

## CONSIDERATION OF THE NON-LINEAR BEHAVIOR MATERIALS IN THE STRUCTURAL ANALYSIS OF THE CHURCH OF SANTA ANA IN SEVILLE BY FINIT ELEMENTS METHOD

Aguilar, Jaime<sup>1</sup>; Compán, Víctor<sup>2</sup>; Baeza, Juan Ramón<sup>3</sup>; Garduño, Carlos<sup>4</sup>; Rodríguez, Rubén<sup>5</sup>; Pachón, Pablo<sup>6</sup>

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to bring the numerical models' structural behavior closer to the real behavior of the Church of Santa Ana in Seville, in Triana, through the development of high-definition geometric models that incorporate the non-linear materials' behavior.

This church is presented as a unique case study due to the geometric complexity of its vaults and the influence on the structural behavior of the constructive solution of its passable roof. A geometrical model has been developed "as it", adapting the various constructive solutions to the real building. The result is a "high definition geometrical model". To define the materials a dynamic identification campaign has been carried out using OMA (Operational Modal Analysis) that has allowed us to adjust the mechanical properties of these materials in the numerical models. Modal shapes and frequencies of vibration similar to those obtained in the environmental vibration campaign has been obtained. A first linear analysis give us an approximation and a magnitude order of the displacement levels and the stress state, and let us to locate areas that exceed the admissible level stresses of the defined materials. With these results and analyzing in situ the displacement levels using photogrammetry, we decide to implement in the numerical analysis a constitutive model that contemplates the nonlinear behavior of these materials with Concrete Damage Plasticity model in Abaqus Cae. A non-linear analysis has been performed increasin the gravity factor until the structural collapse to determinate the structural safety factor.

**Keywords:** masonry, vault, FEM, nonlinear behavior, high definition geometrical models.

<sup>1</sup>Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). [jav@us.es](mailto:jav@us.es)

<sup>2</sup>Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). [compan@us.es](mailto:compan@us.es)

<sup>3</sup>Dep. of Architectural Construction II. University of Seville (Spain). [jbaeza@us.es](mailto:jbaeza@us.es)

<sup>4</sup>Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). [cgarduno@us.es](mailto:cgarduno@us.es)

<sup>5</sup>Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). [rrodriquez@us.es](mailto:rrodriquez@us.es)

<sup>6</sup>Dep. of Building Structures and Geotechnical Engineering. University of Seville (Spain). [ppachon@us.es](mailto:ppachon@us.es)

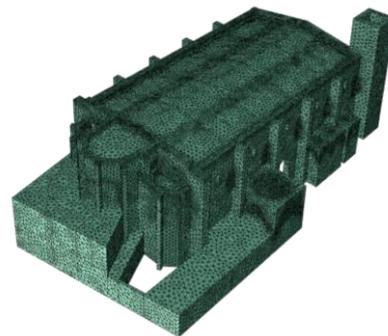
## OBJECT

EL objeto del presente trabajo es acercar el comportamiento estructural de los modelos numéricos de cálculo al comportamiento real de la Iglesia de Santa Ana de Sevilla, en Triana, mediante la elaboración de modelos geométricos de alta definición para su análisis por el MEF). Así mismo, se evaluará su estado tensional en aquellas zonas singulares que presentan valores por encima de los límites elásticos preestablecidos inicialmente mediante la implementación de modelos constitutivos que caractericen el comportamiento no lineal de los materiales.

El trabajo concluye con la determinación del nivel de seguridad que presenta el edificio aplicando incrementos del factor de gravedad hasta llevar el modelo numérico al colapso.



**Figura 1.** Iglesia de Santa Ana. Representación del modelo geométrico con las simplificaciones adoptadas.

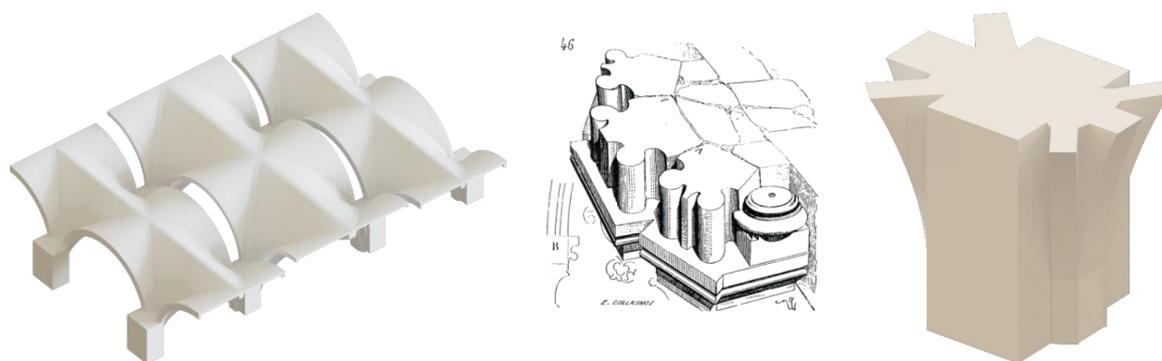


**Figura 2.** Modelo de elementos finitos elaborado con la consideración del edificio en su totalidad.

## RESUMEN EXTENDIDO

La Iglesia de Santa Ana de Sevilla se presenta como un singular caso de estudio tanto por la complejidad geométrica que presentan sus bóvedas como en la influencia en el comportamiento estructural de la solución constructiva de su cubierta transitable. Para su análisis estructural, se ha elaborado un modelo geométrico *as it*, adaptando las diversas soluciones constructivas a la realidad ejecutada tomando de referencia el trazado geométrico teórico de sus bóvedas. De esta forma y dada la complejidad que presenta el conjunto, se ha estimado necesario llevar a cabo ciertas simplificaciones entendiéndose que no va a repercutir en el comportamiento estructural de forma representativa. Quizás la más significativa haya sido la de considerar el cuerpo de naves de forma modular estableciendo los tramos de bóvedas todos de la misma dimensión con planos de simetría transversales. Otro de los aspectos considerados ha sido la de hacer coincidir los nervios longitudinales del espinazo en las tres naves con las claves de los arcos. Respecto al arranque de nervios y el trazado de bóvedas, se ha procedido siguiendo el mismo criterio constructivo que pudieran haber empleado sus constructores. El resultado es un modelo de alta definición geométrica.

Para la caracterización de sus materiales se ha procedido mediante la realización de una campaña de identificación dinámica mediante OMA (Operational Modal Analysis) que nos ha permitido realizar un ajuste de las propiedades mecánicas de dichos materiales en los modelos numéricos hasta obtener un comportamiento dinámico en formas modales y frecuencias de vibración análogo al obtenido en la campaña de vibración ambiental [1].



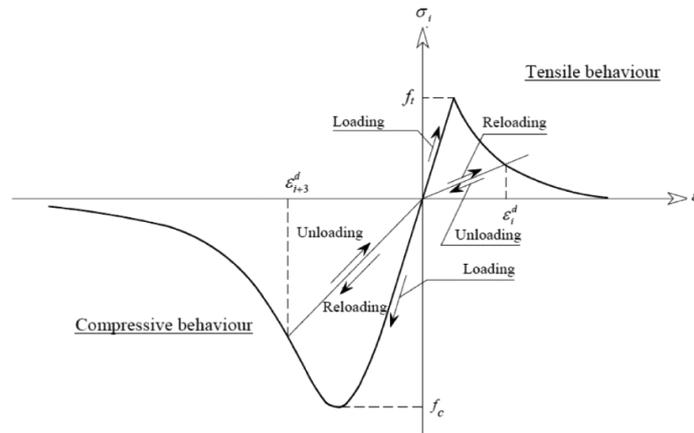
**Figura 3.** Modelado geométrico de soluciones constructivas del cuerpo de bóvedas (izquierda), y de la adaptación de la solución de salmeres en el arranque de nervios (derecha).

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas actualizadas tras la calibración del modelo numérico.

| PROPIEDADES MECÁNICAS                             |  |  |  | $\rho$            | $f_b$ | $f_m$ | $f_c$ | $f_t$ | E      | $\nu$ |
|---|--|--|--|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|   |  |  |  | Kg/m <sup>3</sup> | MPa   | MPa   | MPa   | MPa   | MPa    |       |
| MATERIAL COMPUESTO FÁBRICA DE PIEDRA              |  |  |  | 1.800             | 5,65  | 3     | 1,91  | 0,2   | 3.000  | 0,25  |
| MATERIAL COMPUESTO FÁBRICA DE LADRILLO            |  |  |  | 1.800             | 13    | 3     | 1,5   | 0,15  | 1.800  | 0,25  |
| MATERIAL COMPUESTO FÁBRICA DE LADRILLO EN PILARES |  |  |  | 1.800             | 13    | 3     | 1,5   | 0,15  | 1.400  | 0,25  |
| MATERIAL DE RELLENO                               |  |  |  | 900               | -     | -     | -     | -     | 40     | 0,25  |
| MATERIAL DE CUBIERTA                              |  |  |  | 2.500             |       |       |       |       | 23.000 | 0,25  |

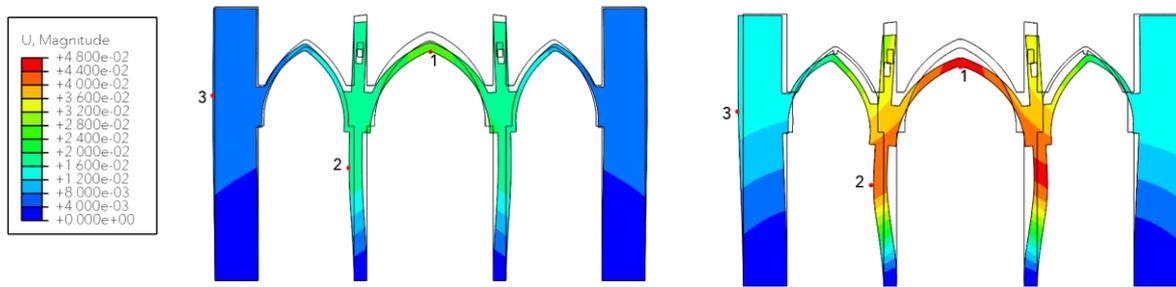
Un primer análisis en régimen lineal nos aporta una aproximación y un orden de magnitud tanto de los niveles de desplazamientos como del estado tensional localizándose zonas que superan los niveles de tensión admisibles de los materiales definidos. A la vista de estos resultados y analizando in situ los niveles de desplazamiento de un tramo del cuerpo de bóvedas mediante fotogrametría, se opta por implementar en los modelos numéricos la caracterización de la obra de fábrica y de cantería un modelo constitutivo que contemple el comportamiento en rango no lineal de estos materiales. En este caso, un modelo en régimen elástico con la consideración de un comportamiento dañable plástico en rango no lineal distinguiendo tracciones y compresiones limitadas [2].

La metodología empleada para la realización de los modelos pasa por definir inicialmente su geometría mediante el software de generación de formas complejas Rhinoceros. Posteriormente se genera el mallado mediante métodos de generación adaptativa de malla con Ansys Icem y malla de tetraedros de 4 nodos de integración reducida (C3D4R) para una mejor adaptación a la geometría y reducción del tiempo de computación respectivamente. El análisis estructural se lleva a cabo con ABAQUS CAE. Respecto a las consideraciones de los materiales y para facilitar su estudio por el MEF con la consideración del material como medio continuo e isótropo englobado en un único material ladrillo-mortero o piedra-mortero [3].



**Figura 4.** Modelo de comportamiento Concrete Damage Plasticity.

Los resultados que se obtienen en rango plástico arrojan unos niveles de desplazamientos del orden del 30% superiores a los obtenidos en régimen lineal y que se aproximan más a la realidad ejecutada.



**Figura 5.** Niveles de desplazamientos máximos  $U_{mag}$  (m) en régimen elástico lineal (izquierda) frente al comportamiento no lineal (derecho).

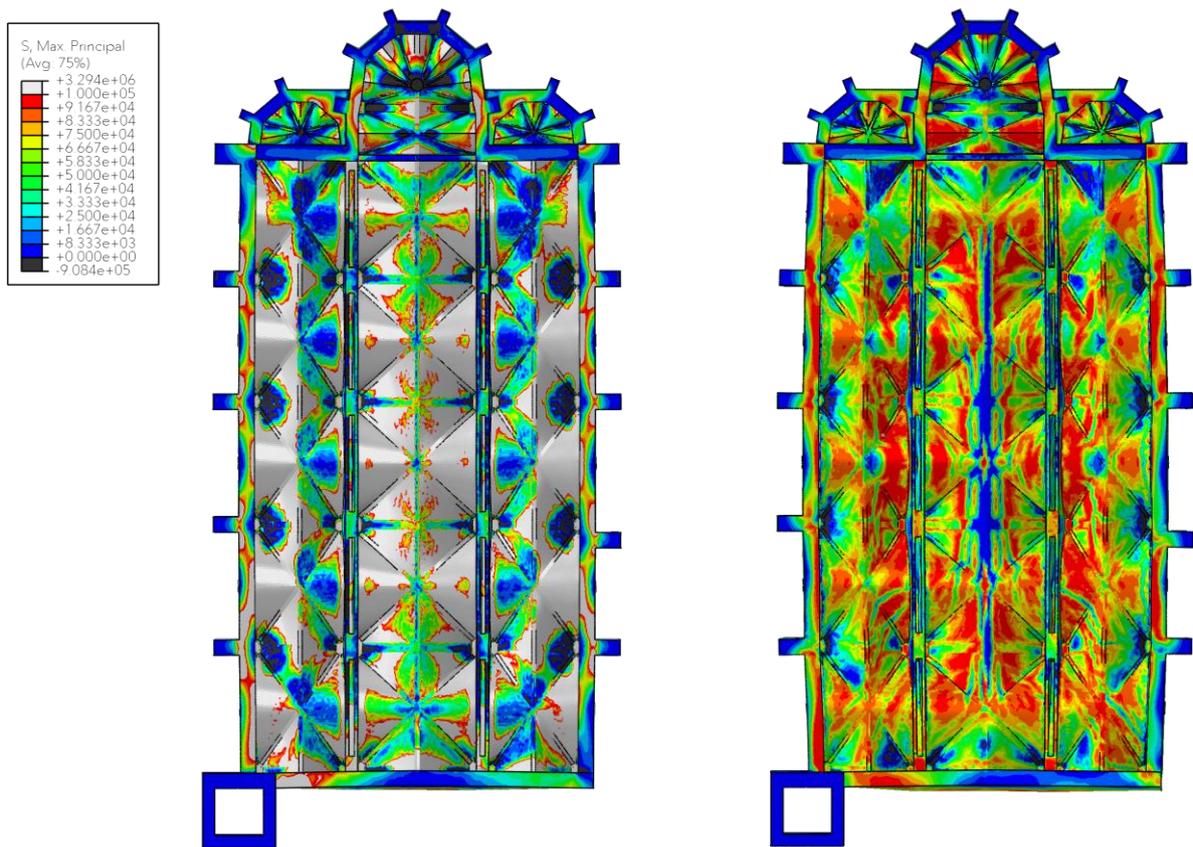
**Tabla 2.** Desplazamientos máximos en los nodos analizados (mm).

| DESPLAZAMIENTOS EN NODOS (mm) |                         |       |       |              |                  |       |       |              |              |
|-------------------------------|-------------------------|-------|-------|--------------|------------------|-------|-------|--------------|--------------|
| NODOS                         | MODELO ELÁSTICO LINEAL. |       |       |              | MODELO NO LINEAL |       |       |              | %            |
|                               | $U_x$                   | $U_y$ | $U_z$ | $U_{mag}$    | $U_x$            | $U_y$ | $U_z$ | $U_{mag}$    |              |
| <b>1 CLAVE</b>                | 0,16                    | 0,76  | 24,60 | <b>24,61</b> | 5,52             | 2,83  | 75,85 | <b>76,10</b> | <b>32,33</b> |
| <b>2 PILAR</b>                | 13,02                   | 0,09  | 12,27 | <b>17,88</b> | 42,73            | 5,86  | 38,92 | <b>58,10</b> | <b>30,77</b> |
| <b>3 CONTRAFUERTE</b>         | 5,35                    | 0,07  | 2,23  | <b>5,80</b>  | 20,60            | 2,67  | 1,54  | <b>20,83</b> | <b>27,85</b> |

Desde el punto de vista tensional, los niveles de tracciones se han visto reducidos gracias a la redistribución de esfuerzos en las zonas más solicitadas. Son de destacar desde este punto de vista el cuerpo de bóvedas y los contrafuertes. Las zonas comprimidas presentan menor desviación respecto de las obtenidas en el análisis elástico lineal.

Analizado el estado tensional y apreciándose el elevado nivel de sollicitación en determinados elementos del conjunto (bóvedas, contrafuertes y pilares), se procede a realizar un nuevo cálculo que contemple un incremento del factor de gravedad hasta llevar la estructura al colapso numéricamente. De esta forma, se procede aumentando cuatro veces la gravedad obteniéndose como resultado un incremento de capacidad de carga de un 18% sobre el análisis anterior, arrojando un factor multiplicador de 1,72g. En relación a las patologías que se han podido detectar en la Iglesia, se analiza

numéricamente la deformación plástica equivalente (PEQT) a las tensiones de tracción (*tensile equivalente plastic strain*  $\varepsilon_t^{\sim pl}$ ) así como la evolución de la fisuración.



**Figure 1.** Mapa de Tensiones Principales Máximas de Tracción en régimen de comportamiento lineal (izquierda) frente al no lineal ( $S_{max}$ ,  $N/m^2$ ).

[5] [6][7][8][9][10] [4]

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Moreno, E. Amanda, P. García, C. Pérez, and C. Cardiel, "CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS PATRIMONIALES MEDIANTE ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL," 2017.
- [2] D. Systemes, "SIMULIA, ABAQUS v.6.14-4. Users manuals." 2014.
- [3] J. 1968- López, S. 1955- Oller, and E. Oñate Ibáñez de Navarra, *Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1998.
- [4] B. Zhou, B. Liu, X. Wang, J. Kong, and C. Zhang, "Natural Vibration Characteristics Analysis of a High-Rise Reinforced Masonry Structure Based on Field Test Data," *Buildings*, vol. 12, no. 9, p. 1457, Sep. 2022, doi: 10.3390/buildings12091457.
- [5] V. Compán, P. Pachón, M. Cámara, P. B. Lourenço, and A. Sáez, "Structural safety assessment of geometrically complex masonry vaults by non-linear analysis. The Chapel of the Würzburg Residence (Germany)," *Eng. Struct.*, vol. 140, pp. 1–13, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.03.002.
- [6] J. R. Baeza, V. Compán, G. Castillo, M. Cámara, and P. Pachón, "Determining static elastic modulus of weak sandstone in Andalusian historical constructions from non-destructive tests:

San Cristóbal's stone," *J. Build. Eng.*, vol. 57, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104864.

- [7] R. Zavalis, ; Jonaitis, and ; Lourenço, "Analysis of bed joint influence on masonry modulus of elasticity," 2014.
- [8] J. A. Valseca, "TRAZA, GEOMETRÍA Y ESTRUCTURA DE LA IGLESIA DE SANTA ANA DE SEVILLA. Tesis Doctoral." Sevilla, 2023.
- [9] J. Luis Martínez, J. A. Martín-Caro, and J. León, "Monografías sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA OBRA DE FÁBRICA."
- [10] M.J.Cassinello, "Influencia del espesor de la junta de mortero en la deformabilidad de las fábricas pétreas mediavales.," 2006.

## CONCLUSIONES

La metodología empleada en la elaboración de modelos de alta definición geométrica mediante softwares de generación de formas complejas y su posterior análisis estructura mediante el MEF se presenta como una potente herramienta para la caracterización de edificios de la complejidad como el que se estudia.

La implementación del comportamiento no lineal de los materiales presenta unos resultados más adecuados al estado de conservación del edificio y de las patologías que éste presenta, consiguiéndose identificar con los modelos numéricos la localización de las fisuras en zonas análogas a las identificadas en el edificio. La calibración de los modelos numéricos va a posibilitar que se puedan estudiar posibles actuaciones en edificios patrimoniales como el que nos ocupa sin la necesidad de realizar operaciones previas en el edificio ejecutado ni ensayos de carácter destructivo.

Desde el punto de vista de comportamiento del conjunto, resulta destacable la rigidez que aportan la cabecera y los pies de la iglesia respecto del cuerpo de naves. Esto hace que tanto los pilares intermedios como los contrafuertes de los vanos centrales estén más solicitados, siendo también destacable el análisis de comportamiento en su sección longitudinal.

Respecto al nivel de seguridad obtenido, preocupa considerablemente el alto nivel de fisuración que presenta debido fundamentalmente al gran peso que introduce el material de relleno sobre las bóvedas para conformar la cubierta transitable y el poco margen de seguridad analizado. Incluso ya desde la consideración del factor de gravedad de "1g".

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer todo el apoyo proporcionado durante todos estos años a D. Francisco González de Canales, Arquitecto y Maestro Mayor de la Iglesia, y a Dña. Amparo Rodríguez Bavío por compartir sus conocimientos sobre la Iglesia. Del mismo modo, al Padre Eugenio (†) por habernos permitido deambular por el recinto y a todas las personas que ayudan a mantener, de una u otra forma, que la Iglesia de Santa Ana mantenga el aspecto que presenta hoy día. Y en estos últimos años, al Padre Antonio Rodríguez Bavío, Delegado Diocesano de Patrimonio de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía.