

# Optimization of modeling and 3D printing of architectural elements in historical buildings through the systematization of boolean solid operations

Diego Francisco García-Molina<sup>1</sup>, José Manuel Valderrama-Zafra<sup>1</sup>, Juan Manuel Montalvo-Gil<sup>1</sup>, Miguel Ángel Rubio-Paramio<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de ingeniería gráfica Diseño y Proyectos.*

*Universidad de Jaen, Paraje las Lagunillas s/n, Jaén, 23071, España*

\* Corresponding author: Tel.: +34-953-212-823; E-mail address: marubio@ujaen.es

---

**Resumen:** En ciertas ocasiones se encuentran modelos 3D que solo por visualizarse en la pantalla de un ordenador se cree que se puede imprimir en 3D. Para que realmente pueda ser así, cuando se diseña una pieza, hay que tener en cuenta que nuestro modelo ha de ser sólido y ha de estar completamente cerrado. El presente trabajo de investigación consiste en el modelado 3D tanto del exterior como del interior de la Torre del Homenaje de Priego de Córdoba.

Dada la complejidad que posee el interior del citado modelo 3D se propone diseñar el interior de la torre como si fuese un molde 3D virtual en positivo y tras aplicar operaciones booleanas restar el citado molde 3D virtual al exterior de la torre. El objetivo consiste en conseguir un modelo 3D imprimible y realizar un análisis variando los modos de impresión.

**Palabras Clave:** Ingeniería inversa, Operaciones booleanas, impresión 3D, modelado por deposición fundida, modelos 3d de edificios interiores, modelo 3D sólidos.

**Abstract:** By having a 3D model of an architectural element that can be viewed on a computer display, it cannot always be printed in 3D adequately to achieve a real model. When the element is designed, it must be taken into account that the model must be solid, it must be completely closed and the existence of geometries that require supports in 3D printing must be minimized or even eliminated. This paper presents the research on the optimization process of the 3D modeling of both the exterior and the interior of the keep of the Castle of Priego de Córdoba.

Given the complexity of the aforementioned 3D model, the interior of the tower has been conceived as if it were a *positive virtual 3D mold* and, after applying Boolean operations, subtracting the aforementioned virtual 3D mold from the exterior of the tower. This conception facilitates the systematization of the process of obtaining 3D models. The ultimate goal is to obtain a printable 3D model without supports and perform an analysis varying the printing modes.

**Keywords:** Reverse Ingeniering, Boolean operations; 3D printing; FDM (Fused Deposition Modeling); interior building 3D models; 3D solid; 3D modeling.

## 1 Introducción

En los últimos años, se ha puesto de manifiesto un notable incremento en el uso de programas informáticos relacionados con el modelado 3D. El software ha evolucionado y perfeccionado sus procesos. Su uso, en el ámbito de la arqueología, arquitectura e ingeniería ha permitido mediante una computadora, realizar reconstrucciones virtuales de entornos históricos y arqueológicos con minuciosos detalles difíciles de concebir en la representación bidimensional.

El diseño y la representación 3D están hoy más que nunca al servicio de la investigación, permiten convertir en realidad restos de estructuras arquitectónicas que en un principio solo existen en la mente del arqueólogo, arquitecto e ingeniero.

Estos proyectos basados en la configuración de estructuras constructivas 3D se hacen realidad desde una perspectiva multidisciplinar mediante la interpretación de los restos arqueológicos y aplicando una visión funcional aportada por la ingeniería. Este hecho, junto al rigor científico ha permitido no solo modelar tridimensionalmente elementos constructivos de gran valor documental donde solo existían ruinas [1]. Además, han servido para transmitir comprender y conocer los diferentes contextos históricos y políticos de otras etapas de nuestra historia desde un aspecto educativo [2].

Modelar un objeto 3D partiendo de un escaneado 3D o documentación geométrica previa, no es otra cosa que aplicar la ingeniería inversa. Este concepto, viene siendo utilizado en el estudio y desarrollo de piezas a pequeña y mediana escala en el ámbito industrial [3] y se ha propuesto abordarlo desde el ámbito arquitectónico, con un elemento a gran escala.

Este trabajo de investigación consiste en el digitalizado y modelado 3D tanto del exterior como del interior de la Torre del Homenaje de Priego de Córdoba uno de los monumentos más significativos ubicada dentro del recinto de su Castillo. Dada la complejidad que posee el interior del citado modelo 3D nos hemos propuesto diseñar a modo de molde virtual piezas tanto en positivo como en negativo y tras aplicar diferentes operaciones booleanas obtener nuestro modelo 3D resultante. El objetivo consiste en conseguir que el citado modelo tridimensional sea un sólido imprimible pero además se propone hacerlo de una manera eficiente, sin soportes estructurales.

## 2 Antecedentes

Esta investigación consiste en proponer un método que ponga en valor la construcción de una maqueta de un elemento arquitectónico mediante el modelado virtual 3D y la tecnología de impresión FDM. Realizar un estado de la cuestión que analice los citados conceptos ha sido fundamental para la comprensión de nuestro estudio. Hemos pretendido desde un primer momento encontrar un nexo histórico, o punto en común donde confluyan ambas tecnologías [4].

Realizar una maqueta partiendo de un modelo virtual es propio de la era digital en la que vivimos. El diseño asistido por ordenador comenzó a utilizarse industrialmente en los años setenta y ochenta, mientras que el desarrollo de las primeras tecnologías de impresión 3D se remonta a mediados de la década del ochenta [5]. Su mayor evolución tuvo lugar en la siguiente década, coincidiendo con la evolución de los equipos informáticos al hacerse estos más potentes, fáciles de manejar y con precios más asequibles. Un modelo 3D se puede representar tanto en pantalla como imagen bidimensional o bien como objeto físico, a través de una impresora 3D.

Aplicar la ingeniería inversa en elementos arquitectónicos de gran escala presenta una dificultad inherente constatada durante la fase de modelado 3D. Transformar una nube de puntos obtenida mediante un láser escáner terrestre en líneas y superficies de referencia mediante primitivas partiendo de geometrías conocidas ha sido todo un reto. Se hará constar que el punto de partida consiste en pasar de geometrías complejas asociadas a archivos muy robustos y pesados por la cantidad de información que poseen a geometrías simplificadas con archivos más asequibles para su manejabilidad y compatibles con software de impresión 3D [6]. Por ejemplo, una puerta digitalizada con tecnología láser posee miles de puntos con información (xyzRGB) sin embargo esta misma puerta se puede simplificar asemejándola a un prisma rectangular con 4 puntos. De la misma manera una escalera podría resultar de la suma de varios prismas colocados de manera consecutiva.

El punto de partida ha sido el archivo resultante de la toma de datos con láser escáner terrestre. La nube de punto (xyzRGB) correspondiente al interior y exterior de la Torre del Homenaje fue realizada en unos trabajos de investigación previos [7]. De la misma manera se ha contado con el asesoramiento arqueológico y con los numerosos documentos resultado de las intervenciones arqueológicas. Hecho que ha permitido reconstruir zonas de la propia torre que no existen en la actualidad.

Para finalizar una vez concluido el proceso de modelado 3D se convierte tanto la zona exterior como la interior en sólidos y aplicando operaciones booleanas por diferencia y adición obtenemos un modelo

preparado para la impresión 3D. También se abordan los diferentes problemas surgidos durante la impresión 3D: creación de soportes en los vanos, relleno de espacios mediante material sobrante, encarece y ralentiza el proceso. Por tanto, se propone buscar un método que optimice el proceso de modelado y conduzca a una impresión 3D mucho más eficaz en términos de coste y plazo de ejecución.

Cabe destacar, como dato relevante, que la tecnología de impresión 3D, sirve de nexo, entre el escaneado 3D en una primera fase y el modelado 3D como herramienta para su simplificación en la parte final.

Una impresora 3D es una máquina capaz de materializar una reconstrucción virtual a partir de un archivo digital, como un nuevo objeto que anteriormente no existía. Con este trabajo dotaremos de nuevos recursos al sector turístico contribuyendo a la difusión del patrimonio de una manera comprensible. De la misma manera, lo hacemos, en el ámbito educativo, dando a conocer a los estudiantes edificios arquitectónicos e históricos tanto de manera virtual a través de una pantalla como de manera física mediante la impresión 3D. Cabe destacar de esta tecnología su cercanía ya que está implantada en la mayoría de IES de Secundaria. De manera habitual los estudiantes realizan actividades donde diseñan su propio modelo virtual para posteriormente convertirlo en un modelo físico. Cabe destacar, que estos modelos son utilizados por los profesores como apoyo durante la enseñanza [8].

### **3 Objetivos**

El objetivo general del trabajo de investigación consiste en desarrollar una metodología de análisis que permita abordar la ingeniería inversa en el ámbito arquitectónico. Simplificando y reconstruyendo virtualmente nuestro modelo tridimensional para su fabricación mediante la impresión 3D. Definida la idea central de nuestro trabajo pasaremos a detallar nuestro propósito enumerando los objetivos específicos:

En primer lugar y una vez realizada la toma de datos en campo mediante láser escáner terrestre, se ha propuesto simplificar la robusta base de datos (xyzRGB) reduciendo nuestro modelo a primitivas.

En segundo lugar, se analiza y estudia las diversas intervenciones arqueológicas documentadas para conseguir reconstruir de manera virtual esos elementos arquitectónicos que existieron, pero hoy día no se conservan.

En tercer lugar, mediante la configuración de los sólidos (exterior e interior), se realizan de manera sistemática operaciones booleanas que consisten en el modelado de elementos 'en negativo' que conducen, mediante la sustracción, a la obtención más eficaz del modelo 3D resultante.

Por último, se fabrica mediante impresión 3D un modelo físico y eficiente ya que se busca prescindir de soportes gracias a la propia estructura portante del interior de nuestro modelo arquitectónico. De la misma manera se evalúa la reducción de costes de material y el tiempo de impresión 3D.

### **4 Metodología**

A continuación, se muestran diferentes fases que configuraran nuestro flujo de trabajo, Figura 1. A grandes rasgos la toma de datos en campo y los trabajos de gabinete son los dos grupos que proporcionaran los diferentes resultados.

En un segundo nivel, se muestra la verdadera transformación de una malla compleja a simple del modelo tridimensional (xyzRGB) obtenido en forma de nube de puntos. A continuación, mediante el estudio de las diferentes intervenciones se realiza el modelo 3d en forma de reconstrucción virtual y mediante la configuración de sólidos aplicando operaciones booleanas obtenemos como resultado el modelo 3D definitivo e imprimible de una manera eficiente y sin soportes. Por último, en un tercer lugar, se hace referencia a equipos y software empleados en todo el proceso.

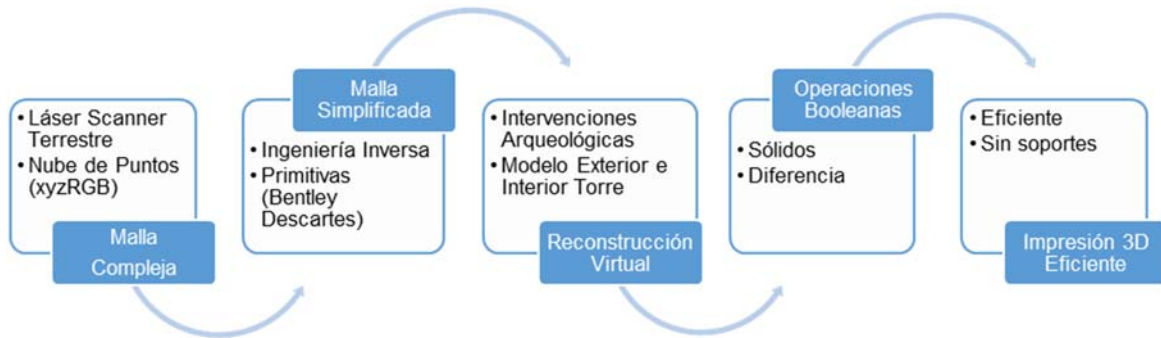


Fig. 1. Fases para la realización de un modelo tridimensional imprimible 3D.

## 5 Equipos, materiales y software

Enumerar y describir las diferentes tecnologías empleadas en cada una de las fases que componen nuestro trabajo de investigación ha sido determinante para entender los diferentes procesos realizados. Partir de la nube de puntos (xyzRGB) obtenida con el *láser escáner terrestre* y transformar la compleja base de datos en una simple y manejable mediante la ingeniería inversa requiere del uso de un software multiplataforma como *Bentley Descartes CONNECT Edition v10.16.00.80*. De la misma manera la impresión 3D del modelo implica tanto el conocimiento de la técnica *FDM (Fused Deposition Modeling)* como el uso del material empleado *PLA (ácido poliláctico)* sus características se ajustan perfectamente a nuestro propósito, Tabla 1. La configuración de sus parámetros dependiendo del material y equipo utilizado ha sido imprescindible para conseguir los objetivos. Posteriormente, hemos decidido realizar la fabricación del modelo físico con el mismo software *Ultimaker Cura V.4.5*. La impresora utilizada ha sido la *Ultimaker S2 Extended + (215x215x300mm)*.

Tabla 1. Características del filamento utilizado para la impresión 3D.

| Material | Color       | Diámetro | Tamaño | Temp. extrusor |
|----------|-------------|----------|--------|----------------|
| PLA      | Ivory White | 2,85 mm  | M750g. | 200-220°C      |

## 6 Resultados y discusión

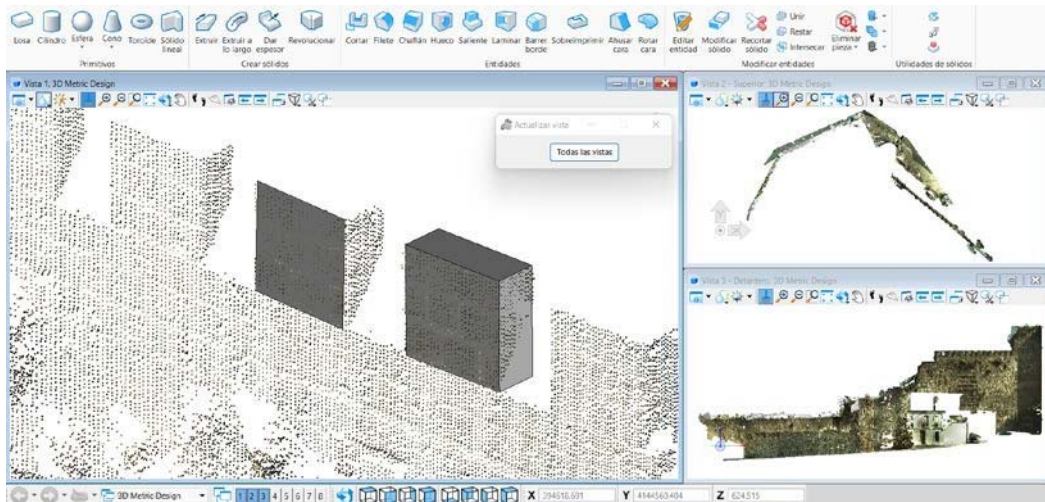
El proceso concreto de trabajo consiste en la puesta en práctica de nuestro método y este, de modo esquemático, ya se había expuesto anteriormente. A continuación, desarrollaremos cada fase abordando en profundidad cada una de los pasos.

### 6.1 Fase 1: Documentación

Como es previsible, antes de iniciar la creación de nuestro modelo virtual, se ha consultado las distintas intervenciones realizadas en la Torre del Homenaje [9]. En relación a los trabajos de documentación geométrica hemos tomado como dato de partida la nube de puntos resultado de un trabajo previo de investigación [7].

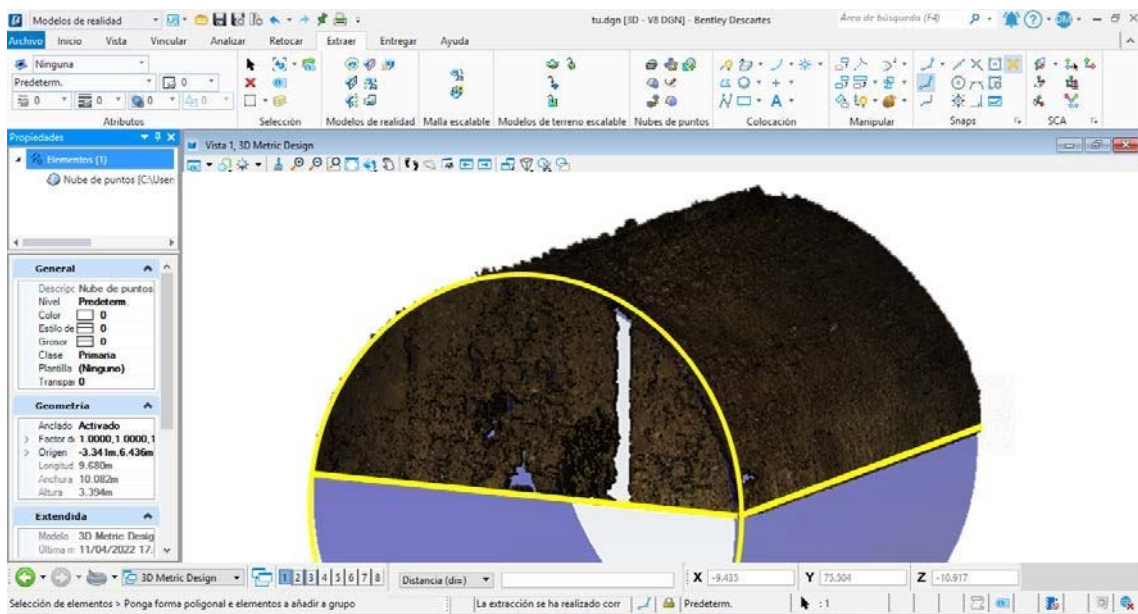
### 6.2 Fase 2: Transformación. Simplificación del modelo 3D

La ingeniería inversa nos permite transformar un archivo robusto como es una nube de puntos (xyzRGB) obtenida mediante láser escáner terrestre en superficies de referencia obtenidas mediante primitivas partiendo de geometrías conocidas. En primer lugar, mostramos varias almenas del Castillo de Priego documentada geométricamente con láser escáner terrestre y simplificada con primitivas para reconstruir virtualmente en la coronación del modelo 3D objeto de nuestro estudio la Torre del Homenaje, Figura 2. Cabe destacar que las almenas no se conservan en la citada torre por lo que se ha optado por la evidencia y no ha sido otra que recurrir a la única tipología existente, dentro del Castillo de Priego.



**Fig. 2.** Transformación de la nube de puntos ( $xyzRGB$ ) a geometría simple en forma de prima (*almena del Castillo de Priego junto a la Torre del Homenaje*).

En segundo lugar, mostramos la nube de puntos ( $xyzRGB$ ) correspondiente a la bóveda de caño tipología que se repite en cada una de las plantas de nuestra Torre del Homenaje, Figura 3. Como se puede observar hemos repetido el mismo proceso transformando la geometría con exceso de información a primitivas. En este caso ha sido un cilindro, este se ajusta de manera equivalente simplificando el resultado.



**Fig. 3.** Transformación de la nube de puntos ( $xyzRGB$ ) a geometría simple en forma de cilindro (*bóveda de cañón en todas las plantas de la Torre del Homenaje*).

Este hecho, permitirá configurar nuestro modelo 3D simplificado mucho más liviano y manejable. Esta fase ha permitido configurar un nuevo modelo 3D ya que se han transformado nuestros datos ( $xyzRGB$ ) a archivo CAD [10].

### 6.3 Fase 3: Reconstrucción Virtual 3D

La creación del modelo digital concierne a un edificio arquitectónico histórico este hecho implica en su última fase la consolidación de elementos no conservados y abordados desde una reconstrucción virtual [11]. Para ello, hemos contado con el asesoramiento arqueológico, proporcionando numerosos datos relativos a diferentes intervenciones arqueológicas. Esta fase ha resultado la más larga y compleja ya que ha estado supeditada a numerosas propuestas hasta configurar un modelo definitivo con rigor científico. En la Figura 2 y 3, observamos el proceso llevado a cabo con el software Bentley Descartes para la

simplificación, pasando de una geometría compleja en forma de nube de puntos (xyzRGB) a una geometría simplificada con primitivas en forma de prisma.

#### 6.4 Fase 4: Operaciones Booleanas. Diferencia y Adición

Para realizar operaciones booleanas se necesita tener como mínimo 2 sólidos, y estos han de tener como característica sus caras normales hacia fuera. El resultado de las operaciones booleanas dependerá de la dirección de las citadas normales.

El modelado 3D se ha realizado en 3 sólidos independientes:

- Modelado 3D del exterior de la Torre (*diseñado base*), Figura 4.
- Modelado 3D del interior (*diseñado en negativo*), Figura 4.
- Modelado 3D de los complementos o detalles constructivos (*diseñados en adición o unión*), Figura 5.

En nuestro caso, antes de aplicar las 2 funciones asociadas a la operación de booleanas, diferencia y unión hemos corregido algunas normales invertidas, así como algunas superficies solapadas. Este hecho, ha originado la configuración de nuestros sólidos.

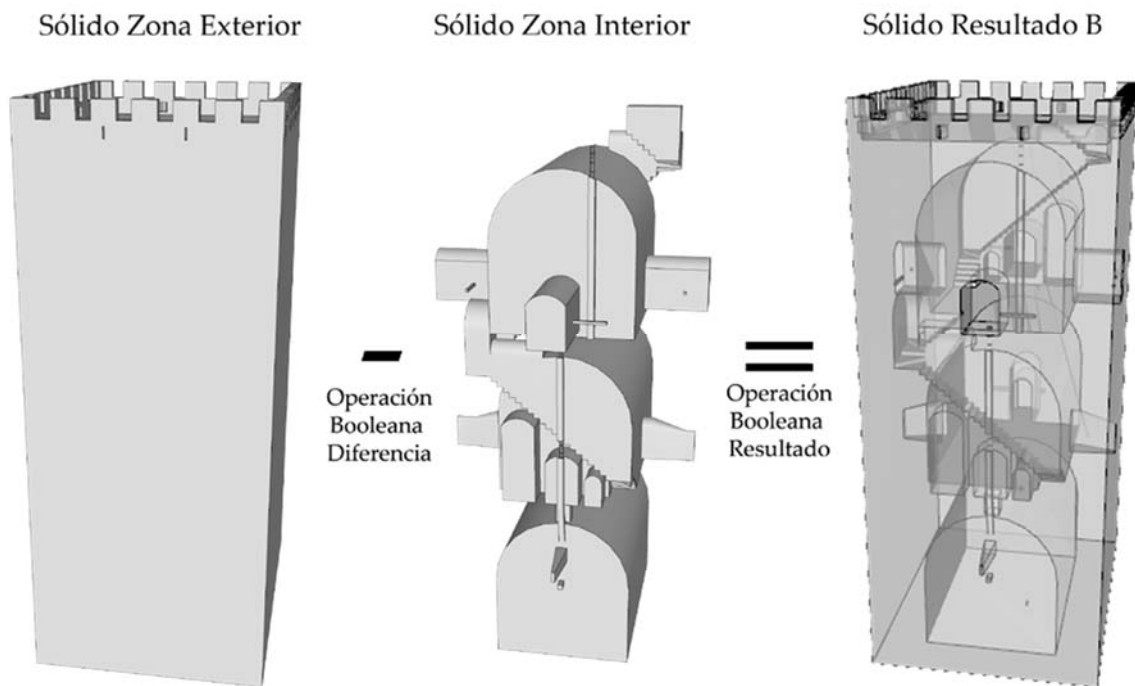


Fig. 4. Fase correspondiente a la operación booleana *diferencia* (*sólido exterior menos sólido interior*) y el sólido resultado.



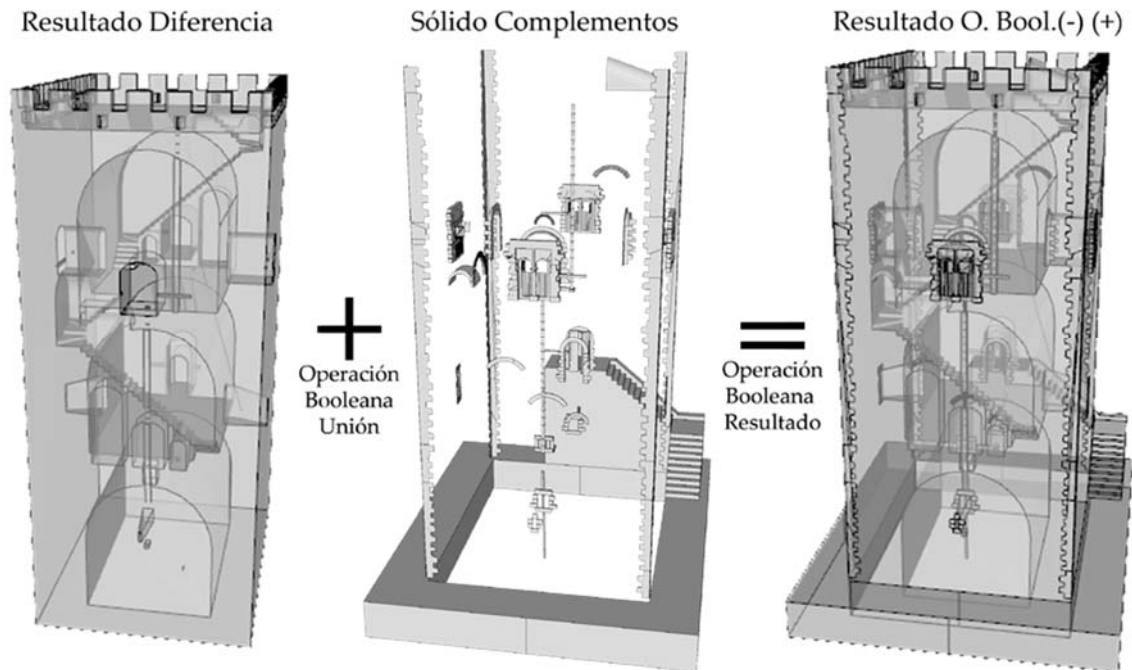


Fig. 5. Fase correspondiente a la operación booleana *unión* (*sólido resultante + sólido complementos*) y el sólido definitivo.

## 6.5 Fase 5: Impresión 3D eficiente. Sin soportes

El equipo utilizado para la impresión 3D de nuestro elemento arquitectónico histórico ha sido *Ultimaker Extender 2+* con tecnología FDM (*Fuse Deposition Modeling*). El ácido poliláctico PLA ha sido el material utilizado.

Para determinar el máximo aprovechamiento del volumen de impresión necesitamos conocer 2 datos fundamentales:

- Las dimensiones de nuestro **modelo 3D** reconstruido virtualmente (*20,25x16,85x28 cm*)
- Las dimensiones del **volumen de impresión** del equipo utilizado (*22.3 x 22.3 x 30.5cm*)

Por cuestiones de aprovechamiento hemos decidido aplicar la escala 1:100 y para imprimir nuestro modelo de manera eficiente queremos estudiar cómo realizar la impresión 3D *en dos procesos o de una sola vez*. Para ello, hemos dividido nuestro modelo en 2 partes diferenciadas una llamaremos *sólido cara frontal* y otro sólido *cara trasera*. El propósito ha sido poder contemplar la arquitectura interior, su distribución y su funcionamiento de la edificación de la maqueta física del elemento objeto de estudio, la Torre del Homenaje a escala 1;100. Las dos piezas resultantes, poseen como característica común, un archivo con extensión (\*.stl) compatible con el software para impresión 3D *Ultimaker Cura V4.5*. De la misma manera, como elemento de salida para el equipo de impresión 3D hemos asociado un archivo (\*.gcode) a cada una de las piezas resultantes. El objetivo es analizar a modo de supuesto teórico los resultados en tiempo neto y gasto de filamento de las piezas arquitectónicas imprimidas con y sin soportes, Figura 6, 7 y 8.

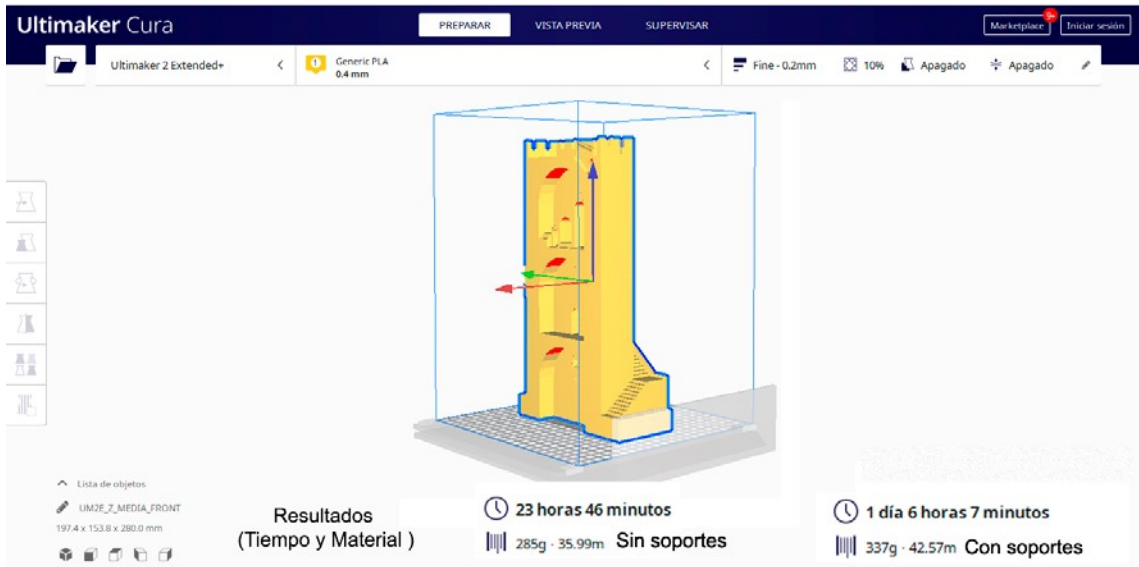


Fig. 6. Resultados obtenidos mediante el software *Ultimaker Cura V4.5* con y sin soportes (*Pieza Front 1 de 2*).

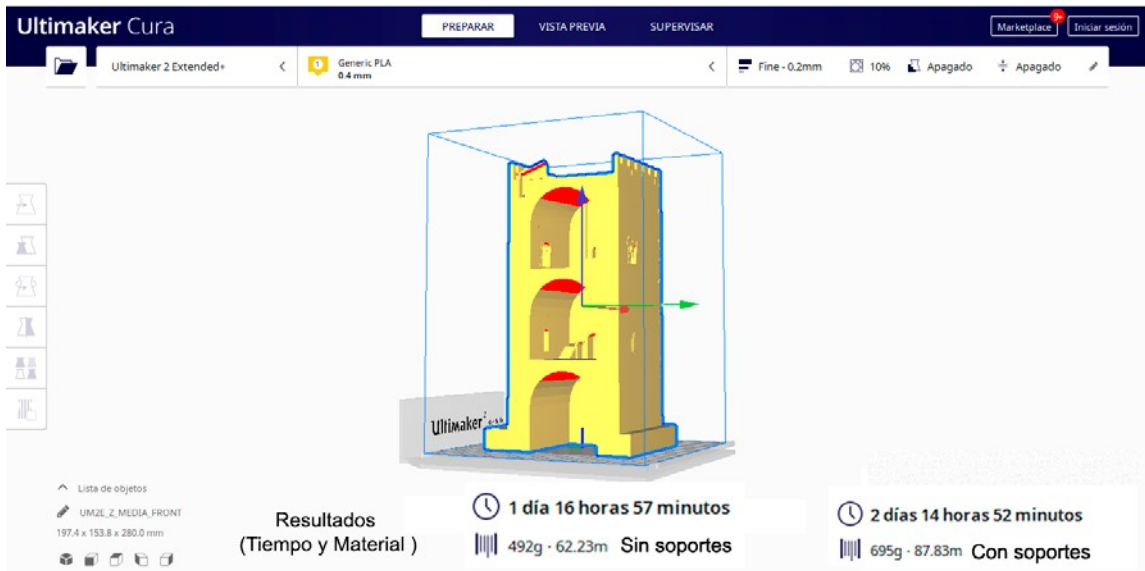


Fig. 7. Resultados obtenidos mediante el software *Ultimaker Cura V4.5* con y sin soportes (*Pieza Tras 2 de 2*).



Fig. 8. Resultados obtenidos mediante el software *Ultimaker Cura V4.5* con y sin soportes (*Pieza Tras y Front a la vez*).



Como podemos observar en las imágenes las zonas en rojo son zonas conflictivas a la hora de abordar la impresión 3D ya que se deposita el material en voladizo. Hemos abordado este hecho como caso práctico y el resultado ha sido óptimo. El ángulo correspondiente a la deposición material en el caso de la bóveda de cañón es asumible debido a la anchura del cordón 0,2 mm. y las imperfecciones producidas por este hecho han sido inapreciables al ojo humano.

A continuación, analizamos los resultados expresados en la Tabla 2. Existen 2 posibilidades imprimir cada pieza por separado con o sin soportes y ambas juntas en un único proceso de impresión. En ambos casos, hemos cuantificado **el ahorro de filamento y de tiempo de impresión obteniendo un valor del 30% y 25% respectivamente.**

**Tabla 2.** Datos relativos a tiempos y consumo de material en función del modo de impresión 3D con y sin soportes.

| Descripción                     | C/Soporte            | S/Soporte            | C/Soporte           | S/Soporte         | Diferencia S/S                |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|
|                                 |                      |                      |                     |                   | Tiempo/Material               |
| Pieza 1 frontal                 | 1.807 minutos        | 1.426 minutos        | 337 gramos          | 285 gramos        | -381gr./-52 min.              |
| Pieza 2 Trasera                 | 3.772 minutos        | 2.457 minutos        | 695 gramos          | 492 gramos        | -1315gr./-203m.               |
| <b>Piezas 1-2 Suma</b>          | <b>5.579 minutos</b> | <b>3.883 minutos</b> | <b>1.032 gramos</b> | <b>777 gramos</b> | <b>-1696gr./-255m.</b>        |
| <b><u>Piezas 1-2 Juntas</u></b> | <b>5.587 minutos</b> | <b>3.918 minutos</b> | <b>1.030 gramos</b> | <b>777 gramos</b> | <b><u>-1669gr./-253m.</u></b> |

Por último, en relación al tiempo neto de impresión hemos observado que la diferencia es mínima o prácticamente igual. No se produce ahorro de tiempo neto si se imprime las 2 piezas en un único proceso o por separado. Por lo tanto, hemos decidido una vez obtenidos los resultados realizar la impresión 3D en dos procesos independientes para minimizar riesgos y para aprovechar rollos de filamento con material sobrante.

## 7 Conclusiones

Ha sido clave para el citado trabajo obtener las respuestas que ponga en valor nuestra investigación. Se ha conseguido definir un método que aplique la ingeniería inversa en elementos arquitectónicos históricos de gran escala. Este hecho, pone de manifiesto que queda camino aún por recorrer.

Se ha conseguido simplificar el modelo tridimensional, pero tanto el software como sus procesos no han sido del todo automáticos como se puede pensar. Generalmente los procesos han sido largos, con operaciones manuales y poco intuitivas. Como aspecto positivo, *la multi-plataforma de Bentley Descartes* ha sabido concentrar las herramientas necesarias para desarrollar todo el proceso.

En relación al modelado 3D mediante la aplicación de booleanas cabe destacar un resultado efectivo y práctico, pero antes es necesario la preparación de nuestros modelos tridimensionales a sólidos. Esta operación requiere el modelado 3D del interior en negativo y de los complementos en positivo hecho que nos ha permitido validar un método para conseguir un modelo imprimible 3D.

En relación a la impresión 3d observamos que las edificaciones con estructuras estables mecánicamente hablando no necesita de ayuda de soportes para su impresión 3D se puede prescindir de ellos ya que el comportamiento de las zonas conflictivas concretamente en las bóvedas de cañón es asumible debido al ángulo estructural que se consigue durante el proceso de impresión.

## Bibliografía

- [1] Cáceres-Criado I, Triviño-Tarradas P, Valderrama-Zafra JM, García-Molina DF. Digital preservation and virtual 3D reconstruction of "The Baker's house" in the archaeological site of Torreparedones (Baena, CordobaSpain). J Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00218>.
- [2] Ponzoa, J. M., Gómez, A., Villaverde, S., & Díaz, V. (2021). Technologically empowered? perception and acceptance of AR glasses and 3D printers in new generations of consumers. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121166. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121166>

- [3] Torreblanca Díaz, D. Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos. *Iconofacto*, vol. 12, no. 18, pp. 118–143, 2016, <https://doi:10.18566/v12n18.a07>.
- [4] Balletti, C., Ballarin, M., Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, 26, pp.172–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>.
- [5] Robben, B. (2013). The History of Production with Computers. In J. Walter-herrmann & C. Büching, eds. *FabLab of Machines, Makers and Inventors*. Bielefeld: Transcript Verlag, pp. 127-138.
- [6] Helle, R.H.; Lemu, H.G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Mater. Today Proc.* 2021, in press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>
- [7] García-Molina, D. F., & Montes Tubío, F. d. P. (2012). El Láser-Escáner 3D aplicado al patrimonio arquitectónico de Priego de Córdoba: la Torre del Homenaje. *Antiquitas* (24), pp.277-302
- [8] Ford, S., & Minshall, T. (2019). Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education. *Additive Manufacturing*, 25,pp.131-150. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>.
- [9] Carmona Ávila, R. (2018): “Sobre arquitectura y armamento: el control arqueológico de las obras de consolidación de la Torre del Homenaje del castillo de Priego de Córdoba (2016-2017)”, *Antiquitas*, 30, pp.167-321.
- [10] Cheng, X. J., & Jin, W. (2006, October) Study on reverse engineering of historical architecture based on 3D laser scanner, Institute of Physics Publishing International Symposium on Instrumentation Science and Technology *Journal of Physics: Conference Series*, 48 (1) (2006), pp. 843-849
- [11] Grimaud, V., & Cassen, S. (2019). Implementing a protocol for employing three-dimensional representations in archaeology (PETRA) for the documentation of neolithic funeral architecture in Western France. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13, e00096. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00096>