

- ▲ **Palabras clave/** Diseño arquitectónico, construcción, robótica, BIM.
- ▲ **Keywords/** Architectural design, construction, robotics, BIM.
- ▲ **Recepción/** 03 de noviembre 2020
- ▲ **Aceptación/** 13 de abril 2021

# Condiciones arquitectónicas de la construcción impresa-3D<sup>1</sup>

## Architectural Conditions of Construction 3D Printing

### Rodrigo García-Alvarado

Arquitecto Pontificia Universidad Católica de Chile.  
Doctor Universidad Politécnica de Catalunya  
Profesor Titular, Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.  
rgarcia@ubiobio.cl

### Claudia Muñoz-Sanguinetti

Ingeniera Constructora, Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.  
Doctora Universidad del Bio-Bio  
Profesora Asociada, Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.  
clmunoz@ubiobio.cl

### Alejandro Martínez-Rocamora

Ingeniero de Edificación, Universidad de Sevilla, España.  
Doctor Universidad de Sevilla  
Profesor e Investigador, Universidad de Sevilla, España  
rocamora@us.es

### Ginnia Moroni Orellana

Arquitecta Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.  
Master Ingénieur Civil Architecte, Université Libre de Bruxelles, Bélgica  
Doctora (c) en Arquitectura y Urbanismo, Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile  
Académica, Escuela de Arquitectura, Universidad San Sebastián, Concepción, Chile.  
ginnia.moroni@uss.cl

**RESUMEN/** Las construcciones mediante impresión-3D pueden reducir recursos y tiempos de ejecución, impulsando la productividad y la sustentabilidad de la edificación. Si bien esta nueva tecnología se está desarrollando en distintas partes del mundo y ya hay ejemplos diversos, no se han determinado las condiciones de diseño arquitectónico con este nuevo sistema constructivo. El presente trabajo realiza una novedosa identificación de características arquitectónicas de la construcción impresa-3D basadas en pruebas experimentales, estudios de casos y modelaciones digitales con el fin de promover estas edificaciones. Las pruebas a escala de laboratorio, con mezclas de microhormigón y un Robot Kuka R120, han permitido elaborar diversos elementos constructivos. Además, se revisan ejemplos internacionales de viviendas impresas y se analizan sus condiciones formales. También se desarrollan modelos tridimensionales en BIM basados en las pruebas y condiciones registradas. Las experiencias y las revisiones muestran primordialmente la impresión de paramentos rugosos y curvos que sugieren nuevas posibilidades arquitectónicas. **ABSTRACT/** 3D-printed buildings can save resources and time, boosting productivity and the construction's sustainability. While this new technology is developing around the world and examples abound, its architectural design conditions have yet to be determined. This work accomplishes a novel identification of the architectural features of construction 3D printing based on pilot tests, case studies, and digital modelling. Lab scale tests –with microcement and a Kuka R120 robot– have led to the development of different constructive elements. In addition, international models of impress housing are reviewed, in addition to discussing their formal conditions. BIM tridimensional models are also developed based on the registered tests and conditions. The experiences and reviews basically show the printing of curved and coarse parameters that point to new architectural possibilities.

## INTRODUCCIÓN

Los nuevos sistemas de impresión tridimensional a gran escala –mediante equipos automatizados y mezclas de rápida solidificación– permiten imprimir elementos constructivos y edificios completos (Lim *et al.* 2012; Perkins y Skitmore 2015; Labonnote *et al.* 2016; Delgado-Camacho *et al.* 2018). Esta

tecnología reduce accesorios y materiales de construcción, disminuyendo costos, plazos y residuos, y logrando una gestión digital del diseño y fabricación (Hager *et al.* 2016; Bos *et al.* 2016; Ghaffar *et al.* 2018). En los últimos años, varios centros de investigación y empresas han montado equipos y levantado edificios completos con impresión-3D (Tay *et al.* 2017; Davtala

2018). Si bien se están probando diferentes materiales y maquinarias, no se han definido las condiciones arquitectónicas para desarrollar edificios con esta tecnología, como ha sido advertido por varios autores (Ma *et al.* 2018; Craveiro *et al.* 2019). Este trabajo realiza una novedosa revisión de características de diseño arquitectónico de las construcciones impresas-3D mediante pruebas experimentales, casos

1 Nuestros agradecimientos al Proyecto Fondecyt 1221730, Proyecto INES I+D 22-26 (VRIP-UBB), Proyecto INN I+D 20-52 (VRIP-UBB), CIPYCS-Nodo Sur, FONDEQUIP EQM210225, DYPCS - 2110375, VI Plan Propio de Investigación y Transferencia de la Universidad de Sevilla (VI PPIT-US).

ejecutados y modelos digitales, con el fin de impulsar la aplicación de esta nueva tecnología. Además, presenta por primera vez condiciones de diseño de los edificios impresos. La metodología utilizada consiste en la recopilación y el análisis de documentos o sitios de información, así como también en la realización directa de ensayos, mediciones y modelos.

### CONSTRUCCIÓN IMPRESA-3D

La construcción impresa-3D es un proceso de fabricación aditiva basado en la deposición tridimensional de material fluido de rápido endurecimiento que permite ejecutar elementos para una edificación permanente (Craveiro *et al.* 2019). La impresión consiste en depositar una mezcla mediante una boquilla sujeta con rieles de tres ejes de movimiento o por un brazo robótico con seis rotaciones u otros sistemas, que desarrollan una trayectoria para formar el elemento previsto. La mezcla debe prepararse en un depósito y bombearse hasta la boquilla. El bombeo y entrega de material debe sincronizarse con el movimiento de la boquilla, controlada por el pórtico o robot a partir de un modelo geométrico. Normalmente se imprime en sucesivas capas horizontales. La mayoría de las experiencias realizadas a la fecha han utilizado mezclas cementicias optimizadas, pero también se ha experimentado con materiales naturales (Bos *et al.* 2016; Ghaffar *et al.* 2018; Ma *et al.* 2018), promoviendo el uso de insumos locales y reduciendo el consumo energético para contribuir a un metabolismo urbano sustentable (Niño-Soto y Chavez-Martinez 2020).

La impresión de elementos constructivos o edificios completos considera técnicas como: (i) *Contour Crafting* (CC), que se basa en un pórtico que extruye el material cementicio capa por capa, utilizando sistemas automatizados y fabricando con un acabado superficial liso, restringiendo el flujo con paletas laterales (Khoshnevis 2004); (ii) Concrete Printing, (CP), tiene el potencial de producir componentes de construcción altamente personalizados, aunque con un acabado superficial más rugoso (Sungwoo *et al.* 2011). Las principales diferencias entre estos métodos quedan resumidas en la tabla 1.

| CARACTERÍSTICAS     | CONTOUR CRAFTING                   | CONCRETE PRINTING                  |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Proceso             | Extrusión                          | Extrusión                          |
| Uso de molde        | Sí, en la boquilla                 | No                                 |
| Mezcla-Materiales   | Material cementicio                | Material cementicio                |
| Diámetro Boquilla   | 15 mm                              | 9-25 mm                            |
| Número de boquillas | 1                                  | 1                                  |
| Espesor de capa     | 13 mm                              | 6-25 mm                            |
| Refuerzo            | Sí                                 | Sí                                 |
| Tamaño de impresión | >1m                                | >1m                                |
| Ventajas            | Superficie lisa                    | Altas resistencias                 |
| Desventajas         | Proceso adicional de moldeo previo | Dimensiones de impresión limitadas |

Tabla 1. Comparativo de métodos de fabricación aditiva (fuente: Elaboración propia adaptado de Torres, 2016).

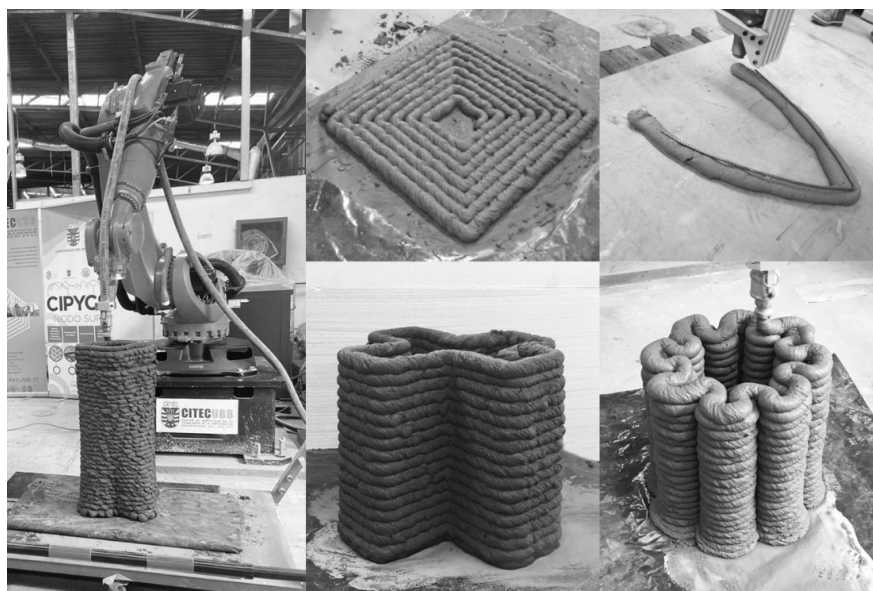


Imagen 1. Pruebas de construcción impresa con robot Kuka120 R2500 (fuente: De los autores, 2019).

A través de pruebas realizadas con un robot industrial (Kuka120 R2500) y una bomba de hormigonado de 120 litros para elaborar prototipos de muros, columnas y piezas (imagen 1), se han determinado mezclas

optimizadas y muestras que presentan las siguientes características:

- a) El material (micro-hormigón extruible) debe contar con alto contenido de material fino, mayor a 500 kg/m<sup>3</sup>, con una razón

agua-cemento comprendida en rangos de 0,35 a 0,45.

- b) La deposición genera un “cordón” horizontal, de dimensiones de acuerdo con el tamaño de la boquilla (30-80 mm), densidad (entre 1,9 a 21,21 kg/l) y fluidez (entre 200 y 250 cm de mesa) de la mezcla, velocidad de empuje y de trayectoria, y tiempo de abertura o solidificación inicial, entre las variables más relevantes. Una vez depositado, este cordón posee además una expansión lateral y un asentamiento vertical (Lim *et al.* 2012).
- c) La sobreposición vertical de los cordones produce una ondulación horizontal por ambas caras exteriores, generando una textura rugosa.
- d) Los elementos constructivos se suelen imprimir con una trayectoria perimetral para definir la forma, desarrollada verticalmente de manera helicoidal; es decir, en ligero ascenso para evitar discontinuidades.
- e) El alcance geométrico de los equipos, así como las capacidades de las bombas, establecen dimensiones máximas de los elementos según carga y posición de los equipos, por lo que se deben establecer tramos y secuencias de ejecución.
- f) Los tiempos de apertura de la mezcla de micro-hormigón deben regularse para la constructibilidad del elemento a través del diseño de dosificaciones (con aditivos químicos reductores de agua, docilidad, extrudibilidad, etc.) y control del proceso de impresión (velocidad de apertura de boquilla, ruta y altura de impresión, etc.). La secuencia vertical de cordones presenta probabilidad de volcamiento temporal, especialmente en trazados rectos, por lo que se suelen realizar trayectorias curvas, reticulados interiores y rellenos que colaboran en la sustentación posterior.
- g) Las deposiciones en esquinas presentan particularidades debido a la rotación de la boquilla, produciendo una entrega más densa de material en la parte interior y más expandida en el exterior. Por ello es

recomendable utilizar aristas redondeadas que permiten un reparto más homogéneo del material.

- h) Los cambios de dirección en las trayectorias implican reducir y acelerar velocidades de distintos motores de rieles o articulaciones robóticas que poseen retardos o vibraciones. Un mayor radio en las esquinas permite reducir las diferencias de velocidad.
- i) Para imprimir elementos reforzados con enfierraduras, se debe depositar sin colisionar con la armadura, inclinando la boquilla y desarrollando trayectorias laterales e intermedias con mayores aceleraciones, lo que incentiva cantos redondeados.

El proceso de construcción impresa-3D implica, entonces, diseñar mezclas bombeables y extruibles; disponer y preparar los insumos; y controlar propiedades físico-químicas, condiciones granulométricas, adiciones minerales o sintéticas que aporten aspectos reológicos. Asimismo, es necesario proporcionar una entrega de material continua, trasladable y controlada digitalmente. La ejecución se puede realizar en planta y trasladar el elemento endurecido a obra para su montaje (como pieza prefabricada), o bien ejecutar en terreno, conformando directamente la construcción.

A partir de la experiencia se logran hacer exploraciones en sintonía con el método Concrete Printing, consiguiendo un prototipaje en laboratorio de elementos de hormigón con altas resistencias iniciales, libertad de formas para el diseño y sin moldes en la boquilla de la mezcla, reconociendo que el grado de terminación del elemento es irregular.

El control de la deposición requiere desplazamientos en tres dimensiones para ejecutar elementos volumétricos, así como rotaciones para realizar formas complejas, o usar manipuladores para tareas adicionales. Se está experimentando también con pórticos triangulares con boquillas colgantes, soportes articulados con un eje vertical, bases móviles, soportes combinados o voladores,

con distintas mangueras o actuadores para lograr mayor efectividad y precisión.

### EJEMPLOS ARQUITECTÓNICOS DE CONSTRUCCIÓN IMPRESA-3D

En los últimos años se han levantado diversas construcciones mediante impresión-3D en distintas partes del mundo, por empresas, universidades o consorcios. Estos ejemplos están destinados principalmente a probar y exponer esta tecnología, aunque también para comercializar edificaciones, equipos o mezclas. Desde un pequeño refugio realizado en Milán en 2010; hasta elementos y pabellones experimentales ejecutados entre 2013 y 2015 en California, Reino Unido, Australia, Ámsterdam y Barcelona; una habitación de hotel en Filipinas; casas prefabricadas en China y oficinas en Minnesota en 2016; y una vivienda en Rusia en 2017 (publicada por su ejecución en 24 horas por menos de US\$10.000). La empresa china WinSun ha difundido conjuntos habitacionales y edificios realizados con impresión-3D. Además, varios concursos de la NASA han involucrado a grupos universitarios y empresas para realizar pruebas y proponer alternativas de edificación extraterrestre, y el Cuerpo de Ingeniería del Ejército de Estado Unidos ha ejecutado pabellones. Recientemente se ha difundido la ejecución de una casa de dos pisos en Bélgica, una vivienda flotante en la República Checa, y el edificio impreso más grande a la fecha (de 640 m<sup>2</sup>), realizado en Dubai, cuyo gobierno ha declarado la meta de realizar 25% de sus edificios mediante construcción impresa-3D de aquí a 2025. En América Latina se registran varias iniciativas: una fábrica automatizada de viviendas en Chile y construcciones en Colombia, Argentina y el norte de Brasil.

En un registro de construcciones impresas realizado en 2019 (García-Alvarado *et al.* 2019), se advierte que la mayoría se ha destinado a viviendas, ejecutadas con pórticos o brazos robóticos, usando principalmente mezclas cementicias. La mayor parte realiza la deposición en terreno de manera continua y, en algunos casos, con piezas





**Imagen 2.** Ejemplos de Viviendas Impresas (fuentes: <https://cobod.com/the-bod/>; <https://theculturetrip.com/europe/france/articles/the-first-3d-printed-home-in-the-world-has-been-unveiled-in-france/>; <https://www.businessinsider.com/house-built-one-day-apis-cor-2017-3>; <https://www.archdaily.com/919667/could-3d-printing-be-the-future-of-social-housing>; <https://bemore3d.com/language/en/3d-housing/>; <https://theurbandevolver.com/articles/portable-robot-prints-house-in-48-hours>; <https://www.kampc.be/innovatie/projecten/3d-printen-in-de-bouw/presentaties-fotos>, 2017-2020).

que se montan posteriormente. En general se imprimen paramentos sólidos (de un cordón), o huecos (de dos cordones laterales), algunos con reticulados interiores y rellenos con material de aislación o barras metálicas de refuerzo, complementadas con puertas, ventanas, instalaciones, etc., y cubiertas en madera, metal o losa de hormigón armado. En unos pocos casos se imprimen también fundaciones, pilares, dinteles o losas.

Una revisión de siete viviendas impresas recientemente mediante distintos sistemas evidencia varias similitudes arquitectónicas (imagen 2 y tabla 2). En general, todas son construcciones independientes, la mayoría de un piso, con una superficie construida de 24 m<sup>2</sup> a 95 m<sup>2</sup>, y una forma centralizada con envoltente mayormente opaca. Estas consideran una estructura portante en base a muros horizontales extensos, (aunque escasamente reforzados). Los muros presentan una disposición perimetral con una o dos separaciones interiores y una altura por piso de 250 cm a 300 cm. Las luces estructurales varían entre 3,0 m y 5,0 m, y la techumbre se ejecuta con madera o losa de hormigón armado. Como base se utilizan fundaciones corridas y pisos de hormigón. Los muros contienen algún refuerzo en diferentes modalidades, en algunos casos combinadas:

- a) Reticula interna: cordón intermedio en diagonal o recto, transversal a los costados (ApisCor, Icon, Kamp C).
- b) Enfierradura horizontal: dispuesta en forma perpendicular a los cordones perimetrales, que quedan unidos a través de estos fierros (Cobod, BeMore).
- c) Relleno de hormigón: muros rellenos con hormigón depositado en obra con barras de acero verticales (Yhnova, CYBE).

En dinteles y laterales de vanos se identifican soportes temporales y, ocasionalmente, barras metálicas empotradas. En los casos donde existen dos niveles con losa de entrespiso, se agregan refuerzos verticales en encuentros o posiciones distribuidas a modo de pilares afianzados a fundaciones y, eventualmente, a

| N° | FABRICANTE | AÑO  | PAÍS         | SUP. (M²) | PISOS | ALTURA TOTAL (CM) | CANTIDAD DE RECINTOS | EQUIPO DE IMPRESIÓN |
|----|------------|------|--------------|-----------|-------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1  | COBOD      | 2017 | Dinamarca    | 23,44     | 1     | 300               | 2                    | rieles              |
| 2  | Yhnova     | 2017 | Francia      | 95,00     | 1     | 300               | 7                    | robot               |
| 3  | Apis Cor   | 2017 | Rusia        | 83,98     | 1     | 300               | 7                    | robot-grúa          |
| 4  | Icon       | 2018 | EE.UU.       | 24,00     | 1     | 300               | 4                    | rieles              |
| 5  | BeMore     | 2018 | España       | 24,00     | 1     | 300               | 3                    | robot-grúa          |
| 6  | Kamp C     | 2019 | Países Bajos | 90,00     | 2     | 550-600           | 4                    | rieles              |
| 7  | CYBE       | 2020 | Bélgica      | 90,00     | 2     | 550-600           | 6                    | robot               |

Tabla 2. Viviendas impresas y características generales

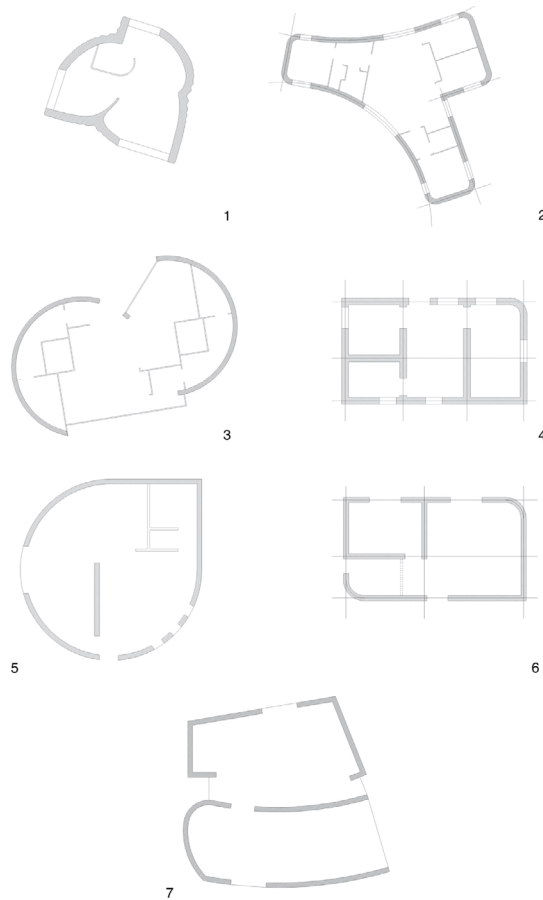


Figura 1. Plantas esquemáticas de viviendas impresas (fuente: Elaboración propia, 2021).

cadenas de amarre que funcionan en forma similar a una albañilería confinada.

Los muros se asumen como resistentes a la compresión, con armaduras para trabajar al corte y flexión, por cargas laterales como movimientos sísmicos regulares, fuerzas de viento o impacto. Los muros perimetrales tienen espesores mayores que una construcción usual, asociado al proceso de impresión, y mayor resistencia, dado que las mezclas de impresión no contienen áridos mayores (normalmente hasta 5 mm) (Carrasco 2019). Los espesores de muros varían entre 15 cm y 40 cm para muros principales, y hasta 5 cm para tabiques divisorios.

La geometría de los muros es mayormente de ejes rectos y planos verticales, por referencia a la construcción tradicional, pero con presencia relevante de ejes curvos con radios de 60 cm a 1600 cm, basado en la rotación de la mayoría de los equipos de impresión, lo que proporciona una gran diversidad de formas (figura 1). Generalmente, estas curvas se dan en muros estructurales y perimetrales y comúnmente en encuentros entre muros perpendiculares. También se dan construcciones completas de muros curvos en extensión y altura, como es el caso de los ejemplos ejecutados por COBOD, Yhnova, Marsha y KampC. Algunos ejemplos muestran ondas menores en el muro o extremos por razones decorativas, de sombreamiento o de incremento de la estabilidad. Otra particularidad común en las construcciones impresas son las esquinas redondeadas, presentando en promedio un radio de entre 5 cm y 7 cm.

El ancho de los vanos varía de 60 cm a 300 cm, en algunos casos con ventanales que abarcan toda la altura. Las dimensiones de puertas se mantienen regulares, y las ventanas son más escasas. Por ejemplo, ICON incluye un ventanal corrido superior con valores de fenestración (WWR o *wall to window ratio*) entre 19% y 30%.

La distribución de las viviendas es convencional en cuanto a la cantidad y la magnitud de los recintos, usualmente con un espacio más grande que actúa de salón, comedor y cocina integrada. Este espacio tiende a ocupar una

posición central, absorbiendo las circulaciones intermedias y el acceso, aparentemente con el fin de asumir (y delatar) las singularidades espaciales en cuanto a muros curvos. Esta jerarquía espacial otorga un lugar de exhibición, pero también promueve una habitabilidad colectiva propiciada, además, por las continuidades de la envolvente. Las viviendas impresas se caracterizan por las formas monolíticas, pero distintas entre sí y, en algunos aspectos, se asimilan a las residencias convencionales, en especial por las techumbres planas y cantos curvos, con volúmenes, fenestraciones y magnitudes que sugieren su destino habitacional, pero con siluetas singulares y paramentos ondulantes que producen un novedoso panorama residencial.

Los casos analizados se determinaron a partir de documentación disponible, contando los siete ejemplos analizados con planos y descripciones escritas. Además, se priorizaron proyectos que tuvieran un ejemplar construido, ya sea en uso o como prototipo y/o exhibición. Otros casos conocidos, como el edificio residencial de 5 pisos, de la empresa WinSun, disponen de escasa documentación y aparentemente solo se han impreso algunos elementos, por lo que no pueden ser analizados con detalle.

### MODELACIÓN BIM DE ARQUITECTURA IMPRESA

La modelación de edificios en BIM permite mayor relación del diseño con la construcción, puesto que detalla todos los elementos del edificio para la gestión de la obra. Esto se potencia aún más con la fabricación automatizada, que se puede generar a partir del modelo constructivo. En la construcción impresa-3D se deben enviar a la máquina de impresión las trayectorias de deposición para ejecutar los elementos. Algunas experiencias han mostrado su desarrollo desde modelos BIM (Lim *et al.* 2016; Davtalan *et al.* 2018), sin mediar planos ni operarios, pero manteniendo una administración general.

Asimismo, la modelación BIM permite analizar los componentes a imprimir aprovechando la variedad de impresión y eliminación

de moldajes. Según diversos estudios, los muros curvos ofrecen mayor estabilidad ante esfuerzos laterales (Lagomarsino 2015; Liu *et al.* 2018), por lo que es posible construir muros de menor espesor y con menos consumo de material, aumentando de ese modo la eficiencia constructiva y reduciendo el impacto ambiental, la mano de obra, los residuos y el transporte. De este modo, en un modelo BIM se pueden revisar distintas configuraciones y comparar el material utilizado, el proceso de impresión y el espacio construido. Además, la generación de espacios con distintas alternativas de muros (figura 2) y el análisis comparativo con respecto a las variables antes mencionadas puede ser programado en BIM para seleccionar configuraciones más óptimas (Martínez-Rocamora *et al.* 2020). La metodología BIM permite, además, trabajar conjuntamente distintas especialidades para reducir conflictos y compartir ajustes y objetivos comunes. A partir de un modelo inicial, es posible elaborar el proyecto

de arquitectura, estructura, presupuesto, carga ambiental y análisis energético con información integrada (figura 3). En este desarrollo combinar los requerimientos de expresión y funcionalidad arquitectónica, detalles constructivos, capacidades sísmicas, costos generales, gastos operacionales, energía contenida en los materiales, huella de carbono, confort ambiental, etc. De este modo se logra un proyecto que concilie adecuadamente dichas demandas (García-Alvarado *et al.* 2020), permitiendo revisar el diseño y los resultados generales de forma dinámica.

La generación de las trayectorias de impresión a partir de un modelo BIM implica la traducción geométrica de la forma en niveles horizontales y una dirección de ejecución en secuencias o espiral continua desde la base (Burkhart y Alucena 2020). También es necesario controlar la orientación del eje, la disposición de la boquilla y las aceleraciones del equipo con el fin de articular el movimiento desde

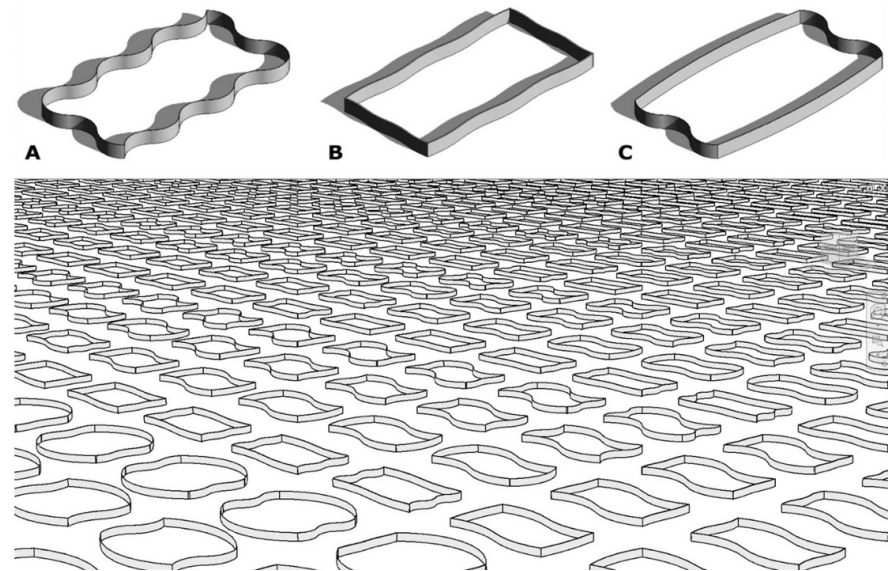


Figura 2. Análisis de modelos BIM para impresión-3D. Arriba: modelo de menor material (A), menor tiempo de ejecución (B) o menor costo combinado (C). Abajo: generación de modelos (fuente: Martínez-Rocamora *et al.* 2020).



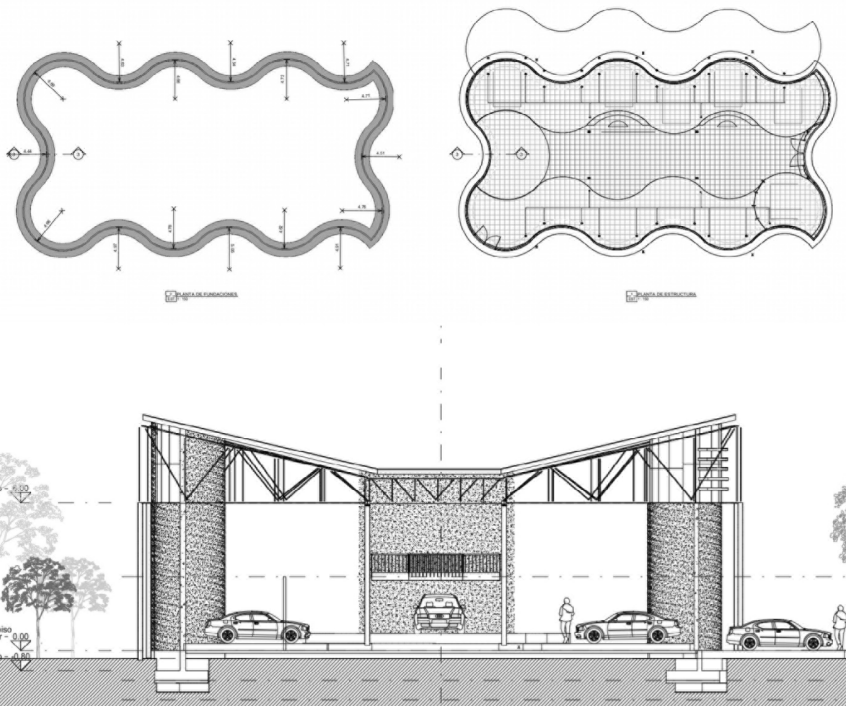


Figura 3. Modelo BIM de construcción impresa-3D (fuente: García-Alvarado et al. 2020).

su posición de trabajo, evitar colisiones y mantener desplazamientos fluidos, esquivando armaduras y otros elementos aledaños. La integración con la modelación del edificio y las cámaras de visión artificial son los avances necesarios para regular una automatización eficiente de la construcción impresa-3D, así como una regulación del diseño arquitectónico a las estrategias constructivas, materiales y maquinaria disponible.

### DISCUSIÓN

La impresión de elementos constructivos requiere, en primer lugar, disponer de una mezcla adecuada para su extrusión, bombeabilidad y endurecimiento controlado, entre los parámetros de material más relevantes. Este trabajo ha presentado los principios generales de deposición del material y consideraciones técnicas para el diseño óptimo de micro-hormigón, como el material con mayor disponibilidad y utilización actual. Se han identificado condiciones de trabajo de las mezclas para impresión en cuanto a extrudibilidad, tiempo de apertura, fluidez y endurecimiento, así como de fraguado, requeridos habitualmente por sus prestaciones constructivas. Se han planteado además aspectos de preparación, propiedades reológicas, granulometría de áridos, aditivos químicos y adiciones minerales, incorporación de fibras y mejoramiento de la huella ambiental que deben profundizarse en futuras investigaciones, considerando mezclas con bases de polímeros o biomateriales, en particular de residuos o recursos locales que promuevan la economía circular y el desarrollo sustentable. Por ejemplo, recientemente se han realizado investigaciones sobre mezclas con arena reciclada (Ding *et al.* 2020), con vidrio reciclado (Ting *et al.* 2019) o incrustaciones biológicas para arrecifes artificiales (Ly *et al.* 2020). También parecen promisorias las investigaciones sobre la impresión con mezclas basadas en tierra (Mohammad *et al.* 2020) o con nanomateriales, como el grafeno (Allouzi 2019).

Entre las variables de procesos identificadas se encuentran el sistema de mezclado/bombeo,

el sistema de impresión automatizada y el diseño y la programación de trayectorias, considerando pórticos en tres ejes cartesianos, sistemas radiales con desplazamiento vertical o brazos robóticos con seis o más ejes de libertad, montados en bases fijas, móviles o rieles de traslación. Estas labores implican la planificación de los recursos y la disposición de los equipos.

La revisión de los casos ejecutados en construcción impresa muestra un panorama diverso e incipiente. Esta tecnología se caracteriza por la variedad de iniciativas, equipos y diseños, que declaran ventajas constructivas notables, aunque escasa masificación. En general, se replican características de las edificaciones existentes y se experimenta con nuevas posibilidades. En la revisión de siete viviendas ejecutadas se advierten condiciones morfológicas similares, incluyendo volúmenes aislados y centralizados, muros perimetrales de mayor espesor y opacidad, algunos tramos curvos con medianas y esquinas redondeadas o perfiles diversos y superficies rugosas

que advierten una exploración y expresión particular.

En la modelación digital de construcciones impresas, en plataformas BIM, se demuestran capacidades de integración y análisis, así como nuevas posibilidades de diseño y optimización del proceso constructivo. Se definen los componentes del proyecto de edificación con propiedades de la construcción impresa-3d en cuanto a materiales, procesos de ejecución y atributos físicos. Todo ello para considerarlos en la planificación y el control de la maquinaria mediante la programación de trayectorias generada a partir de la geometría de los elementos. A la vez, se persigue generar alternativas de componentes y evaluar los resultados en cuanto a costo, tiempo de ejecución o la visualización de los espacios.

La gestión automatizada para la fabricación de los elementos constructivos implica la generación directa de las instrucciones de operación desde la geometría digital, según los equipos y los materiales disponibles, estableciendo las curvaturas apropiadas de

muros y encuentros. Por lo tanto, el proyecto arquitectónico se concentra en establecer los recintos y sus relaciones; es decir, la definición funcional y espacial del edificio para, después, realizar la transferencia de información para la construcción. De este modo, el diseño de edificios para construcción impresa-3D requiere fundamentalmente la dimensión central de los recintos (figura 4) y, posteriormente, se determina el trazado detallado de los muros. Esto impulsa al trabajo arquitectónico a concentrarse en la ocupación y la magnitud de los espacios, y en sus cualidades formales y vivenciales, para luego gestionar la ejecución. Si bien los paramentos convexos pueden dificultar la colocación de instalaciones y muebles, estos incitan la interioridad de las actividades, la fluidez espacial y la vinculación.

Desde el punto de vista arquitectónico, las funcionalidades particulares de las técnicas de construcción impresa-3D permiten ejecutar los elementos constructivos de los edificios adoptando formas sinuosas que provocan una sensación de innovación tecnológica y de mayor estabilidad (Tabla 3). Los muros curvos y esquinas redondeadas eliminan las aristas, suavizando la apariencia del edificio y generando cierta continuidad en la envolvente y en los espacios, tanto interiores como exteriores. Por lo tanto, las implicancias tecnológicas y culturales de la introducción de la construcción impresa-3D en el campo de la arquitectura promueven transformaciones en la organización espacial y funcional de los edificios, su integración e interacción con el entorno urbano y la oportunidad de aplicar nuevas capacidades expresivas y técnicas.

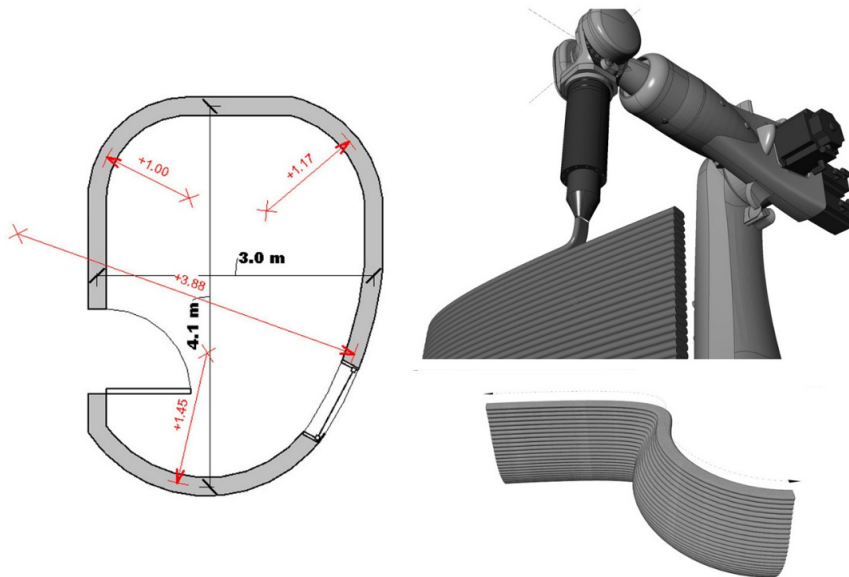
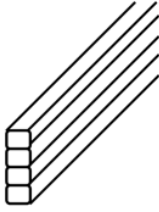
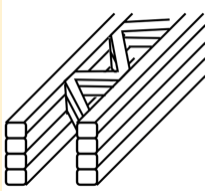
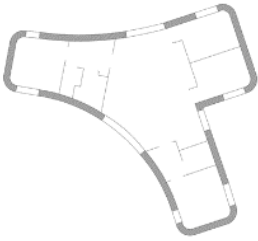

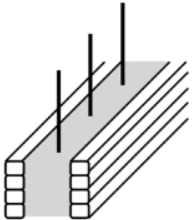


Figura 4. Diseño de recintos y proceso de construcción impresa-3d (Izq. Elaboración Propia, der. Alexis Salinas, 2022)



| ELEMENTOS | CONDICIONES ARQUITECTÓNICAS                                    | EJEMPLO                                                                             | PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN IMPRESA-3D                         |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Muros     | Predominio de paramentos verticales                            |    | Fabricación aditiva (por deposición de material en altura)  |
| Textura   | Rugosidad horizontal                                           |    | Ejecución por cordones de impresión horizontal              |
| Curvas    | Trazados en arcos y esquinas redondeadas                       |  | Flexibilidad de movimiento de la boquilla                   |
| Vanos     | Abertura estrechas y verticales                                |  | Interrupción de los cordones sin soporte para dinteles      |
| Refuerzos | Adición de fibras, barras horizontales o verticales interiores |  | Impresión de mezclas fluidas combinadas con otros elementos |

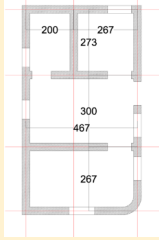

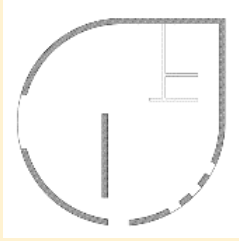
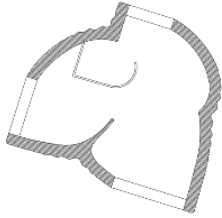
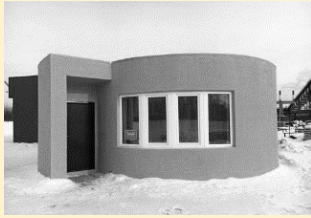
| ELEMENTOS    | CONDICIONES ARQUITECTÓNICAS                                                                  | EJEMPLO                                                                             | PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN IMPRESA-3D                                  |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Luces        | Distancias de espacios domésticos (max. 3-4 mts.) por entresijos o techumbres independientes |    | Resistencia de elementos a compresión y flexión con refuerzos        |
| Alturas      | Un piso (2,5 mts.) o dos con losa convencional                                               |   | Capacidad de los paramentos y refuerzos                              |
| Formas       | Configuraciones compactas y centralizadas                                                    |  | Alcance limitado de los equipos por su instalación y capacidad       |
| Distribución | Interiores escasamente particionados con amplitud central                                    |  | Elaboración de paramentos a partir de posición radial de los equipos |
| Volumen      | Construcciones pequeñas e Independientes                                                     |  | Magnitud de los equipos y procesos involucrados                      |

Tabla 3. Relación de condiciones arquitectónicas y procesos de la construcción impresa-3D fuente: Elaboración propia2022).

## CONCLUSIONES

La construcción impresa-3D es un procedimiento de edificación nuevo que sugiere capacidades productivas y características arquitectónicas y constructivas inéditas. Constituye una tecnología incipiente y diversa que está emergiendo en distintas partes del mundo. Se están definiendo procesos y materiales, así como equipos y aplicaciones, y se han levantado varias construcciones experimentales, las cuales destacan la velocidad de ejecución, la reducción de costos y el control digital. La gestión de la construcción impresa-3D permite un diseño integrado mediante BIM y la planificación de diferentes características. Aunque se requiere masificar esta tecnología que inicialmente replica edificios convencionales, los ejemplos a la fecha revelan algunas características particulares.

Las pruebas elaboradas con mezclas de micro-hormigón y un robot Kuka R120 han permitido ejecutar diversas piezas mostrando la capacidad de fabricación aditiva, en tiempos breves y sin moldajes (de acuerdo con el método *Concrete Printing*), con gran versatilidad de formas y control de variables. Los casos revisados de viviendas completas efectuadas en distintas partes del mundo muestran condiciones constructivas y atributos arquitectónicos similares, los cuales se orientan a características formales de envolventes, volumetría y terminación. También, los modelos digitales efectuados de diferentes diseños arquitectónicos con condiciones de construcción-impresa 3D exhiben una variedad y potencialidad expresiva, con procesos y espacialidades singulares. Se trata de una novedosa recopilación de condiciones arquitectónicas de esta nueva tecnología

automatizada de edificación para impulsar futuros proyectos con este sistema.

La construcción impresa-3D genera paramentos extensos y rugosos, promoviendo edificios de formas centralizadas, horizontales y opacas. La modelación digital permite gestionar y optimizar la construcción, en especial con envolventes curvas, que producen nuevas estrategias de diseño. Estas condiciones expresan un desarrollo arquitectónico concentrado en la organización espacial, con edificios sinuosos, dedicados a nuevas actividades y expresiones. El panorama de la construcción impresa-3D sugiere, entonces, una evolución del trabajo arquitectónico y del paisaje edificado. ▲▲

## BIBLIOGRAFÍA

- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016) Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), 209-225.
- Burkhardt A. y Alucena E. (2020) *Análisis de las Variables que Intervienen en el Tiempo Durante el proceso de Impresión de Hormigones 3D en un Brazo Robótico*, Memoria de Título Ingeniería Civil, U. del Bío-Bío, Chile.
- Carrasco, P. E. (2019). *Diseño de mezclas de hormigón para su uso en tecnología de impresión 3d, a partir de materiales disponibles en la región del Bío-Bío*. Memoria Ingeniería en Construcción, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- Craevoir, F., Duarte J., Bartolo H., Bartolo P.J. (2019) Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. Sustainable Development, *Automation in Construction*, 103, 251-267.
- Davtalab, O. (2018) Perspectives on a BIM-Integrated Software Platform for Robotic Construction through Contour Crafting, *Automation in Construction* 89, 13-23.
- Delgado Camacho, D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, 110-119.
- García-Alvarado R., Forcael-Durán E. y Pulido-Arcas J. (2020) Evaluación de Colaboración Extrema con modelación BIM para la Enseñanza de Proyectos de Edificación, *ArquitecturaRevista* 16, 137-153.
- Ghaffar, S. H., Corker, J., & Fan, M. (2018) Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93, 1-11.
- Hager, I., Golonka, A., y Putanowicz, R. (2016) 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, 151, 292-299.
- Lagomarsino, S. (2015) Seismic assessment of rocking masonry structures *Bulletin of Earthquake Engineering* volume 13, pages97-128, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9609-x>.
- Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., y Rüter, P. (2016) Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Automation in Construction*, 72, 347-366.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., y Thorpe, T. (2012) Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21(1), 262-268.
- Lim S., Buswell R.A., Valentine P.J., Piker D., Austin S.A., De Kestelier X. (2016) Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components, *Addit. Manuf.* 12, pp. 216-230.
- Liu, Y., Lu, D., Wang, Y., y Liu, H. (2016). The sliding and overturning analysis of spent fuel storage rack based on dynamic analysis model. *Sci. Technol. Nucl. Ins.*, 2016
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting. *Automation in Construction*, 13, No. 1, pp. 5-19.
- Ma, G. W., Wang, L., y Ju, Y. (2018). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61(4), 475-495.
- Martínez-Rocamora A, García-Alvarado R, Casanova-Medina E, González-Böhme LF, y Auat-Cheein F. (2020) Parametric Programming of 3D Printed Curved Walls for Cost-Efficient Building Design. *Journal of Construction Engineering and Management*. 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001811.
- Niño-Soto A. y Chávez-Martínez S. (2020) Metabolismo urbano: Reflexiones sobre el crecimiento urbano y el consumo energético, *Revista AUS* 27, 80-85.
- Perkins, I., y Skitmore, M. (2015) Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1-9.
- Sungwoo, L., Richard, B., Thanh, L., Rene, W., Simon, A., Alistair, G. y Tony, T., (2011) Development of a viable concrete printing process. "28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction", Seoul, s.n., pp. 665-670.
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., y Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261-276.
- Torres, R. (2016) *Diseño de hormigón para impresión 3D*. Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67255/TORRES%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20hormig%C3%B3n%20para%20impresi%C3%B3n%20en%203D.pd?sequence=3&isAllowed=y>