambos se establece definiendo una interacción en la que el movimiento de las caras de los volúmenes que representan ambos materiales queda con una restricción que simula una atadura. Tras esto, se somete el modelo a un mallado definido por

elementos hexaédricos de tipo "esfuerzo tridimensional". Configurado lo anterior, la estructura se somete a un análisis estático lineal mediante el software utilizado (fig. 2a). Para obtener un material único cuyo comportamiento estructural sea similar al obtenido como suma de dos materiales, se calcula la proporción de cada material en la composición del muro. Determinando que las piedras componen un 61% del volumen de la porción y el 39% restante corresponde al mortero [19], se trabaja con una densidad de 23.265,28 N/m³ y un coeficiente de Poisson de 0,20. Para una mayor precisión, el valor del módulo de elasticidad longitudinal, estimado en 6,91*10¹⁰ N/m², se halla de:

$E_H = 1 / [(1-a/E_p)+(a/E_M)]$; donde $a = e_M / (e_M+e_p)$; siendo:

- E_H el módulo de elasticidad longitudinal homogéneo
- E_p el módulo de elasticidad longitudinal homogéneo
- E_M el módulo de elasticidad longitudinal homogéneo
- e_p el espesor de la piedra caliza
- e_M el espesor del mortero de cemento

A partir de aquí se realiza un nuevo análisis estático lineal de una pieza de iguales dimensiones con este nuevo material (fig. 2b). Para comprobar que los valores estimados ofrecen un resultado similar a la porción idealizada del muro, se comparan ambos resultados. Este material homogéneo es el que se aplica al modelo de la estructura completa del cortijo para realizar los análisis estático y dinámico.

4. ANÁLISIS ESTÁTICO

Con motivo de conocer el comportamiento estructural sin la

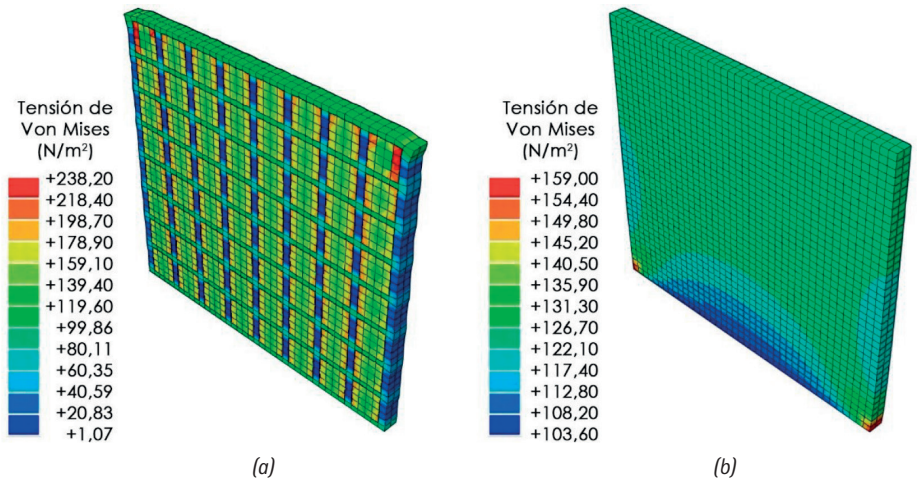


Fig. 2. (a) Distribución de tensiones y deformación en la idealización de porción de muro de mampostería. (b) Distribución de tensiones y deformación en la idealización de porción de muro homogéneo.

influencia de un sismo, se realiza un análisis estático mediante un cálculo elástico lineal, es decir, un cálculo en el que las características estructurales son constantes en el tiempo y sus desplazamientos, esfuerzos y reacciones son directamente proporcionales a las cargas aplicadas.

La figura 3a muestra que a la geometría se le incorporan unas condiciones de contorno consistentes en el empotramiento de la cara inferior del modelo y, con respecto a las acciones que ejerce la cubierta, se le introduce una carga en las coronaciones de muro correspondientes. El mallado de la geometría se realiza con elementos tetraédricos de tipo "esfuerzo tridimensional", debido a su buen funcionamiento en estudios estáticos lineales y análisis modales [5,10, 11-13]. Ante huecos de pequeñas dimensiones como el hueco irregular de la fachada suroeste y la ventana redonda ubicada

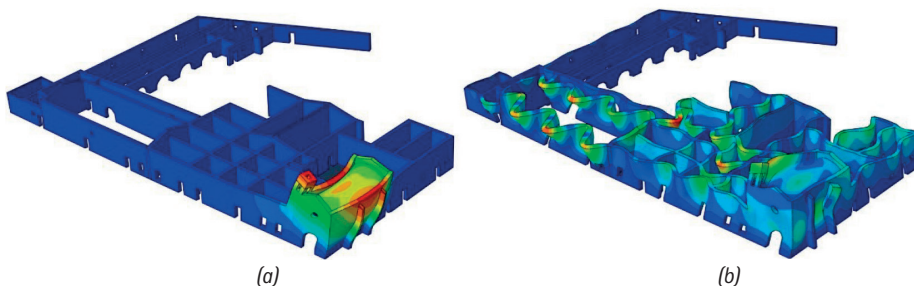


Fig. 4. (a) Deformada del modo local 11. (b) Deformada del modo general 96

sobre la puerta principal de la capilla o elementos curvos como la bóveda que cubre la capilla, se efectúa un refinamiento de la malla, donde los elementos son del mismo tipo y menor dimensión.

El análisis estático sobre la geometría, se configura para que la estructura esté empotrada en su base y las cargas de las cubiertas recaigan sobre la coronación de los muros. De igual manera, se indica que el modelo está sometido a la aceleración de la gravedad.

Los resultados del análisis estático permiten afirmar que los valores de la tensión de la figura 3b se incrementan en las zonas próximas al empotramiento, acentuándose en el tercio inferior del volumen de la capilla. Los desplazamientos verticales que se muestran en la figura 3c crecen con la altura del elemento y el valor máximo se ubica en el área central de la bóveda de la capilla. La deformada sigue un esquema coherente con el sistema constructivo que posee el cortijo.

5. ANÁLISIS DINÁMICO

5.1. ANÁLISIS MODAL

Se realiza un análisis modal de la estructura del cortijo mediante el programa "Abaqus" (versión 2018) para obtener sus modos de vibración, sus frecuencias naturales, la masa movilizada y las deformadas. Para ello, se realiza un cálculo de autovalores a partir de las propiedades elásticas del material. Debido a su singularidad geométrica, se hallan los cien primeros modos de vibración, en los que se observa la existencia de modos consecutivos con valores de frecuencias muy similares. Además, las grandes dimensiones de la estructura originan que los 35 primeros modos sean locales. Se observa que los modos 11 y 96 son los que movilizan mayor cantidad de masa, $1,059 \cdot 10^6$ kg el primero y $8,529 \cdot 10^5$ kg el segundo.

En la figura 4a. se muestra la deformada del modo 11, que es un modo local que afecta al volumen más esbelto de la estructura, tiene una frecuencia de 13,862 Hz y un período de 0,072 segundos. De la misma forma, la deformada del modo 96 se recoge en la figura 4b., es un modo general que posee una frecuencia de 38,676 Hz y un período de 0,026 segundos, con desplazamientos en las dos direcciones principales, donde se observa que los de mayor magnitud se encuentran en el punto medio de la coronación de muros interiores y de la fachada suroeste.

5.2. SISMO DE LORCA (MURCIA), 2011

Se somete el modelo de elementos finitos a un análisis dinámico para

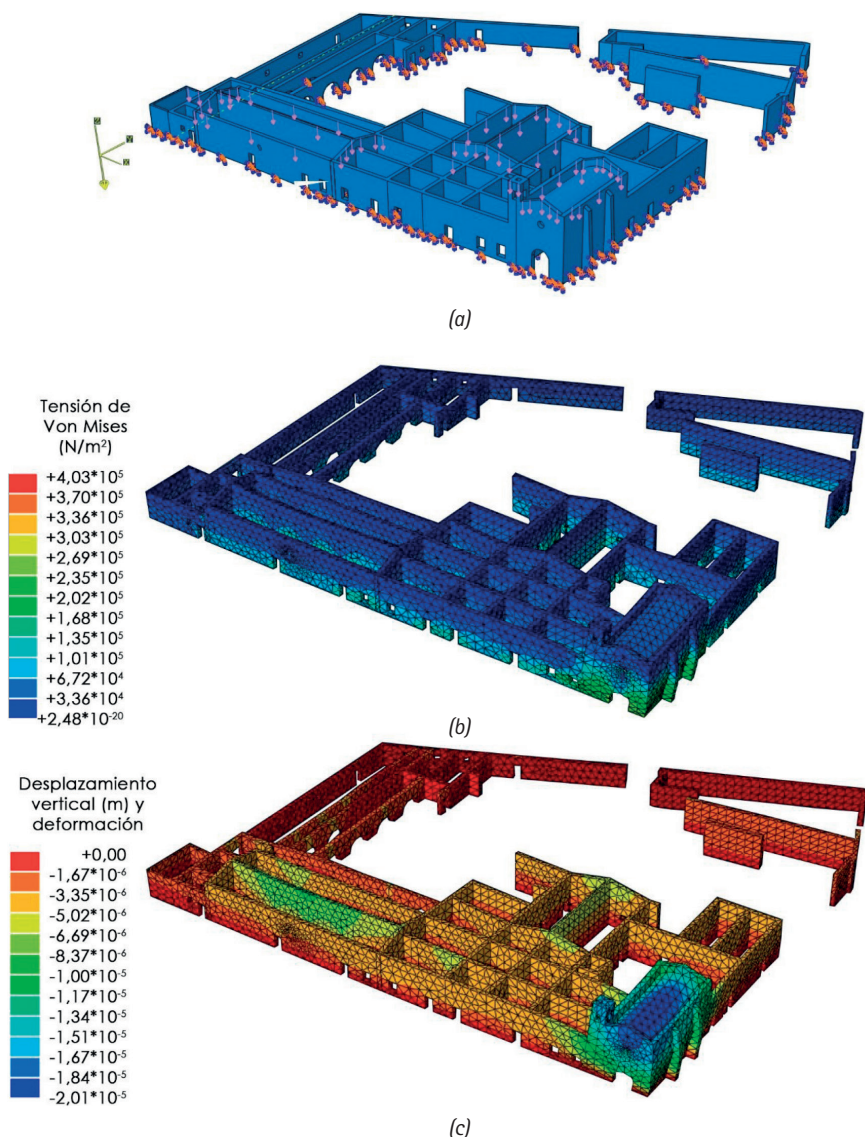


Fig. 3. (a) Modelo tridimensional del Cortijo del Fraile, con las condiciones de contorno aplicadas para el análisis estático. Autoría propia, 2018. (b) Distribución de tensiones y deformación en el modelo elástico del Cortijo del Fraile. (c) Desplazamiento vertical y deformación en el modelo elástico del Cortijo del Fraile.

detectar las áreas de la estructura del cortijo más vulnerables ante sismo. Se emplean los datos del sismo acontecido en Lorca (Murcia) en 2011, tomados desde la estación sísmica de Lorca Noroeste. Se escoge esta acción porque tuvo lugar en la misma zona sísmica que la del cortijo objeto de estudio y es reciente, por lo que ha sido determinado mediante métodos actuales [20].

5.3. ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO LINEAL

Para este análisis, se trabaja con el Amortiguamiento de Rayleigh, un amortiguamiento proporcional de masa y rigidez, que precisa los valores de la masa de Rayleigh y el factor de amortiguamiento proporcional de la masa de Rayleigh, definidos a partir de las frecuencias naturales de dos los primeros modos de vibración. Se obtiene un factor de amortiguamiento del 5%.

En lo relativo al terreno sobre el que se asienta el cortijo, es preciso especificar que es de tipo granular suelto. Este terreno presenta un coeficiente de contribución (influencia de los distintos tipos de terremotos esperados en la peligrosidad sísmica de cada punto) de valor 1 y un coeficiente del terreno (establecido a partir de sus características geotécnicas) de valor 2 [14, 19]. Estos datos permiten conocer el espectro de respuesta elástica de una estructura ubicada en Níjar (Almería, España) con un amortiguamiento del 5%.

Previo a la ejecución del cálculo, se estima la resistencia máxima del material homogéneo que se va a emplear en el cálculo, tanto a compresión como a tracción [19]. Tras la consulta de diversas fuentes basadas en la experiencia, se hallan los valores correspondientes del material homogéneo utilizando el mismo método que en el caso del resto de parámetros que definen dicho material, descrito en el apartado 3. Se estima una resistencia a compresión de $7,38 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ y una resistencia a tracción de $3,05 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.

Para la simulación del sismo, se aplican al modelo tres condiciones de contorno en su base, tres aceleraciones mecánicas del suelo en los tres ejes principales. Para cada uno, se define la amplitud a partir de los valores disponibles en el acelerograma del sismo, que están recogidos con un intervalo de tiempo constante de 2 segundos.

Durante el transcurso del sismo, se observan los mayores incrementos tensionales, máximos desplazamientos y mayor deformación en dos instantes concretos, en adelante t_1 y t_2 .

La figura 5a recoge las tensiones máximas principales en el instante t_1 . Se

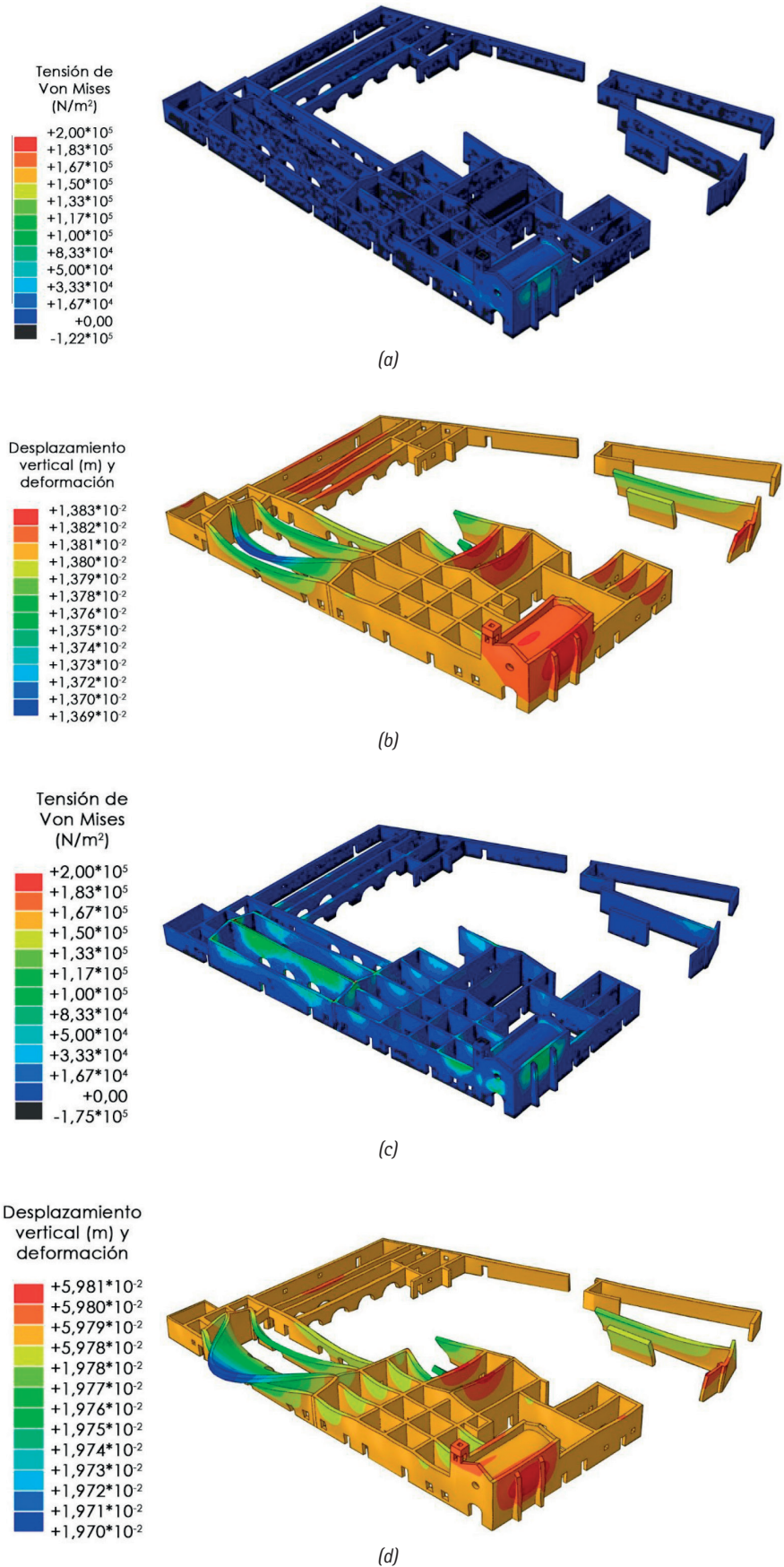


Fig. 5. (a) Tensiones máximas principales de la estructura del cortijo en el instante t_1 . (b) Desplazamientos y deformación total de la estructura del cortijo en el instante t_1 . (c) Tensiones máximas principales de la estructura del cortijo en el instante t_2 . (d) Desplazamientos y deformación total de la estructura del cortijo en el instante t_2 .

observa que la tracción tiende a acentuarse en las coronaciones de los volúmenes más esbeltos, especialmente en áreas próximas a vanos. El valor máximo de tracción

se encuentra en la clave de la puerta de entrada y en el encuentro de la bóveda con el cerramiento oeste de la capilla. Cabe destacar que muchas de las áreas señaladas

se encuentran en proceso de derrumbe.

En la figura 5b se plasman los desplazamientos y la deformación en el segundo t_1 . El máximo desplazamiento se ubica en el tercio superior de los muros próximos al volumen de la capilla, lo que permite identificarlo con el modo de vibración local 11 obtenido en el apartado 5.

Las tensiones máximas principales en el instante t_2 se muestran en la figura 5c, en la que se aprecia que, aunque el rango de valores es el mismo que en el instante t_1 , se experimenta una expansión en las inmediaciones de esos puntos. También se alcanzan máximos en las bases y coronaciones de algunos muros.

En la figura 5d se observa cómo la deformación disminuye, así como la extensión del máximo donde se alcanza el mayor desplazamiento, que tiene lugar en los tercios superiores de los muros donde se han encontrado máximos durante todo el proceso, destacando la línea de arranque de la bóveda. Esta distribución de desplazamientos y deformación se identifica con el modo de vibración general 96 obtenido en el apartado 5.1.

En base a los análisis anteriores, se comprueba que el valor de los desplazamientos incrementa con la altura del muro, concentrándose en el tercio superior del área sur, especialmente en la bóveda de la capilla. El valor de estos desplazamientos sufre un aumento considerable al inicio del sismo y alcanza su máximo al término del mismo. Con respecto a la deformación total, comienza con un crecimiento que disminuye a partir del segundo 1 hasta el fin de la actividad.

6. RIESGO DE FALLO MECÁNICO

Los resultados de los análisis estático y dinámico se deben a que el fallo mecánico más probable de la mampostería se produce por inestabilidad, ocasionada por concentraciones de tensiones o desplazamientos excesivos. Los modos locales también son indicativos de fallo, por lo que han de considerarse

las áreas rojas de la figura 4a, donde se producen tensiones, desplazamientos y deformaciones excesivas, así como tracciones próximas al límite del material. Por ello, el riesgo de colapso se enfoca en el tercio superior de los muros más esbeltos y con mayor presencia de huecos. Esto se incrementa en las proximidades de la capilla, en las coronaciones de encuentros de muros perpendiculares y en la base de la fachada suroeste

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas se centran en la evaluación estructural del Cortijo del Fraile, y concretamente en el modelo de su sistema murario. En el que determinando el comportamiento de su estructura se ha realizado el estudio de estabilidad mediante un análisis estático. Los resultados obtenidos han identificado las áreas más críticas ante las cargas soportadas y la respuesta del modelo frente a un sismo.

Los resultados del análisis estático, determinan el cumplimiento del comportamiento estructural esperado y localizan las zonas más sensibles en el tercio inferior de los muros, acentuándose en el volumen de la capilla, identificándose con ello la necesidad de actuaciones de conservación en estas áreas.

El análisis dinámico incluye un análisis modal que demuestra que los primeros modos de vibración son locales e indican las zonas más propensas a sufrir fallo ante sismo en primera instancia, mientras que los siguientes son modos generales que determinan la deformación de la estructura ante sismo. Los resultados del análisis dinámico ubican las áreas más vulnerables en las coronaciones de los muros más esbeltos, especialmente en las proximidades de los vanos.

Este estudio constata que conocer los desplazamientos y deformaciones de la estructura en sus modos es necesario para determinar las áreas con riesgo de fallo mecánico. De igual forma someter el modelo a una acción sísmica permite determinar las máximas

tensiones, tracciones, desplazamientos y deformaciones, procedimiento necesario para localizar las zonas más probables de sufrir fallo mecánico (fig. 8).

La evaluación final de la presente investigación determina que la inestabilidad de la estructura del Cortijo del Fraile se vería incrementada durante la ocurrencia de un sismo. Lo que pone en evidencia que el modelo y los análisis aplicados conforman una representación eficaz de la estructura, pues permiten determinar las consecuencias de su geometría en lo referente a su estabilidad, así como identificar las áreas más vulnerables ante un movimiento sísmico.

REFERENCIAS

- [1] Ruiz-Pinilla, J.G., Adam, J.M., Pérez-Cárcel, R., Yuste, J., Moragues, J.J. 2016. Learning from RC building structures damaged by the earthquake in Lorca, Spain, in 2011. *Engineering Failure Analysis* 68: 76-86.
- [2] Micelli, F., Cascardi, A. 2020. Structural assessment and seismic analysis of a 14th century masonry tower. *Engineering Failure Analysis* 107: 104198.
- [3] Ahmend, A., Shahzada, K., Ali, S.M., Khan, A.N., Shah, S.A.A. 2019. Confined and unreinforced masonry structures in seismic areas: Validation of macro models and cost analysis. *Engineering Structures* 199: 109612.
- [4] Bayraktar, A., Hökelekli, E., Halifeoglu, F.M., Mosallam, A., Karadeniz, H. 2018. Vertical strong ground motion effects on seismic damage propagations of historical masonry rectangular minarets. *Engineering Failure Analysis* 91: 115-128.
- [5] Roca, P., M. Cervera, G. Gariup, and L. Pelà. 2010. Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advances approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering* 17 (3), 299-325.
- [6] Martínez, M. y Atamturktur, S. 2019. Experimental and numerical evaluation of reinforced dry-stacked concrete masonry walls. *Journal of Building Engineering* 22: 181-191.
- [7] Siano, R., Roca, P., Camata, G., Pelà, L., Sepe, V., Spacone, E. y Petracca, M. 2018. Numerical investigation of non-linear equivalent-frame models for regular masonry walls. *Engineering Structures* 173: 512-529.
- [8] Yacila, J., Camata, G., Salsavica, J. y Tarque, N. 2019. Pushover analysis of confined masonry walls using a 3D macro-modelling approach. *Engineering Structures* 201: 109731.
- [9] Yan, M., Xia, Y., Liu, T., Bowa, V.M. 2019. Limit analysis under seismic conditions of a slope reinforced with prestressed anchor cables. *Computers and Geotechnics* 108: 226-233.
- [10] Sandoval, C., López-García, D. 2017. Numerical assessment of accumulated seismic damage in a historic masonry building. A case study. *International Journal of Architectural Heritage* 11 (8): 1177-1194.
- [11] Cakir, F., E. Uçkan, J. Shen, B.S. Seker, and B. Akbas. 2015. Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011. *Engineering Failure Analysis* 58:249-66.
- [12] Jorquera, N., Misseri, G., Palazzi, N., Rovero, L. y Tionietti, U. 2017. Structural Characterization and Seismic Performance of San Francisco Church, the Most Ancient Monument in Santiago, Chile. *International Journal of Architectural Heritage* 11(8): 1061-1085.
- [13] Sandoval, C., Valledor, R. y López-García, D. 2017. Numerical assessment of accumulated seismic damage in a historic masonry building. A case study. *International Journal of Architectural Heritage* 11 (8), 1177 - 1194.
- [14] Ministerio de Fomento, Gobierno de España. 2009. Documento Básico SE-AE Seguridad Estructural Acciones en la edificación.
- [15] ASTM C476-16. 2016. Standard Specification for Grout for Masonry. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- [16] Farmer I. W. (1968). *Engineering Properties of Rocks*. Londres (Reino Unido): E & F. N. SPON Ltd.
- [17] Asociación Española de Normalización y Certificación. 2011. Norma Española UNE-EN 1998-1:2011. Eurocódigo 8. Parte 1: reglas generales, acciones sísmicas y reglas para la edificación.
- [18] García, A. 2017. *Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación*. Universidad de Granada.
- [19] García Ruiz, L.M. 2018. Cortijo del Fraile, Níjar (Almería). Comportamiento estructural. Vulnerabilidad Sísmica. Universidad de Granada. TFM (no publicado).
- [20] Instituto Andaluz de Geofísica. Acelerograma del Sismo de Lorca (Murcia) en 2011.

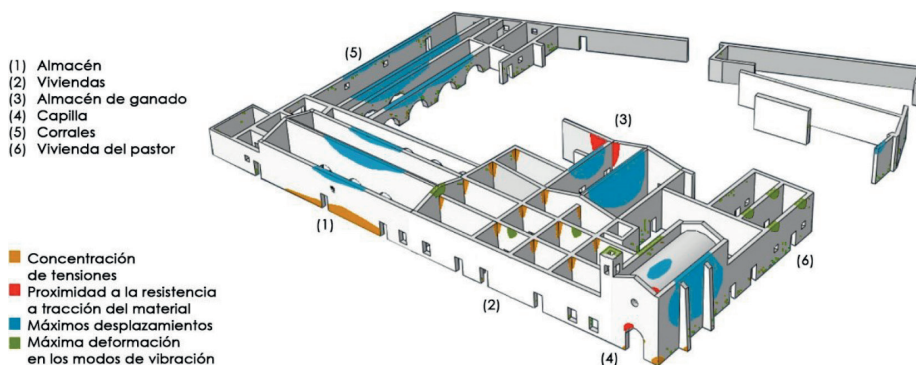


Fig. 6. Áreas más susceptibles de sufrir fallo mecánico