

PROMOCIÓN Y RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO DE LA COMUNIDAD VALENCIANA A TRAVÉS DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA 3D CON MATERIAL CERÁMICO

María Jesús Máñez Pitarch

Universitat Jaume I, Castellón, manez@uji.es

María Pilar Gómez Tena

Instituto Tecnológico de Cerámica (ITC). Universitat Jaume I, Castellón,
pilar.gomez@itc.uji.es

Joaquín Ángel Martínez Moya

Universitat Jaume I, Castellón, jomoya@uji.es

Jaume Gual Ortí

Universitat Jaume I, Castellón, jgual@uji.es

Jose Teodoro Garfella Rubio

Universitat Jaume I, Castellón, garfella@uji.es

Cristina Fabuel Bartual

Instituto Tecnológico de Cerámica (ITC). Universitat Jaume I, Castellón,
cristina.fabuel@itc.uji.es

1. Introducción

1.1 La puesta en valor del patrimonio arquitectónico

La puesta en valor del patrimonio arquitectónico, como conjunto de bienes edificados de valor cultural, heredados del pasado, pasa por diferentes tareas, como son trabajos de levantamientos arquitectónicos, realización de documentos que representen objetivamente los edificios estudiados y, en último caso, la difusión de los resultados, a través de diferentes mecanismos.

En los últimos años la realización de levantamientos arquitectónicos ha sufrido una evolución considerable. Hace sólo quince años los métodos tradicionales, consistentes en inspecciones oculares a los edificios, toma de fotografías o mediciones *in situ* con flexómetros, cintas métricas o aparatos topográficos, eran perfectamente válidos. Posteriormente, la aparición de escáneres láser, capaces de tomar miles de puntos de referencia, mediante el uso de coordenadas (X, Y, Z), en breves segundos y, de ahí, elaborar completas nubes de puntos, que reproducían el edificio en tres dimensiones, supuso una revolución en el estudio del patrimonio arquitectónico. Actualmente, la implantación de vuelos realizados con drones, capaces de georreferenciar los inmuebles, además de captar fotografías que permiten restituir totalmente los monumentos, ha supuesto un nuevo avance hacia la representación de las construcciones con una gran precisión.

Paralelamente, el estudio del patrimonio arquitectónico de nuestro entorno ha ocupado, durante los últimos años, muchas horas de trabajo y actividades diversas del grupo de investigación en el que se enmarcan los autores de este trabajo. En las tareas han participado varios profesores y estudiantes, tanto de grado, como de postgrado y doctorado. Se han elaborado varios trabajos fin de grado y algunas tesis doctorales, así como un gran número de artículos científicos. Todos ellos han seguido los tres pilares fundamentales de este tipo de estudios: la realización de levantamientos arquitectónicos, la elaboración de documentos que representen objetivamente y con rigor los edificios y la difusión de los resultados.

Por otro lado, la realización de documentos que representarán objetivamente los edificios ha pasado también por diferentes etapas. Desde los insustituibles croquis o las planimetrías realizadas al principio a mano alzada y posteriormente con softwares específicos de CAD, se pasó a representar los edificios en 3D en formato digital. Actualmente las técnicas de georreferenciación, la realidad

aumentada y realidad virtual, a partir de modelos en tres dimensiones, se presentan como métodos o sistemas perfectos para promocionar el patrimonio arquitectónico. Así mismo, la creación de modelos 3D mediante tecnologías de Fabricación Aditiva 3D (*Additive Manufacturing*), tanto para representar edificios completos o parte de ellos, existentes o desaparecidos, se presentan como una alternativa interesante para reproducir y mostrar las construcciones estudiadas.

Además, la tradicional difusión de los resultados en congresos, libros, revistas, folletos turísticos u otros medios emplean principalmente el formato *paper-based*, actualmente, estos medios parecen ser insuficientes, dado que este tipo de divulgación tenía un alcance, en ocasiones, reducido entre la población específicamente interesada en la temática abordada, es decir, en expertos en la materia [1]. En este sentido, la presencia de las nuevas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), junto a la popularización de la red de comunicación internet, han abierto nuevas oportunidades a la difusión del patrimonio cultural. Oportunidades que, por otro lado, son capaces de llegar a cualquier rincón del mundo y a cualquier tipo de población [2].

1.2. Proyecto 3D RestaurAM como medio para difundir el patrimonio y las nuevas tecnologías cerámicas

El polvo utilizado, con la tecnología seleccionada (3DP o BJ), está formado mayoritariamente por escayola, el cual carece de suficiente resistencia y durabilidad para ser expuesto en exteriores. Tras estudiar otros materiales que se comercializaban para la impresora que se estaba utilizando, *ZPrinter 310* de *Zcorporation* y observar que no se conseguían mejores resultados se contactó con el Instituto Tecnológico de Cerámica (ITC). Tras varias conversaciones y pruebas (Fig 1) surgió un proyecto conjunto "3D RestaurAM". En el proyecto se realizarían dos acciones. Por una parte, la difusión del patrimonio arquitectónico valenciano y por otra parte el desarrollo de materiales cerámicos para la tecnología de FA conocida como *Binder Jetting*, con la finalidad de realizar tanto maquetas físicas como para utilizarla para la restauración de bienes culturales.



Fig. 1. Resultado de las primeras pruebas realizada con material cerámico tras cocción.

El desarrollo de las tecnologías de fabricación aditiva (FA) ha supuesto una revolución en el mundo de la restauración, dado que permite la manufactura física de estructura altamente complejas y precisas de un modo flexible que son costosas y difíciles de realizar utilizando métodos tradicionales [5]. En la actualidad ya se utilizan polímeros o composites no cerámicas con técnicas de FA en la restauración del patrimonio. No obstante, la obtención de un material cerámico ofrece una mayor durabilidad, impermeabilidad y resistencia a los agentes atmosféricos externos, así como la estabilidad en el tiempo, reduciendo las intervenciones posteriores.

2. Objetivos

El objetivo del presente artículo es mostrar los resultados de investigación que se están desarrollando en el ámbito del patrimonio arquitectónico valenciano dentro del proyecto denominado 3D RestaurAM: por una lado, en la creación de modelos digitales en tres dimensiones, así como, en su posterior fabricación rápida a una escala determinada, empleando tecnología de Fabricación Aditiva, con materiales cerámicos y, por otro lado, también en la difusión de dichos modelos en un formato de libre acceso.

3. Método

Para la realización de los levantamientos arquitectónicos se han seguido los procesos habituales de este tipo de trabajos, así se han registrado un gran número de datos bibliográficos, gráficos y archivísticos sobre los edificios estudiados. Para la captación de los datos gráficos la metodología ha abarcado la toma in situ de las construcciones, con el fin de captar las características dimensionales, métricas, geométricas y gráficas de las construcciones. Posteriormente, en la elaboración de los documentos, básicamente gráficos (alzados, plantas, secciones, ortofotos o modelos 3D), la información recogida se ha procesado y digitalizado en gabinete.

3.1. Selección de los elementos arquitectónicos

Para seleccionar los elementos arquitectónicos objetivo de estudio se han seguido diversos criterios. En primer lugar, la muestra aborda distintas tipologías arquitectónicas (Castillos, Palacios, Iglesias, Lonjas, etc.), así como representaciones en su conjunto, pero también elementos en detalle (arcadas, portadas, ventanas, etc.). El global de los elementos expresa además distintas ubicaciones físicas dentro de la Comunidad Valenciana. Se trata de elementos que en algún momento han sido tratados por algunos de los miembros del equipo investigador obteniendo datos originales y únicos. En resumen, se han estudiado un total de 22 ítems (Tabla 1).

	SITUACIÓN		EDIFICIO	ELEMENTO
1	Castellón	Betxí	Castillo-palacio Betxí	Castillo-palacio Betxí
2	Castellón	Betxí	Castillo-palacio Betxí	Arcada Patio Renacentista
3	Castellón	Betxí	Castillo-palacio Betxí	Portada Renacentista
4	Castellón	Castellón	Claustro Convento Dominicos	Columna
5	Castellón	Castellón	El Fadri	El Fadri
6	Castellón	Vila-Real	Ciudad Amurallada	Maqueta Viciana
7	Castellón	Vistabella	Iglesia Nª Sra. Asunción	Portada Grande Virgen de la Asunción
8	Castellón	Vistabella	Iglesia Nª Sra. Asunción	Portada Pequeña S. Miguel
9	Castellón	Vistabella	Iglesia Nª Sra. Asunción	Bóveda Crujería Nave Principal
10	Castellón	Vistabella	Iglesia Nª Sra. Asunción	Planta de la iglesia
11	Castellón	Vistabella	Iglesia Nª Sra. Asunción	Bóveda Crujería Sacristía-capilla de san Juan
12	Valencia	Cotalba	Monasterio de Cotalba	Ventana Claustro Superior
13	Valencia	Oliva	Palacio de Oliva	Portada D12
14	Valencia	Oliva	Palacio de Oliva	Portada D13
15	Valencia	Oliva	Palacio de Oliva	Portada D28
16	Valencia	Oliva	Palacio de Oliva	Ventana V4
17	Valencia	Oliva	Palacio de Oliva	Artesonado Sala 12
18	Valencia	Valencia	Catedral	Portada Capilla Santo Cáliz
19	Valencia	Valencia	La Lonja	Portada Planta Superior Consulado del Mar
20	Valencia	Valencia	La Lonja	Portada Planta Inferior Consulado del Mar
21	Valencia	Valencia	La Lonja	Portada Exterior Sur
22	Valencia	Valencia	La Lonja	Base Columna Sala de Contratación

Tabla 1: Listado de los elementos arquitectónicos de la Comunidad Valenciana estudiados.

3.2. Herramientas para toma de datos y representación gráfica

Se han utilizado desde sistemas tradicionales consistentes, entre otros, en la realización de croquis, reconocimiento táctil de molduras, comprobación de dimensiones mediante elementos manuales tales como flexómetros, peine de arqueólogo, brújula, distanciómetros láser, niveles o plomadas, hasta instrumentos y aparatos topográficos. Respecto a los instrumentos y aparatos topográficos se ha utilizado, como elemento de apoyo, una estación total robótica con imagen, de lectura sin prisma, de la marca Topcon, modelo IS-203, que tiene un alcance de hasta 2000 metros, con una precisión lineal $\pm 2\text{mm}$ y angular de $3''$, con dos cámaras digitales internas, una panorámica y otra con zoom de 30 aumentos y una resolución aparente equivalente a 4.8 Megapíxeles. Además, se ha usado un láser escáner terrestre 3D basado en pulsos (tiempo de vuelo), láser invisible de clase uno de largo alcance, tipo Topcon GLS 1500 y precisión de 4 mm, en un rango de escaneo hasta 150 m y angular de $6''$, asociado con una cámara digital integrada de 2.0 Megapíxeles. La toma de datos se ha completado con una cámara fotográfica digital Nikon modelo D-80 de 10,2 Mega píxeles, con un objetivo comprendido entre los 18-135mm y con apertura focal de f/3.5-5.6.

En la elaboración de los documentos se han utilizado softwares específicos de escáneres, de CAD, de fotogrametría y de modelado digital 3D (Scanmaster, Imagemaster, Autocad, Altair Inspire Studio, Blender, Netfabb, Recap, FreeCAD, Rhinoceros).

3.3. Materiales cerámicos para Fabricación Aditiva

Para la realización de las maquetas físicas se ha optado por su construcción física mediante tecnologías de Fabricación Aditiva (FA. *Additive Manufacturing*), donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material a partir de un modelo digital 3D, normalmente en formato de archivo STL (*Standard Triangle Language*). Para ello se contaba con tres tipos de equipos; de polvo (3DP o BJ, Binder Jetting), de polímeros termoplásticos (FDM. *Fusion Deposition Modeling*) y de resina fotosensible a los rayos Ultravioleta (SLA. Estereolitografía).

Para el desarrollo de los materiales cerámicos se desarrollarían diferentes mezclas desde el ITC para probarlas en el equipo ZPrinter. El fin era encontrar un material que pudiese ser utilizado en la impresora de polvo que posibilitara tanto la reproducción a escala del patrimonio cultural para su promoción (maquetas) como la reproducción de partes desaparecidas en algunos de estos bienes arquitectónicos.

Para la conformación de las pruebas los materiales cerámicos utilizados han sido de base arcillosa con diferentes aditivos y utilizando un aglutinante líquido de base agua. Las pruebas fueron nombradas por una letra y un número (P1, P2, P3, C1, C2, C3, etc...)

Para experimentar las diferentes mezclas cerámicas, se diseñaron un conjunto de probetas de 80x20x7 mm, colocadas en dos direcciones. Seis probetas alineadas al movimiento del cabezal de impresión, es decir paralelas a la dirección de impresión y seis en sentido perpendicular (Fig. 2 y 3).

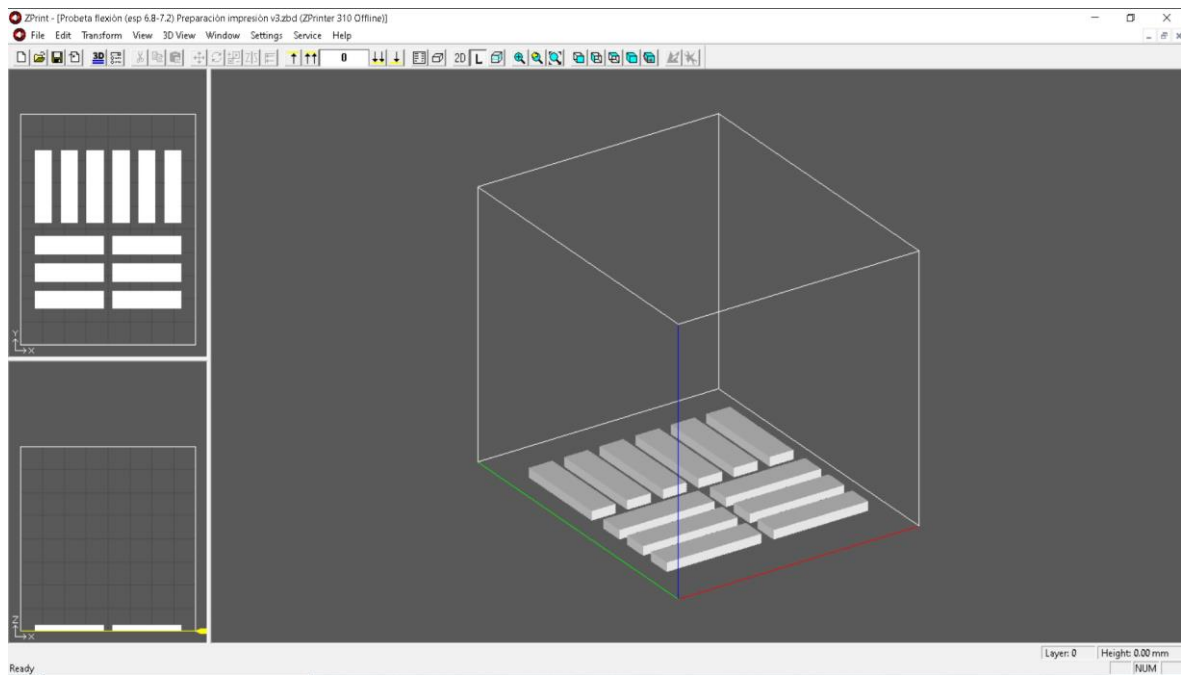


Fig. 2. Fichero de las probetas en *Zprinter* software.



Fig. 3. Probetas imprimiéndose en la impresora *Zprinter*.

3.4. Difusión de los resultados

Finalmente, en la difusión de los resultados, además de exponer éstos en varias publicaciones y en un dominio específico web, se desarrolló un proceso de arquitectura inversa, de tal manera que se han creado maquetas físicas a partir de los modelos virtuales 3D obtenidos. Esta opción permite mostrar los edificios en su totalidad, o parte de ellos, a un gran número de personas. En este sentido, una gran ventaja de este tipo de difusión es poder contemplar edificios ya desaparecidos, pero también facilitar la visión y entendimiento de las construcciones a personas con discapacidad visual [3] [4]. Por añadidura las maquetas virtuales se pueden utilizar para visualización los monumentos a través de Realidad Virtual (RV) o Realidad Aumentada (RA).

4. Discusión de los resultados

De los tres equipos de Fabricación Aditiva susceptibles de ser empleados en este trabajo, el que ofrecía una combinación de tamaño y precisión óptimos para los objetivos de este proyecto, era el equipo basada en la tecnología *Binder Jetting* o también denominada 3DP. Al igual que en otros procesos de fabricación aditiva, la pieza a producir se construye a partir de muchas secciones transversales milimétricas del modelo 3D digital. Sobre una fina capa de polvo, un cabezal de impresión de inyección de tinta se mueve a través de un lecho de polvo, depositando selectivamente un material aglutinante líquido. Este proceso se repite capa a capa originando el modelo volumétrico. Posteriormente, entre otros aspectos, se elimina el polvo sobrante.

Al ser un material cerámico se presentaron dos principales problemas. Uno, la resistencia mecánica en “crudo” (denominado en “verde” en el argot específico del ámbito cerámico), es decir, que cuando la pieza se extraía del equipo de Fabricación Aditiva tuviese suficiente resistencia y no se desmoronara. Se ha de tener en cuenta que el material original que utiliza la máquina es de base escayola, por tanto, al añadirle el aglutinante en base acuosa reacciona y fragua. Este proceso le da dureza a la pieza. Sin embargo, al utilizar un material cerámico, no se cuenta con el fraguado, ni la máquina le puede inducir presión, por tanto, conseguir la estabilidad en verde (crudo), antes de la cocción, era un factor muy importante. Y dos, la resistencia mecánica una vez cocida la pieza, así como otros factores como la porosidad, la precisión del modelo o la estabilidad dimensional.

Finalmente se seleccionaron y estudiaron veintidós elementos arquitectónicos de la Comunidad Valenciana (Tabla 1). A partir de los modelos en 3D se crearon los correspondientes archivos de estereolitografía (STL). Estos archivos digitales se publicarán en la página web del proyecto (<http://www.3drestauram.es>) (Fig. 4) y algunos de ellos ya están presentes en la plataforma de modelos digitales 3D, *Sketchfab* (Fig. 5).



Fig. 4. Portada de la página web <http://www.3drestauram.es>

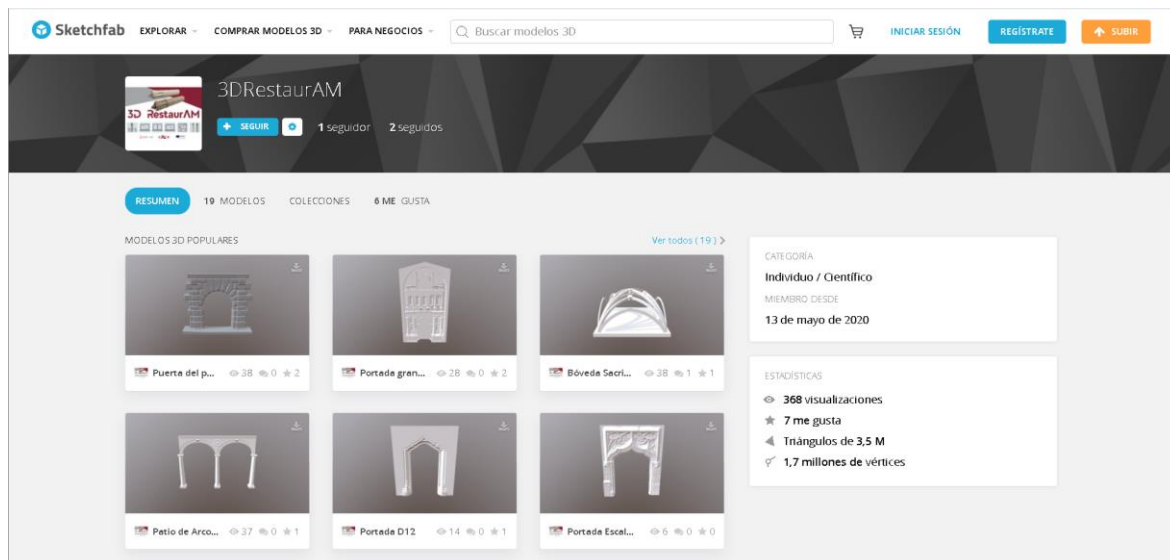


Fig. 5. Modelos en la plataforma de *Sketchfab*.

Posteriormente y a partir de estos archivos y mediante diferentes softwares de equipos de Fabricación Aditiva, se seleccionaron diferentes parámetros y se convirtieron a un formato legible por estos equipos de fabricación aditiva empleando código máquina: G-Code (Fig. 6).

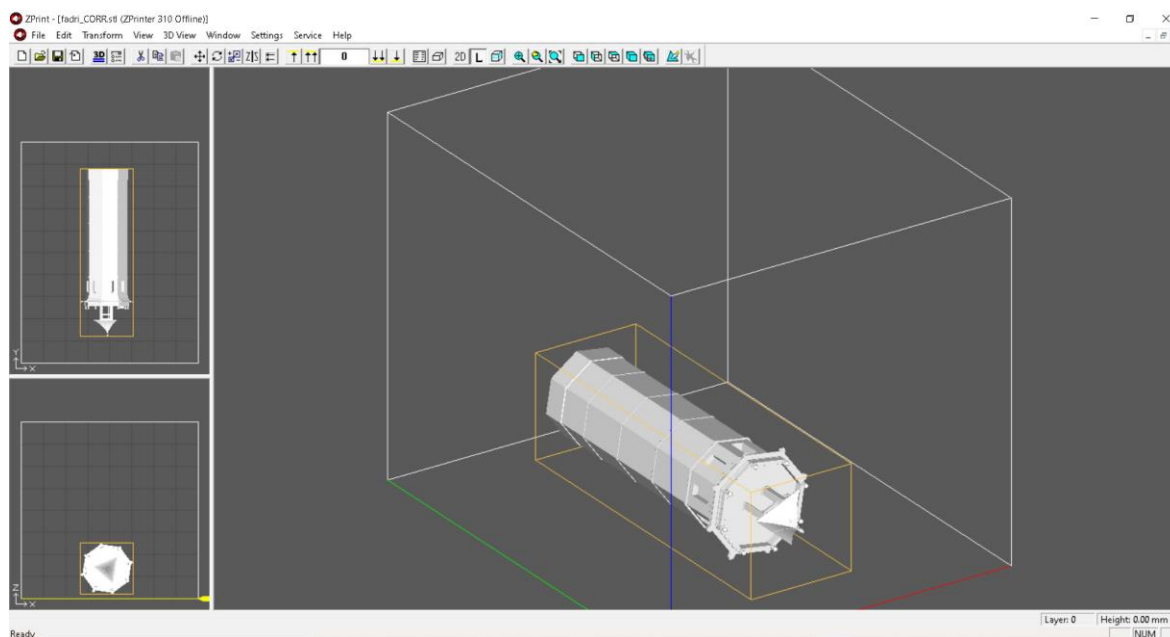


Fig. 6. Modelo en el software del equipo de 3DP, *Zprinter software*, que convierte el fichero STL en G-Code.

Las probetas se sometieron a ensayos de flexión, se valoró la influencia de la orientación en la producción, y se realizaron mediciones para comprobar la estabilidad dimensional tras el proceso de secado y cocción. Las probetas con base porcelana llegaron a alcanzar un margen entre 8-11 MPa. Por otra parte, las probetas impresas paralelas al sentido perpendicular al movimiento del cabezal de impresión alcanzaron mejores resultados que las realizadas paralelas a la dirección de impresión, tanto en estabilidad dimensional como en resistencia mecánica. En último lugar, se pudo constatar que algunas muestras mantenían las dimensiones tras el secado, muestras en “crudo” (sin cocción), pero contraían hasta aproximadamente un 10% de su dimensión longitudinal tras la cocción.

Algunas composiciones tuvieron que ser descartadas por excesiva fragilidad en “crudo”, o mostrar inadecuados acabados superficiales, o formaban excesivas grietas tanto en la impresión como en el postprocesado.

5. Conclusiones y futuros trabajos

El trabajo aquí realizado supone una aportación a la mejora de la divulgación del patrimonio arquitectónico al generar contenidos digitales de acceso libre y gratuito originales.

El ámbito cerámico aplicado a la Fabricación Aditiva es un campo por explorar pero que entraña dificultades que superar en varios aspectos. En un futuro próximo, los autores de este trabajo el pretenden continuar realizando más pruebas tales como probetas con otras composiciones, con el fin de encontrar materiales con mejores resistencias mecánicas, acabados superficiales o precisiones dimensionales, así como pruebas de fabricación o prototipado, tanto de maquetas (Fig.7) como de elementos arquitectónicos para su utilización en restauración.

Por otra parte, con los modelos se experimentará con la aplicación de texturas para poder visionarlos mediante realidad virtual (Fig. 8, 9, 10 y 11)



Fig. 7. Impresión de uno de los modelos con material cerámico.

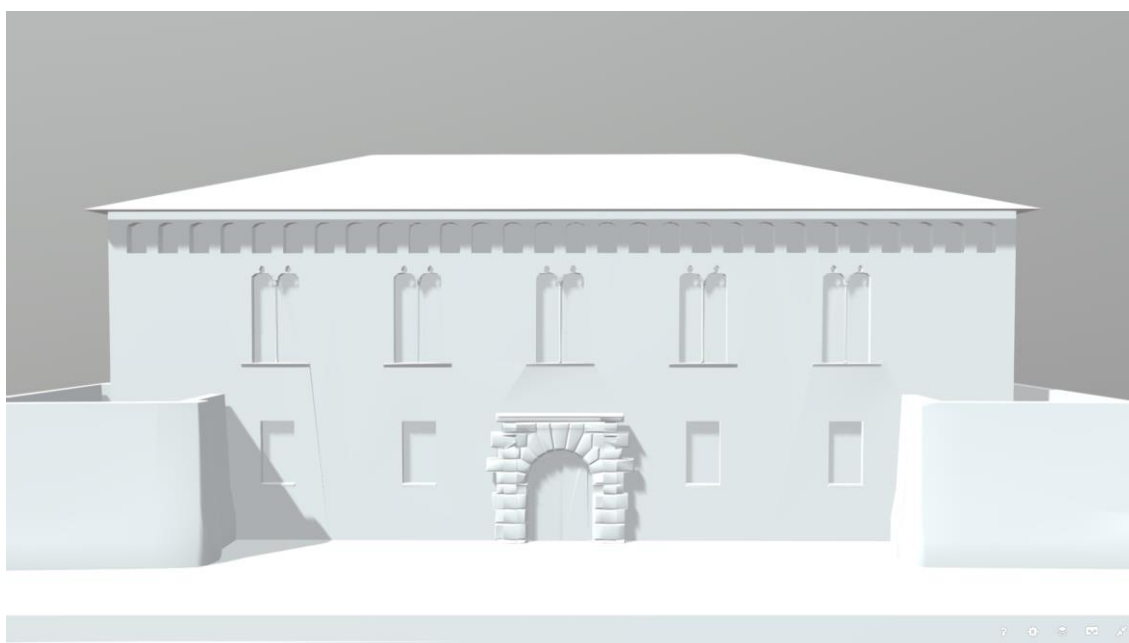


Fig. 8. Reconstrucción 3D del castillo-palacio de los marqueses de Ariza, parcialmente desaparecido. Betxí. Castellón

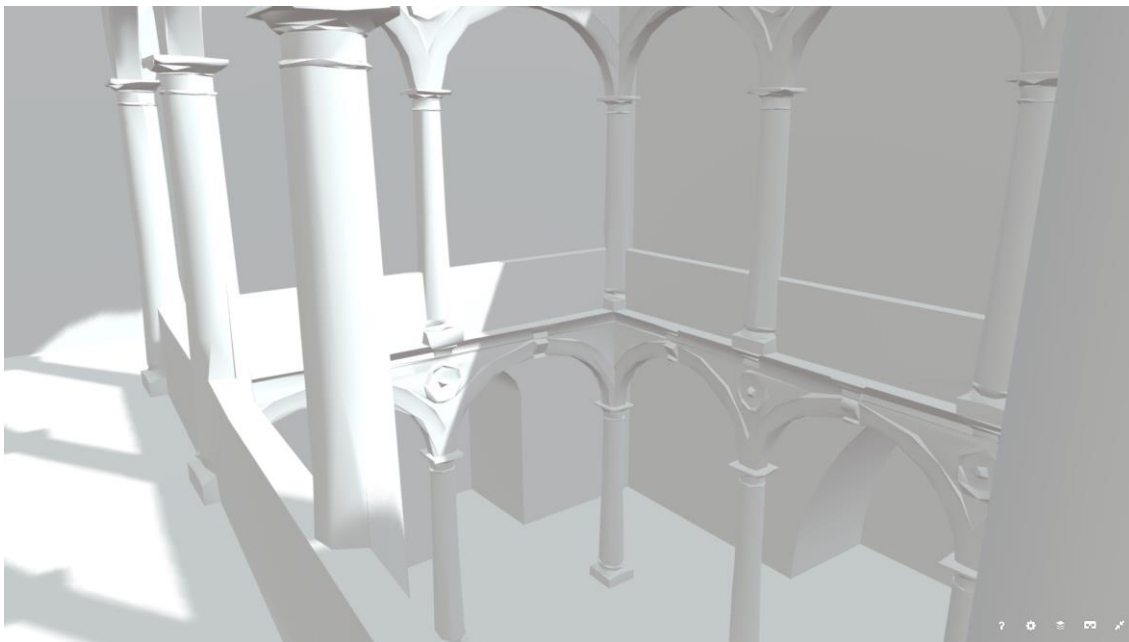


Fig. 9. Reconstrucción 3D del patio del castillo-palacio de los marqueses de Ariza, parcialmente desaparecido. Betxí. Castellón



Fig. 10. Reconstrucción 3D de la plaza Mayor de Vila-real en el siglo XVI. Castellón



Fig. 11. Reconstrucción 3D con texturas de la sala 12 del desaparecido palacio de Oliva. Valencia.

6. Citas y Referencias bibliográficas

- [1] Monge Hernández, J.R. (2017) *Herramientas de difusión del Patrimonio Cultural en España*. Final Degree Project. Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya.
- [2] Máñez, MJ, Garfella, JT. (2019). The diffusion of architectural Heritage, through social networks, as a digital Heritage. *Disegnarecon*, volumen (12), No 23. 4.1-4.17. Recuperado de <http://disegnarecon.univaq.it/ojs/index.php/disegnarecon/article/view/616>
- [3] Máñez, MJ, Gual, J., Garfella, JT y Martínez, J. Á. (2016). Renaissance-Style Architecture in El Maestrazgo: From Virtual to Tactile Models. En Amoruso, G. (Ed.), *Handbook of Research on Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools* (pp. 174-200). IGI Global. <http://doi:10.4018/978-1-5225-0029-2.ch008>
- [4] , Gual, J., Fabuel, C., Máñez, MJ., Garfella, JT. (2019) Posibilidades de la fabricación aditiva para la elaboración de maquetas táctiles inclusivas. En Llorens, S., Rincón, MD., Martín, A. (Ed.), *Avances en Expresión Gráfica aplicada a la edificación* (pp. 661-672). Tirant Humanidades.
- [5] Gibson, Ian, Rosen, David, Stucker, Brent (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer-Verlag.

Agradecimientos

El proyecto 3D RestaurAM, con referencias IMDEEA/2019/81 y IMDEEA/2020/99, ha sido cofinanciado por el IVACE y por los fondos FEDER, dentro del Programa Operativo FEDER de la Comunitat Valenciana 2014-2020 y se ha desarrollado en colaboración con el Instituto Tecnológico de Cerámica (ITC) y la asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)