

METODOLOGÍA INTEGRADA HBIM-FEM PARA EL DESARROLLO DE GEMELOS DIGITALES DE OBRAS DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

INTEGRATED HBIM-FEM METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS OF ARCHITECTURAL HERITAGE ASSETS

Jesús Tejero Romero ⁽¹⁾, Enrique García-Macías ⁽²⁾, M. Lourdes Gutiérrez-Carrillo ⁽³⁾

¹ E.T.S. Ingeniería de Edificación, Granada, España, jesustejero03@correo.ugr.es

² Dpto. de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, E.T.S. Ingeniería de Edificación, Granada, enriquegm@ugr.es

³ Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, E.T.S. Ingeniería de Edificación, Granada, mlgutier@ugr.es

RESUMEN

Esta comunicación presenta los resultados preliminares del desarrollo y aplicación de una metodología científica multidisciplinar para la creación de gemelos digitales de estructuras históricas de ingeniería civil.

El objetivo principal es integrar levantamientos geométricos detallados, ensayos experimentales y análisis estructurales mediante modelización por elementos finitos (FEM) dentro de un modelo de información del edificio histórico (HBIM), ofreciendo un gemelo digital completo que sirva de apoyo en tareas de conservación del patrimonio. En primer lugar, se obtiene una representación geométrica precisa del bien mediante vuelos con dron y técnicas de fotogrametría. La nube de puntos resultante se procesa para la reconstrucción de superficies, generando una representación volumétrica del bien. Esta representación, construida en un entorno BIM, se malla posteriormente mediante elementos finitos, dotando al gemelo digital no solo de una representación geométrica virtual del bien, sino también de una herramienta para evaluar su vulnerabilidad estructural. Por último, se incorporan también datos experimentales obtenidos a partir de una campaña de ensayos de vibración ambiental, lo que permite calibrar el modelo numérico y reducir las incertidumbres asociadas a sus parámetros. Toda esta información, junto con datos históricos y documentales, se integra en el modelo HBIM, proporcionando una herramienta basada en la física y guiada por datos para los gestores del patrimonio construido.

La metodología propuesta se ilustra mediante un caso de estudio real: el Puente de Pinos Puente, en Granada, España. Se presta especial atención a los desafíos asociados a la integración de los distintos programas informáticos necesarios para la generación del gemelo digital. Para hacer frente a estos retos, el artículo presenta herramientas personalizadas desarrolladas en Python que facilitan la integración de diversas plataformas comerciales, como Revit y ABAQUS

Palabras clave: BIM-to-FEM; Conservación del Patrimonio; Fotogrametría; HBIM; Modelado por Elementos Finitos.

ABSTRACT

This paper presents the preliminary results of the development and application of a multidisciplinary scientific methodology for creating digital twins of historical civil engineering structures.

The main objective is to integrate detailed geometric surveys, experimental testing, and structural analysis by finite element modelling (FEM) within an integrated historical building information model (HBIM), offering a comprehensive digital twin to support heritage conservation tasks. Firstly, an accurate geometrical representation of the asset is obtained by drone surveys and photogrammetry. The resulting point cloud is processed for surface reconstruction, yielding a volumetric representation of the asset. This representation, built within a BIM environment, is then meshed using finite elements, providing the digital twin not only with

a virtual geometric representation but also with a tool to evaluate the structural vulnerability of the asset. Finally, experimental data obtained from an ambient vibration testing campaign are also incorporated, enabling the calibration of the numerical model and reducing the uncertainties associated with its parameters. All this information, along with historical and documentary records, is integrated with a HBIM model, providing a physics-based and data-driven tool for infrastructure managers.

The proposed methodology is illustrated through a real case study, the Pinos Puente Bridge in Granada, Spain. Particular emphasis is placed on the challenges associated with integrating the various software programs required for generating the digital twin. To address these challenges, the paper reports on custom-made Python-based tools developed to facilitate the integration of multiple commercial software platforms, such as Revit and ABAQUS.

Keywords: BIM-to-FEM; Heritage Conservation; Photogrammetry; HBIM; Finite Element Modelling.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la metodología Scan-to-BIM-to-FEM ha emergido como una herramienta clave en los campos de la ingeniería, la construcción y la conservación del patrimonio, siendo objeto de numerosas investigaciones. Este enfoque integra técnicas de escaneado (fotogrametría, escáner láser terrestre –TLS– y vehículos aéreos no tripulados –UAVs–) para generar nubes de puntos 3D que permiten construir modelos de información BIM (por sus siglas en inglés, *Building Information Modeling*) y modelos estructurales. A diferencia de una simple representación 3D, los modelos BIM integran datos sobre geometría, materiales y estructura, siendo clave para la inspección y gestión de infraestructuras. Sin embargo, para habilitar su aplicación a la conservación estructural, resulta esencial vincular dicho modelo BIM con modelos de cálculo estructural, tales como modelos de elementos finitos (FEM), permitiendo así simular el comportamiento estructural de las construcciones y evaluar su vulnerabilidad. En este punto, aún se presentan considerables desafíos, como una limitada interoperabilidad entre plataformas BIM y motores de cálculo estructural. Por ello, a día de hoy, aún no existen metodologías Scan-to-BIM-to-FEM ampliamente consensuadas.

Diversos autores han propuesto soluciones a estas limitaciones. Por ejemplo, Fang *et al.* (2025) desarrollaron un flujo de trabajo que automatiza la reconstrucción digital a partir de nubes de puntos de baja calidad, mejorando la interoperabilidad con herramientas de análisis mediante *scripts* en Python. Huang *et al.* (2024) desarrollaron una metodología BIM-FEM para la simulación de excavación de túneles con escudo, automatizando tareas como la asignación de propiedades de materiales, la simulación del proceso constructivo y la generación de mallas FEM de alta calidad. En el ámbito del patrimonio construido, la investigación ha evolucionado desde enfoques Scan-to-HBIM (Galanakis *et al.*, 2023) hasta enfoques más holísticos de Scan-to-HBIM-to-FEM (Liu & Li, 2024). En este sentido, cabe destacar el trabajo de Barazzetti *et al.* (2015), quienes integraron en un modelo HBIM del Castillo Masegra, en la ciudad de Sondrio (Italia), información acerca de su geometría mediante escáner láser, resultados de inspecciones destructivas y no destructivas, así como un modelo FEM generado de manera semi-automática. Bouzas *et al.* (2022) desarrollaron una metodología HBIM para la generación automática de modelos mecánicos de puentes históricos en celosía a partir de nubes de puntos extraídas mediante escáner láser, demostrando su eficiencia en un caso práctico del puente de acero roblonado de O Barqueiro, ubicado en Galicia (España). También es destacable el trabajo de Pirchio *et al.* (2021), quienes integraron en un modelo HBIM un modelo geométrico detallado mediante fotogrametría con dron y modelado FEM para el análisis de la vulnerabilidad sísmica de la Iglesia Santa María La Mayor en la localidad de Alatri, Lazio (Italia).

Pese a estos avances, aún no existe una metodología Scan-to-BIM-to-FEM ampliamente aceptada. En concreto, aún existe un vacío en la literatura relativo a la implementación de modelos FEM para la identificación supervisada de daños en sistemas de vigilancia de la salud estructural (por sus siglas en inglés, SHM). Las técnicas SHM basadas en vibraciones y Análisis Modal Operacional (OMA) son las más ampliamente empleadas en edificaciones del patrimonio, ya que permiten obtener propiedades modales (frecuencias naturales, tasas de amortiguamiento y formas modales) a partir de vibraciones inducidas por acciones ambientales sin necesidad de aplicar cargas artificiales (Ferrara *et al.*, 2024). En este sentido, existen multitud de estudios demostrando la eficacia de estas técnicas para analizar la vulnerabilidad estructural del patrimonio. Por ejemplo, García-Macías *et al.* (2022) desarrollaron un gemelo digital estructural de la Torre de las Gallinas en la Alhambra, el cual se calibraba de forma continua mediante análisis OMA, lo que permitía una evaluación permanente de la aparición de patologías estructurales. De forma similar, Requena-García-

Cruz *et al.* (2023) realizaron un ensayo OMA en el sector de Abd al Rahman I de la Mezquita de Córdoba, con el objetivo de calibrar un modelo FEM, empleado finalmente para evaluar su comportamiento sísmico. Leonardi *et al.* (2024) avanzaron en la automatización de modelos FEM desde formatos IFC, mejorando la interoperabilidad BIM-FEM. A pesar de estos progresos, la integración de técnicas SHM en entornos BIM o HBIM sigue en fase incipiente. En esta línea, Santini *et al.* (2023) integraron datos de monitorización dinámica en modelos HBIM calibrados mediante análisis de sensibilidad y la técnica de actualización de modelos. Li y co-autores (2022) desarrollaron una solución para puentes que combina BIM, bases de datos SQL Server y programación en C#, junto con un método de detección de daños basado en distribuciones de Wigner-Ville. Meoni *et al.* (2024) demostraron el potencial de los modelos BIM como repositorio y herramienta de procesamiento de datos de inspecciones y SHM en puentes de vigas cajón de hormigón postensado. De manera similar, Gragnaniello *et al.* (2024) propusieron un enfoque metodológico basado en estándares IDS, vinculado a un mapa de procesos colaborativo para la gestión integral de un sistema SHM basado en vibraciones instalado en el viaducto Canalone, un puente de arco de hormigón localizado en Nápoles (Italia).

En base a la revisión del Estado del Arte anterior, se puede afirmar que la metodología Scan-to-BIM-to-FEM representa una línea de investigación activa con aplicaciones prometedoras tanto en infraestructura moderna como en conservación patrimonial. De ahí que esta comunicación aborde una metodología integral que combina fotogrametría de alta resolución, modelado HBIM, OMA, modelado FEM y calibración inversa para evaluar el estado de salud de estructuras históricas. El flujo de trabajo se articula mediante scripts informáticos desarrollados en Python que automatizan la comunicación entre plataformas BIM y FEM. La eficacia de esta propuesta se demuestra mediante su aplicación al caso del Puente de Pinos Puente, en Granada, una estructura compleja y de gran valor histórico.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar y validar una metodología multidisciplinar para la creación de gemelos digitales de estructuras históricas, que integren de forma robusta la información geométrica, documental, experimental y de simulación numérica. Como objetivos específicos destacan:

- Desarrollar un flujo de trabajo eficiente para la adquisición de datos, combinando técnicas de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (drones) y procesamiento Structure from Motion (SfM) para generar una nube de puntos densa y precisa del activo patrimonial.
- Establecer un protocolo para el modelado HBIM (Scan-to-BIM) que permita traducir la nube de puntos en un modelo de información paramétrico y semánticamente rico, que sirva como base de datos centralizada del gemelo digital.
- Integrar datos experimentales de comportamiento estructural mediante la realización de campañas de ensayos de vibración ambiental para identificar las características dinámicas reales de la estructura, reduciendo así la incertidumbre en la modelización.
- Crear un modelo de elementos finitos (FEM) calibrado a partir del modelo HBIM y ajustado con los datos experimentales, capaz de simular de forma fiable el comportamiento estructural del bien.
- Resolver el reto de la interoperabilidad BIM-FEM mediante el desarrollo de herramientas de software personalizadas (scripts en Python) que automaticen la transferencia de geometría y datos entre plataformas como Revit y ABAQUS, garantizando la consistencia y eficiencia del proceso.

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se estructura en un flujo de trabajo secuencial e iterativo ilustrado en la Figura 1. Ésta abarca desde la captura de datos en campo hasta la creación de un gemelo digital integrado y calibrado. Dicha metodología se ha desarrollado en paralelo a su aplicación a un caso de estudio real, el Puente de Pinos Puente (Granada), demostrando su aplicabilidad y potencial para la gestión y conservación del patrimonio construido. Las fases principales de la metodología propuesta se describen a continuación:

1. Levantamiento fotogramétrico del bien a partir de imágenes aéreas tomadas con dron, que permite generar un modelo geométrico 3D que representa con fidelidad la geometría del caso de estudio.
2. Análisis estratigráfico murario del bien a partir de ortofotografías extraídas del modelo 3D.
3. Caracterización dinámica del Puente mediante una prueba ambiental de vibración.
4. Desarrollo y calibración del modelo FEM calibrado del Puente de Pinos Puente mediante un algoritmo de optimización global en base a los datos experimentales obtenidos de la prueba ambiental de vibración.

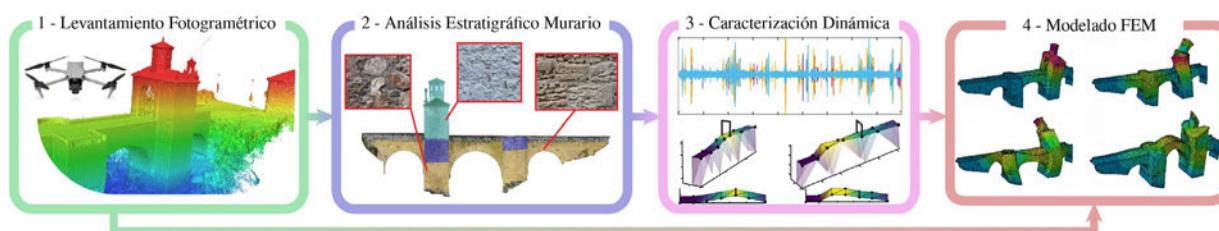


Figura 1. Flujo de trabajo de la metodología propuesta

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización patrimonial del puente de Pinos Puente

Pinos Puente, localidad granadina situada a 16 km de la capital, ha sido históricamente un enclave estratégico en la Vega de Granada, destacando como punto clave de comunicaciones militares y comerciales. En época califal, Binus (Pinos) fue una alquería relevante en la ruta Córdoba-Granada (Carvajal López, 2007). Su primera mención la realiza Ibn al-Sayrafi en el siglo XII al narrar la expedición de Alfonso I en 1125-1126 (Dozy, 1881). En 1319, el puente fue escenario del “Desastre de la Vega” donde murieron los infantes don Pedro y don Juan (Peinado Santaella, 1998). En 1341, funcionó como aduana y también se cita en la batalla de la Higuera en 1431 durante la cual fue destruida una torre defensiva de pequeñas dimensiones (De Lucena Paredes, 1956). A finales del siglo XV, según De la Rada y Delgado (1882), Cristóbal Colón fue alcanzado por un emisario de los Reyes Católicos en este mismo lugar, informándole sobre la financiación de su expedición. Autores del XVI y XVII como Navagiero, Mármol Carvajal y Henríquez de Jorquera lo mencionan por su comercio (Henríquez de Jorquera, 1987).

El puente, aún en uso, presenta tres arcos de herradura desiguales, con el central como el más amplio, sobre el río Cubillas. Está construido con mampostería en aparejo a soga y tizón, con acabado superficial que imita sillería. Se asienta directamente sobre la roca y los arcos descansan en tajamares cilíndricos a contracorriente y planos al otro lado. Originalmente contaba con una torre defensiva, anteriormente citada, que fue reemplazada por una capilla dedicada a Nuestra Señora de las Angustias.

El debate sobre su origen oscila entre una posible fundación romana (Rodríguez Rueda, 2009) y una construcción emiral o califal. Gómez Moreno (1951) lo relaciona con el emirato por la similitud de los sillares con los muros de la ampliación de Abderramán II, mientras que Torres Balbás (1957) ofrece una de las descripciones formales y constructivas más rigurosas. A la par, defiende una datación califal basándose en paralelismos con la mezquita de Córdoba. Sin embargo, Vélchez (1999) introduce una discrepancia relevante en las dimensiones de los sillares situando la construcción en época de Abd al-Rahman II, contradiciendo parcialmente a Torres Balbás. En el año 1922 fue declarado como monumento arquitectónico-histórico y considerado como Bien de Interés Cultural por aplicación de la Ley 16/1985 del Patrimonio Histórico Español.

4.2 Adquisición de Datos y Reconstrucción Geométrica 3D

El primer paso consiste en obtener una representación geométrica digital de alta fidelidad. Para ello, se emplea la técnica de fotogrametría digital, utilizando un vehículo aéreo no tripulado UAV (por sus siglas en inglés, Unmanned Aerial Vehicle) equipado con una cámara de alta resolución. Fueron realizados tres vuelos con UAV, operado manualmente y volando alrededor del puente a una distancia de la estructura de 1.5 m. El UAV empleado fue un DJI Air 3 Fly More Combo equipado con una cámara 4K integrada (sensor óptico de 25.4×1.3 mm [1/1.3"] y 8064×6048 píxeles de resolución) y un Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS). Se capturaron un total de 1.737 imágenes, con una frecuencia aproximada de dos segundos por imagen y con un alto grado de solapamiento.

Las imágenes se procesaron con el software *Agisoft Metashape Pro*, que implementa algoritmos de Structure from Motion (SfM). Este proceso incluye la alineación de imágenes con identificación de puntos clave homólogos, la generación de la nube de puntos densa y la creación de la malla y texturizado donde los puntos se conectan para formar una malla poligonal 3D creando un modelo fotorrealista. La nube de puntos obtenida alcanzó los 39 millones de puntos (Figura 2(a)). Con la ayuda del mismo software, fueron eliminados los puntos que corresponden a la vegetación o a datos anormales y se establece una distancia entre cada par de puntos de 1 cm (downsampling) para disminuir la densidad de la nube alcanzando los 2 millones de puntos,

pudiendo obtenerse un modelo geométrico del puente eficiente y operativo. El resultado final de esta fase es una nube de puntos georreferenciada y a escala (Figura 2(b)), que constituye la base geométrica para las fases posteriores.

El modelo 3D generado permite conocer con precisión las características geométricas y formales del puente y obtener información de los materiales, técnicas constructivas y su estado de conservación. El estudio de la estructura desprende que el puente excede de 46 m de longitud, siendo el arco central el mayor de los tres, con unos 10 m de diámetro, mientras que los arcos laterales miden 6.5 y 7.4 m, respectivamente. La estructura está construida con bloques de arenisca de aproximadamente 1.00 x 0.50 x 0.34 m, conectados con juntas de aproximadamente seis centímetros de espesor (Gutiérrez-Carrillo et al, 2025).



Figura 2. Nube de puntos inicial (a) y final tras proceso de limpieza y downsampling (b)

Asimismo, se realizó un análisis estratigráfico murario apoyado en ortofotografías extraídas del modelo 3D. A partir del estudio de materiales, tipo de aparejo, aglutinantes, marcas de herramientas y grado de elaboración, se identificaron tres fases constructivas principales (Figura 3). La primera, con sillares de arenisca dispuestos a soga y tizón, se atribuye al período andalusí temprano (siglos IX-X). La segunda, en la parte superior de los tajamares, presenta mampostería tosca con lascas de piedra sin hiladas regulares, posiblemente de los siglos XIV-XVI. La tercera corresponde a la construcción de la capilla en el siglo XVIII. Estas características estructurales y geométricas han de ser contrastadas por un estudio mediante georradar 3D y perfiles sueltos 2D a la par que las cronologías propuestas deben confirmarse con estudios petrográficos y datación de muestras que están en curso.

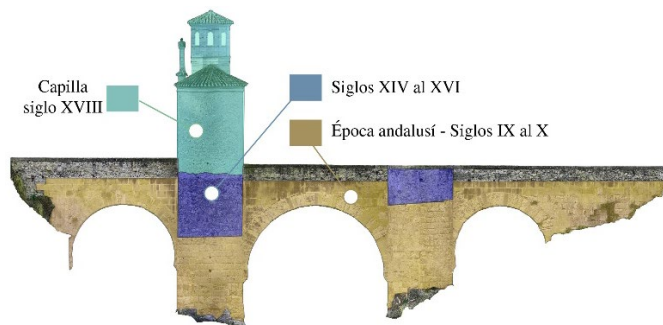


Figura 3. Estratigrafía paramental y fases cronológicas del puente

4.3 Test ambiental de vibración

Para caracterizar estructuralmente el puente de Pinos Puente, se realizó un ensayo ambiental de vibración, compuesto por cuatro adquisiciones asíncronas de 15 minutos, cubriendo toda la longitud del tablero con una frecuencia de muestreo de 500 Hz. En cada configuración se usaron seis acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad (modelo PCB 393B05), conectados por cables coaxiales a un sistema de adquisición NI cDAQ-9178 con dos módulos NI-9230 y un ordenador portátil situado en la capilla. Dos sensores se mantuvieron fijos en el tramo central como referencia, mientras los otros cuatro se desplazaban en cada adquisición para registrar vibraciones verticales y transversales (excepto el sensor S43, que midió la aceleración longitudinal). Los sensores se identifican como S_{ij} , donde i es el setup y j el número del sensor (Figura 4(a)). Durante el ensayo, la temperatura fue de 17.1 °C, la humedad relativa del 86.9%, y se registraron suaves rachas de viento (0.9 m/s), por lo que el tráfico vehicular fue la principal fuente de excitación. Los registros de aceleración se procesaron con el software MOVA/MOSS (García-Macías y Ubertini, 2020),

siguiendo esta secuencia: (i) eliminación de tendencias lineales; (ii) supresión de picos con ventanas Hanning invertidas de 10 s para valores superiores a 0.06 m/s^2 ; (iii) filtrado Butterworth (1–190 Hz); y (iv) decimación a 400 Hz. Las señales resultantes para el primer setup y las funciones de densidad espectral de potencia (PSD, de sus siglas en inglés, Power Spectral Density functions) se muestran en las Figuras 4(b) y (c).

Estos datos sirvieron para identificar propiedades modales (frecuencias de resonancia, amortiguamiento y formas modales) mediante OMA, utilizando el algoritmo de identificación automatizada de subespacios estocásticos impulsados por covarianza CoV-SSI implementado en MOVA. Se emplearon órdenes de modelo entre 2 y 220 (pasos de 2), y un desfase temporal de 1.28 s para estimar covarianzas. Para eliminar polos espurios, se aplicaron criterios estrictos: colinealidad modal mínima (MPC) del 80%, desviación de fase máxima del 50% y amortiguamiento máximo del 10%. En la extracción de diagramas de estabilización se establecieron tolerancias del 1% en frecuencia y 3% en amortiguamiento, junto con un umbral del Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) de 0.01. Finalmente, se utilizó un algoritmo de agrupamiento jerárquico para identificar polos físicos, con una distancia límite de 0.03 (combinando frecuencia y MAC) y un tamaño mínimo de clúster de 20. Este mismo procedimiento se aplicó a los cuatro setups, y los modos obtenidos se combinaron mediante ajuste de mínimos cuadrados. Aunque se identificaron varios modos de vibración, solo los cuatro primeros fueron claramente reconocibles como se muestra en la Figura 5: (i) flexión lateral de primer orden con máximos en la pila de la capilla (6.05 Hz); (ii) flexión lateral de primer orden en la otra pila central (10.82 Hz); (iii) flexión lateral antisimétrica (12.96 Hz); y (iv) flexión vertical de primer orden del vano central (22.84 Hz).

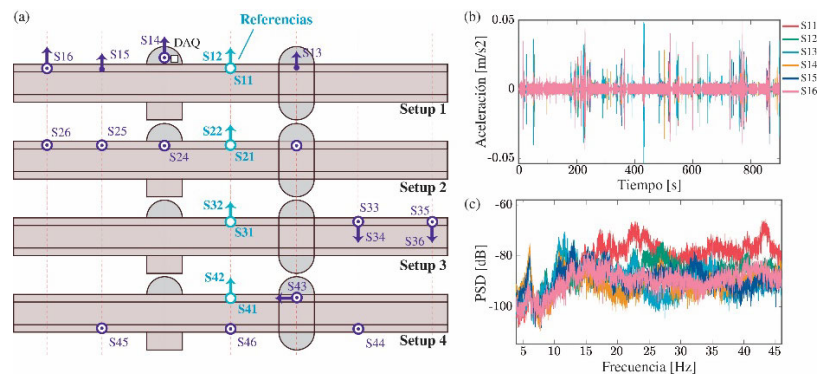


Figura 4. Disposición de sensores (a), registro de aceleraciones en el primer setup (b), y función de densidad espectral correspondiente (c).

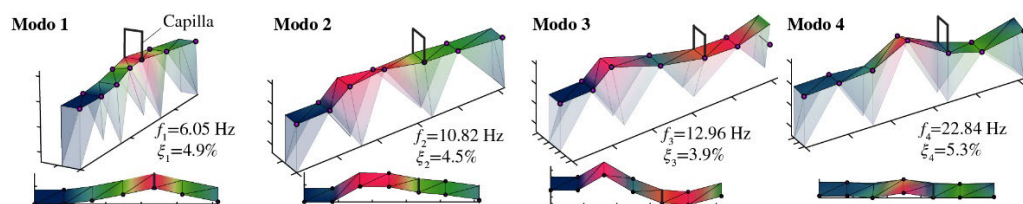


Figura 5. Cuatro primeros modos naturales de vibración del Puente de Pinos Puente.

4.4 Modelo de Elementos Finitos y Análisis Modal

Con los datos experimentales, se generó un modelo estructural FEM para simular el comportamiento del puente. La nube de puntos 3D, obtenida con *Agisoft Metashape Pro*, se exportó en formato *.obj* e importó en Autodesk Fusion 360 para reconstruir la superficie y crear un volumen sólido. Este modelo, en formato *.sat*, se incorporó en *Abaqus/CAE*, donde se generó una malla de 170,688 elementos tetraédricos C3D10, obteniéndose así el modelo FEM de la estructura (Figura 6). De manera preliminar, toda la estructura se ha modeló con un único material similar a mampostería de piedra, con Módulo de Young de 2 GPa, coeficiente de Poisson de 0.3 y densidad de $2,400 \text{ kg/m}^3$. Como condiciones de contorno, se obviaron efectos de interacción terreno-estructura, considerando condiciones de apoyo rígido (grados de libertad traslacionales restringidos) en toda la superficie en contacto con el terreno (Figura 7(a)).

Para comparar las predicciones del modelo FEM con los datos experimentales recogidos en el AVT, se identificaron las posiciones de los sensores en el modelo FEM (Figura 7(b)) y se realizó un análisis modal lineal del mismo. La Figura 8 muestra que el modelo FEM reproduce las formas modales experimentales, aunque

con frecuencias de resonancia notablemente menores. Esta diferencia se debe al uso de un único material, destacando la importancia de caracterizar adecuadamente los materiales y calibrar el modelo. Estos resultados justifican la ulterior calibración del modelo descrito en el siguiente apartado.

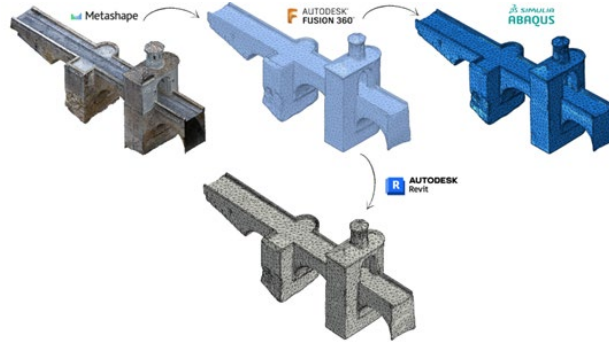


Figura 6. Generación de un FEM estructural del Puente de Pinos Puente a partir de la nube de puntos generada mediante UAV y su incorporación en entorno BIM.

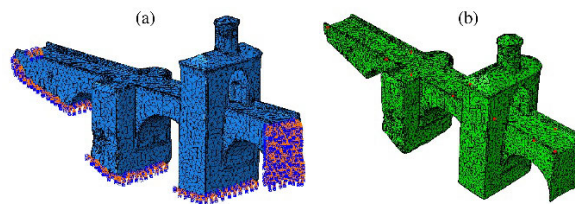


Figura 7. Condiciones de contorno del modelo estructural (a) y definición de la posición de los sensores del AVT (b) en Abaqus/CAE a partir de la nube de puntos generada mediante UAV y su incorporación en entorno BIM.

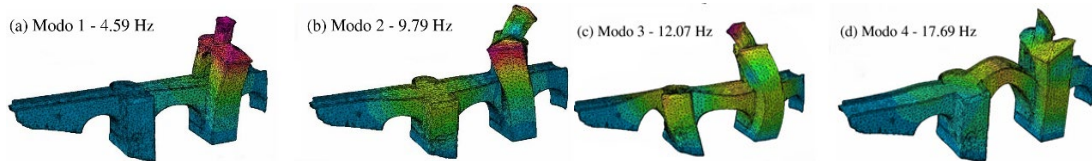


Figura 8. Resultados del análisis modal preliminar del Puente de Pinos Puente.

4.5 Calibración del modelo

Para calibrar el modelo con los datos experimentales, se utilizó la técnica FEMUP mediante el algoritmo de optimización global de enjambre de partículas (PSO, de sus siglas en inglés, Particle Swarm Optimization), con 30 partículas y 50 iteraciones. Este algoritmo, implementado en un código Python, permite actualizar el módulo de elasticidad y la densidad del material del modelo FEM (representado por el vector de variables $\mathbf{x}$), inicialmente estimados en 2 GPa y 2,400 kg/m³. Para ello, se define una función objetivo $J(\mathbf{x})$ que tiene en cuenta las diferencias entre las propiedades modales experimentales y las obtenidas experimentalmente. En concreto, se emplea la siguiente función de coste:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l [\alpha \varepsilon_i(\mathbf{x}) + \beta \delta_i(\mathbf{x})]. \quad (1)$$

donde $\varepsilon_i(\mathbf{x})$ representa el error relativo en la estimación de las frecuencias de resonancia y $\delta_i(\mathbf{x})$ el error en las formas modales:

$$\varepsilon_i(\mathbf{x}) = \frac{|f_i^{exp} - f_i^{num}|}{f_i^{exp}}, \quad \delta_i(\mathbf{x}) = 1 - MAC_i(\delta_i(\mathbf{x})). \quad (2)$$

Los términos α y β representan coeficientes de peso entre los dos términos de error, definidos en este estudio como $\alpha = 1.0$ y $\beta = 10.0$. Finalmente, los términos f_i^{exp} y f_i^{num} representan las i -ésimas frecuencias experimentales y numéricas, y el operador MAC en la Ecuación (2) denota el criterio de garantía modal (de sus siglas en inglés, Modal Assurance Criterion). Esta última métrica permite comparar los modos

experimentales y numéricos, arrojando un valor igual a 1 si los modos son iguales (paralelos) y cero si no presentan similitud (ortogonales). El proceso se repite hasta alcanzar el número máximo de iteraciones o lograr la convergencia. La mejor solución es aquella que minimiza la función objetivo, reproduciendo con mayor precisión la respuesta dinámica del puente.

Los resultados de la calibración del modelo, mostrados en la Tabla 1, arrojan un módulo elástico de 2.64 GPa y una densidad de 1,674 kg/m³. El módulo es notablemente superior al valor nominal de la mampostería, lo cual es razonable considerando que la piedra pudo haberse rigidizado con el tiempo. La baja densidad obtenida podría explicarse por la exclusión del material de relleno, posiblemente más ligero, y del hueco en la capilla, lo que habría llevado a reducir la densidad para ajustar las frecuencias experimentales. Se observa en la Tabla 1 que, tras la calibración, las frecuencias numéricas se aproximan más a las experimentales, reduciendo el error máximo en la predicción de las frecuencias de 22.55% a 6.65%. Nótese que estos resultados aún son preliminares, y a día de hoy se continúa trabajando en la caracterización petrográfica y mecánica de los materiales del puente para enriquecer el modelo FEM y obtener una representación más precisa del comportamiento dinámico del puente.

Tabla 1. Resultados obtenidos del FEMUP del Puente de Pinos Puente antes y después de la calibración del modelo. El término ϵ denota el error relativo entre las frecuencias experimentales y predichas por el modelo FEM.

Modo	f^{exp} [Hz]	Antes calibración		Después calibración	
		f^{num} [Hz]	ϵ [%]	f^{num} [Hz]	ϵ [%]
1	6.05	4.59	-24.13	6.32	4.46
2	10.82	9.79	-9.52	11.54	6.65
3	12.96	12.07	-6.87	13.46	3.86
4	22.84	17.69	-22.55	23.00	0.70

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido comprobar que es posible desarrollar una metodología integral que combine herramientas digitales y técnicas experimentales para estudiar y conservar estructuras históricas con un alto grado de precisión. La aplicación al caso del Puente de Pinos Puente ha servido como validación práctica de un enfoque innovador que integra levantamientos geométricos con drones, modelado HBIM y simulación estructural mediante elementos finitos.

Uno de los logros más destacados ha sido la obtención de una representación tridimensional detallada del puente gracias al uso de UAV y técnicas de fotogrametría. Este modelo no solo ha permitido documentar fielmente la geometría y el estado de conservación del bien, sino también identificar, a través del análisis estratigráfico, diferentes fases constructivas que confirman su evolución histórica. Por otro lado, la incorporación de datos experimentales procedentes de ensayos de vibración ambiental ha sido fundamental para caracterizar el comportamiento dinámico del puente. Estos datos permitieron calibrar el modelo numérico con gran precisión, ajustando sus propiedades estructurales reales. Gracias al uso de un algoritmo de optimización global heurístico, se consiguió afinar parámetros clave como el módulo de elasticidad o la densidad del material, reduciendo las diferencias entre los resultados teóricos y los experimentales.

A pesar de los avances, el estudio también ha puesto de manifiesto algunos desafíos, como la elevada carga computacional o las dificultades para modelar con exactitud la heterogeneidad de los materiales históricos. Aun así, los resultados obtenidos confirman el enorme potencial de esta metodología para apoyar la conservación preventiva del patrimonio arquitectónico. En definitiva, se abre una vía prometedora para la gestión y diagnóstico estructural de bienes patrimoniales mediante gemelos digitales integrados y calibrados, capaces de combinar lo mejor del conocimiento técnico, histórico y computacional.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte de la Cátedra UGR “El Puente de Pinos Puente”, financiada por Verbund Green Power Iberia, con la colaboración estratégica del Ayuntamiento de Pinos Puente y la Delegación Territorial de Cultura de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Revitali, M., Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation modelling practice and theory*, 57:71–87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>
- Bouzas, O., Cabaleiro, M., Conde, B., Cruz, Y., Riveiro, B. (2022). Structural health control of historical steel structures using HBIM. *Automation in Construction*, 140: 104308. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104308>
- Carvajal López, J. C. (2007). El poblamiento altomedieval en la Vega de Granada a través de su cerámica. Granada: Universidad de Granada. <http://hdl.handle.net/10481/1428>
- De la Rada y Delgado, J. D (1892-1893). El Puente de Pinos Puente (Granada). *Centenario: Revista*, tomo III, pp. 386-388.
- De Lucena Paredes, L. S. (1956). Las campañas de Castilla contra Granada en el año 1431. *Revista del Instituto Egipcio de Estudios Islámicos*, (4), 79-120.
- Dozy, R.P.A. (1965). *Recherches sur l'histoire et la littérature de l'Espagne pendant le Moyen*. Oriental Press.
- Fang, Y., Mitoulis, S.A., Boddice, D., Yu, J., Ninic, J. (2025). Scan-to-BIM-to-Sim: Automated reconstruction of digital and simulation models from point clouds with applications on bridges. *Results in Engineering* <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104289>
- Ferrara, M., Bertagnoli, G., Giordano, L. (2024). Model Updating of different Bridge types using ambient vibration and OMA identification. *Procedia Structural Integrity*, 62:773–780. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.105>
- García-Macías, E., Hernández-González, I. A., Puertas, E., Gallego, R., Castro-Triguero, R., Ubertini, F. (2024). Meta-model assisted continuous vibration-based damage identification of a historical rammed earth tower in the Alhambra complex. *International Journal of Architectural Heritage*, 18.3: 427-453. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2155883>
- García-Macías, E., Ubertini, F. (2020). MOVA/MOSS: Two integrated software solutions for comprehensive Structural Health Monitoring of structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 143 <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106830>
- Galanakis, D., Maravelakis, E., Pocobelli, D., Vidakis, N., Petousis, M., Konstantaras, A., Tsakoumaki, M. (2023). SVD-based point cloud 3D stone by stone segmentation for cultural heritage structural analysis—The case of the Apollo Temple at Delphi. *Journal of Cultural Heritage*, 61:177–187. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.04.005>
- Graganiello, C., Mariniello, G., Pastore, T., Asprone, D. (2024). BIM based design and setup of structural health monitoring systems. *Automation in Construction*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105245>
- Gutiérrez-Carrillo, M.L., García-Macías, E., Gutiérrez Andrades, J.M., García-Contreras, G. (2025). Multidisciplinary Characterization Methodology for Engineering Structures: The Case of the Pinos Puente Bridge. *Actas del congreso AID Monuments*. Perugia, Italia (en prensa).
- Hao Huang, Bin Ruan, Xianguo Wu, Yawei Qin (2024). Parameterized modeling and safety simulation of shield tunnel based on BIM-FEM automation framework. *Automation in Construction*, 162, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105362>
- Henríquez de Jorquera, F. (1987). *Anales de Granada. Descripción del Reino y ciudad de Granada, crónica de la Reconquista (1482-1492), sucesos de los años 1588 a 1646*. Edición preparada según el Manuscrito.
- Leonarda, M.L., Granja, J., Oliveira, D., Azenha, M. (2024). Scalable BIM based open workflow for structural analysis of masonry building aggregates. *Computers & Structures*, 297:107321. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107321>
- Liu, J., Li, B. (2024). Heritage Building Information Modelling (HBIM): A Review of Published Case Studies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48:387–393. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6_5
- Li, X., Xiao, Y., Guo, H., Zhang, J. (2022). A BIM based approach for structural health monitoring of bridges. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1):155–165. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2040-3>
- Meoni, A., Castellani, M., Mariani, F., Ceccobelli, M., Venanzi, I., Ubertini, F. (2024). A BIM-based approach for risk assessment and management in roadway bridges: preliminary results from the application to a post-tensioned concrete box girder bridge. *Procedia Structural Integrity*, 62:73–80. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.018>
- Peinado Santaella, R.(ed.) (1998). *De Ilurco a Pinos Puente: poblamiento, economía y sociedad de un pueblo de la Vega de Granada*. Diputación Provincial de Granada.
- Pirchio, D., Q Walsh, K., Kerr, E., Giongo, I., Giaretton, M., Weldon, B., Ciocci, L., Sorrentino, L. (2021). Integrated framework to structurally model unreinforced masonry Italian medieval churches from photogrammetry to finite element model analysis through heritage building information modeling. *Engin Structures*, 241: 112439. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112439>

- Requena-García-Cruz, MV., Romero-Sánchez, E., Morales-Esteban A. (2023). Dynamic performance of the Mosque-Cathedral of Córdoba under different earthquake scenarios: The Abd al-Rahman I sector. *Journal of Building Engineering*, 79:107853. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107853>
- Santini, S., Sabbatini, S., Sebastiani, C., Baggio, C. (2023). Integrated Modeling of Minerva Medica to Identify the Dynamic Effects of Rail-Traffic Vibrations. *Buildings*. 13(5):1308 <https://doi.org/10.3390/buildings13051308>
- Torres Balbás, L. (1957). Arte hispanomusulmán. Hasta la caída del califato de Córdoba. En: "España musulmana: hasta la caída del Califato de Córdoba (711-1031 d. J.C.)". *Historia de España* (5). Espasa-Calpe, Madrid, pp. 331-788.