



IMPRESIÓN 3D

COMO MÉTODO CONSTRUCTIVO ALTERNATIVO

LA CASA HENFEL, LE CORBUSIER

AUTOR

Cristian Castro Mingorance

Tutor: Joan Casals

Fecha de entrega: 2 de julio de 2021

cristianarchas23@gmail.com

ETSAB



Escola Tècnica Superior
d'Arquitectura de Barcelona



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Impresión 3D como método constructivo alternativo

La Casa Henfel, le Corbusier

Autor del TFG.

Cristian Castro Mingorance

Tutor: Joan Casals

Fecha de entrega: 2 de julio de 2021

Cristianarchas23@gmail.com

Resumen: Vivimos en un mundo cambiante, en el que la población mundial aumenta a ritmos vertiginosos y es difícil predecir cuál será la sociedad del futuro. A pesar de ello sigue predominando el confort y la calidad de vida, y para solventar este aumento se establecen como predominantes el abaratamiento del coste de la vivienda y la eficacia en los tiempos de ejecución de la obra, puntos en los que la construcción aditiva aporta nuevas e inteligentes alternativas a métodos tradicionales de construcción. Este trabajo engloba las técnicas actuales ofrecidas por este nuevo método constructivo y estudia cómo implementar dichas técnicas a edificaciones tradicionales.

Palabras clave: Arquitectura, Construcción aditiva, impresión 3D.

ÍNDICE

Introducción	4
Objetivo	5
Organización del TFG.....	5
Estado del arte	6
Antecedentes.....	6
Fabricación aditiva.....	9
Construcción aditiva	9
Sistemas de construcción aditiva.....	11
Oportunidades y limitaciones.....	19
Casa Henfel, Le Corbusier	20
Antecedentes.....	20
Planimetría.....	21
Requerimientos arquitectónicos	24
Solución constructiva	26
Análisis previo	26
Fidelidad arquitectónica.....	28
Resistencia	29
Economía.....	32
Tiempo.....	32
Sostenibilidad	33
Caso aplicado	34
Proyecto y obra.....	34
Preparación	34
Impresión	35
Presupuesto	36
Resultado	38
Planimetría.....	38
Detalles constructivos	40
Despiece.....	42
Conclusiones	44
Bibliografía	45
Tabla de figuras	47

Introducción

La impresión 3D supone un nuevo paradigma para la arquitectura. Se trata de un nuevo método constructivo y que nos ofrece infinidad de opciones por explorar, la generación de nuevos espacios y una ejecución mas rápida y autónoma. Esta nueva Tecnología de Fabricación Digital (TFD) permite materializar un modelo desde un archivo CAD 3D con una amplia gama de técnicas, materiales y acabados, que comportan nuevos procedimientos y formas de trabajar para desarrollar una arquitectura más adaptada a los requerimientos del nuevo mundo.

En este tipo de edificaciones la concepción del edificio es radicalmente diferente. Los datos generados informáticamente además de servir como digitalizado de planos pasan a formar parte del proceso de diseño y producción, por lo que el sistema tradicional de construcción deja de formar parte del proceso constructivo.

Objetivo

El objetivo del trabajo es estudiar qué alternativas ofrece la impresión 3D al método tradicional y la definición de las técnicas y metodologías necesarias para concebir un espacio arquitectónico con la construcción aditiva, además de conocer la nueva forma de construcción que ofrece la impresión 3D.

Para ello se investigarán los inicios de la impresión 3D, el estado del arte, casos aplicados de construcciones reales y se realizará un estudio de oportunidades y limitaciones de la técnica.

El trabajo sobre todo se enfocará en explorar la capacidad del método de construcción, ya que cuando se conciben los espacios, el arquitecto utiliza el método de construcción como base de su desarrollo arquitectónico para proyectar y concebir un espacio.

Al tratarse de una nueva forma de construir, aún se desconocen los alcances de este tipo de edificaciones, en fase de exploración, ya que se requiere de una nueva visión para proyectar el edificio en cuestión. Para ello se analizarán las capacidades resolutivas y metodológicas que puede realizar una impresora 3D, y con ello se determinarán las soluciones aplicables a las edificaciones. Este análisis se apoya en casos reales y proyectos en desarrollo que utilizan este método constructivo.

Organización del TFG

1. Para proyectar es necesario un estudio conceptual previo de los métodos empleados para la construcción del espacio, estos conceptos nos ayudan a guiar nuestra forma de proyectar el espacio, por ello primero se analizará la impresión 3D y sus antecedentes para comprender su funcionamiento.
2. Posteriormente se analizan y comparan los sistemas constructivos que permiten la realización de viviendas con el método de impresión 3D y se generará un listado de opciones o alternativas de métodos de impresión donde se explicarán las nuevas oportunidades que otorgan estos métodos y sus limitaciones
3. Se establecerá una metodología basada en los requerimientos del edificio objetivo para el análisis de ejemplos de viviendas construidas con diferentes métodos de impresión 3D, en los que se extraerá información sólida de relevancia para aplicar al caso de estudio.
4. Propuesta de metodología y técnica de impresión para el caso de estudio más adecuado.
5. Se establecerán conclusiones sobre la eficacia y el desarrollo de la impresión 3D en la construcción adictiva.

Estado del arte

Antecedentes

El inicio de la impresión 3D se remonta a 1976 con la invención de la impresora de inyección de tinta, que dio lugar a nuevas tecnologías e invenciones de impresión con otros tipos de materiales.

1984 Fotopolimerización

Chuck Hull creó y patentó en 1984 la estereolitografía (**SLA**) la precursora de la impresión, técnica que utilizó en su primera impresora 3D, la SLA. Chuck Hull diseña un sistema de fabricación por capas sucesivas.

La fabricación aditiva mediante fotopolimerización de líquido en cuba se denomina Estereolitografía (*Stereolithography, SLA*). El proceso implica la exposición de una capa de líquido fotocurable que inicia una reacción química, mediante un láser de barrido o una imagen proyectada de alta resolución, transformándola en un sólido. La fotopolimerización puede producir piezas con detalles y dimensiones que varían desde micras a metros. (Almazán , 2018)



Figura 1. Impresión 3D, SLA. (2021)

1987 Fusión de leche en polvo

Carl Deckard desarrolla el sistema de impresión mediante **SLS** (Selective Laser Sintering), tecnología en la que un láser es utilizado para fundir las partículas del material en polvo para que se unan y formen un objeto. El proceso de fabricación aditiva mediante fusión en lecho de polvo (Powder Bed Fusion, PBF) se basa en la fusión selectiva de una capa de polvo, ya sea polímero o metal, para crear componentes con geometrías altamente complejas. Los procesos PBF comienzan por extender una fina capa de polvo a través del área de construcción. Las secciones transversales derriten una capa a la vez, la mayoría de las veces utilizando un láser, un haz de electrones o lámparas infrarrojas intensas. (Almazán , 2018)

Se conoce como:

- Sinterización Selectiva por Láser (Selective Laser Sintering, SLS) para plásticos.
- Fusión por Láser Selectiva (Selective Laser Melting, SLM) para metales.

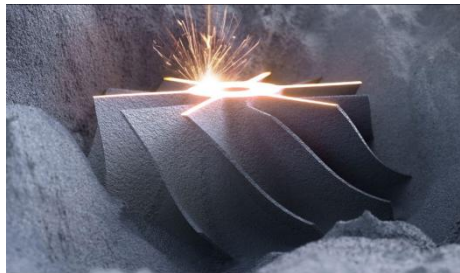


Figura 2. *Impresión 3D, SLS.* (2019)

1988 Extrusión de material

Scott y Lisa Crump crearon la compañía Stratasys, cuando se encontraban en desarrollo del proceso FDM (Fused Deposition Modeling, en español “Modelado por Depósito de Fundente”) Estas impresoras permiten depositar el material fundido capa por capa gracias a un cabezal móvil de extrusión. La FDM acabará convirtiéndose en la tecnología de impresoras 3D convencionales mas comunes en los hogares.

El proceso se basa en un cabezal que se mueve en el plano X-Y y funde un filamento de plástico. El material se va aportando capa a capa y de esta forma se va creando la pieza en 3D. Es la base de las conocidas impresoras 3D y su principal ventaja es el bajo coste del equipamiento junto con la posibilidad de trabajar en diferentes materiales poliméricos. (Almazán , 2018)

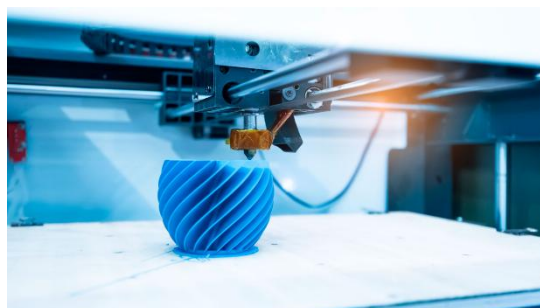


Figura 3. *Impresión 3D. FDM.* (2020)

1990 Construcción impresa en 3D

La impresión de viviendas 3D (3DCP, 3D Construction Printing) se inició a finales de la década de 1990 con los primeros intentos de extrusión de hormigón de un robot controlado por computadora. Desde entonces, se ha producido un gran desarrollo y en 2014 el mundo vio el primer edificio comercial impreso en 3D. (Impresión 3D de Construcción, 2018)

Se desarrolla el diseño paramétrico que abre un nuevo paradigma al poder variar una plantilla en ilimitadas versiones de la misma. Esto permite nuevos enfoques a la arquitectura que reformulara la concepción y realización de los diseños arquitectónicos del pasado.

Actualmente el de interés y la investigación se ha disparado en todo el mundo, con una amplia gama de industria de la construcción tradicional poniendo esfuerzos e inversión en impresión 3D para la construcción. La mayoría de las principales universidades ahora tienen proyectos de investigación en curso, desafiando los límites y ampliando el conocimiento global sobre este campo. En la siguiente gráfica se contempla el crecimiento exponencial que se prevé para este tipo de industria.



Figura 4. Ingreso del mercado de construcción (\$US billones) 2016 - 2027

Fabricación aditiva

La fabricación aditiva se asocia principalmente al mundo industrial y la expresión Impresión 3D está reservada más bien a aplicaciones dirigidas al gran público. De cualquier modo se trata de una tecnología que, a partir de datos de un modelo digitalizado, hace posible la reproducción de piezas en tres dimensiones a través de un mecanismo de impresión por capas de diferentes materiales. (Adam, n.d., p. 8)

Toda esta tecnología de inyección de materiales se aplica en la reproducción y fabricación de maquetas y elementos constructivos, principalmente, donde la variedad de diseños, de procesos de fabricación y de materiales posibles, hace que la mencionada tecnología sea objeto de estudio y análisis en el ámbito de la arquitectura. En este campo la impresión 3D ofrece un amplio abanico de oportunidades aún en fase de exploración, por lo que el ingenio y el arte de proyectar son indispensables para generar espacios novedosos y válidos. El siguiente esquema muestra el principio de funcionamiento de la fabricación aditiva.

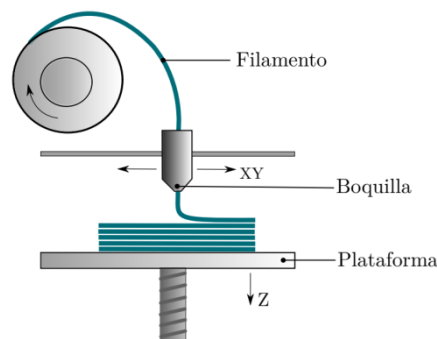


Figura 5. Esquema tecnología FDM. (2018).

Construcción aditiva

El incesante desarrollo y mejora de las tecnologías de impresión de fabricación aditiva, han permitido integrar la impresión 3D al campo de la arquitectura con construcciones habitables. “Construcción aditiva” tiene una definición similar a “fabricación aditiva”. Se describe como "el proceso de unir materiales para crear construcciones a partir de datos de modelos 3D ". Esto significa que los procesos de diseño, producción y / o montaje deben ser controlados digitalmente al menos hasta cierto punto. (Labonnote, Rönquist, Manum, Rütther, 2016/2016, p. 3)

El caso que en este documento se analiza forma parte de la construcción aditiva al tratarse de la fabricación de una vivienda con hormigón como material principal. Como enfoque general podemos decir que los modelos de impresión 3D en la construcción utilizan el mismo concepto, modelar una forma mediante superposición de capas delgadas planas de conglomerado de cemento con un espesor constante que pueden apilarse entre sí. En la actualidad esta tecnología sigue siendo desconocida para

la mayoría, , aunque se propone como una alternativa de mucho potencial para el futuro. Por ello, ya son muchas las empresas que investigan y desarrollan sus propias maquinarias y materiales específicos. El siguiente esquema muestra el principio de funcionamiento de la construcción aditiva.

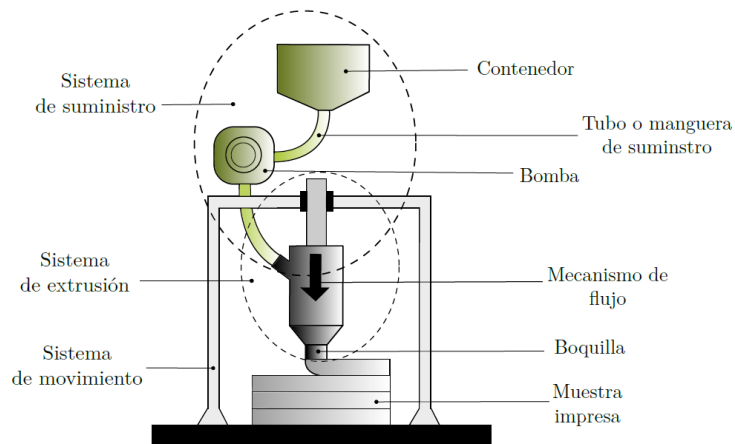


Figura 6. Esquema de una máquina de impresión 3D en hormigón. (2018).

El trabajo propone el estudio de algunas edificaciones realizadas con impresión 3D, elegidas con criterio, siendo estas posibles opciones a utilizar en la implantación del caso de estudio. A continuación se nombrarán características principales y de mayor relevancia de las impresoras utilizadas en sus respectivos proyectos de vivienda y se establecerán criterios categóricos de las edificaciones estudiadas que ayudarán a determinar una elección sólida de la validez de su implantación. Estos criterios son:

- Tipología de edificación
- Resistencia
- Superficie impresa
- Tecnología utilizada
- Tiempo requerido
- Coste estimado



Figura 7. Extrusión de material, 3DCP.

A continuación se presentan los sistemas de construcción aditiva existentes y mas concretamente las tecnologías comercializables mas relevantes hasta la fecha de realización del estudio, dividiéndolos en 4 categorías; Pórtico Grúa, suspensión por cables, brazo robótico y otros casos, todas ellas trabajando por proceso de extrusión de material.

Sistemas de construcción aditiva

Pórtico grúa

Este tipo de soluciones son el escalado más directo de las impresoras de fusión de material convencionales. El cabezal de impresión se desplaza mediante un pórtico en cualquier dirección con tres grados de libertad X, Y, Z (Campillo, 2017). Debido a las dimensiones y peso de la estructura de pórticos, requiere de más esfuerzo para su transporte e instalación.

Impresora: BOD2 de Cobod (COBOD, n.d., p. 12)

Dimensionado modular, es posible adaptar las dimensiones del BOD2 según el proyecto.

Volumen máximo de impresión: 14.62 x 50.52 x 8.14m

Velocidad: hasta 60 metros de material por minuto.

Boquillas intercambiables: la boquilla estándar imprime capas de 2 cm de grosor y 5 cm de ancho. Hay otros tamaños disponibles y fácilmente intercambiables.



Figura 8. Impresora BOD2. (2020)

Caso: KampC, julio de 2020

Edificio impreso de una sola pieza in-situ, con una maquinaria de gran tamaño en su eje Z. Es una casa de bajo consumo de energía, con todas las comodidades modernas, incluido el piso y el techo, fachada especial, paneles solares, bomba de calor, y una azotea verde.

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico: hormigón y fibra de vidrio y refuerzos de malla de alambre
- Volumen de impresión: 9 x 10 x 8 m
- Tecnología utilizada: BOD 2
- Tiempo requerido: 3 semanas
- Producto obtenido: Impresión de muros portantes
- Coste estimado: No disponible



Figura 9. Edificio KampC. (2020)

Impresora: Vulcan 2 (*Technology, n.d.*)

Dimensionado con una maquinaria de gran tamaño, poco ajustable, con movilidad por carriles. Únicamente imprime con Lavacrete, desarrollado por ICON, que mantienen propiedades del hormigón pero capaz de mantener su forma una vez extruido.

Tamaño de la impresora: 2,5 x 10 x 3,5 m

Volumen de impresión: 8,5 x 2,6h x sin limite eje y

Velocidad: aproximadamente 15 cm/s

Boquilla: capas de 2,5 cm de grosor y 5 cm de ancho.



Figura 10. Impresora Vulcan II (2020)

Caso: Casa Chicon, septiembre de 2019

Se trata de una vivienda que desafía a los metodos tradicionales y trabaja para acabar con la falta de vivienda. Se quiere llegar a más familias con las mejores soluciones de refugio posibles, exponencialmente más rápido, creando este modelo de vivienda de forma de forma repetitiva en lugares de escasez economica.

“Con la impresión 3D, no solo tiene una envolvente térmica continua, una alta masa térmica y casi cero desperdicio, sino que también tiene velocidad, una paleta de diseño mucho más amplia, resistencia de nivel superior y la posibilidad de un salto cuántico en la asequibilidad. (Jason Ballard, cofundador de ICON)

- Tipología de edificación: Residencial, vivienda asequible
- Material específico: Lavacrete (patentado)
- Superficie impresa: 100 m²
- Tecnología utilizada: Vulcan II
- Tiempo requerido: 47 horas
- Producto obtenido: Impresión de muros portantes.
- Coste estimado: 4000 €



Figura 11. Casa Chicon (2019)

Impresora: SQ4D (*Features*, n.d.)

Maquinaria de gran tamaño, ajustable, con movilidad por carriles.

Volumen de impresión: 9.1 x 4.4 h x sin límite eje y

Velocidad: Entre 10 y 18 m/min

Instalación: entre 6 - 8 horas

Consolidación: Sistema ARCS imprime en 3D las zapatas, los cimientos y las paredes.



Figura 12. Impresora SQ4D (2019)

Caso: Proyecto 2

ARCS es una tecnología pendiente de patente que construye cimientos, paredes exteriores, paredes interiores, conductos de servicios públicos y más de manera robótica. “Vivienda asequible, construcción más rápida, menos mantenimiento, a prueba de fuego y a prueba de inundacione.(Charles Weinraub)

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico:
- Superficie impresa: 580 m²
- Tecnología utilizada: SQ4D
- Tiempo requerido: 48 horas durante 8 días
- Producto obtenido: Impresión de muros portantes
- Coste estimado: 8000 €



Figura 13. Edificio, Proyecto (2020).

Suspension por cable

Una solución que mejora el transporte del sistema es la “plataforma suspendida por cables”. Este sistema reinterpreta las impresoras de fusión de filamento convencionales de tipo delta. Fundamentalmente se trata de un cabezal unido a un marco mediante cables. Este cabezal es controlado por motores que retraen o extienden los cables de forma automatizada (Campillo, 2017) Sus principales beneficios son el aumento de la superficie de impresión y el abaratamiento de su estructura portante.

Impresora: BIG DELTA de WASP (*Giant 3d Printer*, n.d.)

Dimensionado con perfiles ligeros que actúan como brazos, que restringen la rotación. Apta para imprimir materiales extraídos del lugar de origen.

Volumen máximo de impresión: 12 h x 7 Ø

Velocidad: max 400 mm/s

Instalación: Fácilmente desmontable y transportable.



Figura 14. Impresora Big Delta (2017).

Caso aplicado: EREMO, enero 2017

Modelo de refugio versátil y consistente con un impacto ambiental cercano a cero gracias al uso de materiales locales y de máquinas de prototipado de velocidad o en control numérico.

Eremo puede satisfacer necesidades energéticas a través de aparatos inactivos, capaz de producir energía en lugar de utilizarla. Construido con materiales naturales extraídos de la zona de origen reciclable al final de su vida.

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico: Combinación de materiales reutilizables y reciclables y carbono neutral.
- Superficie impresa: 50m² por cada unidad de impresión.
- Tecnología utilizada: Crane WASP
- Tiempo requerido: 24 h x vivienda
- Producto obtenido: In situ
- Coste estimado: No disponible



Figura 15. Edificio Eremo (2017).

Brazo robótico

Aplicada a la arquitectura este tipo de impresión utiliza brazos robóticos con seis grados de libertad, lo que le permite una impresión más versátil. El sistema de extrusión es el mismo que para el resto de sistemas, pero su alcance se ve limitado por el radio del brazo robótico.

Impresora: Frank (Technology, n.d.-b)

Variante del brazo robótico, se trata de un brazo giratorio. El área de impresión está limitada en función del alcance del brazo de impresión. Esta impresora utiliza hormigón y fibra de vidrio que junto a refuerzos de acero crean una estructura sólida de muros.

Volumen máximo de impresión: 3,1 h x 13 Ø

Velocidad: 10 m/min

Instalación sencilla, 30 minutos.



Figura 16. Impresora Frank (2017)

Caso: Apis Cor House

Para poder realizar construcciones en sitio, Apis Cor ha diseñado un sistema de impresión que es una combinación de los sistemas tipo puente grúa y brazo robótico, que imprime en coordenadas polares. La casa incluye una sala de estar, un baño, una cocina y un pasillo.

Una de las muchas ventajas del proceso de impresión 3D es que es flexible y adaptable. Permite incluir diferentes tipos de instalaciones y herrajes durante el proceso de construcción.

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico: hormigón y fibra de vidrio
- Superficie impresa: 38m²
- Tecnología utilizada: Gantry Solution + brazo robótico
- Tiempo requerido: 24 h
- Producto obtenido: Impresión de muros portantes
- Coste estimado: 223 €/m²



Figura 17. Edificio Apis Cor House (2017)

Impresora: Cybe RC 3DP (Administrator, n.d.)

Variante del brazo robótico, se trata de un brazo móvil montado en un pequeño tractor. Por lo tanto, la máquina se puede mover fácilmente de un sitio de construcción a otro.

Volumen máximo de impresión: 2500×5000×4000 mm

Velocidad: 50 - 600 mm/s

Instalación sencilla.

Material: Mezcla especial adecuada para sus impresoras 3D de hormigón. Sin embargo, es posible utilizar otros materiales.



Figura 18. Impresora Cybe RC 3DP. (2019)

Caso: Meet House, 2019

Esta es la primera villa impresa en 3D diseñada e inspirada por la herencia y la arquitectura de Emirati. La energía solar se utiliza para alimentar la casa como fuente de energía limpia. La construcción se basa en el montaje en obra de las piezas creadas individualmente.

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico: Variable
- Superficie impresa: 100 m²
- Tecnología utilizada: Cybe RC
- Tiempo requerido: 2 semanas
- Producto obtenido: Muros ensamblados en obra
- Coste estimado: No estipulado



Figura 19. Edificio Meet House (2019)

Otros sistemas (Combinación de sistemas, prefabricados o minirobots)

Además de las técnicas mencionadas anteriormente encontramos soluciones que combinan los diferentes sistemas constructivos o los utilizan como maquinaria para generar elementos prefabricados para posteriormente ensamblarlos en obra. Otra solución es la de mini robots que se describe como la construcción de una gran estructura por un ejército de hormigas mecánicas, grano a grano. Dicha solución aún se encuentra en fase de desarrollo y no se ha construido ninguna edificación hasta el momento.

Impresora; Crane Wasp (*Stampanti 3D, n.d.*)

Del sistema de Crane WASP destaca la integración de materiales reciclados o del entorno más cercano a la construcción para aplicarlo al proyecto. Está construida con perfiles ligeros que actúan como pórtico, y en el eje central se sitúa el brazo con la boquilla de impresión. Apta para imprimir materiales extraídos del lugar de origen.

Volumen máximo de impresión: Ø6300mm x h3000 mm

Velocidad máxima de impresión: max 300 mm/s

Instalación: Fácilmente desmontable y transportable.

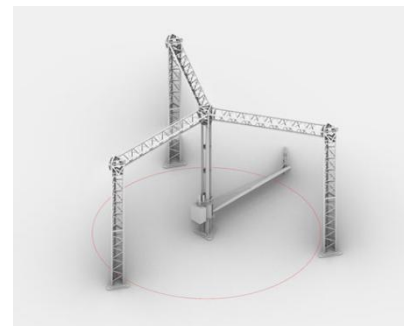


Figura 20. Impresora Crane Wasp. (2018)

Caso: TECLA

Viviendas impresas en 3D utilizando terrenos en Km 0 con miras a la sostenibilidad. (Massimo Moretti, fundador de WASP) Vivienda de modelo circular creado íntegramente con materiales reciclados y adaptable a cualquier clima y contexto.

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico: Reutilizables y reciclables, recolectados del suelo local. (arcilla)
- Superficie impresa: 60m²
- Tecnología utilizada: Crane WASP
- Tiempo requerido: 200 h
- Producto obtenido: Edificio monolítico
- Coste estimado: No disponible



Figura 21. Edificio Tecla. (2018)

Impresora: Métodos prefabricados

Además de poder construir el edificio in-situ, existe la posibilidad de crear el elemento requerido en fabrica para el posterior transporte y ensamblaje en obra. Se debe tener en cuenta el tamaño de las piezas para poder ser transportadas adecuadamente.

Caso: Casas Prefabricadas, Winsun.

10 casas ecológicas de tamaño completo en solo un día. Cada vivienda se creó en unas pocas horas con una construcción reciclada y de desechos industriales.

- Tipología de edificación: Residencial
- Material específico: Combinación de hormigón, fibra de vidrio y materiales reciclados.
- Superficie impresa: 200m²
- Tecnología utilizada: Pórtico grúa
- Tiempo requerido: 8 h
- Producto obtenido: Componentes portantes ensamblados en obra
- Coste estimado: 24 \$/m²



Figura 22. Edificio Prefabricado Winsun (2014)

A continuación se clasifican todas las impresoras mencionadas según la técnica empleada y el volumen de impresión realizable:

Impresora	Técnica	Volumen de impresión
BOD 2, (COBOD)	Pórtico	14.62 x 50.52 x 8.14m
Vulcan 2, (ICON)	Pórtico	8,5 x 2,6 h x sin limite eje y
SQ4D	Pórtico	9.1 x 4.4 h x sin límite eje y
Big Delta (WASP)	Suspensión por cables	12 h x 7 Ø
Apis Cor	Brazo robótico	3,1 h x 13 Ø
Cybe RC 3DP	Brazo robótico	2,5 x 5 x 4 m
Crane Wasp	Pórtico + brazo	3 h x 6,3Ø
P1 (BetAbram)	Pórtico	16 x 8.2 x 2.5
MAXI PRINTER (Constructions 3D)	Brazo robótico	13 x 13 x 3.8
BatiPrint 3D	Brazo robótico	Hasta 7 m de altura
BEM 1Pro (BeMore3D)	Pórtico	9.5 x 3.0 x ilimitado

Tabla 1. Impresoras en el mercado y características principales

Oportunidades y limitaciones

Se debe destacar que estas tecnologías de impresión 3D no resuelven, por el momento, la cubierta de las edificaciones en todos los casos, ya que no es posible imprimir en ángulo horizontal o excesivamente inclinado según las propiedades de los materiales. Como se ha visto en los ejemplos anteriores en la mayoría de casos se opta por resolver la cubierta con sistemas tradicionales o prefabricados. Como proyecto en fase de desarrollo a destacar, Apis Cor proponen la realización de la cubierta horizontal directamente in situ con modernos modelos de impresión, que pueden ser la alternativa definitiva para el futuro de estas edificaciones. (*Technology*, n.d.-b) Con una lista de ventajas e inconvenientes podemos entender porque las impresoras 3D tienen una importante industria alrededor de ellas y la demanda no para de crecer, se proponen como la próxima revolución industrial y sus aplicaciones no paran de aumentar. (*Ventajas y Desventajas de La Impresión 3D*, 2015)

Oportunidades

- **Versatilidad.** Una única impresora puede crear distintos modelos sin tener que hacer cambio de maquinaria.
- La **complejidad** de la fabricación es indiferente. En un proceso mediante impresión 3D, objetos simples o complejos requieren el mismo esfuerzo
- **Inmediatez.** Una concepto arquitectónico puede materializarse en tan solo unas horas.
- **Flexibilidad.** Creación de prototipos y comprobar si funcionan.
- **Reducción de costes.**
- **Personalización.** Creación de nuevos productos y modificación de existentes.
- **Nuevo mercado.** Las aplicaciones y usos de la impresión 3D ha abierto un nuevo mercado laboral.
- **Margen de mejora.** Se trata de una tecnología en proceso de mejora, en unos años se perfeccionará y sus ventajas serán mayores.

Limitaciones

- **Menor creación de puestos de trabajo.** Mano de obra sustituida por impresoras.
- **Limitación de materiales.** Cada impresora 3D puede utilizar un único material, por lo que se requieren diferentes impresoras para diferentes materiales.
- **Derechos de autor.** (copyright) El control de productos falsos es casi imposible de prevenir o determinar.
- **Tamaño.** Limitaciones según maquinarias utilizadas.
- **Contaminación.** Se debe tener precaución con materiales como el plástico que deben ser reemplazados por materiales más respetuosos con el medio ambiente.

Casa Henfel, Le Corbusier

Al tratarse de una edificación de construcción tradicional, en primer lugar se analizarán sus antecedentes y su sistema constructivo, así como sus puntos conflictivos, para establecer requerimientos en los que apoyar la posterior elección del modelo empleado para la impresión 3D del edificio.

Antecedentes

Situada en los alrededores de París, la Casa Henfel, fue construida en 1934 y proyectada por Le Corbusier y Pierre Jeanneret. Los arcos de 2,6 metros de altura con bóvedas tabicadas, cubiertas exteriormente de césped, que se empotran en un alto muro de contención de manera que forman como una cueva refugio apropiada para los días soleados. La casa muestra un interior lleno de luz y abierto al jardín. Desde el interior, y también por fuera, la casa tiene una íntima relación con un paisaje intensamente privado. (Marezi, 2016, p. 1) Para caso de estudio del trabajo se recogen las características de la vivienda que serán tenidas en cuenta a la hora de aplicar las técnicas de impresión 3D, como son:

- **Diseño:** Menor visibilidad de la vivienda. Altura de 2,60 m y situada en la esquina de la parcela,
- **Materiales:** Construcción de muro de mampostería visto, combina piedra caliza tosca de la zona con bloques de vidrio.
- **Cubierta:** cubierta vegetal sobre bóvedas tabicadas de carga, a la que se puede subir desde el jardín por un lateral a través de una empinada rampa que se construye con el movimiento de las tierras, la casa queda excavada bajo una pequeña loma próxima.
- **Interior:** paredes se revisten de madera contrachapada, las bóvedas son de hormigón visto, el suelo de baldosas de cerámica blanca y la chimenea-armario de ladrillo visto, dividiendo en dos partes el espacio principal y construyendo un apoyo necesario para sostener la cubierta. En este caso, la diversidad de materiales y sistemas constructivos no es una renuncia a los principios de la modernidad.



Figura 23. Casa Henfel (1934)

Planimetría

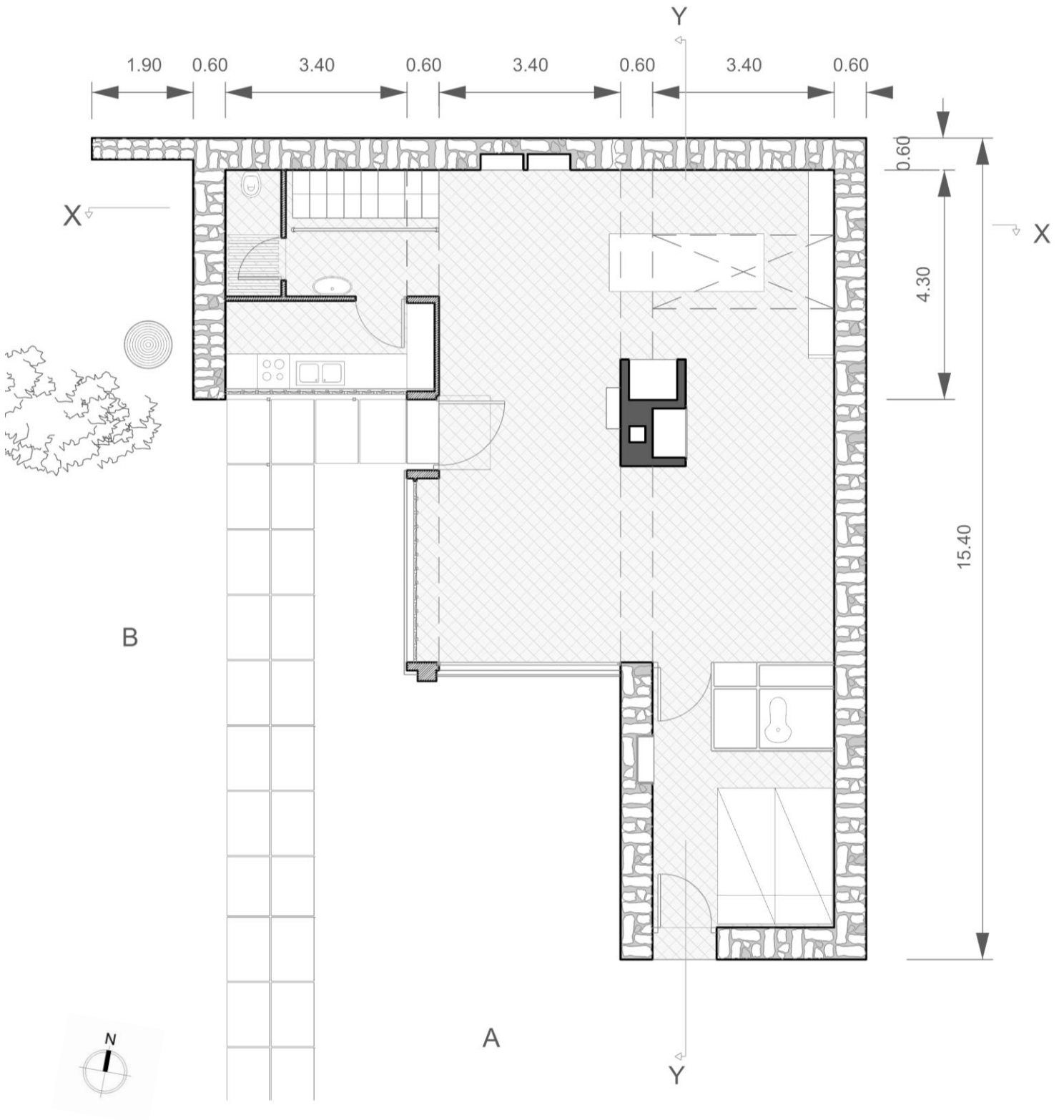


Figura 24. Planta baja, estado actual. E 1/100

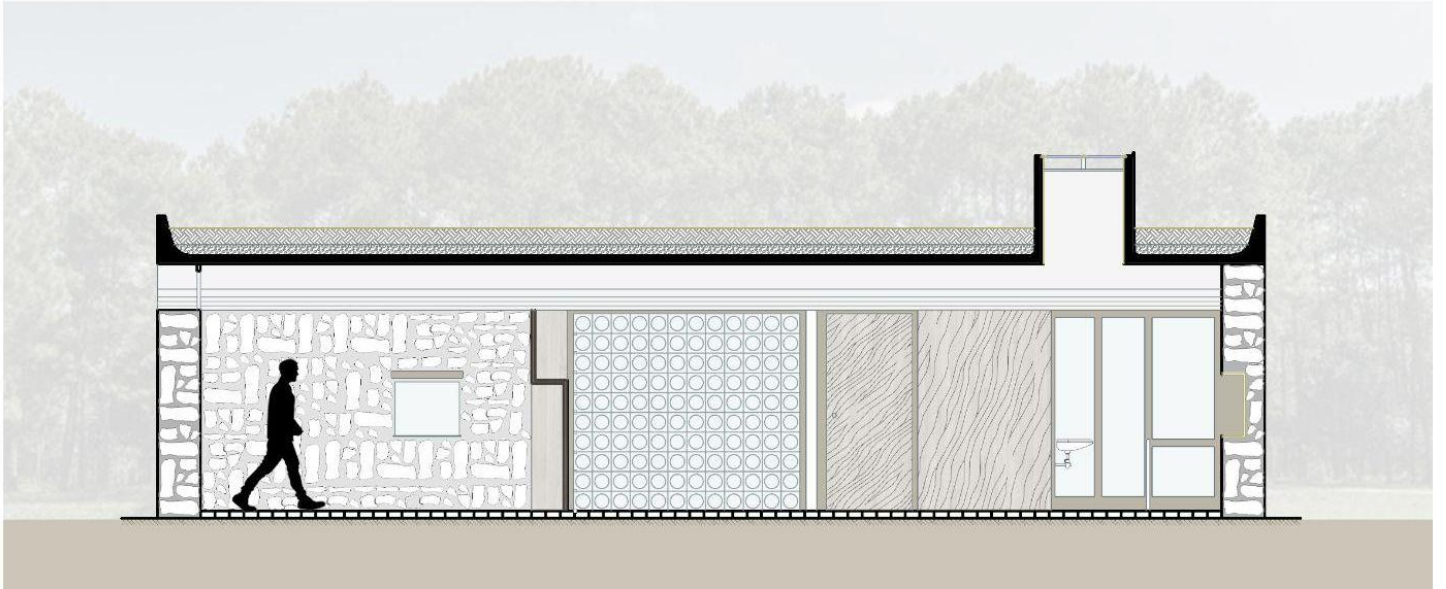


Figura 25. Sección Y, estado actual E 1/100

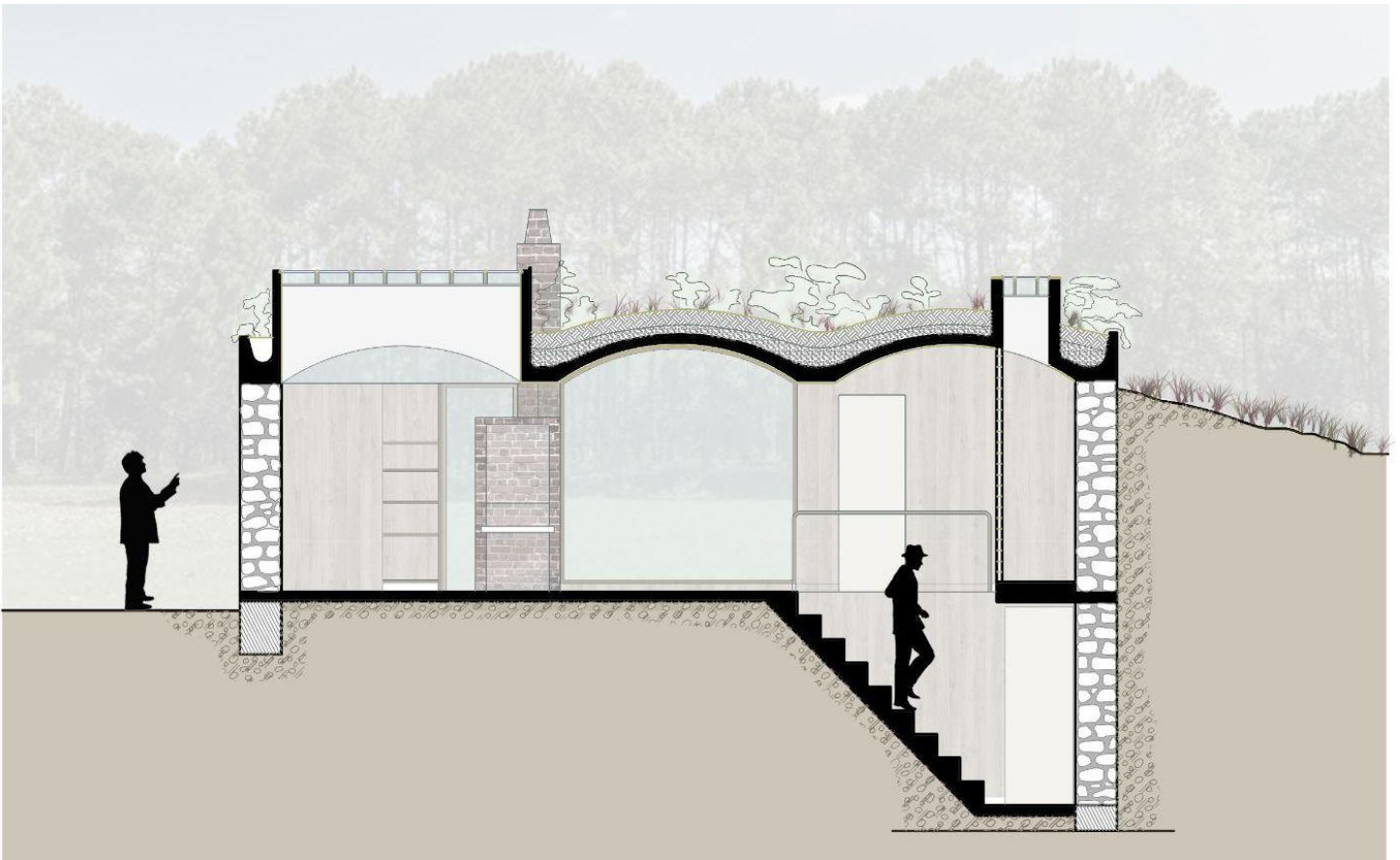


Figura 26. Sección X, estado actual E 1/100

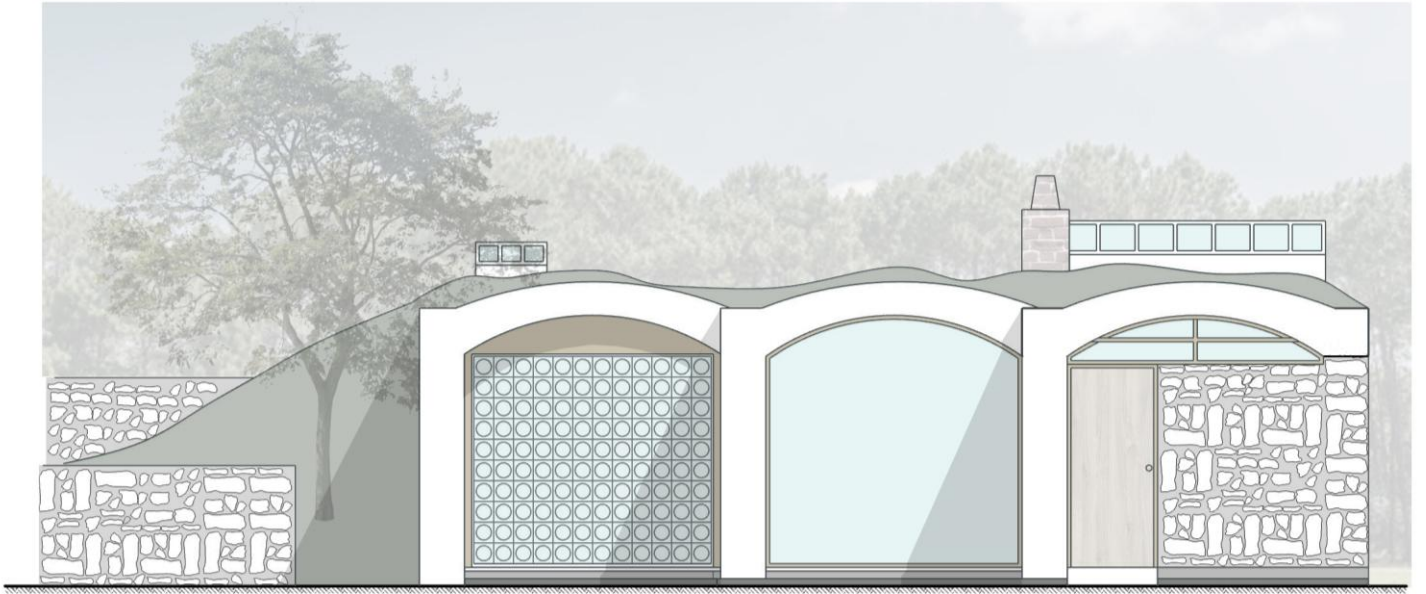


Figura 27. Alzado A, estado actual. E 1/100

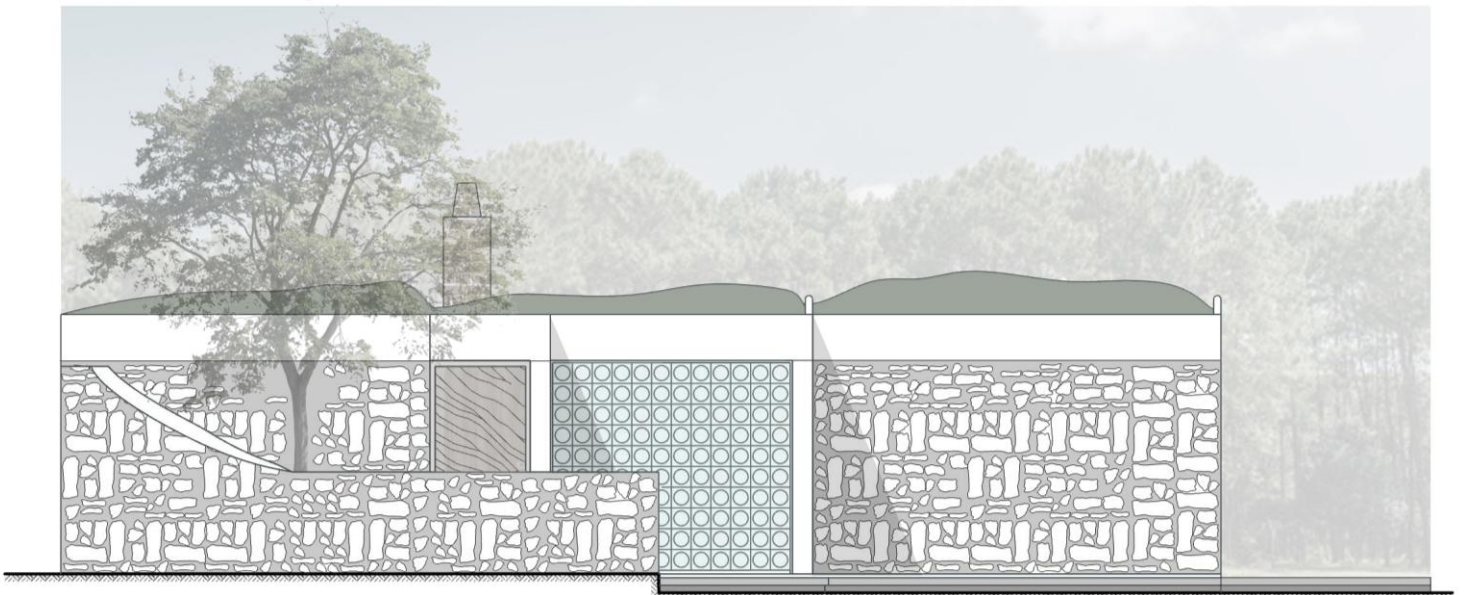


Figura 28. Alzado B, estado actual. E 1/100

Requerimientos arquitectónicos

Con el propósito de definir una construcción alternativa de la vivienda mediante un modelo de impresión 3D, es necesario la determinación de unos requerimientos específicos referentes al proyecto original que deben respetarse y utilizarse como guía. Para ello son necesarios requerimientos específicos del proyecto original para implantar el diseño arquitectónico con las técnicas de impresión 3D. La construcción aditiva no contempla el uso de varios materiales para una misma edificación, debido a que las máquinas están optimizadas para una mezcla concreta, por lo que cuestiones como la materialidad de la edificación o acabados no deben ser el objetivo principal del trabajo. Se trata de buscar un método constructivo alternativo al método tradicional, y establecer limitaciones y beneficios de recrear dicha vivienda. Para lograr un acabado como en el edificio original se deben aplicar técnicas tradicionales para revestir los muros.

Las características planteadas en los antecedentes permiten definir unos requerimientos a la hora de imprimir en 3D.

- **Diseño:** El proyecto fue pensado para esconder la vivienda entre la masa de árboles y hacerla lo menos visible posible, por ello está situada en la esquina de la parcela con una altura mínima. La pared Este se encuentra enterrada para generar un acceso natural a la cubierta. La imposibilidad de aplicar estos sistemas de construcción a este caso concreto debido a el área adicional de las máquinas, hace necesario un trabajo posterior de movimiento de tierras. Se requiere un área de impresión de 13 x 15,50 m y una altura mínima de 3,5 m para implantar una un método de impresión in-situ. Para la aplicación de un sistema de impresión mediante pórtico grúa o suspensión por cables se requiere de un área adicional donde situar el método de impresión. Por lo que respecta a la técnica del brazo robótico se debe alcanzar una distancia mínima de 10 metros desde el centro de su eje. También es posible aplicar técnicas de prefabricación, aunque comportan mayor transporte y mano de obra.

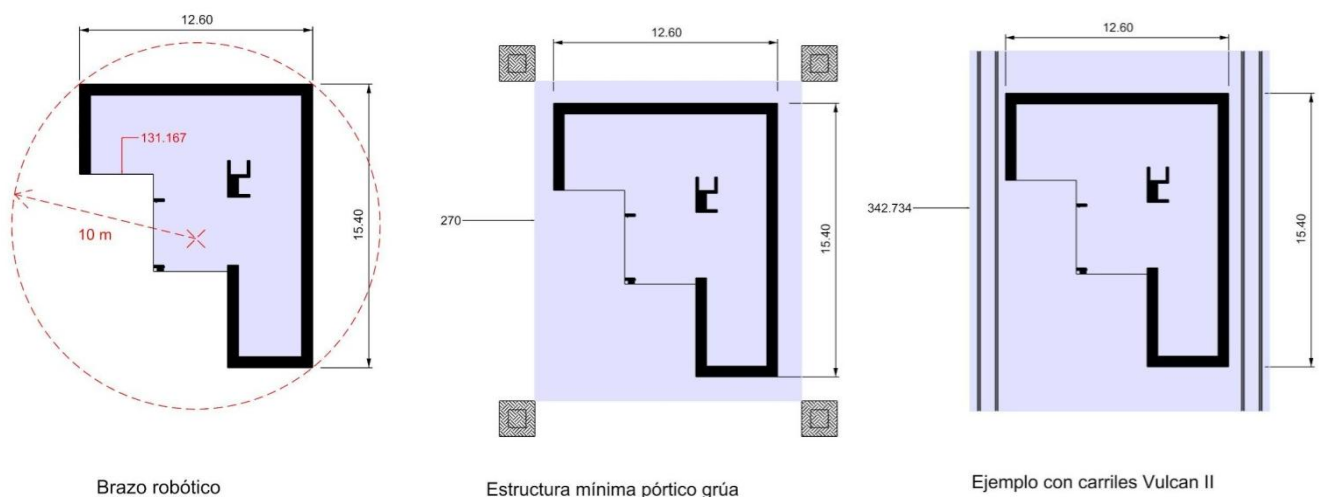


Figura 29. Área requerida sistemas de construcción aditiva

- Para la **materialidad** del edificio, el sistema tradicional utiliza el muro de mampostería, que sirve como estructura además de elemento visto. Este se combina con los bloques de vidrio que aportan luminosidad al interior de la vivienda. Para el acabado de las viviendas realizadas con impresión 3D, pueden aplicarse los mismos revestimientos que en el sistema tradicional, como enrasado, pintado o enyesar. Por lo tanto se puede recubrir con piedra y recrear el modelo original. Aunque parece interesante dejar el material de construcción a la vista como es en el caso del sistema tradicional con el muro de mampostería.



Figura 30. Hormigón visto construcción aditiva.

- **La cubierta** que se genera en el proyecto original es a base de bóvedas tabicadas de carga, que se recubre con tierra y genera una cubierta ajardinada.
 “Entiendo por bóveda catalana la tabicada, esto es, formada por ladrillos puestos de tabla, unos a continuación de otros en toda su vuelta, cintra o curvatura, de modo que viene a ser toda ella como un tabique” (Truñó, 2004)

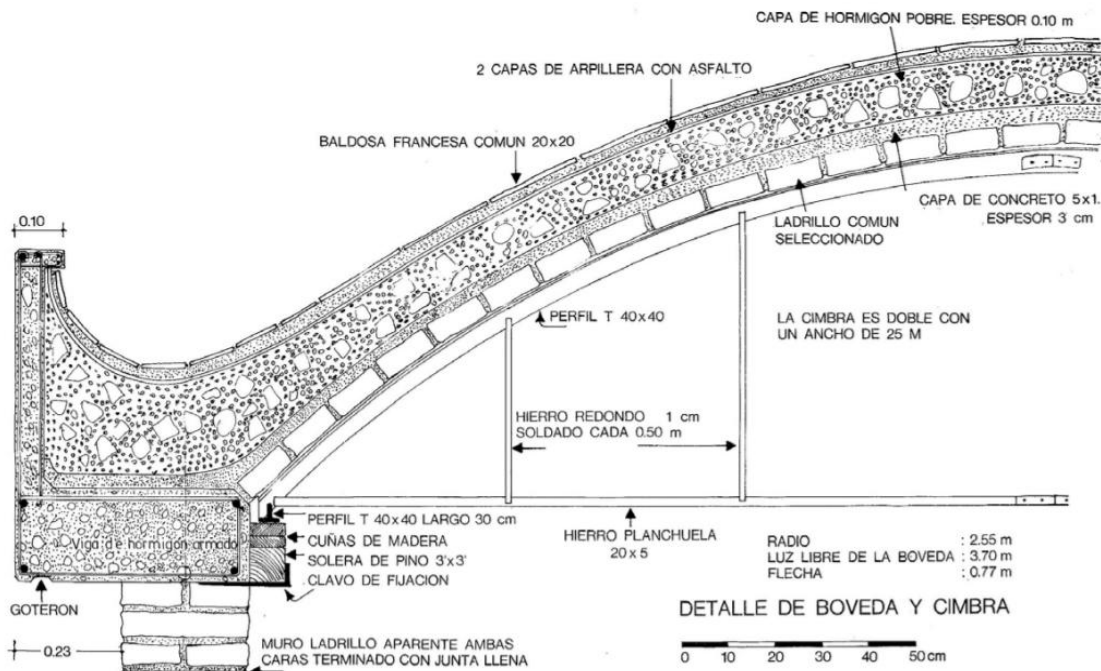


Figura 31. Sección constructiva bóveda tabicada.

Solución constructiva

Análisis previo

Se definen en base a la información recogida, los sistemas de impresión más adecuados, detallando factores clave para el desarrollo del proyecto, que reúnen los requisitos para implementarlas en el desarrollo del proyecto. Los factores que a continuación se enumeran están ordenados siguiendo un orden lógico de descarte. Siendo el primer factor el más limitante constructivamente.

- La capacidad de impresión en términos de m^2 .
- El posicionamiento de la impresora en el lugar de construcción
- Producto obtenido
- La viabilidad del material, priorizando la sostenibilidad del mismo.

En primer lugar, el **área requerida de impresión** es 195 m^2 , (12,7 x 15,40 m).

Impresora	Técnica	Volumen de impresión (m)
BOD 2, (COBOD)	Pórtico	8.14 h x 14.62 x 50.52
Vulcan 2, (ICON)	Pórtico	2,6 h x 8,5 x sin limite eje y
SQ4D	Pórtico	4.4 h x 9.1 x sin límite eje y
Big Delta (WASP)	Suspensión por cables	12 h x 7 Ø
Apis Cor	Brazo robótico	3,1 h x 13 Ø
Cybe RC 3DP	Brazo robótico (móvil)	2,5 h x 5 x 4
Crane Wasp	Pórtico + brazo	3 h x 6,3Ø

Tabla 2. Descarte impresoras no aptas

En segundo lugar, el **posicionamiento de la máquina de impresión** en el área de construcción.

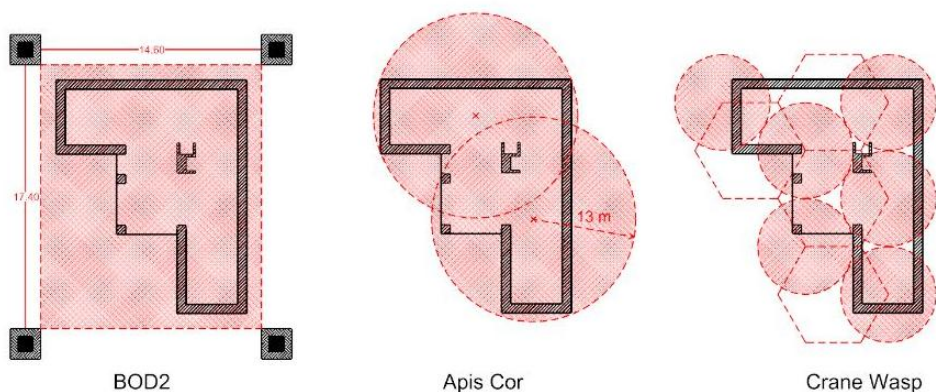


Figura 32. Posicionamiento sistemas de construcción aditiva (fuente propia).

- El sistema de BOD2 cumple con los requisitos de posicionamiento generando una estructura que envuelve el área de impresión.
- El sistema de Apis Cor se puede considerar una opción válida para la impresión del caso de estudio, aunque se requieren de dos máquinas trabajando al unísono.
- El sistema de Crane WASP está destinado más concretamente a edificios circulares que aprovechan al máximo el área de impresión, por ello no es adecuada para el caso de estudio.

Por lo que se refiere al **producto obtenido**, de los dos sistemas restantes, Apis Cor requiere de dos máquinas para la realización del edificio, por ello se crean uniones que no son adecuadas para generar un edificio monolítico. En este punto nos encontramos en que de las tecnologías estudiadas la **BOD2 de Cobod** cumple con los requerimientos del caso de estudio, por ello se decide utilizar este sistema para la construcción del edificio in-situ.

En tercer lugar, respecto a la **viabilidad y sostenibilidad del material** utilizado, Le Corbusier en su proyecto plantea aplicar piedra caliza de la zona para la solución de sus muros de mampostería. Este material no es aplicable para la impresión 3D, aunque como se comenta anteriormente, si fuese solicitado sería posible revestir el edificio con la misma piedra. Este punto no genera discrepancias con la solución propuesta. Una vez se ha seleccionado la alternativa constructiva, vale la pena repasar sus características técnicas y las opciones de fabricación disponibles.

Características técnicas BOD2:

- Longitud máxima de impresión: Sin límite
- Ancho máximo de impresión: 14.6 m
- Altura máxima de impresión: 8.1 m
- Altura de la capa: Hasta 40 mm
- Ancho de la capa: Hasta 300 mm
- Fuente de alimentación: 32 A, 400 V, trifásico
- Sistema de movimiento: Servo
- Operadores: 2
- Tamaño agregado máximo: < 10 mm
- Velocidad máxima de impresión: Hasta 1000 mm / s (1 metro / s)
- Tiempo de configuración de la impresora: 4 - 6 horas
- Hora de desactivación de la impresora: 3 -4 horas
- Flujo de materiales: < 3,6 m³/hour
- Conexión: Wifi or LAN
- Software de la cortadora: COBOD Slice (Windows, MacOS), Third party slicers



Mediante la combinación de técnicas constructivas pueden lograrse resultados que optimizan o resuelven algunos problemas en el desarrollo del proyecto, como en el caso de la solución de la cubierta, que en el caso de estudio es compleja, debido a su forma abovedada y la integración de lucernarios en dos puntos de la vivienda. Por ello se opta por utilizar métodos prefabricados para solucionarla. ¿Por qué generar parte del edificio in-situ y la cubierta prefabricada?

El hecho de imprimir el edificio de una única pieza y únicamente con hormigón, plantea serios problemas estructurales. Puesto que el hormigón actúa bien únicamente a compresión y no a tracción o a flexión, la realización de elementos horizontales como forjados, es casi imposible: una losa impresa de hormigón en masa no puede ser sometida a esfuerzos de flexión, a no ser que aumentemos de manera exagerada los cantos, impidiendo la optimización de los materiales. Esto nos lleva a tener que incorporar algún tipo de refuerzo de forma manual, o a la realización de los elementos horizontales de cubiertas y forjados, de manera tradicional. (Campillo, 2017, p. 34)

Fidelidad arquitectónica

Con la impresión 3D es posible manejar una variación mucho mayor en geometrías, dando a los arquitectos una mayor paleta de geometrías para utilizar en sus proyectos, aunque por el momento existen muchas limitaciones en cuanto a posibilidades de aplicación. En el caso que nos ocupa este trabajo;

- La resolución de la **cubierta** se opta por tratarla con el método prefabricado para el posterior ensamblaje en obra. La distancia entre ejes de los muros en los que se establece la dirección de las bóvedas de la cubierta es de 4 metros, y teniendo en cuenta que para el transporte de elementos prefabricados la anchura máxima es de unos 2,65 m aproximadamente, se requieren de unas jácenas en las que apoyar el forjado de bóvedas prefabricadas. La complejidad que requiere la reinterpretación de la cubierta con el sistema de impresión 3D es demasiado alta, debido a que se requieren armados en las jácenas y paneles para crear el forjado de bóvedas tabicadas, por ello se opta por instalar un sistema de forjado prefabricado adecuado, con un sistema tradicional.
- La **geometría** de la edificación en planta es simple, de muros lineales, separados en algunos puntos por pilares entre los que se instalan bloques de vidrio como apertura lumínica. La propuesta para la impresión de los muros perimetrales de la edificación, genera la misma forma que el edificio original aunque los pilares adquieren una dimensión mínima de 60 x 60 cm, para garantizar su estabilidad durante la impresión.
- No es posible la realización de la planta sótano, debido a que el sistema de construcción in-situ no lo permite.

Resistencia

Material

Los métodos de impresión 3D de edificaciones más desarrolladas que usan los distintos tipos de impresoras de construcción aditiva, son los métodos de extrusión. La pasta que se usa como “tinta” está formada por cementos y otros componentes aglutinados que pueden ser naturales o reciclados. La mezcla de concreto debe ser diseñada para satisfacer ciertos **criterios de desempeño** que están directamente relacionados con el proceso constructivo de impresión 3D con concreto y la impresora asociada. Estos criterios son:

- **Capacidad de ser bombeado:** el material debe tener la fluidez necesaria para moverse por el sistema desde el ingreso de la mezcla hasta el cabezal de impresión
- **Capacidad de ser impreso:** el material debe tener, al llegar a la boquilla, la fluidez necesaria y el tamaño máximo de partículas indicado para poder ser extruido por la boquilla de impresión
- **Constructibilidad:** el material de impresión debe tener la velocidad de fragua adecuada para ser capaz de soportar el peso de la siguiente capa y, a la vez, debe asegurar la adherencia con la misma
- **Tiempo de trabajo:** el material a extruir debe mantener las propiedades antes descritas por el tiempo necesario para que la máquina termine de extruirlo
- **Resistencia a compresión:** además de todos los criterios de desempeño mencionados, el material a emplear debe generar la resistencia a la compresión necesaria según el diseño estructural. (Campillo, 2017)

La mezcla utilizada dependerá de los elementos utilizados para su obtención. En este caso se propone una mezcla utilizada en BOD building, de cemento, arena, grava, tejas recicladas, agua, glemium (superplastificante) y fibras antifisuras.

Muros de carga

Aplicada a la construcción, la fabricación aditiva brinda principalmente la posibilidad de construir estructuras de hormigón sin la utilización de encofrados lo que representa una gran ventaja respecto a tiempos, libertad arquitectónica y reducción de costos. Los muros / estructuras de carga se pueden imprimir en 3D, siempre que el material específico utilizado para la impresión sea aprobado localmente. En los casos en que el material aún no está aprobado localmente, un método de uso frecuente es imprimir columnas huecas dentro de las paredes impresas, que luego se moldean con concreto regular, aprobado, con refuerzo para cumplir con la normativa. (COBOD, 2021, p. 6)

Estructura

Pueden generarse diferentes soluciones para resolver cuestiones como la resistencia o transmitancia de los muros, ya que en el interior de los muros impresos se pueden establecer soluciones que mejoren las cualidades del proyecto.

En el caso del objeto de estudio se opta por seguir los pasos que se emplean en proyectos de COBOD, concretamente la vivienda BOD building, la cual crea columnas huecas en el interior de los muros las cuales se rellenan con armado y hormigón, se colocan armaduras de refuerzo para garantizar la unión entre las paredes y el interior del muro se rellena con aislamiento. Las propiedades claves del hormigón de impresión en estado endurecido son la resistencia a la compresión y a la flexión, las cuales se miden a través de sus ensayos tradicionales. En el caso de estudio nos centraremos en estudiar las propiedades a compresión para generar datos comparativos de la resistencia obtenida con el método tradicional y el impreso en 3D.

Las propiedades de la piedra caliza, de la edificación tradicional, a resistencia a compresión es de 58,9 Mpa (efernandez, n.d., p. 1), muy alta si la comparamos por ejemplo con ladrillos cerámicos (23,93 MPa) La resistencia a compresión de la receta utilizada en las intervenciones de COBOD está probada a 52 MPa.

Se procede a realizar los cálculos para determinar la presión ejercida en los muros. Para ello se elige un tramo del edificio y se calcula la fuerza que se ejerce sobre el. Se calcula mediante la fórmula:

$$P \text{ (Pa)} = F \text{ (N)} / A \text{ (m}^2\text{)}$$

Donde:

F= fuerza generada por el peso de la cubierta

A= área de los apoyo del muro: 0,2 m²

$$F = V \cdot \rho$$

V = Volumen soportado por apoyo: 8.39 m² · 0,3 m = 2,5 m³

ρ = densidad del hormigón: 2400 kg/m³

$$F = 6000 \text{ kg} = 58840 \text{ N}$$

$$P = 58840 / 0,2 = 294000 \text{ Pa} = 0,29 \text{ MPa}$$

La presión ejercida por la cubierta es válida, debido a que los muros son capaces de soportar resistencias a compresión mucho mayores en ambos casos.

Cimentación

Para el apoyo de las edificaciones se pueden establecer metodologías de cimentación tradicionales, aunque el método más aceptado por su sencillez de ejecución es construir una solera de hormigón armado sobre la que descansa el edificio. El área que se construye está definida por la superficie del caso de estudio, 139 m² y se hace de forma previa a la instalación de la máquina de impresión.

Reforzamiento

También es posible imprimir con fibras, para mejorar las capacidades estáticas de las paredes impresas. Las fibras pueden ser de vidrio, acero o cualquier otra fibra mineral disponible, siempre que tenga la granulometría adecuada para pasar a través del sistema de bombeo y extrusión sin obstrucciones. Del mismo modo, la impresión 3D se puede combinar fácilmente con métodos de refuerzo convencionales.

Economía

La impresión 3D permite la colocación selectiva del material exactamente donde es necesario, para optimizar las estructuras, minimizar el desperdicio y el impacto sobre el medio ambiente y el clima.

La construcción puede ser supervisada por tan solo dos operadores, uno para gestionar los datos informáticos y otro para asegurar el suministro de materiales y tareas más pequeñas. Además la mezcla del material de extrusión puede adquirir materiales reciclables, siempre y cuando el material agregado pueda deslizarse correctamente por la manguera de suministro.

Debido a utilizar un único material para la obra, se reduce el transporte de materiales, aunque se requiere de especialistas para el montaje de la máquina de impresión.

Tiempo

La instalación de la máquina de impresión 3D es rápida, se utilizan pies de instalación de hormigón. Las columnas del eje Z están atornilladas al suelo o montadas sobre cuatro pies de instalación de hormigón, que se colocan en la cimentación o suelo.

El transporte se realiza con solo 2-3 personas, la impresora se puede desmontar y trasladar con un camión. La instalación en un nuevo sitio puede realizarse entre 4 y 6 horas, mientras que el desmontaje es de 2 a 3 horas. (COBOD, 2021., p. 8)

La impresora BOD 2 está diseñada para poder mover el cabezal de impresión con una velocidad máxima de 1000 mm / segundo - 1 m / s. Se suministra automáticamente gracias a un sistema de mezcla controlado informáticamente, por el cual se genera la mezcla requerida en la tolva.

Si se utiliza una boquilla de 10 cm de ancho y 4 cm de altura de capa, a una velocidad de 0,4 m / s, la impresora estará extruyendo hasta 2,8 m³ de mortero / hormigón por hora equivalente a 6 toneladas. 6 toneladas también corresponde a la impresión de 28 m² de una sección de doble pared (pared interior y exterior) por hora. Una casa de 100 m² tiene aproximadamente 200 m² de secciones de pared, que la impresora a esa velocidad puede hacer en 8-10 horas de tiempo de impresión, para cuya preparación y se debe agregar tiempo de limpieza. El caso de estudio tiene 139 m² de superficie, y utilizando la misma técnica se aproxima el tiempo de impresión entre 14-15 horas.

Sostenibilidad

A pesar de que actualmente se trabaja con hormigón en prácticamente la totalidad de las impresiones 3D, se están explorando constantemente nuevas fórmulas con materiales reciclados y reutilizados que pueden mejorar la sostenibilidad de la edificación.

Los beneficios energéticos que se obtienen en los muros dependen del diseño de los mismos y la integración de aislantes en su interior. En este caso se genera la misma geometría que en el caso de estudio, por lo que los muros adoptan la misma forma que el edificio original, y se opta por aislar con lana de roca en su interior debido a su fácil colocación y propiedades.

Para determinar la eficiencia de los muros se procede a realizar un cálculo de la transmitancia térmica de un muro, con la fórmula:

$$U = 1 / R_t$$

R_t = resistencia total del elemento constructivo

$$R_t = \lambda / e$$

e = espesor de la capa en metros

λ = conductividad térmica del material que compone la capa, declarados en la norma UNE-EN 10456:2012. El catálogo de elementos constructivos se puede consultar en: <http://cte-web.iccl.es>

El material extruido se compone de una mezcla formada por cemento, arena, grava, tejas recicladas, agua, glicol (superplastificante) y fibras antifisuras. Se considera $\lambda = 1$ (w/mk)

Para el aislamiento obtenemos $\lambda = 0,05$ (w/mk). Por tanto:

Material	λ (w/mk)	e (cm)	R (m ² K/W)
Capa hormigón x2	1	10	0,2
Aislante	0,05	0,4	0,08
TRANSMITANCIA	TÉRMICA MURO	M1 (U en W/m ² K)	0,28

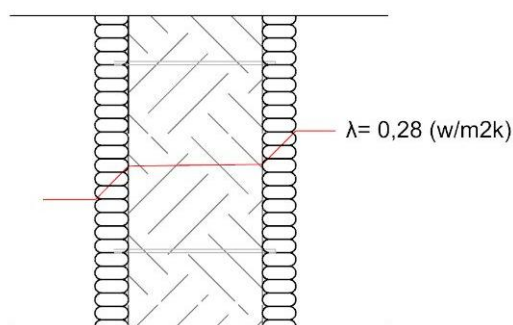


Figura 33. Sección transmitancia térmica muro (fuente propia).

Caso aplicado

Tras el estudio previo realizado, se llega a la conclusión que para construir la vivienda es necesario crear la cubierta con métodos prefabricados. En los siguientes puntos se desglosa el resultado de la aplicación del sistema en el proyecto.

Proyecto y obra

Para comenzar un proyecto se deben seguir los código de construcción local, la impresora 3D y otros equipos no requieren la obtención de un permiso de construcción. Es el edificio planeado cuando se usa la impresora o cualquier otro equipo, que requiere un permiso. La impresora es solo una herramienta que ayuda a construir un edificio y, al igual que otras herramientas, no requiere permiso de construcción. (COBOD, 2021., p. 5)

Preparación

1. Todo empieza por crear u obtener un diseño virtual del objeto que quiere crearse. Este diseño virtual puede hacerse en un archivo CAD (diseño asistido por ordenador) usando un programa de modelado 3D o usando un escáner 3D, para hacer una copia 3D digital de un objeto. Se exporta el archivo en formato STL donde contiene la información geométrica necesaria para representar el modelo digital.
2. Conversión del modelo STL en una lista de comandos que la impresora puede entender y ejecutar, se convierte en un objeto en muchas y pequeñas rebanadas, y luego las construye de abajo hacia arriba, rebanada a rebanada. Las capas se acumulan entonces para formar el objeto sólido. Se convierte a formato Gcode con el proceso de creación listo para imprimir.
3. En cuanto se tiene el modelo final deseado es cuando se comienza con las actuaciones previas del solar donde ubicar el proyecto. Se procederá a realizar un desbroce y nivelación del terreno. Posteriormente se prepara una losa de hormigón armado que sirve de cota cero y cimentación.
4. Una vez se dispone de la losa lista, se procede a colocar la máquina, ensamblando está en el mismo lugar donde se va a construir la edificación, siendo esta siempre de dimensión mayor al volumen a imprimir
5. A continuación, se realiza el acopio de materiales.

6. Cuando se termina de ensamblar la impresora 3D, se procede a estudiar y preparar la dosificación adecuada para cada ambiente, según condiciones y exigencias concretas que requiera el volumen que se pretende imprimir. Para el suministro del material se emplea una bomba de hormigón que impulsa el material desde la hormigonera hasta la tolva.

Impresión

7. En cuanto se han hecho todos los pasos previos y se han realizado las comprobaciones necesarias, se procede a comenzar la extrusión del material.
8. El proceso de deposición continua capa tras capa, respetando los huecos de fachada, y pausando cuando se precise el dispositivo para poder colocar los dinteles y armaduras que se precisen.
9. Para los dinteles de los huecos en particiones y fachadas, se colocarán maderas y armadura como plano de apoyo de las capas de dintel, en las puertas se colocarán los premarcos de madera directamente, sobre estos se arma con acero para poder soportar las tensiones de los dinteles.
10. Cuando se finaliza la impresión de los muros del edificio, se coloca la cubierta previamente fabricada.
11. Es necesario el post tratamiento del edificio para hacer todas las instalaciones convencionales, como agua, luz, etc.

Presupuesto

Maquinaria

El coste actual de la maquinaria es de 300.000 €. El coste por la utilización de la misma viene determinado por el transporte al lugar de la construcción, montaje / desmontaje y tiempo de uso. La maquinaria es solo una herramienta de trabajo y como tal la empresa asume los costes de dicha maquinaria para su utilización y beneficio. Aunque por el momento con esta impresora, algunas empresas ya alquilan sus maquinarias.

La disponibilidad de la maquinaria viene determinada por las limitaciones climáticas, ya que al tratarse de una maquinaria de gran tamaño no es aconsejable el cubrimiento de la misma ya que esto genera unos costes adicionales muy elevados.

El proceso de montaje de la maquinaria requiere de al menos 2 especialistas que monten la maquinaria adecuadamente siguiendo en este caso el manual de montaje de la BOD2. (Soeren, 2021, p.8)

Transporte

Se debe considerar el transporte de maquinaria de impresión, y el material específico de impresión, con un transporte especial para su conservación. Además el transporte de la cubierta prefabricada genera un coste añadido en el transporte.

Se requiere de un camión grande, de 7 x 2,45 x 2,55 m para el transporte de los elementos que componen la maquinaria de impresión y los elementos prefabricados de cubierta, con un coste de 31,50 € / hora. Siendo variable el coste del transporte por la distancia de las ubicaciones, se considera un tiempo estimado de 20 horas, que genera un coste de 630 €.

Tiempo

En primer lugar se requiere maquinaria para mover tierras y crear la losa de hormigón. Para ello se considerarán un margen de 3 días lectivos. El tiempo de impresión que se ha establecido anteriormente para la construcción del edificio es de 15 horas. Si además se tiene en cuenta el tiempo de montaje y configuración de la impresora, entre 4 y 6 horas, así como el tiempo de activación y desactivación de la impresora, entre 3 y 4 horas, se requieren unas 25 horas en total. Posteriormente se ensambla la cubierta, con un margen de 2 días lectivos. Por lo tanto considerando márgenes de seguridad y jornadas laborales habituales, la construcción de muros no debería superar los 9 días lectivos. Si consideramos que se contratan 2 operarios a aproximadamente 120 € /día se estima un coste de 2190 €. A esto se debe añadir alquiler de maquinaria.

Material

En total se generan para la realización del edificio in-situ 39 m³ de material. Teniendo en cuenta que la densidad del hormigón es de 2400 kg/m³, se requieren de 86,05 toneladas de material. Para la generación de un presupuesto se establece la mezcla que utiliza BOD2 en sus construcciones.

Material	Cantidad (ton)	Precio EUR	Porcentaje en peso
Cemento	27,45 ton	6.239 EUR	32%
0-2 mm arena	15,44 ton	356 EUR	18%
0-4 mm grava	15,44 ton	378 EUR	18%
0-4 mm tejas recicladas	19,73 ton	311 EUR	23%
Agua	7,72 ton	35 EUR	9%
Glenium sky 631 (superplastificante)	0.18ton	116 EUR	0%
Fibras antifisuras	0.09 ton	618 EUR	0%
Total	86,05 ton	8.053 EUR	100%

Tabla 2. composición del material de extrusión

En total se genera un gasto aproximado de 10.800 euros.

Resultado

Planimetria

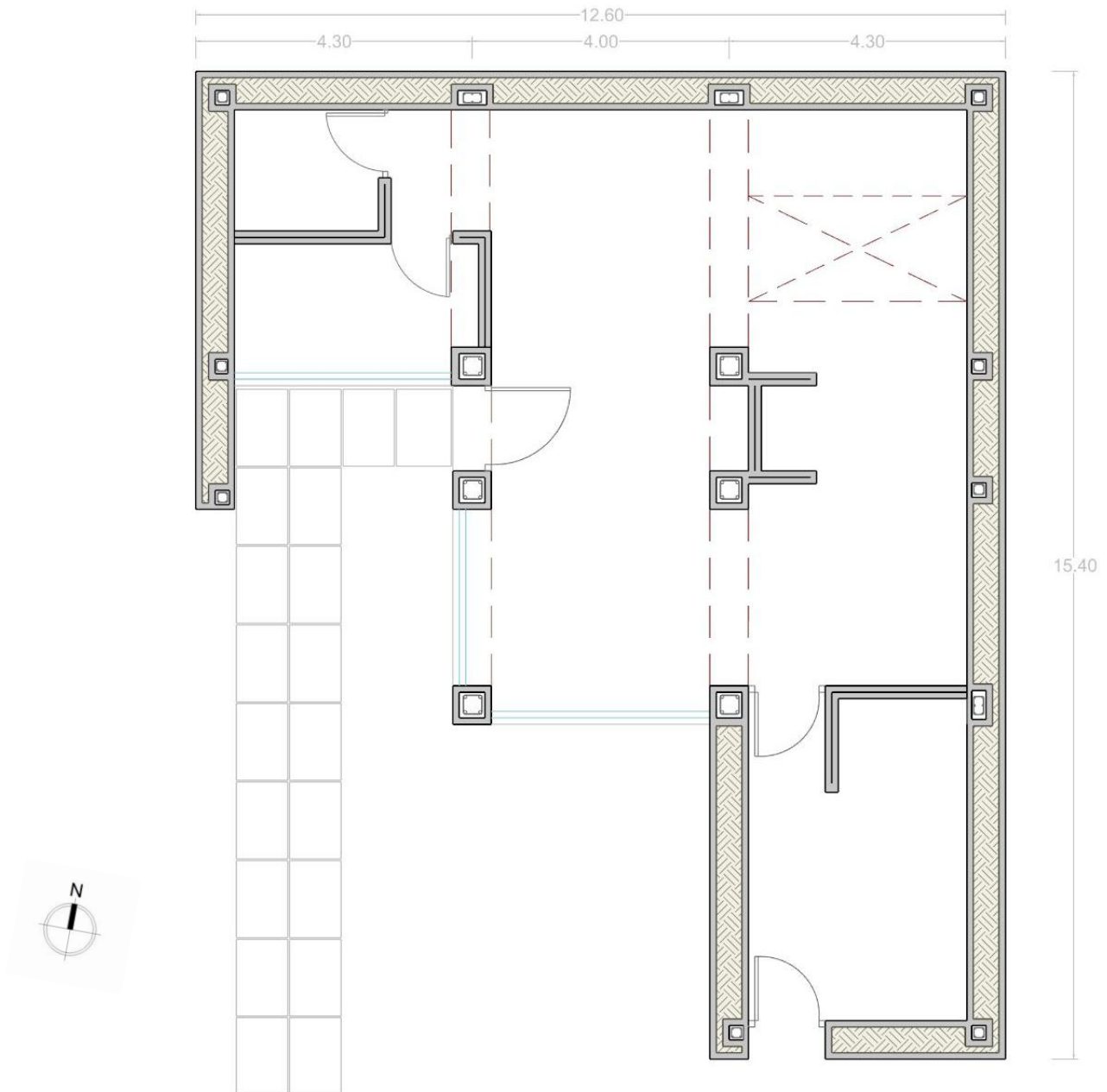


Figura 34. Planta baja, construcción aditiva. E 1/100



Figura 35. Alzado norte, construcción aditiva. E 1/100

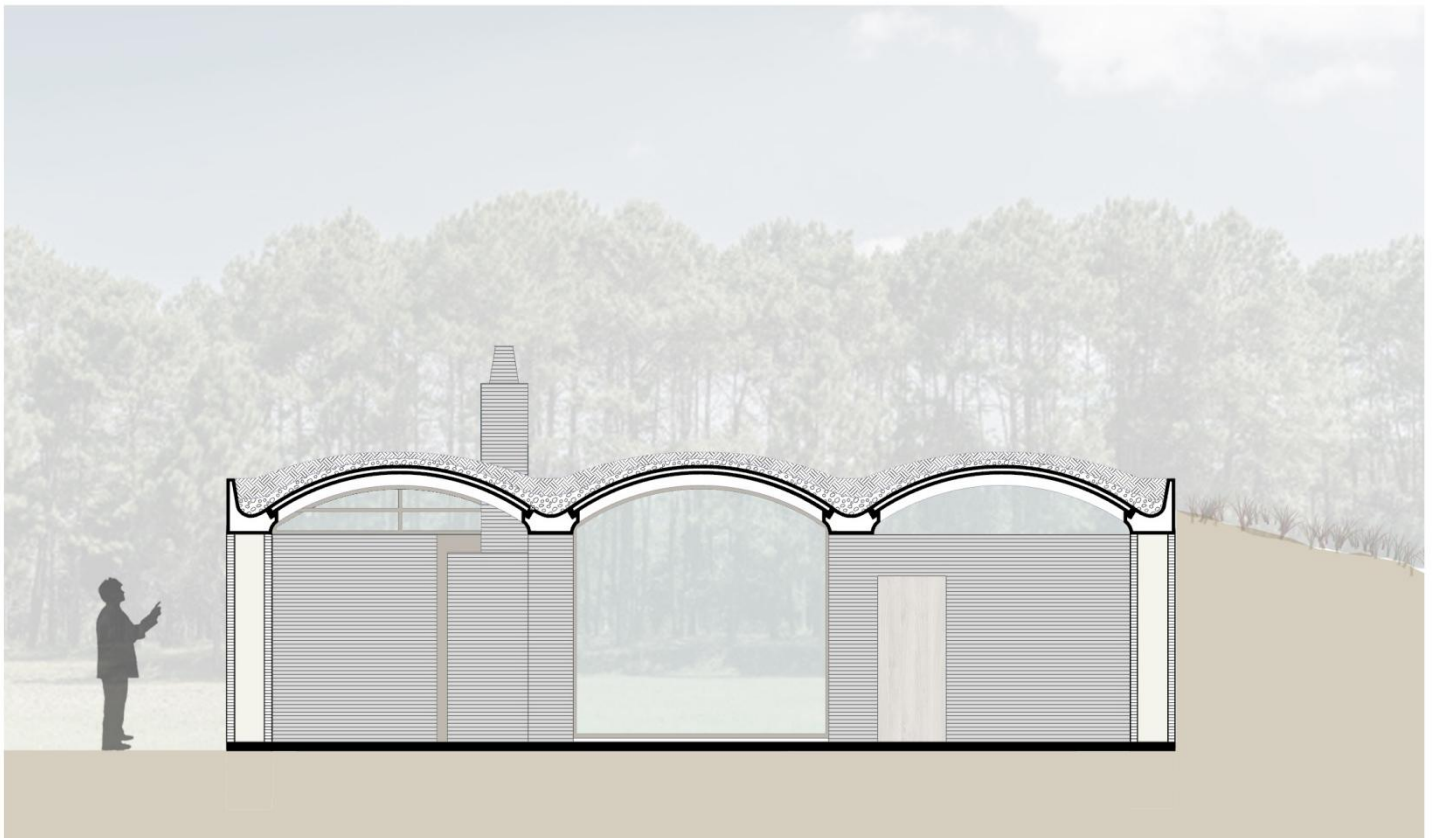


Figura 36. Sección X, construcción aditiva. E 1/100

Detalles constructivos

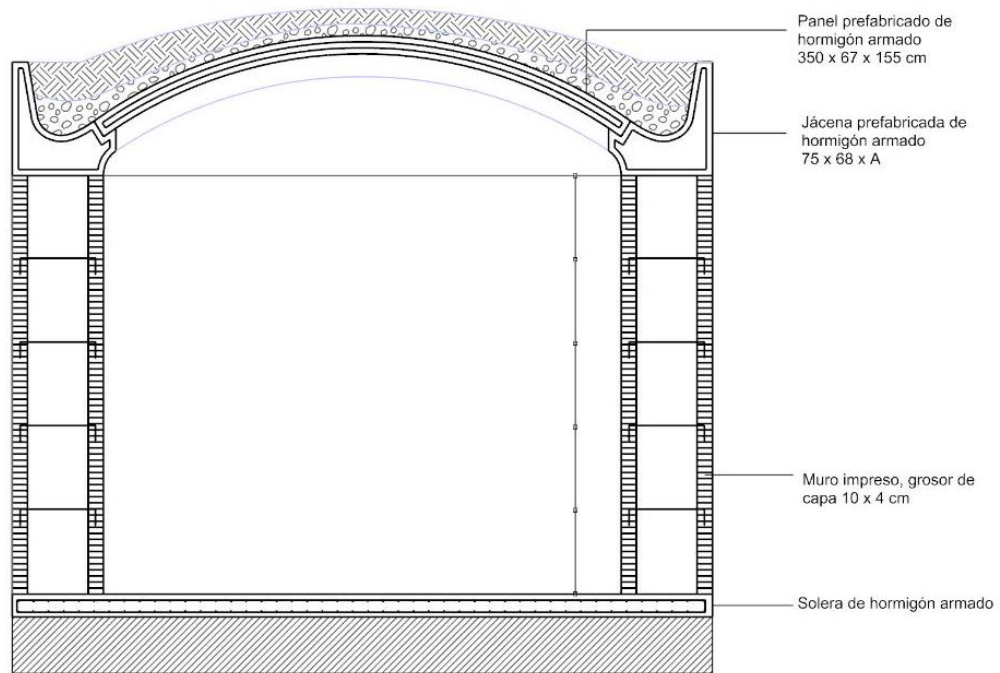


Figura 37. Sección módulo, construcción aditiva. E 1/50

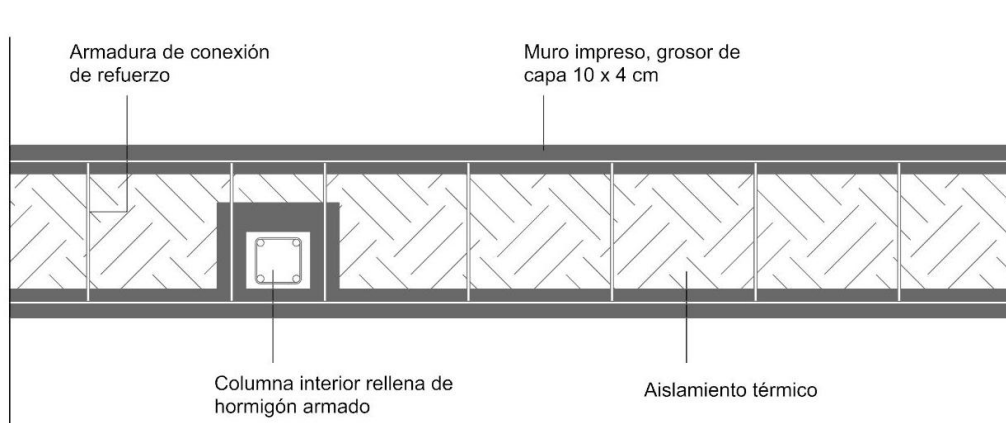


Figura 38. Detalle sección horizontal muro, construcción aditiva. E 1/20

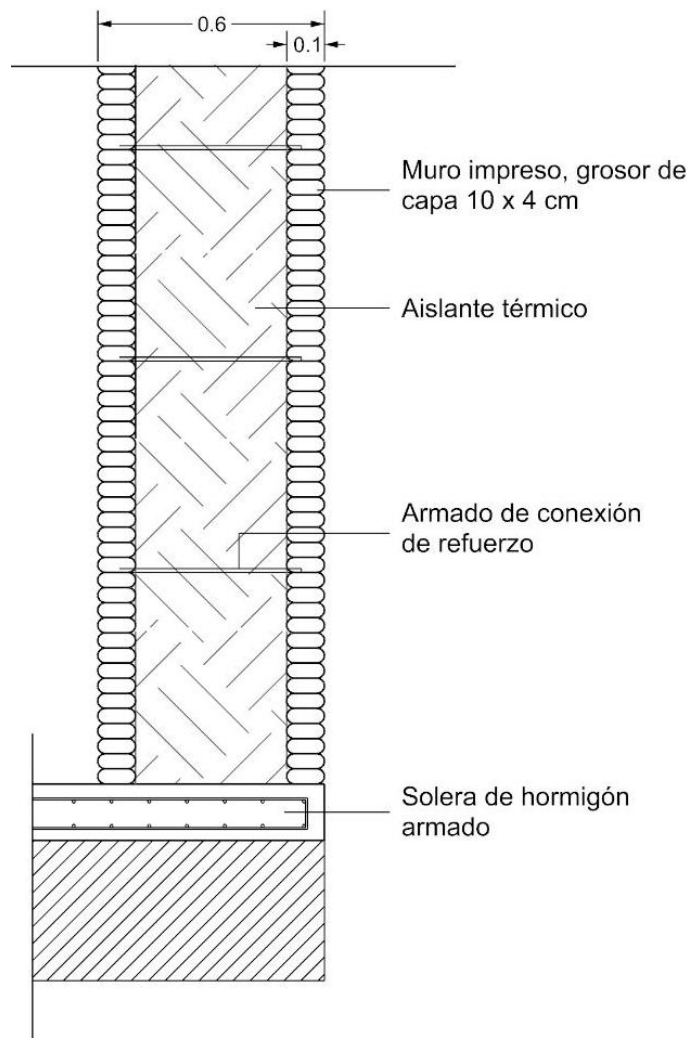


Figura 39. Detalle sección vertical muro, construcción aditiva. E 1/20

Despiece

A continuación se muestra el resultado del despiece del edificio, formado en primer lugar por los muros impresos y a continuación con los elementos prefabricados de cubierta:

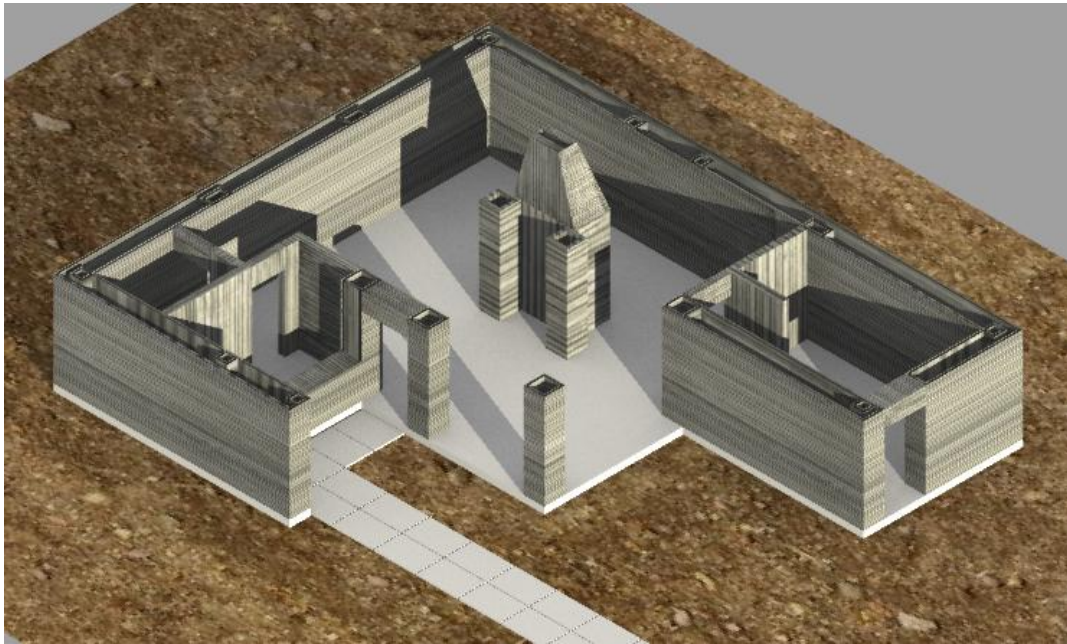


Figura 40. Vista axonométrica de los muros de construcción aditiva.

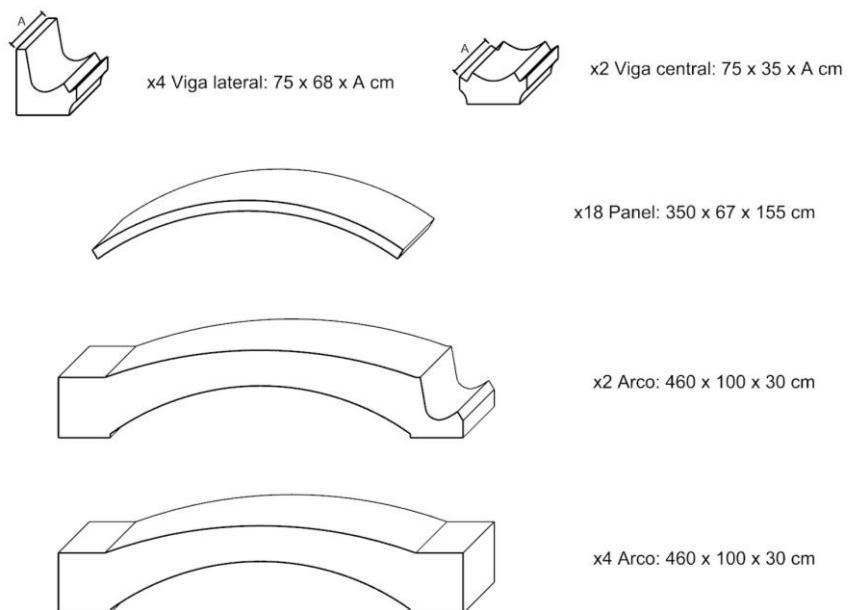


Figura 41. Despiece elementos prefabricados cuboerta

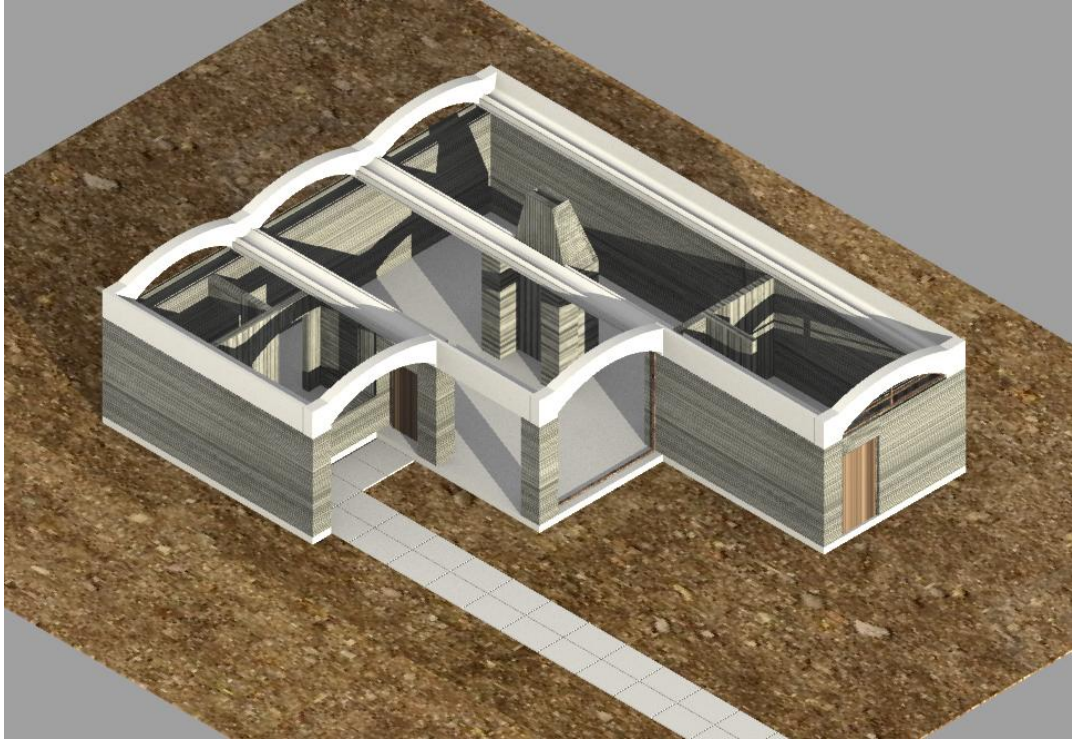


Figura 42. Vista axonométrica montaje vigas. (fuente propia)

Como resultado final, obtenemos un edificio de apariencia semejante al construido con el método tradicional, fiel a la geometría original, aunque se deja visto el hormigón de la construcción aditiva.

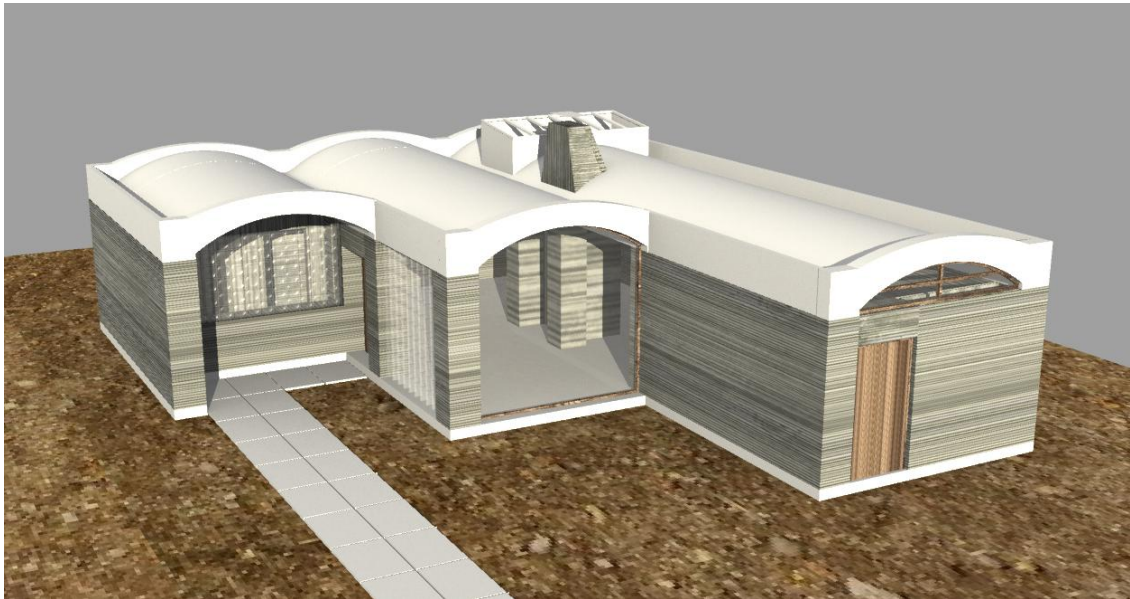


Figura 43. Edificio acabado con construcción aditiva (fuente propia)

CONCLUSIONES

A pesar de todas las oportunidades que ofrece el método de impresión 3D, un edificio se crea según la disponibilidad de recursos y técnicas, por ello la recreación de un modelo existente de vivienda tradicional, hace que no se puedan resaltar y explotar las auténticas mejoras que se pueden obtener aplicando la impresión 3D. Reinterpretar un modelo de vivienda con un método constructivo diferente al original, implica que la nueva técnica empleada deberá amoldarse o generar alternativas al sistema constructivo original. Esto plantea inconvenientes para la resolución de puntos críticos, aunque también puede haber optimizaciones. A continuación se discuten sobre las virtudes y defectos de la aplicación de la construcción aditiva en el caso de estudio, según los criterios estudiados en la solución constructiva:

En el ámbito de la fidelidad arquitectónica, se consideran oportunidades la adaptación del sistema para replicar modelos existentes, así como poder realizar formas complejas. La imposibilidad de poder imprimir con diferentes materiales, así como no poder realizar elementos horizontales, forjados, o elementos que trabajan a flexión, limitan la realización completa de un edificio convencional. Además se obtiene menor definición en acabados que en la construcción tradicional y el área de impresión está limitada por el tamaño de la impresora.

En el ámbito de la resistencia, los muros construidos obtienen cualidades adicionales gracias a la mezcla del material de extrusión y trabajan muy bien a compresión. Son fáciles de tratar e intervenir durante la obra, aunque solo se limitan a materiales autoportantes. Debido a la multitud de empresas que estudian el tratamiento de este nuevo tipo de edificaciones y la gran variedad de opciones posibles, se puede decir que aún falta por definir la técnica de construcción.

En el ámbito de la economía, se reducen los costes por la automatización de las máquinas, se optimizan los materiales empleados durante la obra, además de reducir el número de operarios a tan solo dos.

En lo referido al tiempo, la impresora 3D es capaz de trabajar constantemente sin cometer errores, por lo que reduce los tiempos de ejecución y genera más seguridad en el entorno laboral. En muchos casos la necesidad de transporte y montaje del sistema de impresión requiere de especialistas para su funcionamiento.

Por último la sostenibilidad del edificio viene determinada por el impacto que genera su construcción en el entorno, además de los materiales utilizados para su construcción. La posibilidad de integrar materiales reciclados en la mezcla del material de impresión, así como la reducción de desperdicios en el proceso de construcción mejora la sostenibilidad del edificio. Además la adaptación del diseño a factores ambientales o la integración de sistemas de captación en el modelo del edificio, mejoran factores energéticos.

BIBLIOGRAFIA

- Adam, J. O. (n.d.). Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- Almazán, Á. (2018). La arquitectura de la Impresión 3D. Influencia del Vóxel.
- Bassegoda, B. (1947). La Bóveda catalana: Discurso leído el 26 de noviembre de 1946.
- Campillo, M. (2017). Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón [Escuela técnica superior de Arquitectura de Madrid]. [https://Campillo, M. \(2017\). Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón \[Escuela técnica superior de Arquitectura de Madrid\]. \[http://oa.upm.es/47556/1/TFG_Campillo_Mejias_Miriam.pdf\]\(http://oa.upm.es/47556/1/TFG_Campillo_Mejias_Miriam.pdf\)](https://Campillo, M. (2017). Prefabricación en la arquitectura: Impresión 3D en hormigón [Escuela técnica superior de Arquitectura de Madrid]. http://oa.upm.es/47556/1/TFG_Campillo_Mejias_Miriam.pdf)
- Impresión 3D de construcción. (2018, October 7). HiSoUR Arte Cultura Historia. <https://www.hisour.com/es/construction-3d-printing-40678/>
- International, A. (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies.
- INTRODUCCIÓN AL DISEÑO ESTRUCTURAL. (1905). In Diseño Estructural (pp. 15–82). Ediciones UC. <http://dx.doi.org/10.2307/j.ctv14rmrd3.4>
- La impresión 3D: Guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general. (2016).
- Labonnote, Ronnquist, Manum, Rüther, N., Anders, Bendik, Petra. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities (ELSEVIER). https://www.researchgate.net/publication/309193955_Additive_Construction_state_of_the_art_challenges_and_opportunities (Original work published 2016)
- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2015). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 49(4), 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Soeren, J. (n.d.). 3D construction printer. BOD 2: Specifications
- Truñó, Á. (2004). Construcción de bóvedas tabicadas. Reverte.

Empresas relacionadas

- *Features*. (2021). SQ4D. from <https://www.sq4d.com/features/>
- Administrator. (2021.). *CyBe_3D concrete printers specifications_2018.09.04.pdf*.
- COBOD. (2021) *COBOD - Modular 3D construction printers - 3D printed buildings*. COBOD. from <https://cobod.com/>
- *Giant 3d printer*. (2021) from <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>
- *Technology*. (2021), from <https://www.iconbuild.com/technology>
- *Technology*. (2021). Apis Cor, from <https://www.apis-cor.com/technology>

TABLA DE FIGURAS

- Figura 1. Salvador, M. (2021). Impresión 3D, SLA. <https://electronicamade.com/impresiones-3d/>
- Figura 2. Sanchez, S. (2019). Impresión 3D, SLS. <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>
- Figura 3. Tecnología, I. (2020). Impresión 3D. FDM. <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/>
- Figura 4. ELStudio, A. (2019). Ingreso del mercado de construcción (\$US billones) 2016 – 2027 <https://www.contourcrafting.com/>
- Figura 5. Reyes, H. I. (2018). Esquema tecnología FDM. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/153009/Estudiodelascaracter%C3%ADstica%20delhormig%C3%B3nparausoenunam%C3%A1quina%20de%20impresi%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Figura 6. Reyes, H. I. (2018). Esquema de una máquina de impresión 3D en hormigón. <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/153009/Estudiodelascaracter%C3%ADstica%20delhormig%C3%B3nparausoenunam%C3%A1quina%20de%20impresi%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Figura 7. Alden, S. (2019). Extrusión de material, 3DCP. <https://sourceable.net/future-of-the-construction-industry-prefabrication-and-3d-printing/>
- Figura 8. COBOD. (2020). Impresora BOD2. <https://cobod.com/>
- Figura 9. COBOD. (2020). Edificio KampC. <https://cobod.com/>
- Figura 10. ICON. (2020). Impresora Vulcan II. <https://www.iconbuild.com/technology>
- Figura 11. ICON. (2020). Edificio Casa Chicon. <https://www.iconbuild.com/technology>
- Figura 12. SQ4D. (2019). Impresora SQ4D. <https://www.sq4d.com/>
- Figura 13. SQ4D. (2020). Edificio, Proyecto 2. <https://www.sq4d.com/>
- Figura 14. WASP. (2017). Impresora Big Delta. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>
- Figura 15. WASP. (2017). Edificio Eremo. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-houses-for-a-renewed-balance-between-environment-and-technology/>
- Figura 16. Apis Cor. (2017). Impresora Frank. <https://www.apis-cor.com/>
- Figura 17. Apis Cor. (2017). Edificio Apis Cor House. <https://time.com/4692376/3d-printing-house-apis-cor/>
- Figura 18. Cybe. (2019). Impresora Cybe RC 3DP. <https://cybe.eu/>
- Figura 19. Cybe. (2019). Edificio Meet House. <https://cybe.eu/cases/meet-house/>

- Figura 20. WASP. (2018). Impresora Crane Wasp. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>
- Figura 21. WASP. (2018). Edificio Tecla. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>
- Figura 22. Winsun. (2014). Edificio Prefabricado Winsun . <http://www.winsun3d.com/En/>
- Figura 23. Marezi, J. (2016). Casa Henfel. <https://procesosconstructivos.files.wordpress.com/2016/05/2-casa-de-fin-de-semana-le-corbusier.pdf>
- Figura 24. (2021). Planta baja E.1/100 (fuente propia).
- Figura 25. (2021). Sección Y, E 1/100 (fuente propia).
- Figura 26. (2021). Sección X, E 1/100 (fuente propia).
- Figura 27. (2021). Alzado A, E 1/100 (fuente propia).
- Figura 28. (2021). Alzado B, E 1/100 (fuente propia).
- Figura 29. (2021). Área requerida sistemas de construcción aditiva (fuente propia).
- Figura 30. (2017). Hormigón visto construcción aditiva.
- Figura 31. (2012). Sección constructiva bóveda tabicada.
- Figura 32. (2021). Posicionamiento sistemas de construcción aditiva (fuente propia).
- Figura 33. (2021). Sección transmitancia térmica muro (fuente propia).
- Figura 34. Planta baja, construcción aditiva. (fuente propia) E 1/100
- Figura 35. Alzado norte, construcción aditiva. (fuente propia) E 1/100
- Figura 36. Sección X, construcción aditiva. (fuente propia) E 1/100
- Figura 37. Sección modulo, construcción aditiva. (fuente propia) E 1/50
- Figura 38. Detalle sección horizontal muro, construcción aditiva. (fuente propia) E 1/20
- Figura 39. Detalle sección vertical muro, construcción aditiva. (fuente propia) E 1/20
- Figura 40. Vista axonométrica de los muros de construcción aditiva. (fuente propia)
- Figura 41. Desspiece elementos prefabricados cuboerta (fuente propia)
- Figura 42. Vista axonométrica montaje vigas. (fuente propia)
- Figura 43. Edificio acabado con construcción aditiva (fuente propia)