

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2026
<https://doi.org/10.33586/hya.2026.4156>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Gemelo digital de una bóveda Gaussiana de obra de fábrica ***Digital Twin of a Gaussian Masonry Vault***

Antoni Clarés, Miquel Llorens, Rolando Chacón, Oriol Roselló

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2026.4156>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Clarés, A., Llorens, M., Chacón, R., & Roselló, O. (2026) Gemelo digital de una bóveda Gaussiana de obra de fábrica, *Hormigón y acero*, <https://doi.org/10.33586/hya.2026.4156>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2026 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

Gemelo digital de una bóveda Gaussiana de obra de fábrica

Digital Twin of a Gaussian Masonry Vault

Antoni Clarés^{a,b,*}, Miquel Llorens^{a,c}, Rolando Chacón^b, Oriol Roselló

¹ GMK Associats, Girona, España

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya

³ Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, Universitat de Girona
toni.clares@upc.edu

Abstract

Este artículo presenta el desarrollo y validación de un marco de gemelo digital abierto para estructuras de doble curvatura, aplicado a una bóveda gaussiana construida en Jaén en fábrica cerámica e inspirada en el legado de Eladio Dieste. La principal aportación consiste en la integración interoperable de diseño paramétrico, modelado BIM en estándar IFC, análisis por elementos finitos y monitorización geométrica mediante escáner láser dentro de un único flujo digital de diseño–construcción. Dado que las bóvedas gaussianas pueden desarrollar tracciones localizadas, el modelo paramétrico permitió identificar zonas críticas y definir necesidades de refuerzo, mientras que la monitorización durante las fases de cimbrado y descimbrado proporcionó datos reales para la calibración del modelo numérico. Los resultados muestran que la integración de nubes de puntos y modelos FEM mejora la predicción del comportamiento estructural y la caracterización As-Built. El trabajo demuestra que el uso de estándares abiertos (IFC) permite construir gemelos digitales reutilizables y técnicamente consistentes, facilitando la aplicación contemporánea de tipologías estructurales complejas.

Palabras clave: Gemelo digital abierto, bóveda gaussiana, estructuras de fábrica de doble curvatura, BIM, Análisi por elementos finitos, escáner láser.

This paper presents the development and validation of an open digital twin framework for double-curvature structures, applied to a Gaussian vault built in Jaén using ceramic masonry and inspired by the legacy of Eladio Dieste. The main contribution lies in the interoperable integration of parametric design, BIM modeling based on the IFC standard, finite element analysis, and geometric monitoring through laser scanning within a unified digital design–construction workflow. Given that Gaussian vaults can develop localized tensile stresses, the parametric model enabled the identification of critical areas and the definition of reinforcement requirements, while monitoring during the centering and decentering phases provided real data for calibrating the numerical model. The results show that the integration of point clouds and FEM models improves the prediction of structural behavior and the As-Built characterization. This work demonstrates that the use of open standards (IFC) allows the creation of reusable and technically consistent digital twins, facilitating the contemporary application of complex structural typologies.

Keywords: Open digital twin, Gaussian vault, Double-curvature masonry structures, BIM, Finite Element Analysis, Laser Scanning

1. Introducción

La optimización de los recursos en la construcción ha evolucionado en paralelo con los avances en las técnicas, los materiales y las herramientas de ingeniería. A lo largo de la historia, constructores y arquitectos han buscado maximizar la estabilidad minimizando al mismo tiempo el uso de materiales, lo que ha llevado al desarrollo de formas estructurales eficientes basadas en principios geométricos fundamentales. Entre ellas, las geometrías de doble curvatura — superficies que se curvan en dos direcciones, como cúpulas, láminas y bóvedas— destacan por su capacidad excepcional para distribuir las cargas de manera eficiente. Su doble curvatura permite que las fuerzas fluyan de forma natural, posibilitando estructuras más delgadas y ligeras que mantienen la estabilidad gracias a la acción de membrana en lugar de la flexión.

Las estructuras de doble curvatura han acompañado a la arquitectura y la ingeniería desde tiempos antiguos, siendo empleadas en diferentes culturas para cubrir grandes espacios con elegancia y solidez. Desde las cúpulas bizantinas y renacentistas hasta las bóvedas de la arquitectura islámica o los cascarones modernos de hormigón del siglo XX, estas formas han demostrado una extraordinaria combinación de belleza y eficiencia estructural. Su atractivo radica en conjugar principios geométricos simples con un desempeño resistente sobresaliente, lo que explica su vigencia hasta la actualidad.

Eladio Dieste, ingeniero uruguayo del siglo XX, es reconocido como uno de los grandes innovadores en el uso de las estructuras de doble curvatura. A través de su maestría en el manejo del ladrillo, desarrolló las llamadas bóvedas gaussianas, donde combinó tradición constructiva y rigor científico para crear formas ligeras, resistentes y de gran expresividad arquitectónica. Su obra, presente en iglesias, depósitos y terminales de transporte, evidencia cómo la creatividad estructural puede transformar materiales sencillos en soluciones de notable eficiencia y belleza [1][2][3].

Las bóvedas gaussianas representan un grupo particular de superficies de doble curvatura, cuya geometría se inspira en las superficies continuas estudiadas por Gauss en su teoría de la curvatura. En arquitectura y construcción, se aprovechan como estructuras laminares capaces de cubrir grandes claros con espesores mínimos de material.

Este artículo presenta la construcción y el análisis de una bóveda gaussiana en la ciudad de Jaén, concebida como un ejercicio de experimentación estructural y metodológica. En primer lugar, se ofrece una síntesis del legado del ingeniero uruguayo Eladio Dieste, cuyas bóvedas gaussianas constituyen un referente en la integración de geometría, eficiencia material y expresividad arquitectónica. A continuación, se introduce el concepto de gemelización digital, entendido como la articulación entre modelos digitales y procesos constructivos, y se expone la visión adoptada en este trabajo para vincular la filosofía BIM con el paradigma de los digital twins, destacando el potencial de estas herramientas para mejorar la trazabilidad, la interoperabilidad y el control de calidad en estructuras singulares. Posteriormente, se presenta el caso de estudio: una bóveda gaussiana construida en obra de fábrica e inspirada en los principios estructurales de Dieste. En este ejemplo, el proceso de diseño se apoyó en técnicas paramétricas que facilitaron la identificación temprana de zonas críticas y la definición de refuerzos; durante la construcción se aplicaron tecnologías de escaneo láser para el seguimiento de las fases de cimbrado y descimbrado, contrastándolas con simulaciones de elementos finitos. Todo ello se integró en un modelo digital abierto en formato IFC, lo que permitió generar un registro estandarizado de la bóveda, garantizando su reutilización e interoperabilidad y ofreciendo una aproximación práctica a la convergencia entre tradición constructiva y herramientas digitales contemporáneas. Esta investigación se enmarca en una colaboración academia-industria formalizada a través de un

Programa de Doctorado Industrial en Cataluña, España, cuyo objetivo es contribuir al avance de la digitalización de las bóvedas características de la región (volta catalana) pero de manera más general, las estructuras de doble curvatura.

2. Bóvedas Gaussianas

Una bóveda gaussiana puede entenderse como una superficie de doble curvatura no desarrollable, en la cual la curvatura principal en una dirección difiere de la curvatura principal en la dirección ortogonal. Así, la superficie posee curvaturas de signo distinto en diferentes regiones, lo que le confiere estabilidad espacial y capacidad de redirigir los esfuerzos de forma natural. Estas superficies se generan generalmente a partir de funciones matemáticas que definen parábolas, elipses u ondulaciones sinusoidales combinadas, con el fin de obtener una doble curvatura continua. En esencia, las bóvedas gaussianas se conciben como membranas espaciales en las que ningún segmento recto pertenece a la superficie, a diferencia de las superficies regladas. Las formas gaussianas permiten una gran variedad de configuraciones: desde cubiertas onduladas que alternan crestas y valles, hasta superficies complejas que pueden adaptarse a plantas libres de geometría irregular.

Las bóvedas gaussianas de Dieste ejemplifican una fusión única entre la geometría de superficies regladas y la acción de arco, en la que las láminas deben hacer frente a importantes fuerzas de empuje. Estas bóvedas no son meras membranas delgadas; funcionan como arcos autoportantes, resistiendo las cargas verticales mediante compresión, al tiempo que gestionan el empuje horizontal a través de estrategias de refuerzo integradas. Una distinción crucial en el comportamiento de las bóvedas surge entre las cortas y las largas (Figura 1). Las bóvedas cortas se comportan como arcos, donde el principal desafío estructural consiste en resistir las fuerzas de empuje que tienden a aplanar la bóveda. Dieste abordó este problema incorporando elementos a tracción y refuerzos estratégicamente dispuestos que impiden una expansión lateral incontrolada. Las bóvedas largas se comportan como vigas, donde la compresión domina en la parte superior y la tracción se desarrolla en la inferior. En estos casos, la propia bóveda actúa como un alma, distribuyendo los esfuerzos entre las regiones de compresión y tracción.

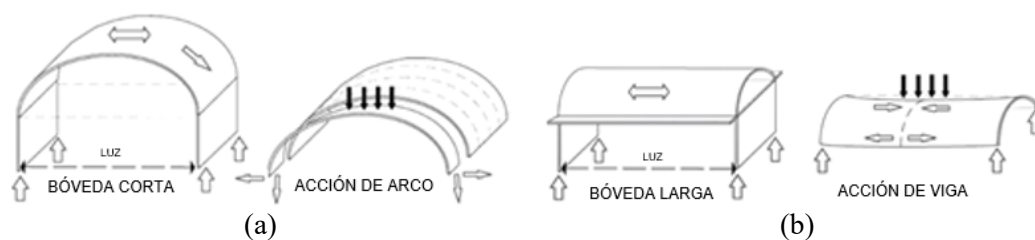


Figura 1: Acción de arco en bóvedas cortas (a), comportamiento de viga en bóvedas largas (b).

Las bóvedas gaussianas desarrolladas por Dieste se encuadran principalmente en la categoría de bóvedas cortas, donde el reto estructural dominante es el control del empuje del arco más que la flexión global. Su solución combina la estabilización mediante curvatura con la incorporación de tirantes y refuerzos destinados a contener las fuerzas laterales, reflejando un enfoque de resistencia basado en la forma y en la eficiencia material. La Figura 2 muestra el sistema de refuerzo de la Iglesia de

Atlántida, con armaduras homogéneas y cables de acero postensados que contrarrestan el empuje que tendería a aplanar la bóveda.

La formulación adoptada en este trabajo se apoya en estos principios, entendiendo las bóvedas gaussianas como superficies de doble curvatura generadas por catenarias de flecha variable cuya ondulación transversal incrementa la rigidez frente al pandeo y permite estructuras delgadas estabilizadas principalmente por su forma [4].



Figura 2: Refuerzo de la iglesia de Atlántida (a), cable de acero para controlar la acción de arco en las bóvedas gaussianas (b). Fuente [4].

3. Gemelos digitales de elementos estructurales de doble curvatura

Un gemelo digital en el entorno construido puede definirse como una representación virtual dinámica de un activo físico —ya sea un edificio, una infraestructura o un elemento estructural— que integra su geometría, propiedades materiales, procesos constructivos y datos procedentes de su operación de una manera síncrona, que permita tomar decisiones a tiempo. No se trata únicamente de un modelo 3D o un modelo de simulación de alta fidelidad, sino de un constructo organizado de información que permite conectar simulaciones, información proveniente de sensores, información documental, descripciones geométricas y modelos predictivos, permitiendo comprender, monitorizar y gestionar el ciclo de vida completo del activo. En este sentido, el gemelo digital actúa como un puente entre el mundo físico y el digital, facilitando la toma de decisiones basadas en información precisa, interoperable y continuamente actualizada. En esta investigación, el concepto de gemelo digital se entiende como un conjunto de datos organizados con información proveniente de distintos agentes durante el proyecto, la construcción y el mantenimiento [5].

Los elementos estructurales están presentes en prácticamente todos los activos construidos. Lograr la gemelización digital de elementos estructurales específicos implica conectarlos con un dominio más amplio de información, en el que se integran la geometría, la logística constructiva, la simulación y la recopilación de datos del mundo real. El auge de los gemelos digitales en los últimos años sugiere que un gemelo digital integral de un elemento estructural puede proporcionar información organizada a los gestores relacionada con su construcción y operación, que a su vez puede vincularse con otros dominios relevantes [6]. El creciente interés en los gemelos digitales aplicados a sistemas estructurales ha catalizado un profuso conjunto de artículos en la literatura

que exploran su implementación en la ingeniería estructural [7–9]. Una de las conclusiones que se vislumbran es que la utilidad de los gemelos digitales (DT) aumenta con la cantidad de fuentes de información que integran.

Actualmente, los estándares abiertos de Building Information Modelling (BIM), como las Industry Foundation Classes (IFC) [10], proporcionan un marco natural para el desarrollo, ya que permiten integrar diversas fuentes de información. Cada vez se entiende mejor que, además de una buena descripción geométrica, los gemelos deben incorporar información del mundo real en diversas formas para lograr una comprensión integral de su entorno e interacciones [11]. Esto implica incluir datos de distintas fuentes, como sensores, información textual, imágenes, nubes de puntos o representaciones visuales. Al sintetizar esta información, los gemelos pueden reflejar mejor la complejidad de los escenarios reales, aumentando así su aplicabilidad y capacidad de adaptación. En el caso del patrimonio construido, los modelos digitales requieren desarrollos específicos para alcanzar la interoperabilidad [12–15].

Sin embargo, virtualizar geometrías intrincadas como las superficies arquitectónicas de doble curvatura presenta desafíos en distintos niveles. En particular, estas estructuras complejas requieren una atención especial en su descripción geométrica. Las vigas pueden describirse mínimamente con dos puntos. Las superficies planas pueden representarse a partir de vértices. Las formas de doble curvatura, en cambio, requieren muchos más parámetros descriptivos, tales como puntos, líneas, planos normales, aristas o curvas, que demandan representaciones detalladas.

Este artículo presenta la aplicabilidad y adaptabilidad de los estándares y herramientas abiertos para la gemelización digital de bóvedas de fábrica de doble curvatura descritos en [16] para un caso de estudio real. La motivación surge de la necesidad de garantizar que este tipo de estructuras puedan ser representadas, monitorizadas y analizadas dentro de marcos interoperables y transferibles entre distintos agentes durante la vida útil. La investigación se guía por las siguientes preguntas:

- ¿Puede emplearse de manera efectiva el estándar IFC para representar la geometría, los materiales y los sistemas de monitorización de las bóvedas de fábrica de doble curvatura?
- ¿Hasta qué punto el esquema Ifc es adaptable a la complejidad de las geometrías patrimoniales de doble curvatura?
- ¿Cómo puede integrarse la información de un elemento real en el gemelo?
- ¿Cuáles son los retos y el potencial de vincular modelos basados en IFC con entornos de simulación estructural?

El objetivo principal es evaluar cómo los estándares abiertos —en particular IFC— pueden aprovecharse para modelar, monitorizar y simular bóvedas de fábrica de doble curvatura de manera que se favorezca su aplicabilidad en distintos contextos y su adaptabilidad a diversas tipologías estructurales y fuentes de datos.

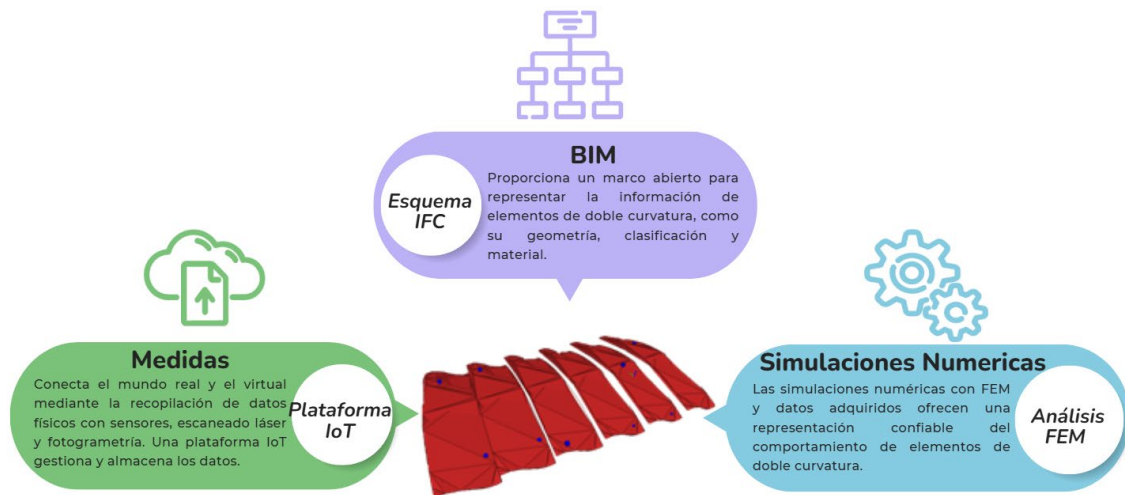


Figura 3. Marco integrador IFC-IoT-FEM para elementos estructurales de doble curvatura.

A continuación, se presenta el caso de estudio desarrollado en Jaén, como ejemplo ilustrativo del proceso de diseño y construcción de una bóveda de doble curvatura. Este análisis permite contextualizar los retos geométricos y estructurales de la obra, para posteriormente profundizar en un apartado específico en los aspectos relacionados con la gemelización digital y su integración en el flujo de trabajo.

4. Caso de estudio. Bóveda Gaussiana, Jaén.

El caso de estudio que se presenta explora la aplicabilidad de técnicas digitales y analíticas avanzadas en una bóveda gaussiana construida en Jaén, España. Esta estructura se configuró como un caso de estudio relevante que abarcó tanto las fases de diseño como de construcción. Su elegancia geométrica y eficiencia funcional ejemplifican la necesidad de emplear herramientas computacionales modernas para digitalizar adecuadamente estas formas arquitectónicas tradicionales. El diseño se inspira en el reconocido “Depósito Julio Herrera y Obes” en Montevideo, Uruguay, una estructura de fábrica icónica celebrada por su enfoque pionero en el diseño estructural y formal [2-3]. Al adaptar este legado a un contexto contemporáneo, la bóveda de Jaén conecta la inventiva arquitectónica histórica con metodologías paramétricas de vanguardia. Su geometría supuso un desafío para ser definida como un elemento estándar en IFC. El conjunto de bóvedas gaussianas conforma un sistema de cubierta compuesto por seis bóvedas interconectadas que cubren una superficie total de 473,38 m². Cada bóveda presenta una luz de 4,7 m, un ancho de 16 m y una altura de 1,97 m, con un espesor principal de 150 mm. La lámina está formada por tres capas de ladrillo cerámico de 35 mm de espesor y dos capas de mortero a base de cal. Este proyecto fue diseñado por el arquitecto Oriol Roselló y calculado estructuralmente por *GMK Associats*. La Figura 4 muestra una vista general (a), una vista frontal (b), así como una parte de la bóveda (c) durante las obras de construcción.



(a)



(b)

(c)

Figura 4. Vista general (a), sección de las bóvedas gaussianas (b), bóveda en fase de construcción (c).

Este caso de estudio se describe en las siguientes fases clave:

- Proceso de análisis estructural paramétrico.
- Caracterización de materiales – Ensayos experimentales de las propiedades de la fábrica.
- Simulación numérica avanzada – Análisis por Elementos Finitos (FEA) incorporando el comportamiento del material.
- Prototipo a escala 1:1 – Metodología constructiva.
- Construcción y monitorización – Escaneo láser para la monitorización durante la construcción.
- Comparación de mediciones y simulaciones – Validación del comportamiento estructural.

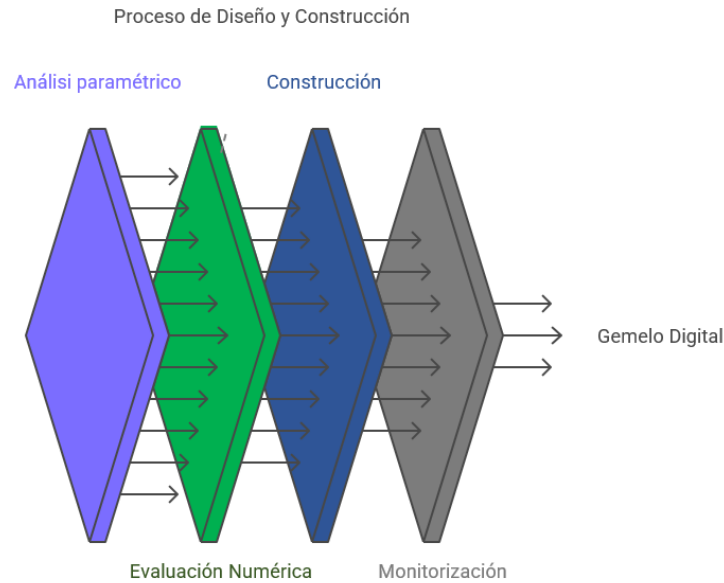


Figura 5. Diagrama del marco metodológico: Análisi paramétrico, análisis numérico, construcción y monitorización para la generación del gemelo digital

Todas estas capas se integran en un entorno BIM basado en IFC. En primer lugar, se emplean herramientas geométricas de tipo paramétrico que permiten trabajar con geometrías complejas propias de las superficies de doble curvatura. Posteriormente, los modelos se exportan a entornos de análisis por elementos finitos, aplicando formulaciones no lineales con elementos tipo shell. Finalmente, se describen geoméricamente las distintas partes y el modelo as-built en base al estándar Ifc, incorporando el concepto novedoso de advanced brep. Este último se integra a través de la herramienta MatchFEM, desarrollada en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y optimizada específicamente para estructuras de doble curvatura.

4.1 Proceso de análisis estructural paramétrico

La curvatura gaussiana es el concepto fundamental para comprender la naturaleza geométrica de estas superficies de doble curvatura, ya que permite clasificar y diferenciar sus formas. En términos generales, cuando una superficie presenta una configuración similar a una cúpula o una esfera, se habla de curvatura gaussiana positiva. Por el contrario, cuando adopta formas de silla de montar o paraboloides hiperbólicos, se trata de curvatura gaussiana negativa. Esta clasificación resulta esencial para describir el comportamiento estructural y la eficiencia resistente de las bóvedas y láminas. Las bóvedas gaussianas, especialmente aquellas inspiradas en Eladio Dieste [1-3], pueden describirse como una superficie de doble curvatura con una forma sinusoidal ondulada en una dirección, la longitudinal, y otra curvatura en la dirección transversal. Una superficie de bóveda gaussiana (S) puede representarse matemáticamente según la ecuación (1):

$$S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \quad (1)$$

Donde (u) y (v) son parámetros que representan, respectivamente, la dirección longitudinal y transversal, y (x) , (y) y (z) corresponden a las coordenadas cartesianas de la superficie. La curvatura longitudinal, es decir, la ondulación sinusoidal del perfil (u) , puede describirse mediante

la expresión (2), en la cual (A) es la amplitud de la onda y (λ) es la longitud de la misma de cresta a cresta o de valle a valle. La posición de un punto en la onda varía entre $-L/2$ y $L/2$.

$$z(u) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} u\right) \quad (2)$$

Por otro lado, la dirección transversal (v) sigue una catenaria o una parábola para lograr una distribución óptima de cargas, tal como se describe en la ecuación (3). En ésta, (H) es un parámetro de entrada que representa la altura de la bóveda en el centro, mientras que (a) es el factor de escala de la catenaria, determinado por la luz y la flecha. La posición de un punto en la curva varía entre $-W/2$ y $W/2$.

$$z(v) = H \cosh\left(\frac{v}{a}\right) - H \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones (2) y (3), la bóveda gaussiana de doble curvatura puede expresarse según la ecuación (4).

$$S(u, v) = \left(u, v, A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} u\right) + H \cosh\left(\frac{v}{a}\right) - H\right) \quad (4)$$

Rhino.Geometry [17] se presenta como una herramienta versátil que permite trabajar con una descripción explícita del espacio geométrico en tres dimensiones. A través de su amplia biblioteca de clases y métodos, ofrece la posibilidad de definir y manipular de manera precisa puntos, curvas, superficies y volúmenes, lo que resulta especialmente útil para representar geometrías complejas como las de doble curvatura. Esta capacidad de parametrización y control detallado convierte a Rhino.Geometry en un entorno adecuado para la experimentación arquitectónica y estructural, así como para la integración con procesos de análisis y simulación digital. Cabe señalar que se trata, además, de una manera directa de incorporar dibujo mediante el motor de Python 3 integrado en Rhino v.8 y Grasshopper [18], lo que potencia la versatilidad del entorno al permitir el desarrollo de rutinas personalizadas y automatizadas.

Rhino.Geometry presenta versatilidad para modelar una bóveda gaussiana incorporando tanto perfiles sinusoidales como catenarios para definir su geometría. Se emplean *Point3d* y *PolylineCurve* para crear una malla de puntos 3D y las curvas correspondientes que representan la estructura de la bóveda. La función sinusoidal introduce ondulaciones longitudinales a lo largo de la luz de la bóveda, mientras que la función catenaria define el perfil transversal para aportar realismo estructural. Estos perfiles se combinan para generar puntos en el espacio 3D, que luego se transforman en una superficie mediante *Brep.CreateFromLoft*. La geometría de la superficie se refina posteriormente aplicando un espesor con *Brep.CreateOffsetBrep*, obteniendo así un modelo más realista de la estructura de doble curvatura. La Figura 6 muestra un flujo de diseño simplificado para una bóveda gaussiana, con un valor de entrada dado, el proceso de generación en ambas direcciones y la representación final de la superficie como salida.

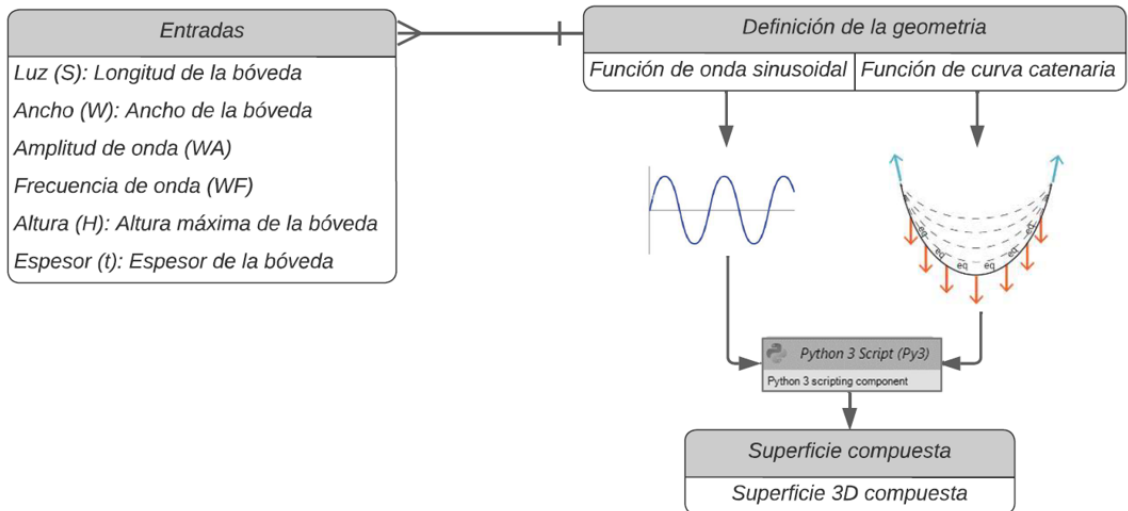


Figura 6. Diagrama de flujo paramétrico para la geometría de la bóveda gaussiana y su representación geométrica.

Una vez parametrizada la geometría de la bóveda, se lleva a cabo una primera evaluación del rendimiento estructural utilizando Kiwi!3D [19], un complemento integrado en Grasshopper que permite realizar *Isogeometric Analysis* (IGA). La IGA es una forma especializada de análisis por elementos finitos que emplea NURBS en lugar de la discretización tradicional de elementos. A diferencia del modelado por elementos finitos (FEM) convencional, en el que los grados de libertad se asignan a nodos discretos de la malla, la IGA los define a través de puntos de control, lo que posibilita una representación más flexible y precisa de geometrías complejas. Este método mejora la suavidad y precisión del análisis estructural, aumentando así la fiabilidad de las simulaciones. Mediante el uso de Kiwi!3D, se obtiene una primera evaluación de la distribución de tensiones de la bóveda. Esto permite realizar optimizaciones tempranas del diseño para mejorar la eficiencia estructural. El proceso iterativo ajusta progresivamente la geometría de la bóveda hasta alcanzar una forma optimizada y eficiente frente a tensiones (Figura 7).

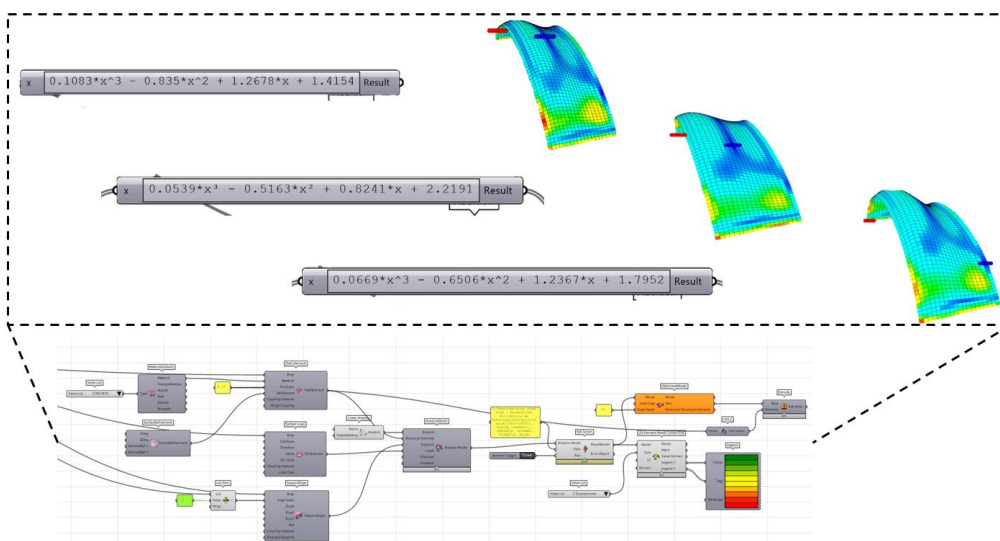


Figura 7. Análisis estructural paramétrico.

4.2 Caracterización de materiales

El material utilizado fue fábrica de ladrillo cerámico unida con mortero de base cal. En algunos especímenes de laboratorio se incorporó refuerzo de fibras para conocer la posible mejora de su resistencia a tracción y su comportamiento frente a la fisuración. Se realizaron seis ensayos destructivos de laboratorio. Se efectuaron tanto ensayos de tracción como de compresión para determinar las propiedades mecánicas de la fábrica y el mortero, centrándose en particular en el módulo elástico y el comportamiento a fisuración bajo carga de tracción $f_t=0,39 \text{ N/mm}^2$ lo que representa un incremento aproximado del 50% en comparación con los valores típicos de fábrica no reforzada. A partir de las curvas tensión-deformación se obtuvo un módulo de Young de $E=6543,94 \text{ N/mm}^2$, definido como una propiedad homogeneizada. Suponiendo una relación de Poisson $\nu=0,2$, representativo de materiales de fábrica homogeneizados dentro del rango habitualmente reportado en la literatura técnica ($\nu = 0,15-0,25$) [20], se obtiene el correspondiente de modulo de elasticidad trasversal $G=2726,64 \text{ N/mm}^2$. Los resultados se resumen en la tabla 1. La Figura 8 muestra el montaje del ensayo, ilustrando la configuración empleada.

Tabla 1. Propiedades mecánicas experimentales de la fábrica.

$E \text{ [N/mm}^2\text{]}$	ν	$G \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$f_t \text{ [N/mm}^2\text{]}$
6543,94	0,2	2726,64	0,39



Figura 8. Montaje de la fábrica con refuerzo para el ensayo de flexión a cuatro puntos.

4.3 Simulación numérica avanzada.

Se denomina en este trabajo simulación numérica avanzada a un modelo no lineal por elementos finitos que incorpora leyes constitutivas específicas para fábrica cerámica, diferenciando el comportamiento a compresión y a tracción, así como la degradación de rigidez asociada a la fisuración. Más allá de un análisis FEM estándar, el modelo integra curvas tensión-deformación obtenidas experimentalmente, definición explícita de ablandamiento post-fisura y ajuste de rigideces de contorno a partir de mediciones reales, lo que requiere parametrización experta del comportamiento mecánico del material.

Se llevó a cabo un análisis por elementos finitos (FEA) detallado para evaluar el estado tensional de las bóvedas gaussianas, prestando especial atención a la identificación de las zonas susceptibles a esfuerzos de tracción bajo diferentes condiciones de carga. Se simularon múltiples casos de carga, incluyendo los estados límite de servicio y último. El modelo numérico se desarrolló empleando Abaqus [21] con elementos tipo shell, utilizando propiedades de material obtenidas a partir del programa experimental. Se consideraron peso propio, sobrecargas de servicio y acción del viento, esta última introducida como presión normal equivalente sobre la superficie según

coeficientes aerodinámicos para cubiertas curvas. Asimismo, se analizaron configuraciones de cargas simétricas de mantenimiento. La geometría del modelo se generó utilizando la misma geometría empleada previamente, lo que permitió una transición fluida de la representación digital al entorno de análisis. La Figura 9 muestra una visión general de los resultados, destacando la localización de los esfuerzos de tracción tanto en las regiones superiores como inferiores.

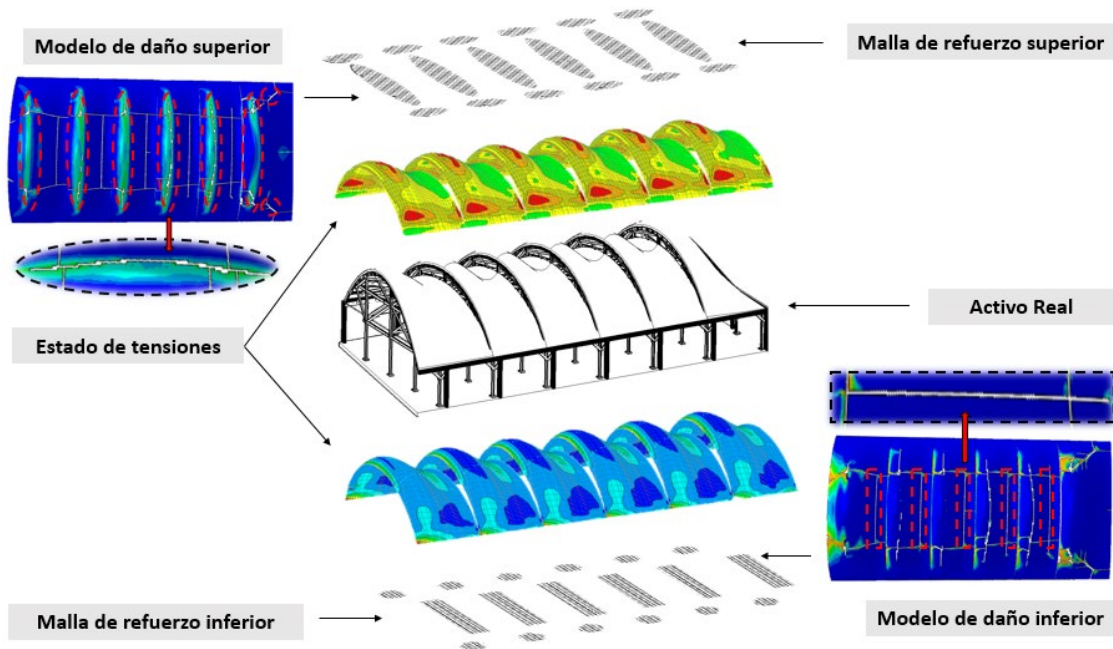


Figura 9. Tensiones en la parte superior e inferior de las bóvedas gaussianas.

4.4 Prototipo a escala 1:1 – Metodología constructiva.

Antes de la construcción de la bóveda gaussiana a escala real en Jaén, se levantó un prototipo a escala 1:1 en Cataluña con tres objetivos principales: capacitar al equipo de obra en las técnicas específicas de montaje, validar la geometría paramétrica optimizada y ensayar la instalación del encofrado junto con la precisión geométrica alcanzable.

Para verificar la fidelidad del prototipo respecto al modelo teórico, se realizó un levantamiento geométrico mediante fotogrametría con un dron Mavic Air 2. Las imágenes obtenidas se procesaron para generar una nube de puntos densa y reconstruir la superficie 3D. Posteriormente, un script en Python extrajo una expresión polinómica a partir de los datos fotogramétricos, comparada con la función equivalente del modelo paramétrico. La alineación y las desviaciones se evaluaron mediante mapas codificados por colores, mostrando las diferencias entre ambos modelos (Figura 10). Este paso permitió validar tanto las metodologías constructivas como las digitales de medición y digitalización a partir de herramientas sencillas de fotogrametría. Si bien en el caso real se contaría con escáner láser, la fotogrametría, aunque menos precisa, posibilita aplicar la misma metodología basada en análisis de nubes de puntos, ofreciendo así una alternativa de bajo coste para las pruebas preliminares. Cabe señalar que estas pruebas se realizaron en Marzá, Cataluña, en el taller de la empresa de cimbrado y descimbrado.

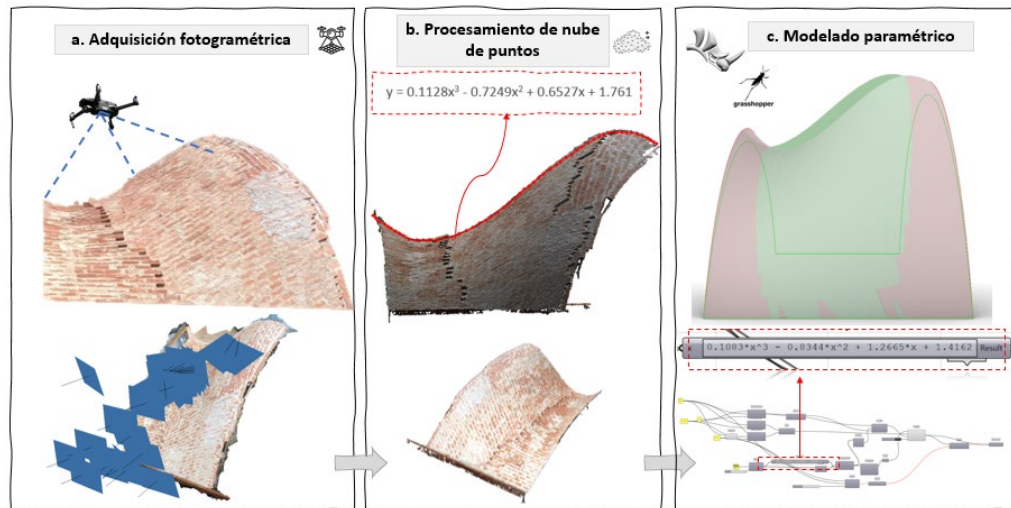


Figura 10: Levantamiento fotogramétrico aéreo del prototipo con dron Mavic Air 2 (a). Expresión matemática polinómica derivada de la fotogrametría (b). Geometría reconstruida a partir de fotogrametría (rojo) comparada con el modelo paramétrico (verde), superposición detallada de ambas geometrías mostrando desviaciones (c).

4.5 Construcción y monitorización – Escaneo láser para la monitorización durante la construcción.

Tras la validación del prototipo a escala real, se inició la construcción de la estructura definitiva en Jaén, que constituye el núcleo del caso de estudio aquí presentado. No obstante, el alcance de este artículo se centra exclusivamente en los procesos de cimbrado y descimbrado de la obra, fases que en estructuras singulares de geometría compleja presentan un impacto técnico y económico elevado. Las cimbras en este tipo de soluciones son sistemas diseñados y fabricados específicamente para el proyecto, de uso no reutilizable, cuyo montaje y retirada dependen de la secuencia y jerarquía de las fases constructivas, influyendo directamente tanto en los costes de ejecución como en la respuesta mecánica y la geometría final de la estructura. Otros aspectos constructivos, aunque relevantes, no forman parte del objetivo específico de esta investigación.

Durante estas fases críticas de la construcción, se implementaron técnicas de medición con escáner láser que desempeñaron un papel fundamental. En primer lugar, permitieron validar los desplazamientos de puntos clave de las bóvedas durante el descimbrado, lo que hizo posible contrastar los valores observados con los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas. Esta verificación fue esencial para garantizar que la respuesta estructural se mantuviera dentro de los márgenes previstos en el diseño paramétrico y en el análisis por elementos finitos. En segundo lugar, las mismas mediciones sirvieron para generar las geometrías finales *As-Built* de las bóvedas, constituyendo un registro digital detallado y preciso de la obra ejecutada. Estas geometrías *As-Built* adquirieron una importancia decisiva en el marco de la gemelización digital. A partir de ellas se construyó el modelo BIM sobre el cual se desarrolló la interoperabilidad descrita posteriormente en el apartado 5. En este sentido, el escaneo láser no solo cumplió la función de control de obra, sino que también proporcionó la base informativa indispensable para la generación del gemelo digital.

Durante la construcción se utilizó escaneo láser tanto antes como después de la instalación del encofrado, con el fin de monitorizar y registrar los desplazamientos tras su retirada. Los datos se capturaron mediante un escáner láser FARO Focus3D, generando una nube de puntos de alta densidad con más de 170 millones de puntos. La Figura 11(a) muestra el modelo geométrico inicial, incluyendo el encofrado, mientras que su equivalente en obra se presenta en la Figura 11(b). La Figura 11 recoge la nube de puntos obtenida con cimbra y la Figura 12 recoge la nube de puntos tras el descimbrado.

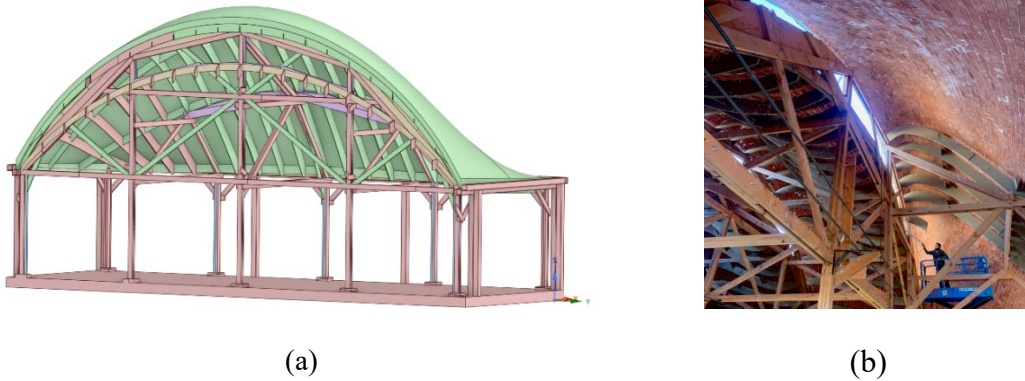


Figura 11. Modelo de soportes de madera de la última bóveda (a), soportes de madera en obra de una de las bóvedas (b) y resultados obtenidos (c).

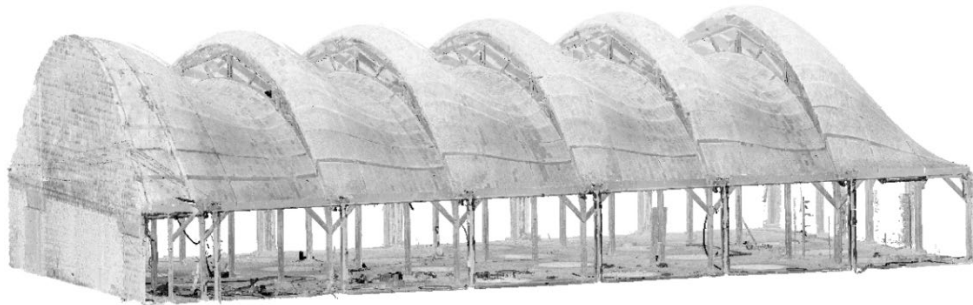


Figura 12. Nube de puntos de las bóvedas gaussianas con la estructura de madera.



Figura 13. Nube de puntos de las bóvedas gaussianas sin la estructura de madera.

Se realizó un análisis comparativo entre los dos escaneos utilizando CloudCompare [22], aplicando el algoritmo Cloud-to-Mesh Distance para detectar desviaciones geométricas. La metodología seguida comprende los siguientes pasos:

- Búsqueda del vecino más cercano: para cada punto de la nube de referencia (bóveda con encofrado), el algoritmo identifica el punto más próximo en la nube deformada (bóveda tras el descimbrado).
- Cálculo de la distancia euclidiana: se determina el desplazamiento absoluto para cada punto.
- Ajuste local de superficie: en lugar de depender únicamente de las distancias punto a punto, el método incorpora varios puntos vecinos para evaluar las variaciones geométricas locales.
- Visualización: los desplazamientos calculados se representan como un campo escalar sobre la nube de puntos, utilizando un gradiente de color para indicar las regiones de deformación (Figura 14).

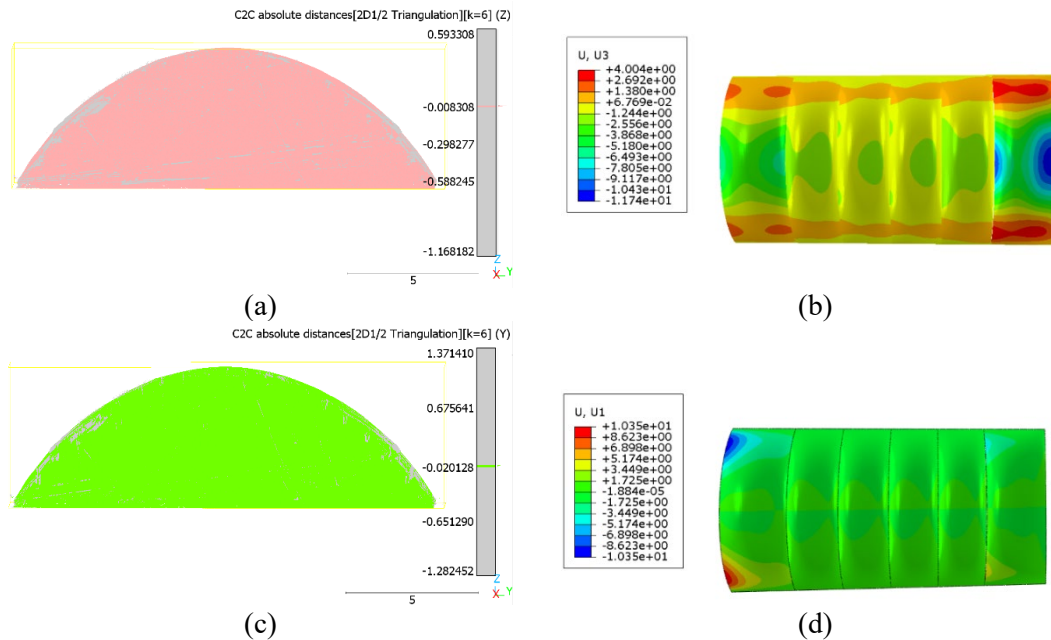


Figura 14: Mapa de desplazamientos codificado por colores que compara los estados antes y después de la retirada del encofrado. Nube de puntos de referencia y resultados comparativos para el cálculo de desplazamientos verticales (a), resultados FE de los desplazamientos verticales (b), nube de puntos de referencia y resultados comparativos para el cálculo de desplazamientos laterales (c) y resultados FE con desplazamientos laterales en mm (d).

Para validar el modelo numérico, los desplazamientos geométricos medidos se compararon con las predicciones del FEM. Las distancias calculadas a partir del análisis de nubes de puntos aportaron información clave sobre la respuesta estructural de la bóveda. Con respecto a desplazamientos verticales, el análisis de la nube de puntos reveló un desplazamiento vertical máximo de aproximadamente 8 mm. Sin embargo, las predicciones del modelo indicaron un desplazamiento hacia abajo de 4 mm en la clave de la bóveda y un desplazamiento hacia arriba de 4 mm cerca de los tercios del vano. Con respecto al análisis de desplazamientos laterales, los resultados de la nube de puntos mostraron desplazamientos laterales de aproximadamente 20 mm en cada lado mientras que el modelo predijo 10 mm de desplazamiento lateral por lado, en direcciones opuestas.

Las discrepancias observadas entre los datos experimentales y las predicciones numéricas pusieron de manifiesto la influencia de las condiciones de contorno en la respuesta estructural. El modelo FEM desarrollado es tridimensional para las bóvedas gaussianas, aunque la subestructura de acero no se modeló explícitamente. En su lugar, su efecto mecánico se representó mediante apoyos elásticos equivalentes que restringen el movimiento con rigideces finitas en las distintas direcciones, permitiendo la transmisión de esfuerzos verticales y horizontales. Los coeficientes de rigidez de estos soportes se ajustaron mediante un proceso de calibración basado en los desplazamientos medidos por escáner láser. Esta actualización permitió mejorar la concordancia entre la respuesta numérica y la observada en obra.

5. Integración de modelos de datos

En el contexto de la representación de bóvedas de fábrica de doble curvatura, el uso del estándar IFC [10] ofrece una vía estructurada para codificar la geometría, los materiales y, en su caso, los sistemas de monitorización dentro de un marco de gemelo digital. Desde el punto de vista geométrico, el esquema admite representaciones mediante Breps, donde *IfcFacetedBrep* constituye la solución convencional: su empleo supone la utilización de un número considerable de pequeños trozos planos que describen con detalle la superficie, lo que en la práctica se asemeja a una discretización que incrementa el tamaño del archivo y añade numerosas líneas al texto. En contraste, *IfcAdvancedBrep* se presenta como una alternativa más ligera y versátil, capaz de manejar de forma más eficiente geometrías de doble curvatura. La caracterización material puede articularse mediante *IfcMaterialConstituent* y *IfcMaterialConstituentSet*, lo que permite una descripción coherente de sistemas compuestos como la fábrica de ladrillo y mortero. Si bien el esquema IFC ofrece la posibilidad de vincular sistemas de monitorización a través de *IfcSensor*, en el caso analizado no se ha hecho uso de dichas entidades. La integración de información estructural real en el gemelo se logra mediante flujos de trabajo paramétricos —en este caso facilitados por MatchFEM [23][24] en el entorno Grasshopper—, el cual permite convertir geometrías paramétricas en modelos IFC en un constructo dinámico, conectado con herramientas de análisis. Todo ello pone de relieve tanto las oportunidades como los retos de vincular modelos basados en IFC con entornos de simulación estructural: aunque es posible transformar archivos IFC en formatos de entrada reconocidos por plataformas de elementos finitos como Abaqus u OpenSees, la complejidad de las geometrías patrimoniales y la brecha de interoperabilidad entre los estándares descriptivos de BIM y los programas de análisis siguen constituyendo cuestiones abiertas.

5.1 Descripción Ifc de la geometría

IfcShapeRepresentation es un concepto clave en el esquema Industry Foundation Classes (IFC), utilizado para describir las representaciones geométricas y visuales de los objetos en un contexto de Building Information Modeling (BIM). Define la representación geométrica de objetos (muros, losas, vigas, ventanas) y ofrece distintos niveles de detalle y tipos de representación según los diferentes casos de uso. Para la representación de bóvedas de doble curvatura, se estudia la aplicabilidad y adaptabilidad de los Breps (Boundary Representations) y de los Advanced Breps dentro del esquema IFC. Es necesario comprender si estos constructos son adecuados gracias a su capacidad de manejar geometrías complejas con precisión. Los Breps definen la geometría de un objeto mediante un conjunto de caras, aristas y vértices, lo que permite la representación de superficies de forma libre, como bóvedas de doble curvatura o sinusoidales. Los Advanced Breps amplían esta capacidad al admitir superficies y curvas basadas en NURBS, esenciales para capturar las transiciones suaves y las formas irregulares presentes en las bóvedas arquitectónicas. La diferencia entre Breps y Advanced Breps radica en la cantidad de datos necesarios para la generación de un código IFC de una bóveda determinada. En el primer caso, la bóveda requiere la definición de una lista de aristas, caras y puntos, lo que se traduce en archivos IFC de mayor tamaño. En el segundo, la descripción precisa de las curvas reduce la cantidad de información requerida, lo que resulta ventajoso desde esta perspectiva.

La continuidad entre el modelo paramétrico descrito en el apartado 4.1 y su correspondiente transformación en geometría IFC se asegura a través del uso de MatchFEM. Este flujo de trabajo permite que la definición paramétrica inicial —concebida en un entorno de diseño computacional como Grasshopper— no quede limitada a un ejercicio de generación geométrica, sino que se proyecte hacia un formato interoperable estandarizado. MatchFEM actúa como puente entre la flexibilidad del modelado paramétrico y la codificación estructurada que ofrece IFC, traduciendo las entidades geométricas en representaciones *IfcAdvancedBrep* y vinculándolas con descriptores materiales y estructurales. De este modo, el gemelo digital mantiene coherencia entre la etapa de diseño paramétrico y su formalización como modelo IFC, garantizando que las propiedades y relaciones definidas en el proceso generativo inicial puedan ser reutilizadas y explotadas en fases posteriores de simulación, análisis o gestión del activo.

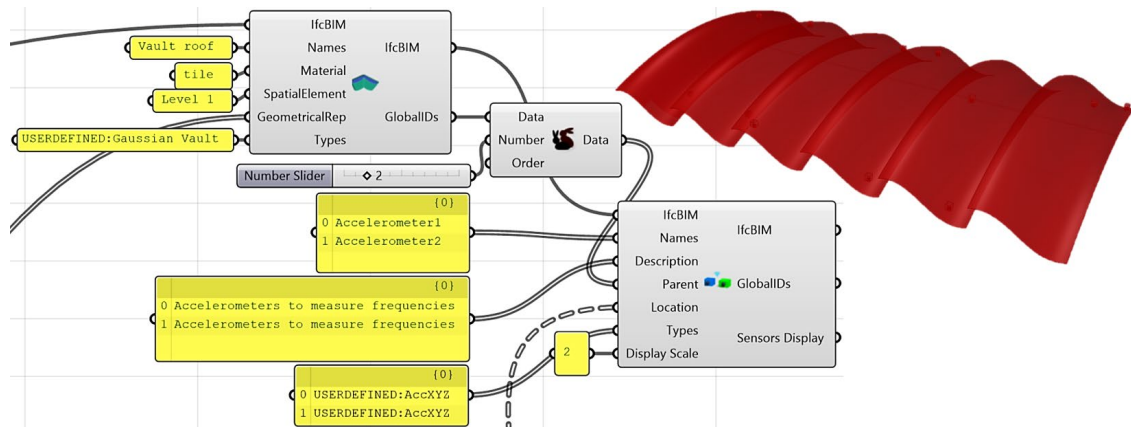


Figure 15. Conversión de geometría utilizando MatchFEM.

5.2 Descripción Ifc de los materiales

En el ámbito del BIM, la especificación de un conjunto de constituyentes para los materiales resulta esencial cuando se trabaja con obra de fábrica. Esta especificación garantiza que el comportamiento compuesto, las propiedades físicas y el rendimiento estructural de la bóveda queden representados en la descripción global del elemento. Con el fin de presentar una descripción coherente del material en bóvedas de ladrillo y mortero, conviene señalar distintas clases del esquema IFC:

- *IfcMaterial* es una entidad definida en el esquema Industry Foundation Classes (IFC), ampliamente utilizada en el modelado de información de la construcción (BIM). Representa un material único que puede asignarse a elementos o componentes dentro de un modelo constructivo. El material puede asociarse a elementos para definir sus características físicas.
- *IfcMaterialConstituent* es una entidad especializada del esquema IFC que permite definir y gestionar materiales que forman parte de un sistema compuesto. Resulta particularmente útil para representar materiales heterogéneos en los que múltiples constituyentes contribuyen a la composición y a las propiedades generales de un elemento o componente constructivo. *IfcMaterialConstituent* se vincula con una entidad *IfcMaterial*, especificando el material del constituyente como atributo.
- *IfcMaterialConstituentSet* es una entidad del esquema IFC que organiza múltiples constituyentes de material en un conjunto cohesionado para representar un sistema compuesto. Esta entidad es especialmente útil cuando se trabaja con materiales formados por varios constituyentes individuales que aportan conjuntamente a las propiedades y al comportamiento de un elemento o componente constructivo.

La Figura 16 muestra cómo estas clases se encuentran interconectadas en la descripción global de un modelo IFC.

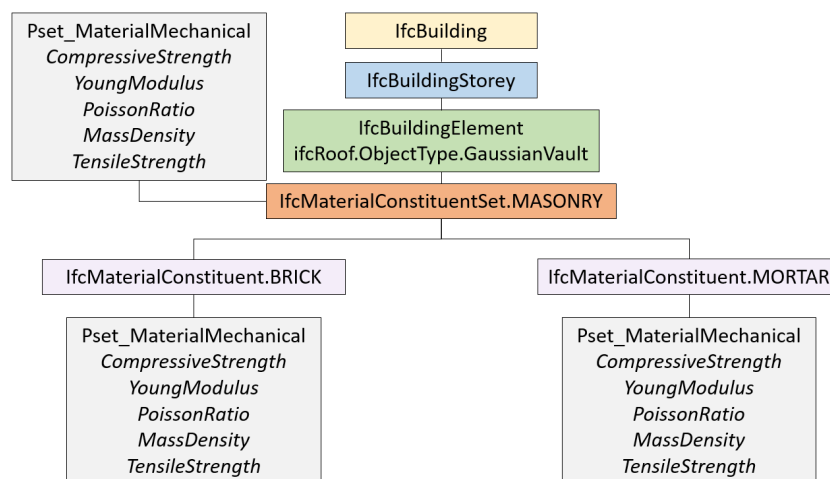


Figura 16. Descripción general en IFC para definir la fábrica como un conjunto de materiales constituyentes vinculado a un elemento constructivo específico (IfcRoof).

5.3 Incorporación de sensores

Si bien en esta gemelización no se ha hecho uso de sensores conectados a la estructura, su incorporación constituye un aspecto fundamental de los gemelos digitales. Los sensores permiten

la conexión entre los datos del mundo físico y el conjunto de descripciones virtuales, posibilitando la integración de información relativa al estado, a las técnicas de caracterización o a los sistemas de monitorización. De manera coherente, estos elementos deberían estar descritos en IFC. La aplicabilidad de esta descripción se refleja en las siguientes clases: *IfcSensorType*, que define las características comunes de un sensor, incluyendo su función, tipo de dato y parámetros operativos; *IfcRelContainedInSpatialStructure*, que establece la relación entre los sensores y la estructura espacial en la que se ubican, garantizando su correcta posición dentro de una jerarquía definida; y *IfcRelConnectsElements*, que define las conexiones lógicas y físicas entre sensores y elementos estructurales, asegurando un mapeo preciso de los datos de monitorización. La figura 16 ilustra esta posibilidad en el caso de estructuras sensorizadas, mostrando la integración de un acelerómetro en un entorno BIM.

La Figura 17 ilustra la integración de un acelerómetro dentro de un conjunto descrito con la serie de clases IFC.

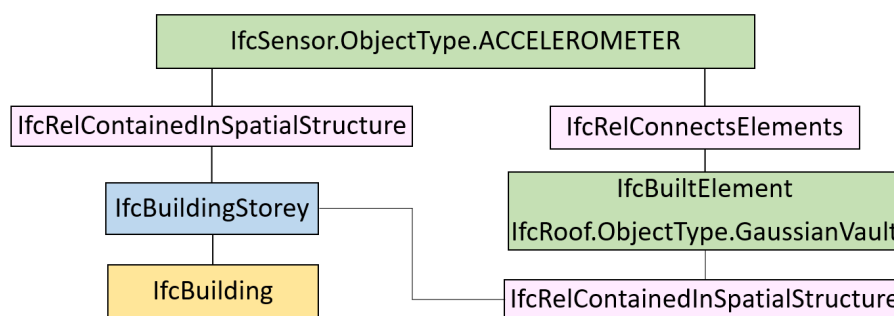


Figura 17. Descripción IFC para definir un conjunto de sensores vinculado a un elemento constructivo.

5.4 Exportación de modelos avanzados de cálculo

Para generar los modelos de elementos finitos de las bóvedas, se adopta la misma geometría utilizada en el BIM, garantizando así la coherencia y la fidelidad en las simulaciones estructurales. El proceso se desarrolla dentro del entorno paramétrico de Grasshopper. La geometría de las bóvedas, representada mediante *Advanced BReps*, se deconstruye en caras individuales, alineando la cara superior en el plano medio del espesor de la bóveda. A continuación, se genera una malla con el grado de discretización suficiente para captar con precisión la doble curvatura de las bóvedas. En Rhino, esta malla se convierte en superficies individuales y se exporta en formato ACIS *.SAT*, que puede importarse directamente en el software de elementos finitos Abaqus. Una vez en Abaqus, es posible realizar un refinamiento adicional de la discretización y definir los parámetros necesarios para el análisis FEM, incluyendo propiedades de material, cargas y condiciones de contorno. El flujo de trabajo completo se ilustra en la Figura 18.

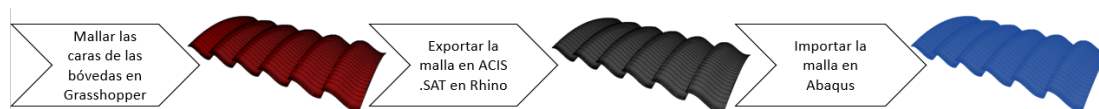


Figura 18. De la geometría BIM a la malla de elementos finitos (FE).

5.5 Modelo integrado

La Figura 19 muestra la definición del gemelo digital de una bóveda gaussiana de fábrica a partir de la integración de distintas fuentes de información. La caracterización de materiales se organiza mediante el uso de `IfcMaterialConstituentSet`, en el que se describen los constituyentes principales del sistema (mampostería, ladrillo y mortero). La geometría de la bóveda se representa como un `IfcAdvancedBRep`, derivado de superficies paramétricas (definidas como funciones $f(x, y, z)$) y validado tanto en su versión de diseño (as-designed) como en su estado construido (as-built) mediante técnicas de fotogrametría y escaneo láser.

El elemento construido se formaliza como un `IfcRoof`, entidad que en el estándar IFC se emplea siempre para la definición de techos. A este elemento se vinculan tanto las propiedades materiales como las mediciones experimentales. En este caso, se consideran acelerómetros descritos como `IfcSensor.ObjectType.ACCELEROMETER`, correctamente situados en la jerarquía espacial del modelo mediante `IfcRelContainedInSpatialStructure` y conectados con el elemento estructural. Finalmente, la información geométrica, material y experimental se convierte en un modelo numérico reproducido en Abaqus (.inp), lo que permite simular y analizar el comportamiento estructural de la bóveda gaussiana en condiciones de servicio o de carga extrema.

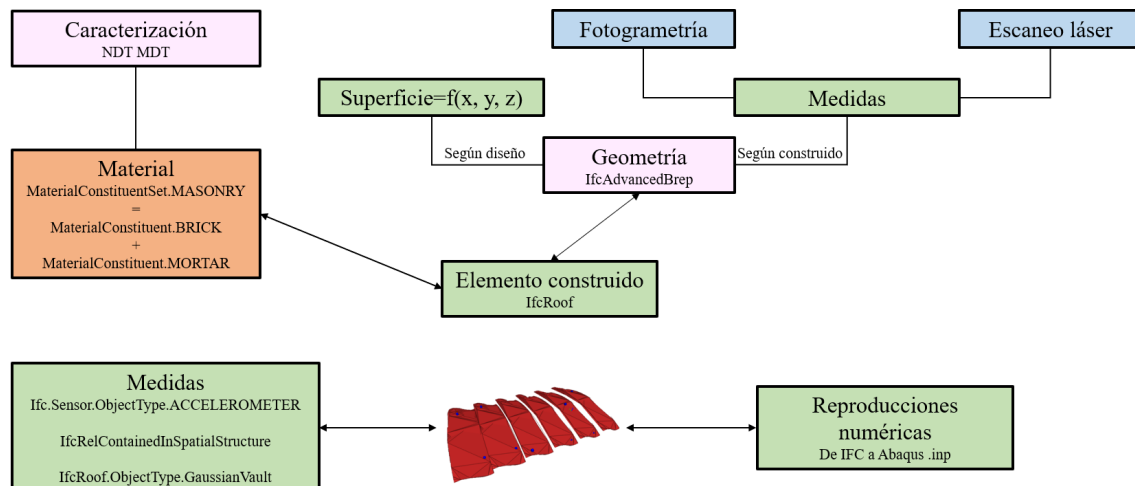


Figura 19. Definición del gemelo de bóvedas Gaussianas de fábrica de doble curvatura.

6. Conclusiones

Este estudio presenta un marco de gemelo digital descrito en IFC para superficies de doble curvatura, ejemplificado mediante una bóveda gaussiana construida en Jaén. El objetivo es evaluar la aplicabilidad y adaptabilidad de los estándares abiertos en la descripción digital de este tipo de estructuras. El gemelo digital se concibe como un constructo de información que integra representación geométrica precisa, caracterización de materiales y datos de sensores, con el fin de incorporarse en gemelos digitales a escala de edificio.

El marco conecta la caracterización de materiales, la generación computacional de geometrías complejas, la integración con mediciones físicas y el análisis estructural orientado al seguimiento y validación del proceso constructivo. Mediante herramientas paramétricas se generaron conectores interoperables que permitieron la creación de geometrías, representaciones de

contorno y su formalización en IFC. El plugin MatchFEM facilitó la producción de IfcShapeRepresentations y la incorporación de IfcSensors. Este constructo permitió asimismo la conversión de la información hacia Abaqus, ampliando la utilidad del modelo en las fases de diseño, construcción y operación. En conjunto, la investigación aporta una base abierta y reutilizable, alineada con las tendencias actuales en gemelos digitales e interoperabilidad en modelado estructural.

Adicionalmente, las técnicas digitales empleadas —modelado paramétrico interoperable, captura geométrica de alta precisión y calibración estructural basada en datos— pueden contribuir a la recuperación contemporánea de tipologías constructivas de doble curvatura actualmente en desuso. La reducción de la incertidumbre geométrica y mecánica, junto con la capacidad de validar el comportamiento real durante las fases de cimbrado y descimbrado, mejora su viabilidad técnica y de control constructivo. En este contexto, los gemelos digitales abiertos pueden actuar como facilitadores para reintroducir soluciones estructurales complejas con mayores garantías de diseño y ejecución.

No obstante, el marco metodológico desarrollado presenta ciertas limitaciones. La precisión del gemelo digital depende de la calidad de la captura geométrica y de la calibración experimental; estructuras con geometrías extremadamente complejas o materiales heterogéneos pueden requerir un esfuerzo adicional de modelado y verificación. La integración en IFC y con plataformas de simulación como Abaqus implica conocimientos técnicos especializados y acceso a infraestructura digital adecuada, lo que podría restringir su adopción en contextos con recursos limitados. Asimismo, la calibración basada en datos experimentales requiere sensores y equipos de medición de alta precisión, con implicaciones económicas y logísticas.

El enfoque es transferible a otras estructuras laminares y sistemas de geometría compleja, como cubiertas shell, láminas plegadas o bóvedas no regladas, especialmente cuando la forma resistente, la sensibilidad a las condiciones de contorno y el control geométrico durante la construcción son críticos. Su aplicabilidad en estructuras de gran escala o con geometrías altamente irregulares deberá evaluarse caso por caso, considerando la relación entre esfuerzo de modelado, disponibilidad de datos y requisitos de precisión. En contextos de rehabilitación de patrimonio o diseño de nuevas tipologías complejas, los gemelos digitales abiertos pueden ofrecer un valor añadido significativo, facilitando la planificación, monitorización y validación estructural, siempre dentro de las limitaciones mencionadas.

Este trabajo proporciona un marco abierto y reutilizable para la digitalización de superficies de doble curvatura, integrando geometría, materiales y sensorización, y sienta las bases para futuras aplicaciones en diseño, construcción y operación de estructuras complejas, con especial atención a la interoperabilidad y la reducción de incertidumbres.

7. Agradecimientos

Este artículo se elaboró en el marco del Programa de Doctorado Industrial DI-101 2021 de AGAUR Doubly-curve surfaces through a digital twin.

Se agradece la contribución de MaxMadera, encargados de la concepción de la estructura en madera para las cimbras, el desarrollo de la maqueta a escala 1:1 en Pedret i Marzà y la realización de distintos ensayos sobre la misma.

8. Referencias

- [1] Marín Palma, A. M. (2021). Eladio Dieste, forma y estructura. La creación de un nuevo material: la cerámica armada [Tesis doctoral, Universidad de Alcalá]. Universidad de Alcalá. <http://hdl.handle.net/10017/50789>
- [2] Adell Argilés, J. M., & Mas-Guindal Lafarga, A. J. (2005). Eladio Dieste y la cerámica estructural en Uruguay. *Informes de la Construcción*, 56(496), 13–23. <https://doi.org/10.3989/ic.2005.v57.i496.459>
- [3] Pedreschi, R., & Theodossopoulos, D. (2007). The double-curvature masonry vaults of Eladio Dieste. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 160(1), 3–11. <https://doi.org/10.1680/stbu.2007.160.1.3>
- [4] Anderson, S., (2004). *Eladio Dieste: Innovation in Structural Art*. Princeton Architectural Press. eISBN 978-1-61689-002-5.
- [5] Ramonell Cazador, C. (2025). Graph-driven digital twins as assistants to bridge maintenance [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-432851>
- [6] Posada, H., Chacón, R., & Ramonell, C. (2024). Job roles for digital twinning building construction processes: Introducing the digital twin manager position. *International Journal of Construction Management*. <https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2417632>
- [7] Boje, C., Hahn Menacho, Á. J., Marvuglia, A., Benetto, E., Kubicki, S., Schaubroeck, T., & Navarrete Gutiérrez, T. (2023). A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings. *Journal of Building Engineering*, 76, 107232. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107232>
- [8] Torzoni, M., Tezzele, M., Mariani, S., Manzoni, A., & Willcox, K. E. (2024). A digital twin framework for civil engineering structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 418, 116584.
- [9] Chiachío, M., Megía, M., Chiachío, J., Fernandez, J., & Jalón, M. L. (2022). Structural digital twin framework: Formulation and technology integration. *Automation in Construction*, 140, Article 104333. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104333>
- [10] Building SMART International. Industry Foundation Classes (IFC) 2025. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/> (accessed October 5, 2025).
- [11] Chacón, R., Casas, J. R., Ramonell, C., Posada, H., Stipanovic, I., & Škarić, S. (2023). Requirements and challenges for infusion of SHM systems within Digital Twin platforms. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2225486>
- [12] Wang, J., You, H., Qi, X., & Yang, N. (2022). BIM-based structural health monitoring and early warning for heritage timber structures. *Automation in Construction*, 144, 104618. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104618>
- [13] Leonardi, M. L., Granja, J., Oliveira, D. V., & 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>
- [14] Cruz, Y., Cabaleiro, M., Conde, B., Barros, B., & Riveiro, B. (2024). Methodology for the Integration of Structural Health Assessment of Masonry Bridges into HBIM. *International Journal of Architectural Heritage*, 1–23. <https://doi-org.recursos.biblioteca.upc.edu/10.1080/15583058.2024.2342950>
- [15] Piaia, E., Maietti, F., Di Giulio, R., Schippers-Trifan, O., Van Delft, A., Bruinenberg, S., & Olivadese, R. (2020). BIM-based Cultural Heritage Asset Management Tool. Innovative Solution to Orient the

Preservation and Valorization of Historic Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(6), 897–920. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1734686>

[16] Clarés, A., Chacón, R., Llorens, M., & Posada, H. (en revisión). Digital twinning of doubly-curved masonry vaults.

[17] McNeel & Associates. (s. f.). Rhino.Geometry namespace (RhinoCommon API). Rhino Developer. Consultado el 28 de septiembre de 2025, de <https://developer.rhino3d.com/api/rhinocommon/rhino.geometry>

[18] McNeel, R. & Associates. (2023). Rhinoceros 3D (Versión 8.0) [Software]. Robert McNeel & Associates. <https://www.rhino3d.com>

[19] Kiwi!3D. (s. f.). Kiwi!3D: Isogeometric Analysis for Grasshopper [Complemento de software]. Consultado el 28 de septiembre de 2025, de <https://www.kiwi3d.com/>

[20] Lourenço, P. (1996). A matrix formulation for the elastoplastic homogenization of layered materials. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol. 1, 273-294.

[21] Dassault Systèmes. (2025). Abaqus 2024 Documentation. Dassault Systèmes Simulia Corp. Available at: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>

[22] CloudCompare. (s. f.). CloudCompare: 3D point cloud and mesh processing software [Software de código abierto]. Consultado el 28 de septiembre de 2025, de <https://www.cloudcompare.org/>

[23] <https://matchfem.gitbook.io/matchfem>

[24] Posada, H., Chacón, R., & Ramonell, C. (2025). MatchFEM: A computational design assistant tool for digital twins of buildings and infrastructure. *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction (EC3 2025)*. <https://doi.org/10.35490/EC3.2025.255>