

Planning & Design Platform of Buildings By Robotic Additive Manufacturing for Construction.

Pablo Banda^{1,2}, Patricio Carrasco¹, Rodrigo García-Alvarado¹, Claudia Muñoz-Sanguinetti¹

¹ Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

² Universidad de las Américas, Santiago, Chile.

pablo.banda2001@alumnos.ubiobio.cl; pecarrasco@ubiobio.cl; rgarcia@ubiobio.cl; clmunoz@ubiobio.cl

Abstract. The following paper describes and comments a construction planning platform for the Additive Manufacturing of wall modules, as a set of design and planning actions that interwove robotic, material capacities and spatial characteristics. Goal here is to take semi-conventional strategy and augment the algorithmic process for design and knowledge acquisition regarding design oriented to 3D Printing Construction.

Keywords: Additive Manufacturing for Construction, 3D Printing, Digital Fabrication, Parametric Design.

1 Introduction

La aplicación Manufactura Aditiva para la Construcción (AMC) con extrusión de material semi-fluido o *Contour Crafting* (Khoshnevis, 2004; Khoshnevis & Rosanne, 1998) ha sido utilizado ampliamente en el mundo en la impresión de edificios con mezclas cementicias. En su mayoría casas de un piso, se observan formas que varían desde lo ortogonal, al redondeo de esquinas y muros levemente curvos (García-Alvarado et al., 2021).

El presente artículo presenta una plataforma para preparación de la impresión de un edificio de dos pisos, desde la descomposición hasta diseño a escala media y de detalles, como también de planificación de la rutina de impresión. Estos detalles en parte incrementan el diseño de la solución a nivel de muros (meso) hasta nivel de detalles (ruta de impresión y ediciones in situ). El objetivo de esta realización es observar en las distintas etapas el conocimiento de diseño y de manufactura aplicada.

1.1 Diseño Digital Asociado a Manufactura Aditiva

En diversos actores actuales de la AMC se observa la implementación de Modelado Paramétrico como Rhinoceros® con Grasshopper® sin esclarecer la metodología de diseño propiamente tal. Algunas excepciones han sido revisadas, como una propuesta de viviendas individuales (Banda et al., 2021; Cascone et al., 2020) y reconstrucción de edificios no-estándar poniendo el énfasis en la solución de componentes estructurales optimizados (Alabbasi et al., 2021; Kontovourkis & Tryfonos, 2020).

Por otro lado, la AMC ha tenido un mayor desarrollo en su implementación desde plataformas Building Information Modeling (BIM), limitando su vinculación con la Manufactura Aditiva al proceso de *slicing* o laminado (ver figura 1), el que ocurre procesando un modelo de malla poligonal .STL del edificio completo (Allouzi et al., 2020; Davtalab et al., 2018; Ding et al., 2014), o de un grupo de muros individuales previamente segregados (Forcael et al., 2021; Khajavi et al., 2021) . La generalidad de este tipo de experiencias BIM el trabajo sobre diseños arquitectónicos convencionales sin ahondar de forma intensiva en la repercusión misma que la AMC puede realizar sobre el lenguaje arquitectónico.

2 Metodología

La metodología toma como base el flujo genérico observado (figura 1), incorporando la tarea de subdivisión. Entendiendo la escasas y disparidad de procesos documentados a la fecha, dentro de estas etapas se produce un desarrollo exploratorio e interpretativo para incluir requerimientos en el desarrollo algorítmico y tectónico que ofrece la plataforma.

La tarea de diseño principal se realiza a través de Rhinoceros-Grasshopper, en cuanto a módulos de especificación geométrica, detallado de volúmenes y *slicing* personalizado. Implementación y corroboración con actuales plug-ins de simulación robotizada.



Figura 1. Proceso genérico de preparación para imprimir un objeto digital. Fuente: Autores, 2022.

2.1 Diseño

La plataforma lograda se basa en la recepción de un diseño existente a través de un modelo BIM, el que en este caso corresponde a un edificio consistente de dos pisos y tres unidades residenciales. Basado en una estructura de losas y pilares, libera a los muros impresos de transmisión de esfuerzos, vale decir, su solicitud estructural solamente es de autosoportantes. Como características generales de este proyecto está la curvatura simple (2.5D) de los muros exteriores.

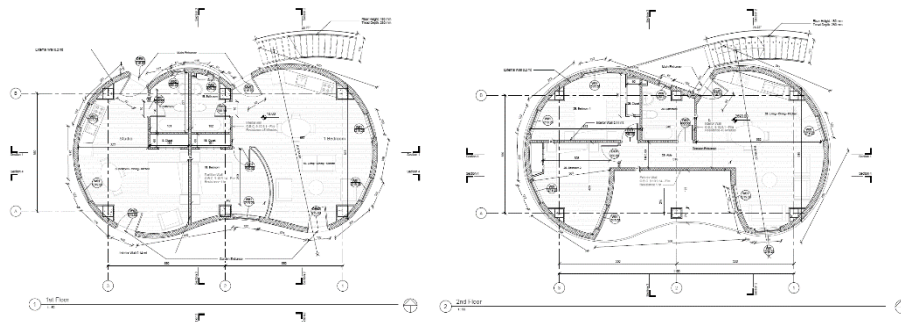


Figura 2. Proyecto arquitectónico a procesar por el algoritmo. Fuente: Autores, 2022

3 Resultados

3.1 Diseño del Proceso:

Este proceso transcurre luego y escindido del diseño arquitectónico, ampliando el proceso de laminado o *slicing*, generación y ejecución del código de impresión para sumar niveles de detalle al proyecto en la etapa de particularidades del muro. A través de este proceso además se establece un enfoque y énfasis en el diseño del muro y la ruta de impresión.

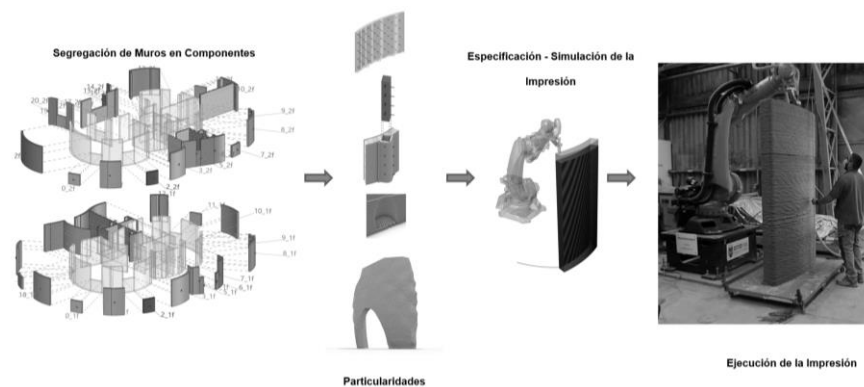


Figura 3. Principales subtareas de la Plataforma. Fuente: Autores 2022.

Tabla 1. Subtareas de diseño de la plataforma.

| Nombre Sub-Tarea | | Definición breve | Producto |
|---------------------------|-------|--|-------------------------------------|
| Segregación muros | de | Satisface distintas restricciones tales como: Peso resultante del elemento, volumen máximo del robot, relación del muro con el vano. | Geometría de muros segregados |
| Particularidades muro | de | Incrementación de detalle del muro: Uniones con piso, cielo, columnas y vanos, como también la inclusión de patrones texturados. | Rutas de muro con particularidades. |
| Código de Impresión | | Se obtiene integrando distintos parámetros: brazo robótico, materiales y extrusión, espacio de trabajo. Etc. | Código de impresión |
| Ejecución de la impresión | de la | Proceso de Manufactura Aditiva del Elemento Muro | Muro impreso en 3D. |

Fuente: Autores, 2022

3.2 Resultados de la subdivisión

Las variables de la subdivisión establecen de forma directa distintas formas para los muros resultantes en forma de cascada o sub-locación volumétrica de modo de:

- Volumen máximo está establecido de forma singular por la capacidad del manipulador robótico y su kinemática.
- Capacidades técnicas como la sofisticación de la bomba, o la capacidad material para hacer buenos amarres estructurales en los cold joints cuando un muro consista en más de una rutina de impresión.
- Capacidad de levante, el que limita directamente la dimensión de los muros

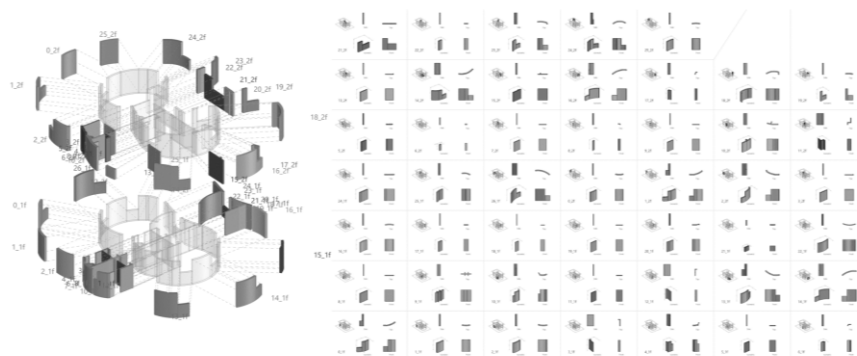


Figura 4. Despliegue de muros a imprimir bajo premisa de montacarga liviano.
Fuente: Autores 2022.

La intersección de estas restricciones va secuencialmente generando muros más pequeños, no obstante estas piezas de muros pueden ser fusionadas y contrastadas por el volumen máximo, de modo de ser cortados los muros.

3.3 Características del muro

En esta etapa se empieza a definir las características del muro, en un ir y venir desde el volumen principal hasta los trazos que finalmente configurarán la ruta del robot manipulador ya que algunos detalles están en el volumen y otros deben ser trazados directamente o modificando *paramétricamente* los trazos de la ruta de impresión.

El muro principalmente es caracterizado por su perímetro o *outline*, el cual es la frontera física de su volumen. Otro trazo característico de la impresión es la trama estructural de relleno o *infill*, la cual consiste en un vaivén modulado con cierta frecuencia y que une ambos perímetros. En la instancia de trabajo debido a la situación de otoños e inviernos sumamente helados, el *infill* es problemático ya que produce puentes térmicos con posibilidad de congelamientos en el interior de los recintos, por lo que la conexión estructural entre caras exterior e interior del perímetro del muro se realiza por pequeñas barras estriadas (ver Figura 6 a la derecha). Estas barras actúan anclando

ambas caras del perímetro también en su estado fresco colaborando con la estabilidad y el aplomo.

3.4 Texturado de muros y cualidades.

Cualidades prestacionales necesarias de adherir a los muros, en cuanto a su capacidad de instalación y recepción de instalaciones. Las siguientes adiciones han sido exploradas:

- Adición de vacíos a nivel de contacto con el suelo y superior.
- Diseño y relación lateral con los demás muros.
- Relación con objetos que han de portarse: ventanas y puertas.
- Otros

El texturado corresponde a la adición de una dimensión extra de diseño, una ampliación del diseño original. Como tal, establece en un margen limitado pero notable un aprovechamiento a nivel plástico de la tecnología de AMC. A nivel geométrico se establece en un rango acotado con centro en el volumen original, el cual debe delimitarse con respecto al grosor del cordón impreso, el alto de capa, características del material y número de la capa en cuestión, entre otros parámetros, ya que localmente estos aspectos podrán establecer localmente situaciones de excentricidad del centro de masa y desplomes. La relación cóncavo-convexa de la forma establece una granularidad del patrón, el cual posiblemente posea una gran expresividad plástica (ver Figura 5).

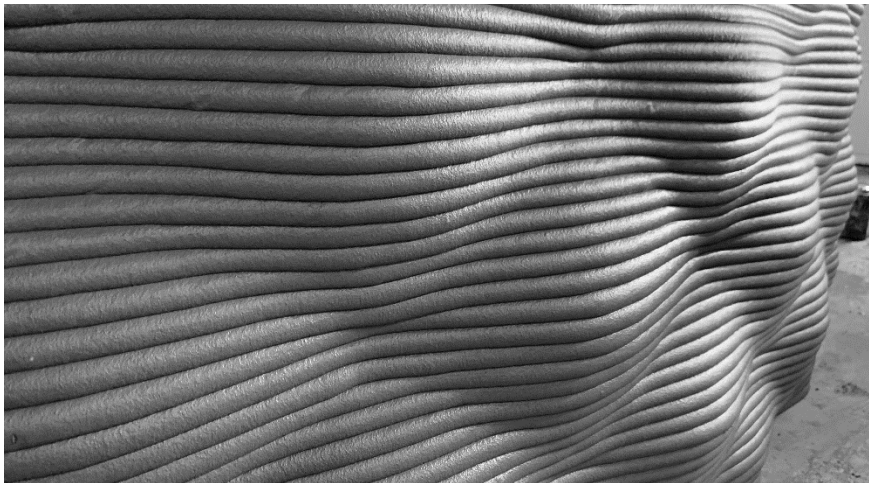


Figura 5. Detalle de textura de muro impreso. Fuente: Autores 2022.

3.5 Generación de Ruta de y Ejecución de Manufactura Aditiva

En esta etapa se toman los trazos modificados con texturas y demás singularidades incluidas en el muro para establecer la ruta del robot. Es deseable para esta etapa terminal coordinar todos los trazos y planos que conformarán los movimientos lineales del robot en una secuencia de espiralización o *vase mode* (términos de impresión 3D FDM), para asegurar zonas sin costuras.

En un proceso singular de manufactura con es importante verificar alturas con respecto a la superficie de impresión, geometría de la herramienta de impresión y la relación entre espacio de trabajo robótico y la pieza a imprimir. Como en esta plataforma dichos aspectos están incluidos dentro del algoritmo de segregación, es importante la corroboración final mediante una simulación digital del proceso de impresión, que consiste en correr el código ruta del robot y verificar la existencia de singularidades. La ejecución de la AMC propiamente tal puede realizarse desde ese entonces, en donde la ocurrencia de otros fenómenos físicos provenientes de los múltiples parámetros de la deposición del material podría hacer fallar la impresión. Estas vicisitudes son importantes y deberán ser analizadas y devueltas como conocimiento de manufactura a la plataforma.



Figura 6. Impresión de muro prototipo según alcance robot Kuka. Fuente: Autores 2022

4 Discusión

4.1 Segmentación y su Visualización como Espacios de Diseño

La segmentación realizada en la instancia estudiada se produjo a través de la intersección de rangos paramétricos materiales (peso propio, capacidad del robot, relación con vanos), donde será necesario realizar mayor exploración en trabajos futuros para pasar de la elección manual de restricciones de segmentación a una opción que deduzca mejores opciones y las fundamente comparativamente con resultados comparados. Independientemente de lo anterior, la visualización del espacio de diseño se posicionó como una herramienta valiosa para el análisis de viabilidad de la AMC por medios robotizados, para conocer un panorama de las características del muro impreso en 3D a través de la variación de distintas premisas de subdivisión.

Programar la etapa de segmentación con un diseño ya establecido acusa el nivel de implementación del conocimiento de fabricación con el robot en la etapa de diseño; es así como radios de curvatura, puntos de inflexión, de concomitancia entre muros, etc. Los que podrían acoplarse de buena manera con el espacio de trabajo del robot. En desarrollos futuros este acople podría ser abstraído e invertido, para producir herramientas y posiblemente sistemas generativos basados en regímenes de portes, trazos de arcos y su relación y gestión con respecto a la geometría global.

4.2 Nivel Muro como Objeto de Diseño

En manufactura aditiva para la construcción es tendencia general el enfoque en el muro para solucionar la impresión del edificio, siendo así también esta una unidad de análisis e intervención ha sido probada desde la especificación y evaluación de desempeños, pudiendo levantar diseño de patrones interiores del muro para desempeño térmico (Alkhalidi & Hatuqay, 2020; Giraud, 2019). Esto es aún acrecentado en cuanto a que otras tipologías como techumbres todavía son raramente exploradas (Craveiro et al., 2019; García-Alvarado et al., 2021). A nivel global esto es coherente con una aproximación Top-Down (Bernal & Eastman, 2011; Carrara & Novembri, 2000; Sacks et al., 2004) en los que la abstracción de una parte para la solución del todo ha sido planteada como una situación favorable.

Conclusiones y trabajo futuro

El presente trabajo estableció una rutina de obtención de código de impresión para manipuladores robóticos desde un diseño dado. Su principal diferencia con las experiencias BIM antes mencionadas radica en la inclusión de diversos criterios para obtención de módulos de muro y el aumento del diseño de éste

en mayores niveles de detalle y de funcionalidad. Como una experiencia en desarrollo para producir una construcción completa (2023), las situaciones en terreno derivarán en adquisición de conocimiento de fabricación valioso para introducir a la plataforma.

Entendiendo el contexto actual en el que se produce la construcción y su cadena productiva caracterizada por una abrumante intervención de elementos de especialidades fabricados convencionalmente, embebidos y que modifican el muro como tal, se hace necesario el relevamiento a nivel sistémico del muro de forma abstraída de la programación misma de las tareas de la plataforma. De esta forma se podría integrar de mejor manera distintos procesos constructivos y salvaguardar la distinción de diseño de la manufactura aditiva. La implementación de ingeniería de sistemas basada en modelos (MBSE) ha sido implementada para estos propósitos (Valdes et al., 2016), además como una alternativa a espacios de diseño diversos (Bernal, 2016).

Referencias

- Alabbasi, M., Chen, H., & Agkathidis, A. (2021). Developing a Design Framework for the 3d Printing Production of Concrete Building Components. 713–726.
- Alkhalidi, A., & Hatuqay, D. (2020). Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study. *Journal of Building Engineering*, 30(May), 101286. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101286>
- Allouzi, R., Al-Azhari, W., & Allouzi, R. (2020). Conventional Construction and 3D Printing: A Comparison Study on Material Cost in Jordan. *Journal of Engineering*, 2020(Cc). <https://doi.org/10.1155/2020/1424682>
- Banda, P., García-Alvarado, R., & Muñoz-Sanguinetti, C. (2021). Architectural Digital Design for 3D Printing Housing : Search for 3D Printing in Construction Trends for a Design Methodology. In *SIGraDi (Ed.), SIGraDi 2021, Designing Possibilities* (pp. 1409–1422).
- Bernal, M. (2016). From Parametric to Meta Modeling in Design. December 2016, 579–583. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-815>
- Cascone, P., Laddaga, M., & Forestiero, F. (2020). DIGITAL CONSTRUCTION: 3D Printing for Performative Houses. *Digital Concrete 2020*, 28, 804–813. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_79
- Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. (2019). Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. *Automation in Construction*, 103(March), 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>
- Davtalab, O., Kazemian, A., & Khoshnevis, B. (2018). Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting. *Automation in Construction*, 89(December 2017), 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006>

- Ding, L., Wei, R., & Che, H. (2014). Development of a BIM-based automated construction system. *Procedia Engineering*, 85, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.536>
- 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. (2021). Architectural Evaluation of 3D-Printed Buildings. *Buildings*, 11(6), 254. <https://doi.org/10.3390/buildings11060254>
- Giraud, I. (2019). Incorporating Thermal Performance in Clay 3D Printing (pp. 1–10).
- Khajavi, S. H., Tetik, M., Mohite, A., Peltokorpi, A., Li, M., Weng, Y., & Holmström, J. (2021). Additive manufacturing in the construction industry: The comparative competitiveness of 3d concrete printing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/app11093865>
- 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>
- Kontovourkis, O., & Tryfonos, G. (2020). Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design. *Automation in Construction*, 110(October 2019), 103005. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103005>
- Valdes, F., Gentry, R., & Eastman, C. (2016). Applying Systems Modeling Approaches to Building Construction. July. <https://doi.org/10.22260/ISARC2016/0102>