

Architectural Digital Design for 3D Printing Housing: Search for 3D Printing in Construction Trends for a Design Methodology

Pablo Banda-Pérez¹, Rodrigo García-Alvarado¹, Claudia Muñoz-Sanguinetti¹

Universidad del Bío-Bío, Chile
pablo.banda2001@alumnos.ubiobio.cl
rgarcia@ubiobio.cl
clmunoz@ubiobio.cl

Abstract. This paper proposes the development of a methodology for the digital generation of valid 3D-printed houses designs and fabrication programming, in the search for an emerging architectural language of this technology. The aim is to develop a transparent, generic and variable modeling and management process, based on some parametric patterns for 3D printing, architectural and construction design knowledge. That serves as an outline or insight of what can be designing architectural 3d-printed forms in the Construction 4.0 era. Preliminary results, discussion and further work are presented.

Keywords: 3D-Printing Construction, Digital Fabrication, Parametric Design, Generative Design, BIM, File to Factory.

1 Introducción

La impresión 3D consiste en la implementación de medios robotizados para la deposición secuencial de capas horizontales que mediante su apilamiento forman el volumen habitable. Destaca primeramente la impresión en polvo con aglomerante (Pegna, 1997) y luego la extrusión de material cerámico con el Contour Crafting (Khoshnevis, 2004; Khoshnevis & Rosanne, 1998). Los experimentos en construcción impresa-3D que han surgido en los últimos años han demostrado la capacidad de levantar con versatilidad paramentos auto-

soportantes con diversas mezclas, desarrollando formas curvas, en tiempos reducidos y excluyendo el uso de moldajes (García-Alvarado et al., 2021).

Diseño Digital para Construcción Impresa 3D

En cuanto a la digitalización, se han observado propuestas en plataformas BIM con traducción de modelos, que incluyen “*slicing*” de componentes específicos (Forcael et al., 2021; Sakin & Kiroglu, 2017), como también mecanismos de gestión de edificios completos que gestionan diseños pre-existentes (Zhang & Khoshnevis, 2013), pero no se han detectado propuestas paramétricas totales para Impresión 3D de construcciones. De lo poco que se devela en las experiencias pioneras, se observa principalmente el uso de Grasshopper® como una herramienta para la producción de instrucciones de impresión a gran escala.

Por otro lado, la apertura a la retroalimentación del diseño para el análisis de desempeños ambientales en etapas tempranas ha sido reconocido como fundamental para la sustentabilidad de esta nueva técnica constructiva (Dixit, 2019). Esta observación sugiere la necesidad para una aproximación digital integrada y paramétrica a las soluciones de diseño, en cuanto a su ajuste rápido para la variación y mejora de desempeños.

Objetivos

Debido a la complejidad de los sistemas de diseño digital y su parametrización, el siguiente trabajo consiste en una primera versión de un método, para entender el problema de diseño y su resolución mediante acciones de diseño, variables y procesos en general. Planteando como objetivos específicos:

1. Generar un algoritmo capaz de producir viviendas, desde su geometría completa hasta la especificación de su ruta de impresión de elementos. Esto supone la asociación válida de variables pertinentes, tanto a la arquitectura como a la impresión 3D.
2. Proponer un sistema de control geométrico, para la coherencia compositiva entre la geometría de vivienda y los trazos de impresión 3D.
3. Encontrar las tendencias de diseño del sistema y sus características arquitectónicas, en el propio algoritmo y sus resultados.

Otras variables resultantes como la espacialidad lograda, serán recogidos en el proceso para producir mejoras en el algoritmo.

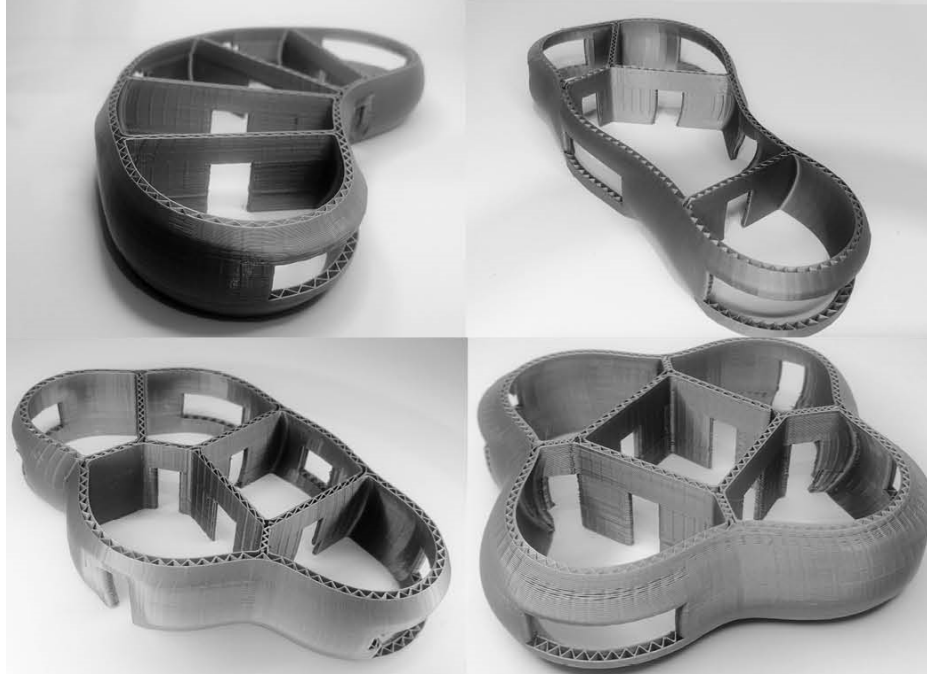


Figura 1. Prototipos a escala de Vivienda Impresa-3d Fuente: Autores, 2021.

2 Metodología

2.1 Aspectos de Diseño para Impresión-3d.

La siguiente metodología busca desarrollar un algoritmo para el diseño y la gestión de la impresión 3D de viviendas utilizando modelado paramétrico. Esta primera versión busca la implementación del diseño para lograr la configuración formal y material de viviendas impresas en 3D, válidas para tempranamente reconocer algunas tendencias, que permitan posteriormente producir una metodología general de diseño para edificios con impresión 3D.

La implementación de medios digitales posibilita el diseño arquitectónico abordando la complejidad formal a través de redes de decisiones y relaciones insumo-producto. De la práctica actual con herramientas de modelado paramétrico y CAD, algunos componentes para llevar a cabo un algoritmo capaz de crear viviendas 3D válidas son los siguientes:

Tabla 1. Aspectos y oportunidades de los medios digitales actuales. Fuente: Autores, 2021.

Patrones de Diseño Paramétrico	Soluciones genéricas para problemas bien descritos (Woodbury, 2010)
Comandos y Geometría Parametrizada (GH)	Oportunidades de geometrización para la satisfacción de requerimientos y variables pertinentes, en los mismos comandos de interfaces de diseño paramétrico.
Flujo de trabajo CAD-CAM (3D)	Oportunidad de creación de sistema paramétrico que pueda especificar rutas de impresión para las máquinas disponibles
Complejidad Formal	La impresión 3D habilita a la diversidad formal de soluciones arquitectónicas, con curvaturas u otras formas intrincadas son posibles.

Requerimientos

Los elementos antes mencionados gestionan una serie de requerimientos para lograr el algoritmo. Principalmente se separan entre requerimientos de edificación y digitales. Los primeros incluyen requerimientos arquitectónicos y de construcción, con los que se establecen variables, capacidades exigidas y restricciones.

Tabla 2. Requerimientos de edificación. Fuente: Autores, 2021.

Edificación	Capacidades arquitectónicas básicas: envolvente, segregación espacial, muros y elementos adyacentes, área habitable (mt ²)
Impresión 3D Construcción	Definición adecuada de muros, estabilidad, trazado de impresión de los muros (cordones) y tipos de trazo.

Los requerimientos digitales corresponden a capacidades deseables del algoritmo a generar.

Tabla 3. Requerimientos digitales. Autores, 2021.

Variaciones de Diseño	Capacidad de entregar distintas opciones de viviendas para variables limitadas.
“Archivo a la Fábrica”	Proposición de sistema digital-generativo capaz de definir directamente un archivo de impresión 3D.
Productos diversos	Capacidad de elaborar archivos geométricos, para impresión y evaluación de desempeños (BPS).

Limitaciones

Este trabajo no abarca la optimización y coordinación de rutas y robots (Abou Yassin et al., 2020), como tampoco la sensibilización de parámetros de la impresión del cordón de concreto (Kazemian et al., 2019; Tay et al., 2019) o análisis de sistemas de bombeos, etc. Sin embargo, establece variables como capacidades, las que con base experimental, se podrán validar y vincular para asegurar la integridad material de las soluciones. No se considera tampoco techumbres, no obstante la evidencia plantea otros conocimientos de fabricación puntuales, alejados del alcance de esta propuesta.

2.2 Diseño de Tareas

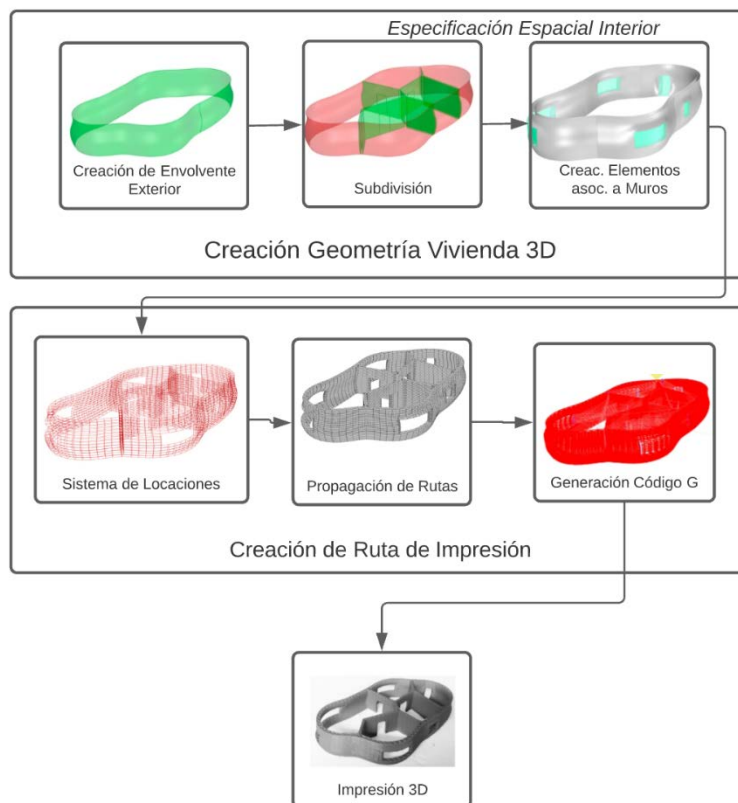


Figura 2. Tarea de Diseño de la propuesta. Fuente: Autores, 2021.

La estrategia de solución de problemas de diseño que orienta la topología del sistema paramétrico desarrollado se denomina diseño de tareas. En este caso

de estudio, observamos el método llamado descomposición / solución / recomposición (Chandrasekaran, 1990) el cual consiste en escoger la descomposición más idónea para el problema de diseño, generar especificaciones para los subproblemas resultantes, tomar y resolver estos subproblemas como problemas de diseño.

En impresión 3D en general el proceso se establece desde la creación o existencia de un modelo, y un proceso de generación de la ruta de impresión. A nivel de requerimientos arquitectónicos, la Creación del Modelo establece las capacidades básicas de: sus áreas, volumetría general y subsecuente habilitación de particiones y particularidades básicas. La Creación de Ruta de Impresión 3D desarrolla el detalle fino de la vivienda y sus muros.

3 Desarrollo

3.1 Creación de Geometría para la Vivienda Impresa-3D.

Creación de Envolvente Exterior

La creación de la envolvente exterior establece la forma volumétrica de la vivienda, según variables formales y variables fijas que caracterizan las capacidades de una vivienda. Esta envolvente se rige por las siguientes variables formales independientes:





Tabla 4. Variables principales para Creación de Envolvente Exterior. Fuente: Autores, 2021.

Unidades Espaciales	Localización de espacios. Puntos localizados a través de restricciones de cercanía como combinatorias entre puntos a distanciamientos fijos.
Radio local	Radio de las unidades espaciales, caracterizando un área circular a fusionar. Radios locales de cada recinto según programa arquitectónico.
Umbral	Nivel de oscilación de la curvatura en el plano horizontal, transitando desde una forma convexa hasta un conjunto de volúmenes unidos.
Curvatura en Z	Valor en un rango -1 a 1 para establecer el nivel y sentido de doble curvatura de muros, para producir curvas cóncavas, nulas y convexas.

La relación entre estas variables plantea la creación de formas que varían en dos rangos complementarios (ver figura), en un tránsito desde formas cóncavas a formas compuestas. Los rangos detectados necesitan revisión y base empírica para ser acotados en cuanto a sus límites: La relación con la impresión 3D se complejiza con el posible desplome al llegar a doble curvatura.

La relación de la Forma Compuesta y su baja compacidad podría producir un posible perjuicio energético.

Tabla 5. Casos típicos taxonomía Envolvente Exterior. Fuente: Autores, 2021.

	Curvatura Simple	Doble Curvatura
Forma Cuasi-Cóncava		
Forma Compuesta		

Especificación Espacial

Especificación espacial establece el detalle medio de la vivienda 3D: La partición y especificación de elementos arquitectónicos básicos dentro de la envolvente especificada en la etapa anterior. Principalmente se compone de la subdivisión del espacio y la creación de elementos asociados a muros.

Subdivisión Espacial

La subdivisión espacial distribuye el ambiente interior segmentando selectivamente las fronteras entre las unidades, construyendo superficies de partición para definir las rutas de impresión. Esta tarea se rige por las siguientes variables formales independientes:

Tabla 6. Variables principales para Subdivisión. Fuente: Autores, 2021.

Variable	Descripción
Fusión Espacial	Valores enteros que establecen qué espacios serán fusionados. Entrada de usuario.
Grososores de muro	Grososores de muros interiores y exteriores.

Como resultados de la subdivisión se observan la creación de superficies de muros interiores y exteriores, agrupados según los espacios que envuelven. Si bien esto es representado por las unidades espaciales en la tarea anterior,

esta tarea permite la fusión de espacios a través de la omisión de subdivisiones interiores por entrada de usuario.

Creación de Elementos Asociados a Muros.

La tarea especifica el espacio para dar cabida a mobiliario embebido, puertas y ventanas en la vivienda. Hasta ahora los dos últimos elementos han sido considerados. Esta tarea se rige por las siguientes variables formales independientes:

Tabla 7. Variables principales para Creación de Elementos Asociados a Muros. Fuente: Autores, 2021.

Existencia puertas	Valores enteros y reales que establecen qué divisiones interiores poseerán puertas. Entrada de usuario.
Existencia ventanas	Valores enteros que establecen qué superficies de la envolvente poseerán ventanas. Entrada de usuario
Valor de Adaptación	Adapta el muro curvo para alojar un elemento de curvatura simple.

La inclusión de vanos en la envolvente curva se realiza a través de adaptabilidad de ésta, de forma de localmente modificar la curvatura y adaptarse al contorno de los objetos.

Como resultados de esta tarea se observan finalmente las superficies y sólidos intervenidos y adaptados localmente. Además, se establecen objetos intermediarios o voids para realizar especificaciones en el Sistema de Locaciones.

3.2 Creación de Rutas de Impresión

La ruta de impresión en 3D constructivo debe adaptarse localmente a la geometría de los muros de la vivienda 3D, para asegurar tanto continuidad geométrica como estructural. En este algoritmo lo anterior se resuelve a través de un Sistema de Locaciones, donde luego se ejecuta una propagación de patrones y la generación del Código G.

Definición de Locaciones

La definición de Locaciones corresponde al patrón *plantilla* (Woodbury, 2010) o construcción de marcos abstractos y simples *que aíslan la estructura para la propagación controlada de detalles geométricos* (ibid.), los cuales corresponderán a patrones de curva para ruta de impresión. La inclusión de

este Patrón de Diseño Paramétrico asegura la continuidad de la ruta de impresión teniendo en cuenta las relaciones entre muros y su complejidad geométrica. Esta tarea se rige por las siguientes variables formales independientes:

Tabla 8. Variables principales para Sistema de Locaciones. Fuente: Autores, 2021.

Grosor del Módulo	Grosor de casillas para el trazado del sistema de locación. Subdivide según un valor en mt. Típicamente se asume un valor igual o menor al grosor de los muros base a utilizar.
Subdivisión del Módulo	Subdivisión del muro en el sentido exterior e interior, de modo de poder establecer distintas capas de patrones en el muro. Valor por defecto =1.
Altura de Capa	Altura de cada capa de impresión. Típicamente se utiliza una fracción menor al grosor del cordón de impresión.


Este módulo posee dirección y sentido, como también relaciones de adyacencia entre los demás módulos. El Sistema de Locaciones controla la penetración entre trazado perimetral (*outline*) y trama interior (*infill*), lo que por ahora consta de un valor fijo de 25% de penetración con respecto a la ruta exterior en espera de retroalimentación empírica.

Propagación de ruta impresión 3D

Tabla 9. Variables principales para Propagación de ruta impresión 3D. Fuente: Autores, 2021.

Patrones Exteriores	Patrones exteriores (polilíneas). Estos patrones pueden ser segmentos rectos o no, se debe asegurar la continuidad.
Patrones Interiores	Patrones interiores (polilíneas). Estos patrones pueden poseer cualquier forma, en las instancias actuales se usan los lados largos de un triángulo isósceles. Se debe asegurar la continuidad.
Soportes	Necesitan asegurar continuidad y frondosidad para apoyar impresión. Pueden ser reemplazados por otra estrategia.

Los patrones de curva, o segmentos a propagar dentro de un módulo del Sistema de Locación, definen la ruta de impresión. Como resultantes se obtienen las siguientes etapas de impresión por capa: (1) Perímetro externo, (2) perímetro interno, (3) relleno muro perimetral externo, (4) relleno particiones internas, (5) soporte. El ordenamiento de cada trazado particular sigue la curva de la envolvente. La definición de soportes impresos es una opción por defecto que deberá ser revisada, no obstante, existe referencia de su implementación (Tay et al., 2019).



De esta manera se define el proceso constructivo de los muros que constituyen la vivienda impresa. Como entradas de usuario de forma de polilíneas, permiten la definición de texturas.

Generación de Código G

El código G producido asume una vivienda monolítica a ser ejecutada con una impresora cartesiana, que tenga un volumen de trabajo igual a superior al volumen mínimo donde cabe la vivienda. La formalización del Código G son establecidos a través de Silkworm® de Grasshopper®.

4 Resultados.

4.1 Evaluación de Modelos Generados

Los modelos generados son consistentes en cuanto a reflejar en detalle las características de lo perseguido por el algoritmo. La congruencia interna permite establecer una relación directa desde los objetos más primitivos de esta rutina (ubicaciones espaciales) y las rutas de impresión. No obstante lo anterior, es necesario juzgar a nivel arquitectónico y de ejecución de la impresión de éstas a través de los siguientes apartados.

4.2 Versatilidad

Los resultados revelan la versatilidad del proceso de diseño en cuanto a la diversidad de organizaciones funcionales como también su adecuación al sistema constructivo, generando nuevas formas arquitectónicas variables y consistentes (ver figura 1). La geometrización en general deberá acotar sus alcances en base a resultados empíricos.

4.3 Inspección Inmersiva a Través de Realidad Virtual

La revisión con dispositivos y modelos inmersivos de Realidad Virtual busca evaluar las espacialidades resultantes y detalles arquitectónicos finos y medios, además de la congruencia material de las soluciones de vivienda 3D. La navegación de tres instancias generadas arrojó la siguiente evaluación:

Tabla 10. Resultados de Inspección Inmersiva a Través de Realidad Virtual. Fuente: Autores, 2021.

Espacialidad	Se reporta una deformación perceptual de los espacios debido al perímetro curvo, como también al encuentro entre muros interiores (rectos) y perímetro. La gestión del espacio interior a través de muros rectos y su relación perpendicular con la envolvente establece espacios interiores cerrados, autocontenidos, limitando la experiencia de totalidad en el sistema propuesto.
Congruencia Digital	Incongruencias leves en cuanto a gestión de Sistema de locaciones, en cuanto a omisión de locaciones en vanos, distorsiones. Esto sugiere fortalecer el Sistema de Locaciones para ampliar cualidades particulares sobre todo entre encuentros entre muros.

4.4 Análisis por Prototipado.

La impresión con plástico, aunque no exhibe el comportamiento mecánico y físico de la impresión 1:1, simula la relación entre grosores, alturas y rutas si es que se mantiene su relación a escala.

Tabla 11. Resultados de Análisis de Prototipado. Fuente: Autores, 2021.

R. Porcentaje Penetración	Penetración entre trazos externos (outlines) e internos (infill) debe ser revisado, ya que si bien establece una buena ligazón produce un patrón texturado distinguible desde el exterior.
R. Sistema de Locación	El patrón texturado detectado podría ser también heredado del Sistema de Locación, por lo cual es necesario la sensibilización.
R. Dobles Curvaturas	Comprometen la integridad estructural de forma local, esto es visible cuando los cordones impresos se separan al avanzar en la vertical.
Movimientos sin impresión	El ordenamiento de los trazos de impresión por etapas en cada capa puede ser mejorado, ya que se observan diversos movimientos sin impresión (travel moves) los cuales incrementan el tiempo de impresión, podrían producir marcas en la impresión e incluso riesgo de accidentes en obra.

5 Discusión y Trabajo Futuro

Este trabajo ha propuesto un proceso de diseño generativo para viviendas impresas en 3D, gobernada por parámetros que habilitan la generación de soluciones variadas de geometría no-estándar, adaptables a distintos requerimientos funcionales y localizaciones. El prototipado inicial expone una rutina que genera viviendas válidas para imprimir, no obstante es necesario confirmar en impresión 3D a tamaño real. Algunos aspectos a considerar para trabajos futuros son:

Implementación de un Sistema de Locaciones. como una estrategia conveniente para vincular topología y orientaciones geométricas de los diseños de las viviendas con la ruta de impresión. La sensibilidad de este sistema debe verificarse para evitar incoherencias.

Analizar la Calidad espacial de los Diseños. La definición de la envolvente, como la subdivisión interna, se realizan según criterios de adecuación a los comandos de impresión. Es necesaria la implementación de más análisis arquitectónico en el sistema para asegurar su calidad espacial, como también la implementación de espacios conectores y/o zonas adjuntas. Actualmente los autores participan en una desarrollo de viviendas con impresión 3D, en el concurso Marcopolo 100. De esta experiencia, el análisis arquitectónico de decisiones y particularidades podrá retroalimentar este algoritmo o la creación de otro superior

Perspectiva de creación espacial. Los espacios interiores son generados por una secuencia jerárquica, lo que les deja privados de establecer órdenes desde sí mismos. Otros sistemas podrían, por ejemplo, desde el muro y la relación con los otros componentes o la deriva propia del trazado impreso, establecer una vivienda 3D en el momento de ejecución, invirtiendo el proceso de diseño desde la construcción.

La generalización de esta propuesta de método de diseño se sustentará revisando la experiencia en Marcopolo 100, según modelos de diseño canónicos como el FBS (Gero, 1990) y la propuesta de R. Oxman para Diseño Digital (Oxman, 2006), e incluyendo además la evaluación de desempeños ambientales de edificación.

6 Referencias

- Abou Yassin, A. A., Hamzeh, F., & al Sakka, F. (2020). Agent based modeling to optimize workflow of robotic steel and concrete 3D printers. *Automation in Construction*, 110 (November 2019), 103040. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103040>
- Chandrasekaran, B. (1990). Design problem solving. A task analysis. *AI Magazine*, 11(4), 59–71.
- Dixit, M. K. (2019). 3-D Printing in Building Construction: A Literature Review of Opportunities and Challenges of Reducing Life Cycle Energy and Carbon of Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290(1), 182–191. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012012>

- Forcael, E., Pérez, J., Vásquez, Á., García-Alvarado, R., Orozco, F., & Sepúlveda, J. (2021). Development of communication protocols between bim elements and 3D concrete printing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/app11167226>
- García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda, P. S. (2021). Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11(6), 254. <https://doi.org/10.3390/buildings11060254>
- Gero, J. (1990). Design prototypes: A knowledge-based schema for design. *The AI Magazine*, 11(4), 26–36.
- Kazemian, A., Yuan, X., Davtalab, O., & Khoshnevis, B. (2019). Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction. *Automation in Construction*, 101(August 2018), 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.022>
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Khoshnevis, B., & Rosanne, D. (1998). Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*, 13(2), 53–56. <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>
- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229–265. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5(5), 427–437. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5)
- Sakin, M., & Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 134, 702–711. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>
- Tay, Y. W. D., Li, M. Y., & Tan, M. J. (2019). Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 271(February), 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.007>
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design* (Routledge, Ed.; 1st Editio). <https://architecture.mit.edu/publication/elements-parametric-design>
- Zhang, J., & Khoshnevis, B. (2013). Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. *Automation in Construction*, 29, 50–67. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.08.006>