



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

DOMÍNGUEZ, I.A.; ROMERO, L.; ESPINOSA, M.M.; DOMÍNGUEZ, M.
Impresión 3D de maquetas y prototipos en arquitectura y construcción
Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 2, noviembre, 2013, pp. 39-53
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127629284004>

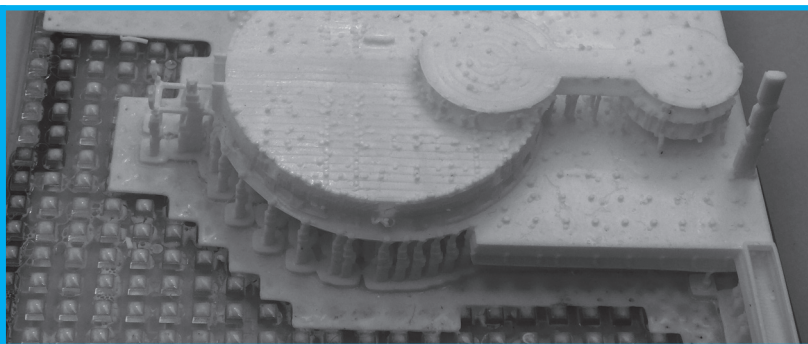
- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*3D Printing of Models and
Prototypes in Architecture
and Construction*

Impresión 3D de maquetas y prototipos en arquitectura y construcción



Autores

DOMÍNGUEZ, I.A. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – UNED.
Juan del Rosal 12, 28080, Madrid, Spain.
ibidominguez@guadalajara.uned.es

ROMERO, L. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – UNED.
Juan del Rosal 12, 28040, Madrid, Spain.
lromero@ind.uned.es

ESPINOSA, M.M. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – UNED.
Juan del Rosal 12, 28040, Madrid, Spain.
mespinosa@ind.uned.es

DOMÍNGUEZ, M. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales – UNED.
Juan del Rosal 12, 28040, Madrid, Spain.
mdominguez@ind.uned.es

Fecha de recepción 12/2/2013

Fecha de aceptación 1/8/2013

Código interno RDLC 0136

Resumen

La fabricación de maquetas y prototipos en el ámbito de la arquitectura y la construcción ha tenido, y tiene todavía, una componente artesanal muy importante. El desarrollo de los sistemas de diseño asistido, con su consiguiente evolución hacia los sistemas de modelado sólido y los actuales sistemas de modelado de información en edificación, ha permitido obtener maquetas electrónicas, imágenes fotorrealísticas y animaciones virtuales de la construcción con una calidad muy aceptable. Pero todavía no se puede decir lo mismo respecto de las maquetas físicas, obtenidas a partir de ese modelo electrónico del edificio a través de máquinas de fabricación rápida de maquetas y prototipos.

En el presente trabajo se aborda el estado actual del arte en cuanto a la obtención de maquetas de construcción mediante máquinas de impresión en tres dimensiones (máquinas de fabricación rápida prototipos), analizando las dificultades que todavía no han sido subsanadas, y se plantea una línea de trabajo en cuanto a máquinas, procedimientos de trabajo y manipulación de los ficheros electrónicos que puede ayudar tanto al usuario final (para aprovechar al máximo la tecnología actual), como al desarrollador de soluciones para la construcción, pues se marcan las pautas de lo que se persigue en este sector.

Palabras clave: Prototipado rápido, modelado arquitectónico, prototipado virtual, impresión 3D, construcción.

Abstract

The manufacturing of models and prototypes in the architecture and construction area has had, and still has, one very important craft component. The development of the systems of assisted design, with its consequent evolution towards the solid modelling systems and the current information modelling systems in building, have allowed to obtain electronic models, photorealistic images and virtual animations of construction with a very acceptable quality. But it still is not possible to say the same thing about the physical models, obtained from this electronic model of the building through machines of rapid models and prototypes manufacture.

In the present work, the current condition of the art is approached as for the obtaining models of construction by means of printers in three dimensions (machines of rapid prototypes manufacture), analyzing the difficulties that have not been yet corrected, and a line of work is proposed as for machines, work procedures and electronic files manipulation that can help the final user so much (to take the maximum advantage of the current technology), since to the developer of solutions for the construction, because the guidelines of what is chased in this sector are established.

Keywords: Rapid prototyping, Architectural modelling, Virtual prototyping, 3D printing, Construction.

1. Introducción

Las maquetas arquitectónicas dan vida a los conceptos abstractos, pero tradicionalmente han requerido mucho tiempo y recursos para su fabricación. Este proceso es problemático para las empresas de arquitectura y construcción, que tienen que enfrentarse normalmente a plazos muy estrictos para presentar el proyecto en público a sus clientes (Giannatsis, 2002). Como es sabido, los proyectos de arquitectura y construcción involucran gran cantidad de recursos, que deben ser administrados correctamente para obtener al final unos resultados satisfactorios (Ryder, 2002; González, 2010).

La fabricación digital puede ser definida como un “proceso computacional que transforma elementos materiales”. En general, este proceso se puede realizar a través de dos sistemas; sustractivos o aditivos. Los sistemas sustractivos extraen material y se asocian a las máquinas de control numérico - CN. Los sistemas aditivos solidifican material y se vinculan a las máquinas de prototipo rápido - PR (García, 2011). Este trabajo se va a centrar en las tecnologías englobadas dentro del segundo sistema.

Recientemente, también se están utilizando robots industriales controlados por ordenador para producir directamente elementos de construcción a partir de los datos de diseño. Estos robots trabajan con una gran flexibilidad y una enorme gama de herramientas y materiales, por lo que tienen un gran potencial en el diseño digital y existen muchos investigadores que se encuentran trabajando en este campo (Gramazio, 2008; Willmann, 2013).

Un sistema de fabricación rápida de maquetas y prototipos es aquel que, partiendo del modelo electrónico de un proyecto de construcción, obtiene de forma rápida, automática y fidedigna una maqueta física del proyecto a una escala previamente definida.

Estos sistemas, también llamados de prototipado rápido, impresión en tres dimensiones o fabricación aditiva, tienen un principio de funcionamiento relativamente sencillo. Una vez se tiene el modelo electrónico del edificio se genera una geometría triangulada con la forma final del edificio (archivo estereolitográfico o .stl) de forma que el sistema de fabricación rápida de maquetas discretiza el modelo en capas, de una altura determinada que oscila entre 0,015 y 0,250 mm, y “construye” la maqueta capa a capa mediante alguna de las diversas tecnologías en las que luego se entrará. Desde que en 1963 Ivan Sutherland presentó su trabajo “Sketchpad, a man-machine graphical communication system” en el Departamento de Energía Eléctrica

del MIT (Sutherland, 1963), la sucesión de desarrollos en el ámbito del diseño por ordenador no ha dejado de sorprendernos. Los primeros trabajos de Sutherland y sus coetáneos se desarrollaban en dos dimensiones, pero muy pronto apareció la tercera dimensión y, no mucho más tarde, el modelado sólido, de la mano de Arístides Requicha y Herbert Voelcker (Voelcker, 1978), en la Universidad de Rochester. Requicha y Voelcker desarrollan los primeros algoritmos matemáticos del modelado sólido, en un primer esfuerzo por comunicar los sistemas de diseño asistido con las máquinas de control numérico, ya operativas desde hacía dos décadas.

El diseño asistido en dos o tres dimensiones, con aplicaciones como Autocad o MicroStation, no difiere en gran medida del diseño tradicional en un tablero de dibujo. Pero la aparición del modelado sólido, con herramientas como Euclid, Pro/Engineer o Catia, en el que las entidades no son solo líneas sino volúmenes, con cualidades como densidad, masa, centro de gravedad o inercia, permitió un gran avance en la dualidad diseño-cálculo en ingeniería (Caño, 2007).

En el presente trabajo se aborda el estado actual en cuanto a la obtención de maquetas de construcción mediante máquinas de impresión en tres dimensiones, analizando las dificultades que todavía no han sido subsanadas; y se plantea una línea de trabajo en cuanto a máquinas, procedimientos de trabajo y manipulación de los ficheros electrónicos que puede ayudar tanto al usuario final, para aprovechar al máximo la tecnología actual, como al desarrollador de soluciones para la construcción, pues se marcan las pautas de lo que se persigue en este sector.

2. Análisis de la situación actual

A continuación se va a desarrollar una exposición de los puntos más importantes a tener en cuenta en la elaboración de maquetas, analizando las posibilidades de las maquetas de trabajo y las maquetas de cara al cliente. Como complemento, para dar una visión completa de la situación actual, se comentarán someramente las características de una máquina de impresión 3D y se abordará de forma sucinta el análisis de materiales y procesos que tienen lugar en el ámbito de estas tecnologías.

2.1. Maquetas en arquitectura y construcción

La maqueta, como elemento de representación tridimensional de la idea de un proyecto, es un elemento fundamental en el desarrollo del mismo, tanto para la concreción de las ideas del ingeniero o arquitecto

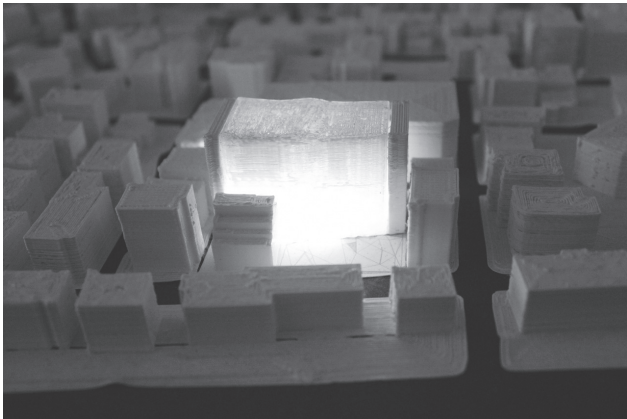
responsable del proyecto como para la planificación del trabajo o la presentación a la propiedad (Gibson, 2002).

En un primer momento, cuando se plantean los primeros bocetos del proyecto, es conveniente también crear una pequeña maqueta donde se vea la distribución de volúmenes y espacios abiertos. Esta maqueta suele ser sencilla y elaborada con los materiales que el equipo de diseño tiene a mano. Además, esta maqueta debe ser muy versátil, ya que sobre ella se realizarán múltiples modificaciones hasta obtener cierto grado de satisfacción.

Esta maqueta abarca en primer lugar la obra aislada, y seguidamente se implanta en una un poco más grande que abarca el entorno del proyecto. Un ejemplo de este planteamiento puede ser la maqueta elaborada por Roque Peña, de waspmod.com, para el proyecto Mediateca, de Adriana de Cola (Figura 1). Es habitual generar una serie de volúmenes a escala para situarlos sobre las primeras versiones de los planos impresos en papel, normalmente en tamaño A1 o A0, de forma que se puedan ratificar las primeras decisiones tomadas para empezar a desarrollar el proyecto.

A medida que el proyecto avanza en el tiempo se hace necesario ir poco a poco complicando y completando esas maquetas iniciales, sin salir de la sencillez y siempre, por ahora, de cara a clarificar ideas y analizar la distribución de espacios y volúmenes (Espinosa, 2003). En estas fases surgen nuevas maquetas de trabajo, también de la obra aislada o de la obra integrada en su entorno, que cada vez se parecen más a lo que será el proyecto una vez terminado.

Figura 1. *Visión del entorno con una maqueta obtenida mediante impresión 3D (cortesía waspmod.com)*



Cuando el proyecto está terminado, de nuevo se hace conveniente aportar una maqueta a escala. Esta maqueta deberá estar preparada para obtener el visto bueno del cliente, por lo que ya no será elaborada con los medios anteriores sino que será desarrollada con calidad y, si la envergadura del proyecto lo permite, subcontratada a un especialista.

En esta maqueta final de nuevo encontramos las dos opciones, de obra aislada y de obra con su entorno. En la Tabla 1 se resumen las características generales y especificaciones para ambas opciones según el estado de los proyectos.

Tabla 1. *Características de las maquetas según el estado de los proyectos*

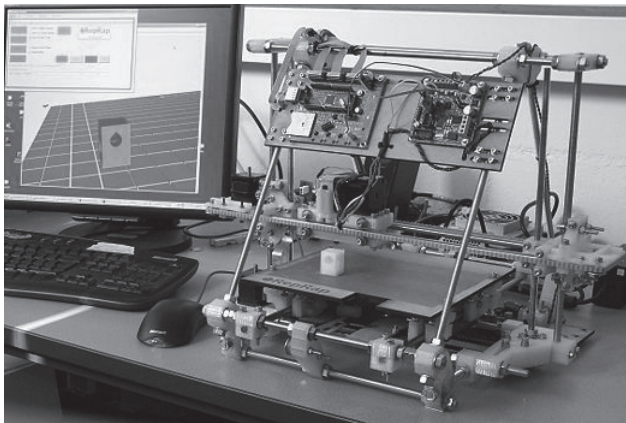
PROYECTO	De análisis de viabilidad (Diseño conceptual)	De trabajo, organización y planificación (Diseño detallado)	Proyecto terminado (Marketing)
Características generales	<ul style="list-style-type: none"> – Coste muy bajo – Se requiere poco tiempo 	<ul style="list-style-type: none"> – Coste bajo – Puede requerir algún material específico – Se requieren varios días 	<ul style="list-style-type: none"> – Coste alto – Requiere materiales muy específicos – Puede tardar semanas
Especificaciones	<ul style="list-style-type: none"> – Se requiere velocidad – No requiere gran calidad – Se trabaja en masas 	<ul style="list-style-type: none"> – Se requiere velocidad – No requiere gran calidad – Se trabaja en detalles 	<ul style="list-style-type: none"> – Se requiere gran calidad – Se trabaja en detalles

2.2. Características de una máquina de impresión 3D

Aun cuando ya algunos estudios de arquitectura y empresas de construcción empiezan a presentar maquetas de sus proyectos obtenidos mediante máquinas de impresión 3D (Yongnian, 2009), el trabajo que desarrollan discurre de forma intuitiva, intentando corregir errores sobre la marcha, y sin un hilo argumental que garantice una maqueta válida y fidedigna.

Antes de entrar en profundidad en el estudio es conveniente analizar las cualidades y especificaciones técnicas de una máquina de impresión 3D. Las principales variables a considerar se agrupan en cinco grandes grupos: costes, dimensiones, materiales de trabajo, precisión y otras variables (Glesner, 2002; Espinosa, 2007; Guerrero, 2013).

Figura 2. Impresora RepRap modelo Mendel



Costes

Las primeras variables a considerar son las relativas al coste, y englobarían el coste de la máquina y el coste unitario de la maqueta fabricada. Respecto a la primera, podemos clasificar las máquinas en tres grandes grupos:

Máquinas de impresión 3D de coste bajo (en torno a 1.000 €). Principalmente son máquinas de carácter docente y lúdico. En este grupo irían incluidas las de tipo RepRap (máquinas autorreplicantes). En la Figura 2 se recoge una impresora RepRap modelo Mendel que

trabaja con la tecnología de deposición de material fundido (FDM). Esta máquina tiene un peso total de 7 kg, unas dimensiones exteriores de 500x400x360 mm y unas dimensiones de tamaño máximo construible de 200x200x140 mm.

Máquinas de impresión 3D de coste medio (alrededor de 15.000 €). Se suelen utilizar en pequeños estudios de ingeniería o arquitectura. En la Figura 3 se recoge una impresora V-Flash modelo FTI 230 de 3D Systems que trabaja con la tecnología de polimerización por proyección de capas completas. Esta máquina tiene un peso total de 66 kg, unas dimensiones exteriores de 660x690x760 mm y unas dimensiones de tamaño máximo construible de 230x170x200 mm.

Máquinas de impresión 3D de coste alto (superior a 40.000 €). Destinadas a grandes estudios, producción en serie o empresas subcontratistas. En la Figura 4 se recoge una impresora EOS modelo P 800 que trabaja con la tecnología de sinterizado. Esta máquina tiene un peso total de 2.300 kg, unas dimensiones exteriores de 2250x1550x2100 mm y unas dimensiones de tamaño máximo construible de 700x380x560 mm.

Figura 3. Impresora V-Flash (cortesía 3D Systems)



Figura 4. Máquina de fabricación aditiva EOS modelo P 800 (cortesía EOS)



No cabe duda que los resultados que se obtienen con una u otra máquina difieren sensiblemente pero, desde un punto de vista técnico, quizá las tres opciones puedan obtener buenos resultados, siendo el producto final función de la pericia de los operarios que elaboran el postprocesado. El coste del producto terminado también puede ser agrupado en estos tres niveles, y en este sentido quizá lo prudente antes de adquirir una máquina es definir en detalle el resto de las especificaciones y acudir a la adquisición, alquiler o subcontratación en función del volumen de proyectos.

Peso y volumen

Un segundo grupo de variables se agrupan en el peso y volumen de la máquina, yendo desde máquinas grandes, con un tamaño similar a un gran armario, hasta las pequeñas, con un tamaño similar al de un microondas. Dentro del “volumen de la máquina” se deben tener en cuenta los elementos accesorios, como son las unidades de lavado, hornos, máquinas de vibración para eliminación de polvo, unidades de curado o postprocesado o las mesas de adición de aglutinantes.

No siempre se cumple pero, normalmente, el tamaño de la pieza terminada será función del tamaño exterior de la máquina, obteniéndose con las máquinas grandes maquetas del tamaño de un plano en A3 o superior. Las máquinas más pequeñas obtienen maquetas con una dimensión algo mayor de un papel tamaño A5.

Dentro de este grupo de especificaciones se debe tener en cuenta el nivel de ruido, ya que se pretende integrar la máquina en el entorno normal de la oficina de diseño. En este sentido es importante no solo el ruido que pueda hacer la propia máquina, sino el ruido que puedan producir los elementos accesorios como las unidades de lavado o los vibradores.

Material

Un tercer grupo de especificaciones lo constituye el material de trabajo. Si se puede trabajar con diversos tipos de materiales, o solo con uno; si se pueden obtener piezas en colores (indicando el número de colores); así como si existe la posibilidad de reciclar el material de trabajo en el caso, por ejemplo, de obtener una pieza que luego se desea desechar, como puede suceder con muchas de las maquetas conceptuales de las primeras fases del diseño.

Precisión

El siguiente grupo de especificaciones es el relativo a la precisión de la maqueta que se va a obtener. En este ámbito es necesario conocer la altura de capa, que puede ir de 0,250 mm en las máquinas más normales a 0,015 mm en las más sofisticadas. Pero también es necesario conocer el tamaño del mínimo detalle, que algunos fabricantes traducen por resolución (en ppp como en las impresoras de tinta). Aparte, es necesario valorar la precisión de la máquina, normalmente en tanto por ciento, y un dato que pocas veces aporta el fabricante, que es el espesor mínimo de pared que se puede construir.

Otras

El último grupo de especificaciones recoge otras variables a tener en cuenta, como son la posibilidad de conectar la máquina en red para, por ejemplo, un control remoto; los tipos de ficheros que soporta, normalmente .stl y otros; o la velocidad de trabajo en vertical, esto es, el tiempo que la máquina tardará en obtener la maqueta.

También entran dentro de este epígrafe las posibilidades de utilizar software libre, la formación necesaria para sacar el máximo rendimiento a las máquinas o de la posibilidad de adaptar la impresora con nuevos complementos que puedan ir saliendo.

En la Tabla 2 se resumen las especificaciones técnicas que se deben tener en cuenta en el momento de la elección de una máquina de impresión 3D.

Tabla 2. Especificaciones a considerar para la elección de una máquina de impresión 3D

Características	Especificaciones
Costes	<ul style="list-style-type: none"> – Precio de la máquina (incluidas postproducción y mantenimiento) – Coste unitario de maqueta – Coste de formación de personal cualificado. – Software de control y de modelado
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> – Área de trabajo – Dimensiones de la máquina – Peso de la máquina – Nivel de ruido – Elementos accesorios
Material de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> – Color o número de colores – Posibilidad de reciclado de material – Robustez o firmeza del material
Precisión	<ul style="list-style-type: none"> – Precisión – Altura de capa – Tamaño mínimo detalle – Resolución – Espesor mínimo de pared
Otros	<ul style="list-style-type: none"> – Velocidad de trabajo en vertical – Conexión en red – Ficheros soportados – Adaptabilidad a complementos – Facilidad de manipulación por el usuario

2.3. Análisis de materiales y procesos

En el epígrafe anterior se ha hecho un análisis de las características o especificaciones técnicas de una máquina de impresión en tres dimensiones. Se ha hecho una breve mención al material con el que se trabaja pero no se ha tenido en cuenta el proceso que tiene lugar dentro de la máquina. No hace falta indicar que la dualidad material-proceso dará como resultado unas especificaciones u otras (Modeen, 2005), razón por la que es muy importante conocer el proceso tecnológico con el que se obtiene la maqueta. También es importante identificar las características más representativas de cada material para poder seleccionar la tecnología más adecuada para la elaboración de cada modelo arquitectónico (Beokrem, 2012).

Tal como se ha indicado, la maqueta se obtiene físicamente añadiendo capas de material. Estas capas se pueden añadir de diferentes formas, de arriba abajo, de abajo arriba, toda la capa en bloque, por deposición

controlada de material fundido en determinados puntos, por deposición de aglutinante o por sinterizado selectivo del polvo depositado por un rodillo (Xu, 2000).

La dualidad proceso-material da lugar a una estructura de clasificación que nos permitirá desarrollar el análisis con posterioridad. Desde este punto de vista, se pueden clasificar las máquinas en cuatro grandes grupos:

Máquinas que aglutinan material sin necesidad de cambio de estado

La máquina deposita una capa de polvo de material (PMMA, escayola, almidón o similar) y un cabezal aporta el aglutinante (adhesivo). Adicionalmente, también se pueden añadir tintas, con lo que se obtienen piezas en color. Al final la maqueta queda embebida en el polvo de material, que puede ser eliminado por soplado o vibración. Ventajas: puede imprimir en color directamente, no necesita soportes, buen acabado superficial. Inconvenientes: maquetas frágiles, no puede obtener piezas transparentes, posibilidad muy limitada de reciclado del material.

Máquinas que depositan material mediante extrusión/inyección

Estas máquinas tienen normalmente dos o más cabezales, de forma que uno de ellos va depositando un material de soporte (un plástico soluble en disolventes especiales o cera con bajo punto de fusión) y el, o los otros, los materiales de la pieza (termoplásticos como ABS, resinas plásticas como PLA, ceras con alto punto de fusión o similares). Una vez terminada la deposición, los materiales de soporte se pueden eliminar con disolventes especiales o con un horno, si se han utilizado ceras de bajo punto de fusión. Ventajas: maquetas robustas y con buen acabado superficial, los soportes se eliminan fácilmente, bajo coste, posibilidad de reciclado del material. Inconvenientes: el número de colores es limitado, los soportes se deben eliminar mecánicamente si solo se tiene un cabezal.

Máquinas que solidifican el material mediante cambio de propiedades, normalmente polimerización

Estas máquinas trabajan con resinas que se polimerizan con luz ultravioleta. El material de partida es líquido, que se solidifica o polimeriza por efecto de la luz. La luz puede ser aportada mediante un rayo selectivo, caso de la estereolitografía; o mediante un proyector, que ilumina toda la capa de forma simultánea. Normalmente tanto el soporte como la pieza son del mismo material, por lo que los soportes deben ser eliminados mecánicamente. Ventajas: maquetas robustas

y con buen acabado superficial, puede obtener piezas transparentes/traslúcidas. Inconvenientes: los soportes no se eliminan fácilmente, solo trabaja en un color, posibilidad muy limitada de reciclado del material.

Máquinas de sinterizado

Estas máquinas son similares a las primeras, por cuanto trabajan con polvo de material, pero la consistencia se obtiene por sinterizado (fusión y solidificación) del material conseguido por un potente rayo láser. Estas máquinas pueden trabajar con materiales termoplásticos, algunas resinas, materiales compuestos o incluso metal. Al final la maqueta también queda embebida en el polvo de material, que puede ser eliminado por soplado o vibración. Ventajas: maquetas robustas y con buen acabado superficial, no necesita soportes. Inconvenientes: alto coste de piezas/máquina, solo trabaja en un color, posibilidad muy limitada de reciclado del material.

2.4. Pasos para la elaboración de los modelos

Para la elaboración de un modelo, dentro del proceso aditivo, los principales pasos a efectuar son (Figura 5):

- Desarrollo del modelo virtual en un sistema de diseño asistido.
- Conversión del modelo virtual a formato STL.
- Corte del archivo STL en diferentes bloques (si fuera necesario). Fase necesaria cuando la maqueta que se quiere obtener es dimensionalmente mayor que las dimensiones de trabajo de la máquina, lo que obliga a la fabricación por partes.
- Fabricación del modelo físico, capa por capa.
- Limpieza, unión de las partes (si se ha fabricado por bloques) y acabado del modelo.

Debido a la gran variedad de algoritmos diferentes que existen para representar los modelos, el formato STL ha sido adoptado como el estándar por la industria de la impresión 3D.

3. Metodología

Al objeto de ilustrar de forma gráfica la problemática que rodea esta tecnología, se han elegido una serie de proyectos, que se han resuelto de formas diferentes, con los que se han aislado las dificultades que se comentan a continuación:

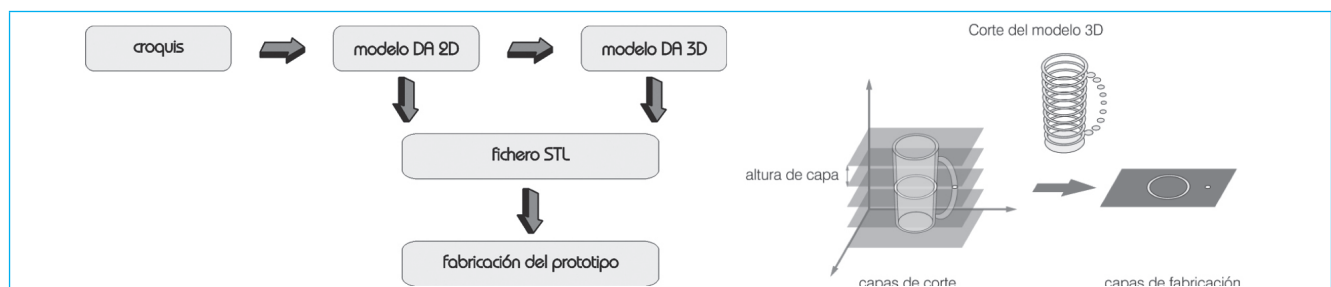
1. Proyecto de construcción de una nave industrial no convencional, modelado íntegramente con *Autodesk-Revit* y prototipado con una impresora *V-Flash* de *3D Systems* que trabaja con tecnología de polimerización de resina.

La altura de capa de esta impresora es de 0,11 mm, la resolución XYZ es de 768 x 1024 x 2000 ppp, siendo el espesor mínimo de pared vertical de 0,64 mm. Las dimensiones reales del proyecto son de 60 y 20 m de diámetro para los edificios grande y pequeño, respectivamente, y una altura de 12 m en el punto más alto. La maqueta se ha realizado a una escala 1:850.

En la Figura 6 se tiene una imagen fotorrealística de la nave. En la Figura 7 se presenta la maqueta tal cual ha salido de la máquina. Se debe advertir que el volcado del sistema de modelado a la máquina ha sido directo, sin retocar nada. Lo único que se ha hecho es adaptar la escala de la maqueta a las dimensiones de la placa de trabajo de la máquina, con lo que aparece el problema ya comentado de espesores de pared demasiado pequeños.

Adicionalmente aparecen otros problemas, derivados de las entidades que maneja el sistema de modelado, que se han volcado al fichero stl pero que no han sido bien interpretadas por la máquina de impresión 3D, por lo que aparecen detalles que no tienen nada que ver con el modelo original. En este caso concreto parece que han sido mal interpretados los detalles constructivos de las columnas que soportan la cubierta, que no deberían aparecer sobresaliendo por encima de la misma, tal como se puede apreciar en la figura. En

Figura 5. Fabricación aditiva



la misma situación está un modelo stl de un vehículo que debería estar aparcado en la plataforma y que ha sido deformado hasta parecer una columna vertical.

Figura 6. Proyecto nave industrial modelado con Revit

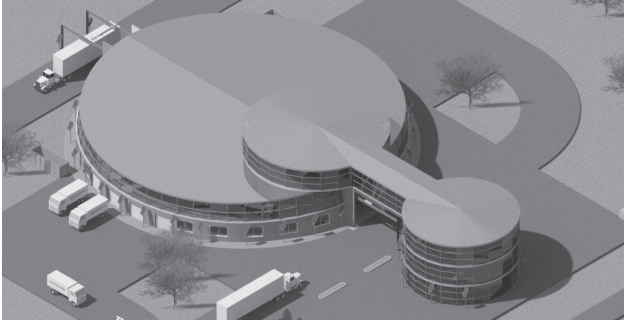
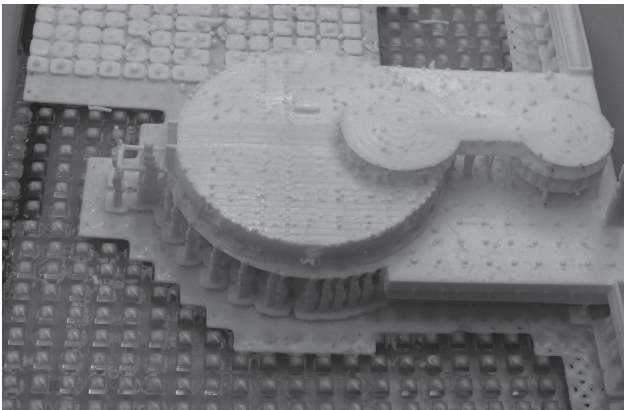


Figura 7. Proyecto nave industrial prototipado con V-Flash



2. Proyecto de edificación de un museo público, modelado con Autocad-Inventor y prototipado también con una impresora V-Flash de 3D Systems (Figura 8).

El tamaño real del edificio es de 70x70 m de base y 30 m de altura. La escala utilizada para la elaboración de la maqueta es de 1:700. Al tratarse de la misma impresora, la precisión y la resolución son las mismas que en el caso anterior.

En la Figura 9 se presenta la maqueta obtenida. Con la experiencia del proyecto anterior se realizó un escalado no uniforme al proyecto y se eliminó todo tipo de elementos no necesarios que pudiesen distorsionar la maqueta. Para ello se exageraron las dimensiones de las

barandillas, por ejemplo, y desaparecieron los peldaños de las escaleras, que quedaron convertidas en rampas.

Figura 8. Proyecto edificación de un museo público modelado con Inventor

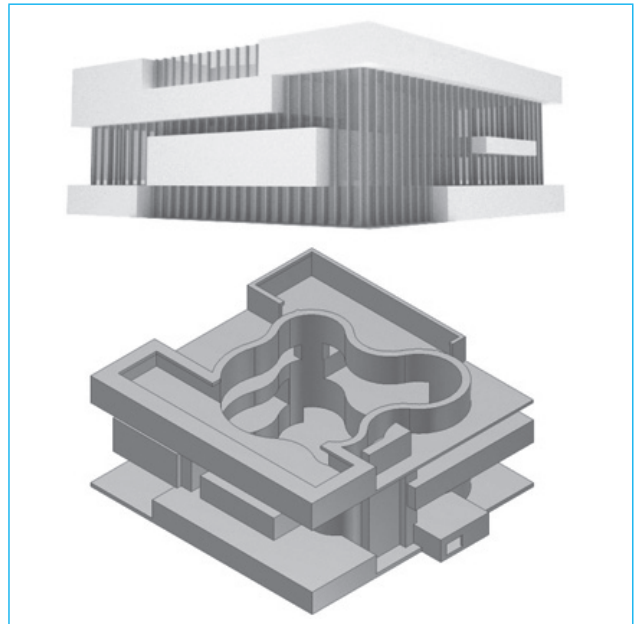
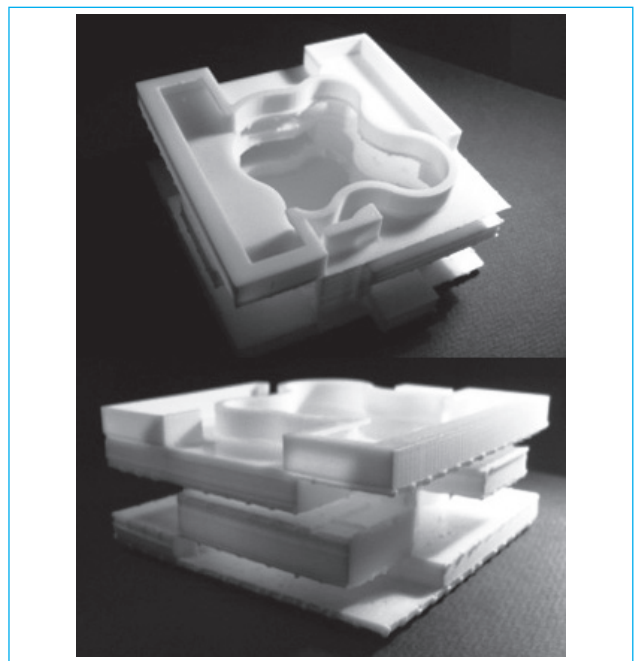


Figura 9. Proyecto del museo prototipado con V-Flash

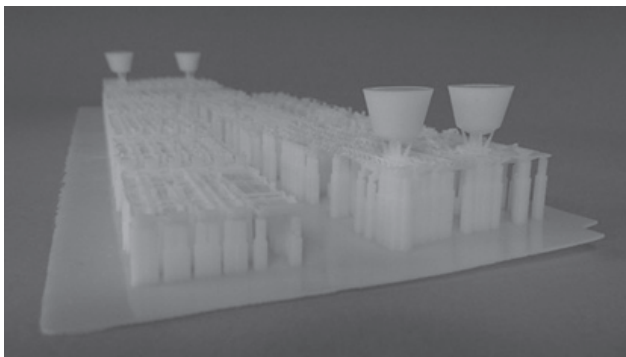


Tanto en este proyecto como en el anterior, al ser la máquina una impresora de un único material, los soportes deben ser eliminados mecánicamente, problema que conlleva un tiempo de postprocesado importante. En la imagen todavía se ve la huella de los restos de los soportes que no han sido correctamente pulidos. Además, previamente, se requiere un proceso de curado, en el cual es necesario introducir el modelo 5 minutos en alcohol isopropílico y 5 minutos en baño de agua y, posteriormente, colocar en cámara ultravioleta durante 45 a 60 minutos.

3. Proyecto de un mercado, desarrollado con *Autocad*, modelado con *Rhinoceros-Solidedge*, e impreso con dos tecnologías, una *Projet 1500* de 3D Systems y una impresora de deposición de hilo fundido de StratasyS. El tamaño real del edificio es de 147 m en su lado más largo (cada bancal cubre aproximadamente 25x19,7 m), con una altura de cubierta de 11,7 m, siendo de 20,5 m si se incluye el depósito más alto.

La primera impresión (Figura 10), realizada en una única placa con una impresora *Projet 1500* de 3D Systems, a una escala 1:1000, dio como resultado una maqueta excesivamente pequeña. En la figura se observa la maqueta a la salida de la máquina, es decir, sin eliminar los soportes de construcción. De hecho, estos soportes no se pueden eliminar porque, dado lo estrecho de las paredes obtenidas, se desmoronaría la maqueta con solo intentarlo.

Figura 10. Proyecto de mercado impreso con una *Projet 1500*



A la vista de los resultados, se optó por dividir el modelo e imprimirla en partes. Se valoraron las escalas 1:500, 1:250 y 1:225, eligiéndose la tercera por ser precisamente la elegida para los planos en papel (Figura 11), pero para esta nueva alternativa se eligió una máquina StratasyS de deposición de hilo fundido. La altura de

capa de esta impresora es de 0,17 mm. En este tipo de máquinas los soportes se eliminan mediante disolución. En la figura aparecen artesas que conforman la cubierta del mercado a las tres escalas indicadas. El resultado de la maqueta montada puede verse en la Figura 12.

Figura 11. Elección de la escala idónea

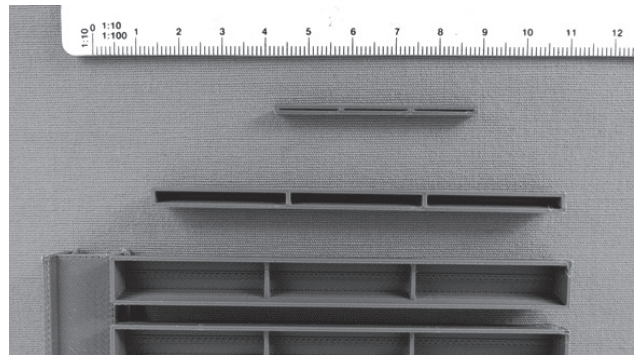
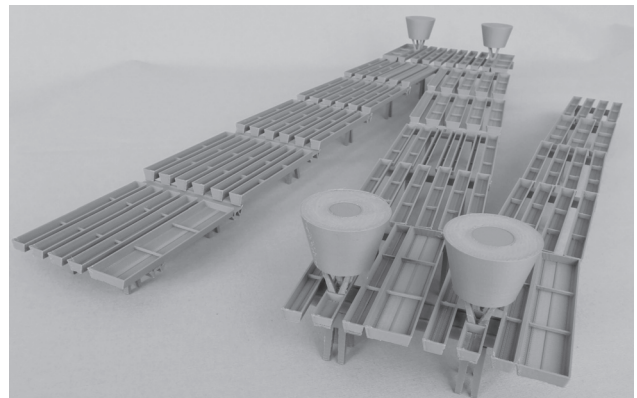


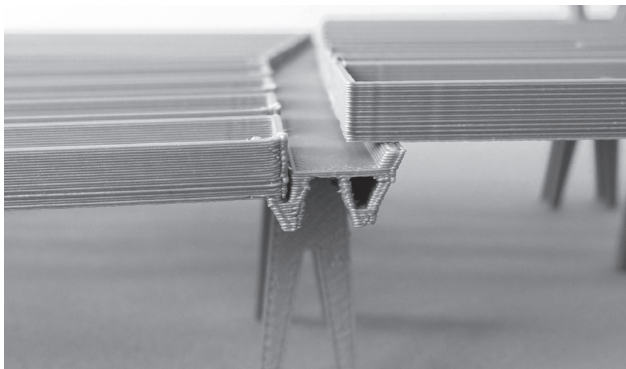
Figura 12. Proyecto mercado impreso en hilo fundido de StratasyS



En la Figura 13 se aprecia en detalle la geometría obtenida. Se puede ver que todavía es necesario un buen trabajo de postprocesado para que esta maqueta pueda tener una imagen válida para su presentación ante un cliente importante. Puede ser interesante introducir el modelo en algún derivado de metiletilcetona para mejorar el acabado superficial.

Como complemento a los proyectos comentados anteriormente, se referencian aquí otros dos proyectos desarrollados con técnicas complementarias a las anteriores.

Figura 13. Detalle del hilo fundido depositado en cada capa



4. Maqueta realizada con máquina autorreplicante de bajo coste, en concreto el proyecto de un Centro de restauración de arte, de Celia Julve (Figura 14). Se observa, por ejemplo, el detalle conseguido para las curvas de nivel en la maqueta del entorno así como la posibilidad de presentar el edificio seccionado. Es evidente que con una máquina de este tipo ya se puede obtener una maqueta funcional preliminar bastante aceptable aun cuando la altura de capa de esta impresora es de 0,25 mm.

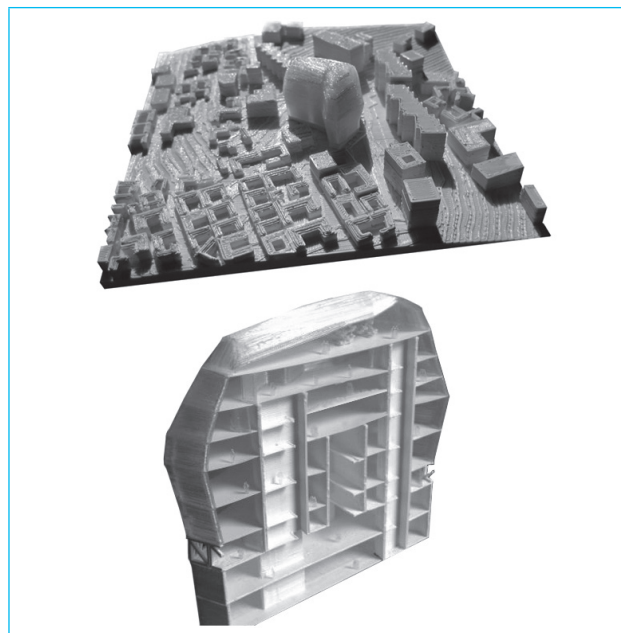
Las dimensiones reales del edificio con entorno son 190x190 m de base y 40 m de altura en su punto más alto (edificio). La maqueta con entorno se ha realizado a una escala 1:1000, mientras que la sección del edificio se ha efectuado en 1:250. Una de las ventajas de este tipo de máquinas es que, al tratarse de un modelo preliminar, no es necesario el postprocesado.

5. Maqueta realizada con una máquina ZPrinter de impresión que aglutina material sin necesidad de cambio de estado (Figura 15). Esta máquina pertenece a un grupo de impresoras de coste medio-alto, y ya puede decirse que empieza a aportar una calidad en la presentación que puede ser útil en su presentación al cliente.

Con esta máquina se pueden obtener detalles de 0,1 mm, siendo la altura de capa 0,089 mm.

Las dimensiones reales del primer edificio (arriba) son de 40x17 m de base y 10 m de altura, mientras que el segundo (abajo) tiene una base de 18x15 m y 15 m de altura. Se han utilizado las escalas 1:200 y 1:250, respectivamente. No requiere postprocesado aunque es conveniente dar un recubrimiento de cianocrilato para darle mayor consistencia a la maqueta.

Figura 14. Proyecto prototipado con máquina RepRap (cortesía waspmo.com)



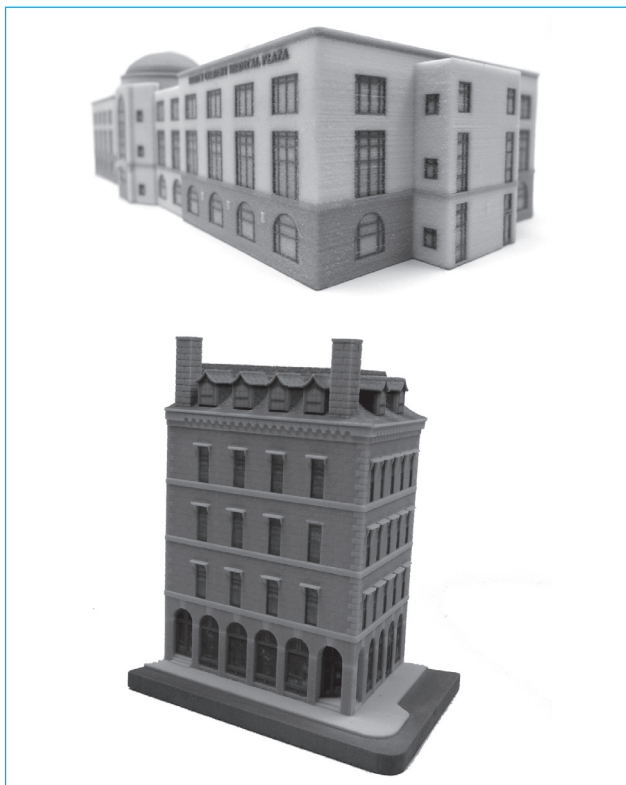
4. Resultados

A continuación, como resultado del estudio realizado, se van a analizar las posibilidades, limitaciones y posibles mejoras de la impresión 3D de maquetas en arquitectura y construcción. Por un lado se ha observado que las cualidades fundamentales a tener en cuenta a la hora de plantear una máquina de impresión 3D en arquitectura o construcción son: precio de máquina (el conjunto del sistema), coste unitario de maqueta, área de trabajo, altura de capa, tamaño de mínimo detalle, resolución (en ppp como las impresoras de tinta), precisión (normalmente en %), espesor mínimo de pared y eliminación de soportes.

Siendo cualidades de menos importancia: Color / número de colores. Nivel de ruido. Posibilidad de interrupción del proceso. Material (aunque esta variable, en el caso de maquetas funcionales, puede tener también gran importancia). Velocidad de trabajo (en vertical): las velocidades de trabajo de las máquinas son muy similares y dependen de forma importante del nivel de precisión de la maqueta; puede ser interesante que la máquina pueda trabajar a varias velocidades en función de los requerimientos necesarios en la maqueta que se está imprimiendo. Peso de la máquina. Conexión en red. Posibilidad de reciclado del material, aunque esta variable puede adquirir mayor importancia si el objetivo de la máquina es la obten-

ción de maquetas de trabajo. Ficheros soportados (normalmente STL y otros). Software de modelado: es necesario disponer de un software de modelado en 3D, pero todas las máquinas se entienden igual de bien, o igual de mal, con las diferentes soluciones de modelado. Formación del operario: las máquinas suelen ser bastante fáciles de utilizar; puede ser una variable importante en caso de acudir a soluciones RepRap, en las que el mantenimiento debe hacerlo el propietario; no obstante, normalmente es posible subcontratar un servicio de mantenimiento que garantice un correcto funcionamiento de las máquinas; aunque sí es cierto que las máquinas se están descatalogando muy rápidamente por lo que, en este sentido, no es muy recomendable acudir a una máquina de segunda mano o a ofertas del fabricante por liquidación de modelos que han dejado de fabricarse.

Figura 15. Maquetas de edificios realizadas con una máquina ZPrinter



4.1. Estética y funcionalidad

Como es sabido, el objetivo de los prototipos mecánicos, ortopédicos o electrónicos es estético, pero también es funcional. Los prototipos en estos sectores

permiten hacer ensayos preliminares y, en determinados casos, incluso se pueden obtener herramientas y utillajes con estas tecnologías (Yongnian, 2009).

En el ámbito de la arquitectura y la construcción las maquetas preliminares tienen un objetivo plenamente funcional, ya que deben permitir a los técnicos planificar su trabajo, distribuir volúmenes y prever futuros conflictos entre las diferentes partes que deben conformar la obra.

Las maquetas preliminares distan mucho de ser “estéticas”, pero pueden ser desmontables como una estructura modular y, con ello, pueden permitir a los técnicos profundizar en los objetivos más importantes de la obra.

Aunque no hay muchas referencias al respecto, una estructura realizada mediante impresión 3D también puede servir para contrastar el buen funcionamiento de una estructura metálica, por ejemplo, analizando la respuesta de diferentes distribuciones de vigas y verificando su capacidad de respuesta a los esfuerzos a los que es sometida. Desde un punto de vista académico, por ejemplo, tener una serie de cubiertas soportadas por cerchas de diferentes configuraciones puede permitir al alumno ver de una forma directa cómo se soportan las tensiones o cómo se deforma el conjunto por el efecto de cargas externas. Incluso, si se consigue una correlación entre la respuesta de la maqueta y la respuesta del material real, esto es, entre las tensiones de rotura del material de la maqueta y del material de la construcción, y teniendo en cuenta la variable de cambio de escala, se pueden hacer ensayos preliminares de respuesta de las estructuras a efectos sísmicos, tormentas o fuertes vientos, por ejemplo. En cualquier caso, estas opciones no servirían en principio para hacer cálculos de precisión en un estudio profesional, al menos de momento.

Es sabido que aunque una maqueta aguante sobradamente determinados esfuerzos, al hacerla más grande, por el propio peso de la estructura, o por las cualidades y defectos de los materiales, la estructura puede fallar. Este efecto, a la inversa, se puede desarrollar en la generación de maquetas, esto es, hacer las estructuras de la maqueta más finas de lo que saldrían con un simple cambio de escala de forma que la relación de la estructura respecto a su punto de rotura fuese el mismo que el que plantea la obra real. Evidentemente, esta opción es viable en las fases preliminares del proyecto ya que, dado que el comportamiento del material nunca será el mismo, los resultados obtenidos deberán ser contrastados con ensayos reales sobre los materiales finales.

Pero, por supuesto, el objetivo fundamental de una maqueta en arquitectura o construcción, sobre todo el de esas maquetas que se elaboran de cara al cliente, es eminentemente estético. La maqueta debe ganarse al público, debe tener todo lujo de detalles y debe responder a las expectativas del cliente de forma plena. Y este es un paso que, a día de hoy, todavía no han dado en toda su envergadura las maquetas obtenidas mediante sistemas de impresión 3D.

4.2. Localización de dificultades

Como se ha anticipado en los párrafos precedentes, al obtener una maqueta de forma automática se debe tener en cuenta una serie de aspectos importantes como son: el espesor de capa y el espesor de la pared vertical. Si tenemos un muro real de 500 mm, y lo representamos a escala 1:250, tendremos una pared de 2 mm, entidad que puede ser reproducida por cualquier máquina de impresión 3D. Si el muro es de 15 cm, la pared resultante en una maqueta de 1:250 debería ser 0,6 mm, entidad que ya no puede construir cualquier máquina. Y si la escala es 1:500 entonces la pared resultante será de 0,3 mm, dimensión que no puede obtener fácilmente la más potente de las máquinas de fabricación aditiva existentes actualmente en el mercado.

4.3. Metodologías y procedimientos para la mejora de resultados

Tras analizar los cinco proyectos planteados, diseñados con distintos sistemas y prototipados con diversas tecnologías, se pueden plantear una serie de pautas de mejora de cara a obtener unos buenos resultados en un futuro no muy lejano, si no se quiere tener que modelar de nuevo el proyecto para poder volcarlo a la impresora 3D:

- Es necesario generar la maqueta a escala no uniforme. Este proceso debe ser realizado, de momento, de forma manual, por lo que si un proveedor de máquinas de impresión 3D afirma que se puede obtener una buena maqueta volcando directamente el fichero .stl obtenido del sistema de modelado, lo más probable es que únicamente pretenda vender su máquina, importándole poco las verdaderas necesidades del estudio de ingeniería o arquitectura que desea implementar esta tecnología.
- También es posible realizar esta transformación a escala no uniforme de forma semiautomática, pero para ello es necesario contar con una serie de subprogramas que puedan ejecutar la transformación. Estos subprogramas deben trabajar a partir de las especificaciones de la impresora 3D que se

va a utilizar, de forma que la propia máquina sea capaz de determinar una escala que tuviera en cuenta los distintos espesores de trabajo. De este modo es posible que se incluyan algunos detalles que de otra forma se perderían. En cualquier caso, igual que sucede cuando se trabaja con impresión en papel, siempre es tarea del usuario adecuar la escala al detalle de lo que quiere imprimir.

Las subrutinas deben ser capaces de deformar el modelo, agrandando aquellos detalles que no queremos que se pierdan como, por ejemplo: muros que quedarían a una dimensión no imprimible, cornisas y detalles de la cubierta, detalles arquitectónicos, barandillas.

En una barandilla, por ejemplo, el sistema debería ser capaz de agrandar las dimensiones de pasamanos y balaustradas para que no se pierdan en la impresión. Además, probablemente sería necesario reducir el número de balaustradas al objeto de crear algo razonable. Asimismo las subrutinas deberían ser capaces de eliminar aquellos elementos que podrían distorsionar la maqueta y que no aportan nada al proyecto (como los pomos y detalles decorativos cuando estos no sean fundamentales, información sobre cableados o tuberías en el interior de los muros, etc.).

- No se debe descartar la posibilidad de un tratamiento posterior, como el pintado de colores, que por ahora tienen mejores calidades que las que ofrecen las propias impresoras de color, el barnizado o el tratamiento con determinados productos disolventes para mejorar el acabado.
- En cuanto al reciclado del material, es realmente difícil en tecnologías como el sinterizado, estereolitografía o proyección de aglutinante. Pero en el caso de deposición de hilo fundido siempre se puede plantear la recuperación del material de los prototipos desechados. Al fin y al cabo no es más que un material que ha sido fundido y solidificado para conformar la maqueta, por lo que no habría mayor problema en volver a fundirlo, después de una fase de triturado, y volver a generar la bobina de hilo con una extrusora.
- Posibilidad de prototipado de varios materiales: En el caso de la tecnología por hilo fundido, se podría hacer cambiando la bobina o utilizando varios cabezales. En el caso de estereolitografía, cambiando totalmente el contenido del depósito (lo que no es nada fácil), pero siempre manteniendo cada capa con un mismo material. En sistemas como el sinterizado es aún más difícil, porque implica vaciar el depósito y sustituir el material de partida,

operación que no está bien resuelta en este tipo de máquinas.

Una alternativa al prototipado con varios materiales es la inclusión de elementos externos, de forma manual o automática. En este sentido se pueden mencionar los trabajos llevados a cabo por el grupo de investigación en Ingeniería del Diseño de la UNED que integran en un único sistema un brazo robot, dotado de un terminal de deposición de hilo fundido, y un manipulador que va incorporando elementos externos a medida que se va construyendo el modelo. Por último, no cabe duda de que con esta tecnología robotizada se podría plantear la posibilidad de introducir herramientas que permitieran trabajar sobre maquetas o proyectos realizados anteriormente.

5. Discusión

El primer ítem a tener en cuenta tras el estudio realizado es que todavía no es factible obtener una maqueta con rigor de forma automática a partir de un modelo informático del proyecto. Hoy por hoy es imprescindible un proceso de manipulación y puesta a punto del modelo informático para obtener una maqueta fiable. Además, desde el punto de vista de la obtención de maquetas en arquitectura o construcción, se localizan varios problemas que deben ser tenidos en cuenta, problemas que pueden ser clasificados en función de que la maqueta sea de trabajo, o de cara al cliente:

Maqueta preliminar de trabajo

Los aspectos funcionales priman frente a los aspectos estéticos, por lo que variables como el color o el acabado superficial no tienen especial importancia. La velocidad de obtención de la maqueta o el coste sí tienen importancia.

Maqueta de obra terminada

Dado que la escala de la maqueta puede ser pequeña, es importante que los detalles no se pierdan en el proceso o por roturas frágiles en la manipulación. Los aspectos estéticos priman frente a los aspectos técnicos, por lo que variables como el color o el acabado superficial cobran especial importancia. Por estas mismas razones estéticas, los soportes, en el caso que los haya, deben ser eliminados fácilmente sin dejar huella. Las dimensiones finales de la maqueta suelen ser superiores a los tamaños de trabajo de las máquinas de impresión 3D, por lo que es normal tener que imprimir por partes y montar el conjunto. En estos casos no solo se deben tener en cuenta las dimensiones, sino también futuros problemas de montaje y

desmontaje. La maqueta final debe salir por un precio razonable, con lo que las máquinas de prototipado de gran calidad, que también tienen un coste alto, pierden competitividad.

6. Conclusiones

No existe ninguna herramienta que, partiendo de modelos virtuales de construcción o arquitectura, obtenga una maqueta correcta. Por lo indicado, las máquinas que no eliminan fácilmente los soportes quedan en un segundo plano, y en esa misma situación estarían las máquinas de sinterizado, por su elevado coste.

Quedarían, por tanto, las máquinas de deposición de hilo fundido como máquinas válidas para la obtención de maquetas de trabajo, dado su bajo coste (sobre todo en el caso de modelos RepRap), la rapidez del proceso y la posibilidad de reciclado del material. Las máquinas de proyección de aglutinante quedarían como válidas para la obtención de maquetas de cara al cliente, gracias a sus precios competitivos, buen acabado superficial, diversidad de colores y ausencia de soportes, entre otras cualidades. Pero lo cierto es que ninguna tecnología responde en este momento de una manera absolutamente favorable a las especificaciones de trabajo en el campo de la arquitectura y la construcción, razón por la que el sector todavía tiene bastante que evolucionar.

Por suerte para los investigadores y desarrolladores del sector, el campo de trabajo de obtención de maquetas físicas mediante impresión tridimensional a partir de un modelo electrónico tiene que mejorar todavía mucho. Por contra, para los usuarios del sector significa que todavía deberán esperar para que las tecnologías mejoren y, por supuesto, bajen los precios.

No obstante, los sistemas de generación rápida de maquetas y prototipos están entrando en el ámbito del diseño con gran fuerza, por lo que no es descabellado pensar que en breve todos los proyectos de construcción deberán aportar una maqueta obtenida mediante estos sistemas.

En este sentido, la siguiente etapa dentro de esta línea de investigación será el desarrollo de alguna de las mejoras que se proponen en este estudio y que dinamizarían de alguna manera la elaboración de maquetas mediante impresión 3D.

Referencias

- Beorkrem, C. (2012). Material Strategies in Digital Fabrication. *Ed. Routledge. Londres.*
- Caño, A.; Cruz, M.P. y Solano, L. (2007). Diseño, ingeniería, fabricación y ejecución asistidos por ordenador en la construcción: evolución y desafíos a futuro. *Informes de la Construcción*, 59 (505) 53-71.
- Espinosa, M.M. y Domínguez, M. (2003). El ciclo de vida de un producto desde la perspectiva de la ingeniería concurrente. *Plásticos Universales*, 85.
- Espinosa, M.M. y Domínguez, M. (2007). Ingeniería concurrente. *Ed. AIDA. Madrid.*
- García, R. (2011). Fabricación digital de modelos constructivos: análisis de equipos y procesos. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, Colombia*, 59, 145-157. (Página 15).
- Giannatsis, J. y Dedoussis, V. (2002). Architectural scale modeling using stereolithography. *Rapid Prototyping J*, 8 (3), 91-95.
- Gibson, I., Kvan, T., Wai Ming, L. (2002). Rapid prototyping for architectural models. *Rapid Prototyping J*, 8 (2), 91-99.
- Glesner, M.; Kirschbaum, A.; Renner, F. M. y Voss, B. (2002). State-of-the-art in rapid prototyping for mechatronic systems. *Mechatronics*, 12, 987-998.
- González, J.A. y Solís, R. (2010). Diagnóstico sobre la planeación y control de proyectos en las PYMES de construcción. *Revista de la Construcción*, 9 (1) 17-25.
- Gramazio, F. y Kohler, M. (2008). Digital Materiality in Architecture. *Lars Müller Publishers. Zürich.*
- Guerrero de Mier, A. y Espinosa, M.M. (2013). Avances en RepRap: Impresión 3D de código abierto. *Dyna*, 88 (5), 286-290.
- Martínez, E.; Álvarez, M.; Arquero, A. y Romero, M. (2010). Apoyo a la selección de emplazamientos óptimos de edificios. Localización de un edificio universitario mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). *Informes de la Construcción*, 62 (519) 35-45.
- Modeen, T. (2005). The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture. *Automation in Construction*, 14, 215-224.
- Ryder, G.; Ion, B.; Green, G.; Harrison, D. y Wood, B. (2002). Rapid design and manufacture tools in architecture. *Automation in Construction*, 11, 279-290.
- Sutherland, I.A. (1963). Sketchpad, a man-machine graphical communication system. *Thesis (Ph. D.) - Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering.*
- Voelcker, H. y Requicha, A. (1978). The PADL-1.0/2 system for defining and displaying solid objects. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 12 (3) 257-263.
- Willmann, J.; Gramazio, F.; Kohler, M. y Langenberg, S. (2013). Digital by Material. Envisioning an extended performative materiality in the digital age of architecture. *en Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, p. 12-27. *Springer-Verlag. Viena.*
- Xu, F.; Wong, Y.S. y Loh, H.T. (2000). Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing. *J Manuf Syst*, 19 (5) 283-96.
- Yongnian, Y.; Li, S.; Zhang, R.; Lin, F.; Wu, R.; Lu, Q.; Xiong, Z. y Wang, X. (2009). Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Science and Technology*, 14 (1) 1-12.