

Architectural Diversity of Residential Buildings through Digital Design and Robotic Construction

Rodrigo García-Alvarado¹, Ginnia Moroni-Orellana^{1,2}, Pablo Banda Pérez^{1,3}

¹ Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, rgarcia@ubiobio.cl

² Universidad San Sebastián, Concepción, Chile, ginnia.moroni@uss.cl

³ Facultad de Arquitectura, Diseño y Construcción, Universidad de Las Américas, Chile

Abstract. The housing demand in Latin America has promoted to build big complexes with repetitive designs to ensure their execution and commercialization, but neglecting the differences in occupation, cultures, ages, abilities, genders, climates and locations. Producing low quality, environmental deterioration and social alienation. This work exposes a parametric programming and robotic construction strategy to develop a varied residential process. Based on structural volumes and 3d-printed walls, to provide a diversity of housing configurations. The modular generation of volumes and development of the envelope is programmed to meet various thermal and occupational conditions, with printing trajectories for the walls according to the equipment, execution processes and material capacities. A repertoire of 494 residential volumes has been defined and prototype walls have been made, suggesting an innovative design system, which provides a new paradigm for housing construction with digital technologies and robotic execution to diversify residential quality.

Keywords: Housing, Digital Fabrication, 3d-printed Construction, Parametric Design, Mass-customization

1 Introducción

América Latina tiene la tasa de urbanización más alta del mundo y una demanda creciente de viviendas para renovación y crecimiento poblacional (Greene y Mora, 2021, Gilbert, 2001). Lo que ha impulsado una producción inmobiliaria, mayormente basada en sistemas constructivos convencionales con formas repetitivas de vivienda, a pesar de la alta diversidad geográfica y social del territorio (Salas, 2000). En estas iniciativas masivas, muchas veces el diseño arquitectónico se supedita a estrechas normativas y resultados económicos, generando soluciones similares basadas en una intuición comercial con razonamientos financieros, que producen un panorama urbano con alienación cultural y desánimo social (Rojas, 2017).

Sin embargo, las tecnologías avanzadas de diseño y construcción permiten desarrollar edificios con producción automatizada y diversidad, mediante la personalización masiva de viviendas (Pinto Duarte, 2005). Usando con este fin la modelación digital, para definir diferentes diseños, programar los recursos y dirigir máquinas de control numérico para elaborar la construcción (Sass, 2007; Cascone et al, 2017). Varias experiencias alrededor del mundo están mostrando incipientes capacidades al respecto, en particular con construcción impresa-3D, aunque esta tecnología todavía requiere refuerzos estructurales y desarrollar procesos de diseño adaptados a condiciones locales (Khajavi et al, 2021; Guaman et al, 2022). Cambiando el trabajo arquitectónico orientado a soluciones únicas, para desarrollar procedimientos basados en secuencias de tareas y parámetros variables para planificar viviendas diversas y adecuadas (Weger et al, 2021). Este artículo presenta una experiencia en desarrollo de programación de diseño y construcción robótica para edificios residenciales en América Latina, con el fin de explorar nuevas vías para la demanda habitacional.

2 Desarrollo

La metodología está compuesta de tres fases; 1) la conceptualización de una estrategia constructiva modular, 2) la programación del proceso de diseño y construcción, y 3) la ejecución de prototipos y edificios ejemplares que verifican la estrategia, culminando con una discusión de condiciones y proyecciones.

2.1 Definición de Volúmenes

La propuesta se inició por la participación de los autores en un concurso internacional y se basa en combinar una estructura principal modular y muros impresos-3D, para realizar edificios de vivienda diversos y eficientes. La estructura principal se define con una trama de columnas y losas de hormigón armado, con pocos muros centrales, para poder soportar edificios de diferentes tamaños con un sistema constructivo habitual en Latinoamérica. Luego, se pueden ejecutar muros impresos-3D en cada piso para las divisiones y envolventes externas conformando distintas unidades habitacionales, de formas variadas y condiciones térmicas adecuadas a diferentes climas.

La estructura se compone de una retícula longitudinal con un módulo central de 2 mt. de ancho para desarrollar un corredor central, y módulos residenciales a ambos lados de 3x6 mts transversales, más 1 mt. extendida en el borde. La trama se establece con unas reglas según longitud y número de plantas para cubrir varias alternativas de edificios, desde un solo módulo residencial en una planta (sin pasillo), hasta 24 módulos de longitud y 25

plantas con pasillo y escalera lateral y ascensores, con el mismo sistema estructural (Fig. 1).

Esta estrategia permite definir 600 formas diferentes de edificios entre los rangos establecidos; 106 se descartan por su estrecha proporción vertical, (que requiere más elementos estructurales), pero las 494 alternativas permitidas pueden albergar edificaciones desde 40 hasta 29.600 m². de superficie total, y de 29 a 24.100 m². de superficie útil (descontando circulaciones y la mitad de los bordes para balcones). Este repertorio puede abarcar desde viviendas unifamiliares y series adosadas, hasta bloques residenciales y torres, como son la mayoría de los proyectos inmobiliarios y sitios urbanos de América Latina, así como también formar conjuntos con combinación de volúmenes edificatorios. Un conjunto puede disponer diferentes tipos de vivienda con el mismo sistema constructivo y procesos de diseño, para promover la diversidad social y una organización eficiente.

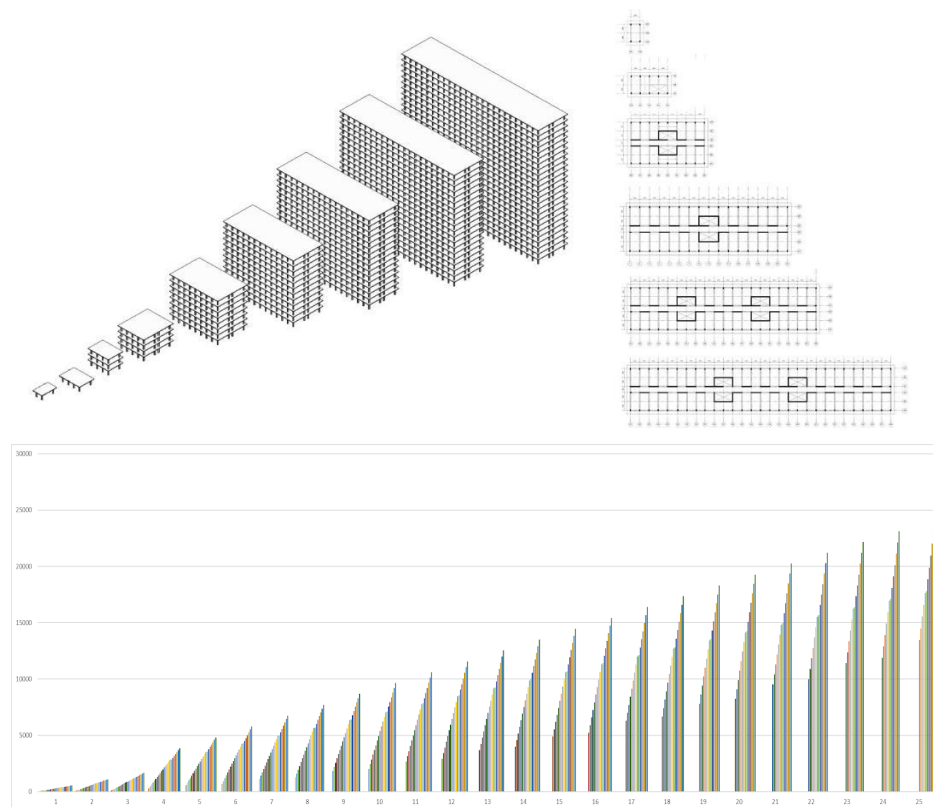


Figura 1. Ejemplos de volúmenes y plantas (arriba), y gráfica de superficie total de cada alternativa según cantidad de módulos y plantas (abajo). Fuente: Autores, 2022

Los elementos estructurales definidos ocupan alrededor del 2-3% de la superficie total construida por planta, por lo que la estrategia puede involucrar menos material estructural que una configuración tradicional. Además, las edificaciones residenciales en las zonas sísmicas habituales en América Latina, tienen alrededor del 50-75% de divisiones como muros de carga, incluyendo la separación entre unidades lo que suele limitar los tipos de casas o departamentos, definiendo usualmente de 2 a 6 posibilidades con cambios menores (solo cantidad de dormitorios). La trama propuesta tiene unos pocos muros de carga en el corredor principal (más columnas en el borde), por lo que se puede ocupar la mayor parte de superficie en planta libre, para distribuir desde un módulo para un estudio individual, hasta todo el piso (48 módulos más corredor) para un gran departamento o recinto comunitario, o muchas combinaciones, incluso de dos o tres plantas con escalera interior y vacíos. Esto otorga una gran versatilidad para acomodar diferentes tipos de viviendas y diseños en el mismo edificio, incluyendo terrazas, espacios comunes, diferentes formas de habitaciones y relaciones exteriores (en particular en la envolvente). Los que se pueden combinar con el diseño digital y la construcción automatizada para definir con los propios habitantes, incluso durante la ejecución, y desarrollar cambios en la vida útil del edificio, para adaptarse a la diversidad y progresión de la vida contemporánea.

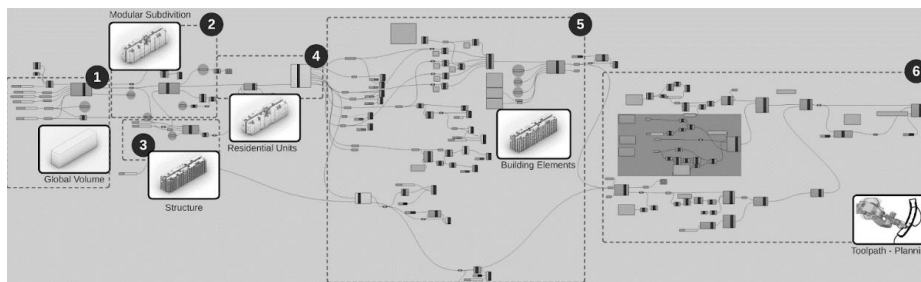


Figura 2. Flujo general de la programación paramétrica. Fuente: Autores, 2022

2.2 Diseño Paramétrico

Además, se está desarrollando un flujo de trabajo paramétrico, en relación con modelos BIM, dibujos CAD y datos de diferentes especialidades, hasta la elaboración de archivos para planificar la ejecución y controlar la impresión 3D robótica (Davtalab et al, 2018; Anane et al, 2021; Ashrafi et al, 2022). También se producen visualizaciones para revisar los diseños, que pueden ser elaborados para la participación de los usuarios en algunas decisiones de diseño y/o modificación de las viviendas a través del tiempo.

La programación se desarrolla en varios pasos (Fig. 2); primero, la definición del volumen global de acuerdo con el tamaño del sitio y la regulación local, así como el monto de la inversión [1], con base en las reglas establecidas para los planos y pisos [2]. En segundo lugar, la subdivisión modular, según la

grilla definida [3] y luego, el modelado de la estructura en base a los tamaños y elementos definidos [4]. La información geométrica generada se puede vincular a un modelo BIM para detallar piezas y datos asociados, y también al análisis estructural para verificar el desempeño de acuerdo a las condiciones locales. Se ha detallado por completo y analizado estructuralmente el diseño de dos edificios, con elaboración de planos y planificación constructiva.

El paso siguiente de la programación es la distribución de las unidades residenciales con base en los requerimientos de los usuarios y el plan comercial del conjunto [5]. Esta parte se puede integrar con el modelo BIM para la elaboración de renders y recorridos de Realidad Virtual, tal como se ha realizado en los dos edificios en desarrollo, con el fin de revisar el tratamiento interior y distribución de espacios. La organización de las unidades se basa en reglas de adyacencia y permite incluir espacios externos como terrazas y balcones, y también puede elaborar una lista de tipos de vivienda con superficie por unidad para la gestión comercial y de instalaciones (Fig.3).

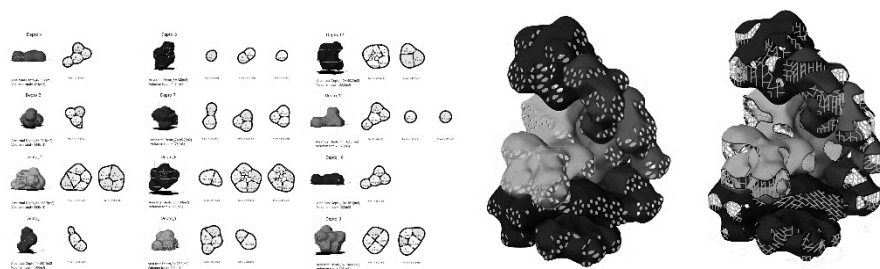


Figura 3. Unidades Residenciales. Fuente: Autores, 2022

Luego, en la programación se detallan los elementos constructivos a ejecutar con construcción automatizada [6], en particular los muros impresos en 3D (Fig. 4). Esta elaboración implica la generación de algunas formas digitales nuevas para unir y/o dividir elementos de construcción, y para exportar datos para programación y planificación. Los muros impresos-3D son en su mayoría de forma curva para aprovechar la flexibilidad geométrica de la impresión robótica y la mayor resistencia lateral, así como la fluidez del espacio interior, la diversidad y la identidad de la expresión exterior. Por último, la programación de la trayectoria para la impresión-3D se genera en función de la subdivisión de las paredes. Estas trayectorias están definidas por las características del equipo específico y la mezcla que se utilizará. Incluyendo el corte vertical de elementos con la altura de capa adecuada y la deformación del material, y la duración de la movilidad del equipo. Además, la capacidad de producción o almacenamiento de la mezcladora y la bomba puede condicionar los tamaños de las piezas y la secuencia de impresión. En ese paso, las normas locales consideran la textura de la superficie de la pared, el refuerzo

interno y el aislamiento para los requisitos térmicos, acústicos y contra incendios. Los archivos para ejecutar la construcción se generan y generalmente se verifican en el sitio con algunos refinamientos.

2.3 Construcción Robótica

La ejecución de los edificios residenciales propuestos combina elementos prefabricados para la estructura principal e impresión 3D robótica para los muros. La estructura principal está compuesta por piezas regulares de hormigón armado; losas, columnas, vigas y muros de las mismas formas y tamaños (10 elementos diferentes). Con barras de refuerzo de acero similares y encofrados modulares, en particular tableros monolíticos de aluminio, que pueden usarse repetidamente y producir una terminación lisa, evitando tratamientos adicionales. El hormigón se puede preparar en fábrica y vaciar en obra con bombas elevadoras, utilizando una mezcla autocompactante que proporciona un acabado plano y de rápido endurecimiento. Esta técnica en los últimos años ha sido cada vez más implementada en varios países latinoamericanos para diferentes tipos de construcciones, demostrando una importante reducción de tiempos de ejecución y presupuesto adecuado, en particular con piezas regulares. Este procedimiento implica un detallado proceso de modelado y planificación del edificio para organizar el suministro e instalación de piezas, así como la coordinación y actuación de proveedores; estudios de ingeniería y arquitectura con una adecuada gestión del diseño e integración de servicios y otros elementos constructivos con plataformas BIM. Estas capacidades también están aumentando en la región con una producción inmobiliaria regular.

Los refuerzos de barras de acero se suelen preparar en obra con plantillas trazadas, en base a láminas generadas por el modelo BIM e instaladas con gráficas por teléfono o tabletas, y en algunos casos, marcas de Realidad Aumentada (RA). Los encofrados modulares se preparan igualmente por familias y láminas preparadas en modelo BIM, y se montan en obra con máquinas de apoyo automatizadas y fijación manual. El concreto puede ser provisto y volcado por empresas de concreto premezclado, y el proceso general controlado por un gemelo digital del modelo BIM y revisar la calidad de las partes realizadas, mediante monitoreo automatizado.

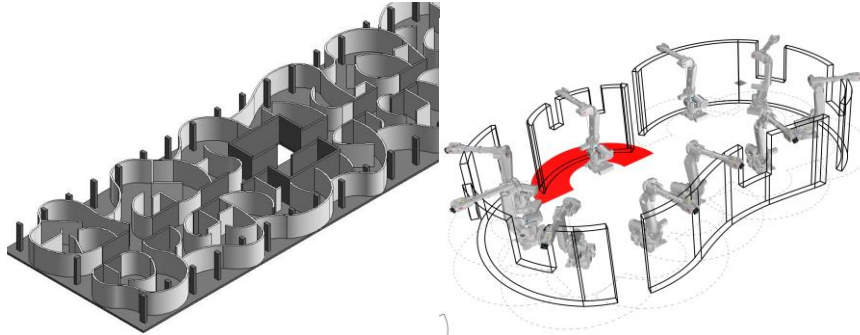


Figura 4. Estrategias de impresion-3d de los muros. Fuente: Autores, 2022

La impresión 3d de elementos constructivos es todavía una tecnología incipiente, con pocas experiencias en Latinoamérica y en el mundo, por lo que para esta propuesta se está probando su aplicación, mediante una estrategia de ejecución en obra, por medio de la disposición secuencial de un brazo robótico de largo alcance, para ejecutar las divisiones y paramentos con diferentes condiciones térmicas y tratamientos. Se realizaron pruebas con un robot Kuka R120 2500 en funcionamiento estacionario, con bomba de impulsión y mezcladora de hormigón de 120 lts.



Figura 5. Ejemplos de Muros Impresos-3d. Fuente: Autores, 2022

Se han realizado prototipos de muros impresos-3D con diferentes características y tamaños (Fig. 5). Algunos de baja altura para probar el proceso de ejecución y la incorporación de revestimientos, aislamientos y barras de apoyo; además otros segmentos de altura completa con superficies texturizadas, formas curvas e integración de servicios, ventanas y puertas. También se está ensayando la duración y mantenimiento, así como el traslado, el afianzamiento a los suelos y la estanqueidad entre piezas. Además, se han probado los diferentes roles de las personas involucradas en este nuevo

proceso de construcción; arquitectos que desarrollan y ajustan el diseño y programación, técnicos de construcción que gestionan la bomba de hormigón, expertos en automatización que configuran el robot y la impresión. Estos prototipos han demostrado la capacidad de imprimir elementos con materiales y trabajadores locales, y adaptar equipos extranjeros. También se realizaron visitas con público a los prototipos de muros, consultando la apreciación de sus propiedades materiales y formales. Los visitantes expresan mayormente una valoración positiva de estos elementos, en particular por su originalidad, durabilidad y curvatura, cuestionando algunos aspectos de color y textura, pero con amplias expectativas de integrar en ambientes domésticos.

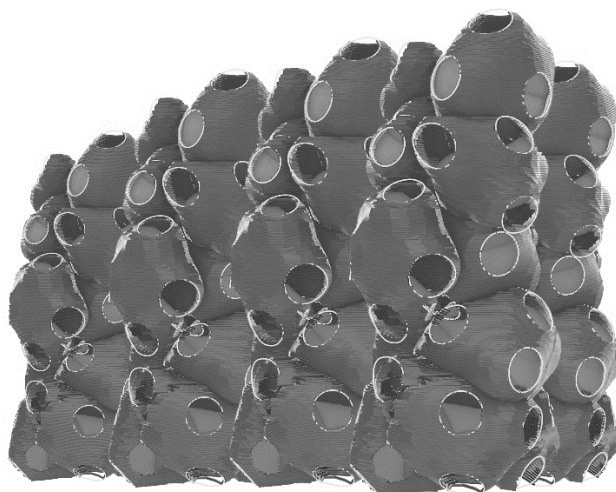


Figura 6. Agrupación Residencial. Fuente: Autores, 2022

3 Discusión

Propuestas de edificios habitacionales con una estructura principal y divisiones variables o cabinas intercambiables, han sido sugeridas varias veces durante el siglo XX (Canales, 2021), pero han sido escasamente aplicadas. En América Latina, los conjuntos de PREVI-LIMA y Elemental plantearon intenciones similares, con viviendas unifamiliares, pero sin un sistema constructivo o procedimiento de diseño. También, muchas viviendas actualmente consideran o realizan espontáneamente autoconstrucción de sus habitantes; pero con baja calidad de ejecución debido a la falta de control de diseño y construcción. La estrategia planteada aquí integra procesos formales y equipos automatizados para regular la elaboración del diseño y construcción

habitacional, con una gran diversidad de tipos y formas de edificación, incluyendo alternativas de baja a alta densidad urbana. Aunque todavía en desarrollo y con varias condiciones que deben ser verificadas y sistematizadas.

El repertorio de volúmenes permite un sistema de ejecución para la estructura principal, con piezas regulares, que pueden ser realizadas por constructores locales para diferentes edificios. Comprobando condiciones particulares, como la resistencia estructural y la disponibilidad de moldajes y concretos adecuados. La integración de muros impresos- 3D para divisiones y envolventes proporciona una gran flexibilidad y variedad arquitectónica, que debe combinarse con los servicios para baños y cocinas, y también con sistemas de calefacción y refrigeración. Además, la ejecución en cada planta debe planificarse y prepararse en obra, lo que tiene diferentes ventajas y desventajas, y en ambos casos tener una solución adecuada para aislamiento, sellado y afianzamiento. Asimismo, el perfil curvo de las paredes es atractivo, pero debe integrar ventanas, puertas y muebles. Estos desafíos se están gestionando en la ejecución de unos edificios iniciales, por lo que se adquirirá experiencia al respecto.

Probablemente, la característica más prometedora de la estrategia es la participación de los usuarios en el diseño y la construcción, ya que esta posibilidad ha sido sugerida en muchas iniciativas, pero se ha implementado poco en la ejecución real de viviendas. La organización del proceso de diseño, con desarrollo algorítmico, de manera que pueda integrar diversas variables y generar alternativas de formas, es una capacidad central para esta condición, aplicando un proceso “anexacto” de proto-geometrías (Lynn, 1998). En esta interacción se debe probar la participación de usuarios a través de visualizaciones y decisiones de diseño, incluido valorar su impacto en los resultados económicos y desempeño del edificio, así como en su ejecución. Además, la posibilidad de cambiar las particiones durante la vida útil de la vivienda es un potencial particular, que depende de la tecnología de los muros. Este desarrollo avanza en el sueño largamente planteado de casas adaptables, y también desafía el rol de la arquitectura en este proceso. En que la calidad y sensación emocional de los espacios se puede regular y adaptar a sus habitantes según características constructivas variables. Así, el diseño arquitectónico puede cambiar desde establecer formas únicas por intuiciones básicas, hasta gestionar sistemas y equipos de trabajo con soluciones variadas que abarquen la diversidad y la sensibilidad de la vida.

Agradecimientos. Este trabajo se está desarrollando en el Proyecto INES I+D 22-26 de la Universidad del Bío-Bío, Chile, con la participación de los autores y los investigadores Claudia Muñoz, Eric Forcael, Alexander Opazo, Aracely Rocha, Javier Sepúlveda, Patricio Carrasco y Fernando Pedreros, apoyo del Proyecto FONDECYT 1121730, y el Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción – CITEC de la Universidad del Bío-Bío. El diseño de mezcla utilizado en prototipos de muros impresos-3D cuenta con registro de Propiedad Intelectual 2020–A–4080.

Referencias

- Ashrafi N, Nazarian S, Meisel N, Pinto Duarte J, (2022) A grammar-based algorithm for toolpath generation: Compensating for material deformation in the additive manufacturing of concrete, *Additive Manufacturing*, Vol. 55, 102803
- Anane W, Iordanova I. & Ouellet-Plamondon C, (2021) The use of BIM for Robotic 3d Concrete printing, *CSCE 2021 Annual Conference* pp 325–336
- Cascone P., Galdi F., Giglio A. & Ciancio E. (2017) Architectural self-fabrication, *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 32, S39-S53
- Canales F. (2021) *Mi Casa Mi Ciudad: Privacidad en un Mundo Compartido*, Barcelona: Ed. Puente
- Davtalab, O., Kazemian, A., & Khoshnevis, B.. (2018) Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting. *Automation in Construction*, 89, 13–23
- Gilbert A. (2001) *La Vivienda en América Latina*, New York: Banco Interamericano de Desarrollo,
- Greene M. y Mora R. (2021) *Hábitat Residencial*, Santiago: Ed. ARQ,
- Guamán Rivera, R., Martínez Rocamora, A., García Alvarado, R., Muñoz Sanguinetti, C., González Böhme, L.F. y Auat Cheein, F. (2022) Recent developments and challenges of 3D-printed construction: a review of research fronts. *Buildings*, 12 (2) 1-32
- Lynn G. (1998) *Folds, bodies & blobs*, Ed. La Lettre voLee.
- Khajavi S.; Tetik M., Mohite A, Peltokorpi A, Li M, Weng Y and Holmström J (2021) Additive Manufacturing in the Construction Industry: The Comparative Competitiveness of 3D Concrete Printing, *Applied Sciences*, vol. 113865
- Pinto Duarte J. (2005) *Towards the Mass Customization of Housing: The Grammar of Siza's Houses at Malagueira*, *Environment and Planning B*
- Rojas L. (2017) *Ciudad Vertical: La “Nueva Forma” de la precariedad habitacional*, *Revista 180*, N°39, 1-17
- Sass, L. (2007) Synthesis of design production with integrated digital fabrication, *Automation in Construction* Vol.16, 298-310
- Salas J. (2000) *La Industrialización Posible de la Vivienda Latinoamericana*, Bogota: Escala.
- Weger D., Gehlen C., Korte W., Meyer-Brotz F., Scheydt J. y Stengel T. (2021) Building rethought – 3D concrete printing in building practice, *Construction Robotics* Vol. 5, pp 203–210