

Terra Fibrosum: Continuous fibers reinforcement system for robotized 3d printing with earth for architecture.

Maximiliano Pazols^{1,2}, Félix Raspall¹

¹ Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile.
maximiliano.pazols@edu.uai.cl; felix.raspall@uai.cl

² Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.
maximiliano.pazols@udp.cl

Abstract. The growing pressure on natural resources and the increase in demand for construction materials highlight for the construction industry the relevance of opening space for constructive alternatives and materials with less environmental impact. Additive manufacturing has developed through various technologies, materials and scales. 3D printing for construction has grown significantly. An obvious challenge for this technology corresponds to the geometric-constructive solutions that involve other materials for mechanical reinforcement. This research works over the initial development of a construction system based on clay paste reinforced with vegetable ropes, which uses additive manufacturing protocols. Through constructive experiments that integrate string reinforcements into 3d print. The lines of work operate in: Design of architectural elements, Programming of constructive robotic routines, Rheological study of printable clay and fiber pastes and Design of effectors for extrusion of pastes.

Keywords: Digital construction, Additive manufacturing earth (AME), Robots in architecture, 3D printing Earth construction (3DPEC).

1 Introducción

Se espera que para 2060 se duplique el uso global de materiales, con un tercio de este aumento atribuible a los materiales utilizados en el sector de la edificación y la construcción (Nations Environment Programme, 2021). Esto presenta la necesidad de que materiales abundantes y menos contaminantes aumenten su proporción en soluciones constructivas capaces de cumplir con los criterios de desempeño necesarios. Por esto resulta de gran interés entender, como materiales elementales, universales y sostenibles, como la tierra, pueden ser utilizados en sistemas constructivos actualizados,

aumentando su desempeño en edificaciones gracias al potencial de optimización que presenta el diseño digital y la fabricación computarizada.

La tierra posee ventajas favorables desde una perspectiva ecológica, al ser un material altamente reciclable, con disponibilidad local y bajo consumo energético en su extracción, procesamiento y transporte. La industria de la construcción desarrolla la manufactura aditiva con fuerte foco en pastas cementicias. La contaminación ligada a productos basados en cemento sugiere la necesidad de aumentar la participación de materiales como la tierra dentro de las soluciones exploradas por la construcción digital. Los intentos de digitalizar la construcción con tierra comenzaron en 2011 (Gomaa et al., 2022); Sin embargo, en los últimos tres años se ha visto un aumento en la cantidad de proyectos de investigación que exploran el potencial de la construcción de tierra digital (Gomaa et al., 2022). Uno de los mayores desafíos en esta materia, corresponde a la posibilidad de reforzar los componentes arquitectónicos impresos en 3D con materiales resistentes a la tracción para aumentar su desempeño mecánico (Marchment & Sanjayan, 2020), este desafío se hace evidente tanto para impresión de pastas cementicias como no cementicias. En una muestra de más de 100 casos de impresión 3D para arquitectura de los últimos 5 años un 25,4% de las experiencias incluyeron algún tipo de refuerzo continuo (García-Alvarado et al., 2021). El problema de reforzar las impresiones de pastas ha sido enfrentado de diversas maneras, desde aditivos, fibras cortas, fibras continuas, fibras tejidas y no tejidas, fibras rígidas y flexibles.

Existen actualmente más investigaciones en este problema respecto a hormigón y acero, que a otras pastas como la arcilla y otros materiales de refuerzo como fibras vegetales. Por esto que resulta de interés experimentar con fibras que mejoran el rendimiento de materiales impresos basados en arcilla (Guamán-Rivera et al., 2022).

Los antecedentes vernáculos de sistemas constructivos en tierra poseen diversas técnicas trabajadas milenariamente. Entre las técnicas de construcción en tierra encontramos el adobe, el tapial o tapia, el cob, la tierra ensacada, bloque de tierra comprimida (BTC), el terrón, el adobillo, y la quinchá o bahareque entre otros (Niroumand et al., 2013).

Dentro de los métodos de refuerzos analógicos, se destaca el sistema de drizas. Exo-refuerzo de cuerdas tensadas, entramado de 3 ejes, las primeras en instalarse atraviesan el muro, para lograr esto se posicionan las cuerdas de manera transversal atravesando el espesor del muro a medida que se va ejecutando la mampostería o adición de material. Luego se amarra a los cabos sueltos transversales, con cuerdas de manera vertical y horizontal, formando una grilla en las superficies interior y exterior del muro. Este se vincula además con la viga collar instalada sobre los muros para integrar la estructura. Este

estudio procede del trabajo desarrollado por el laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y liderado por el ingeniero Julio Vargas Neuman, con el objetivo de mejorar el comportamiento ante esfuerzos dinámicos presentados en eventos sísmicos. (Giribas, 2017).

2 Metodología

Se utilizó el método de análisis comparativo de casos de estudio sobre construcción impresa a través de una recopilación de literatura relevante. Los casos revisados han sido categorizados (Fig. 1) en 2 grupos, cementicios y arcillosos.



Figura 1. Categorización de casos de estudio recogidos Instituciones Universitarias: TU Braunschweig, ETH Zürich, TU Eindhoven, IAAC, Ghent University + Institute Tech Israel, CSIDC TU Swindurne, Oficinas de Arquitectura, Rael San Fratello, Mudd Architects, y empresas, Huashang Tengda. Diagrama por Maximiliano Pazols, 2022.

Junto a una subcategorización según su condición de proyecto o investigación, según la estrategia de refuerzo, y caracterización según tecnología, escala, nivel de automatización del proceso, modulación de lo impreso, y una serie de características de los refuerzos, como flexibilidad, orientación, entramado y ubicación en el sistema constructivo, comparado, ventajas y desventajas de los distintos casos de estudio, siendo referidos en base a un ejemplo representativo de cada estrategia y características de los refuerzos continuos

El análisis de los casos revisados muestra una brecha en el desarrollo de sistemas constructivos automatizados para elementos arquitectónicos de tierra impresos en 3D con refuerzos de fibras vegetales continuas. La metodología propuesta plantea la iteración en el circuito, diseño, fabricación, evaluación y rediseño. Iniciando a través de una matriz de análisis comparativo de casos de estudio. Luego se realiza el diseño exploratorio de secuencias constructivas, para dar paso a la selección crítica y evaluación rápida de los enfoques más prometedores para profundizar sobre los sistemas probados.

3 Resultados

La investigación operó sobre tres áreas; el diseño digital de los sistemas constructivos, la fabricación de prototipos, junto con el desarrollo y adaptación de extrusoras. La primera corresponde al diseño digital del sistema constructivo, la elaboración de modelos digitales experimentales y simulaciones robotizadas, donde se estudian estrategias de refuerzo con fibras vegetales continuas para la tierra impresa, algunas asociadas a procesos de optimización estructural. La estrategia a través del método de reforzamiento por drizas plantea la posibilidad de automatizar la impresión 3D, sus patrones exteriores e intramuros para integrar el tejido de refuerzo de manera ordenada mientras se realiza la impresión. La segunda corresponde a la fabricación de una serie de prototipos en escala 1:5 de muros autoportantes de 2 metros de altura de 1 metro de largo y 0.4 metros de ancho, impresos en tierra con refuerzos, según la estrategia de refuerzo desarrollada basada en el método de drizas. Durante las primeras pruebas se realizó el posicionamiento manual de las fibras, pero se declara y destaca el potencial de automatización del tejido. La tercera corresponde al desarrollo y fabricación de una extrusora de bajo costo para la impresión 3D de pastas de barro y la adaptación de extrusoras calafateadoras activadas por un pistón de aire comprimido a través del manipulador robot y controlado desde la programación de este.

3.1 Diseño digital y simulación de secuencias constructivas.

Los primeros pasos están centrados en el diseño de estrategias constructivas a través de algoritmos que permiten parametrizar el muro a imprimir, desde ahí obtener las rutas de la herramienta (toolpath) y las primeras simulaciones de rutinas robóticas que demuestren la factibilidad de las secuencias constructivas propuestas. Las estrategias de refuerzo preinstalado e instalado durante la impresión 3D en muros ortogonales y de forma libre, fueron exploradas digitalmente (Fig.2) a través de simulaciones, en dos condiciones; ordenamiento de refuerzo en grilla regular y ordenamiento optimizado, con el fin de comparar la complejidad constructiva.

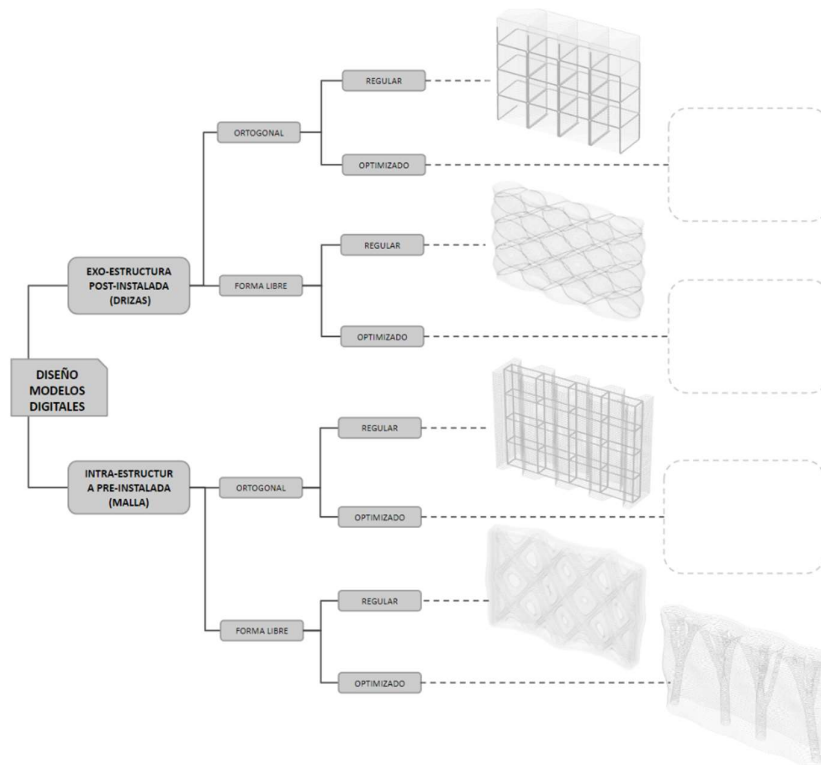


Figura 2. Exploración digital de estrategias de refuerzo, Maximiliano Pazols, 2022.

Se exploraron secuencias constructivas para resultados de muros optimizados topológicamente (Fig. 3), pero debido al incipiente desarrollo de la reología en esta investigación las formas que requieren de una mayor

estabilidad estructural basado en la pasta arcillosa, y la necesidad de complejizar sobre detalles y procesos constructivos del refuerzo, capaces de dar solución de manera versátil a la variabilidad de topologías resultantes, las estrategias de refuerzo profundizadas para ser prototipadas, se centraron en muros ortogonales con refuerzos regulares para una primera etapa de la investigación con el objetivo de aislar variables que sumarán complejidad al inicio de la experimentación.

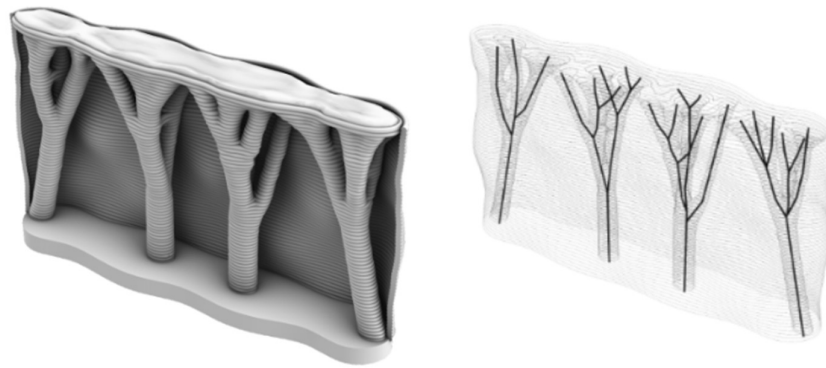


Figura 3. Optimización topológica de muros a imprimir, Maximiliano Pazols, 2022.

3.2 Exo-refuerzo, Secuencia constructiva de muro impreso con drizas.

Las maneras de vincular los cabos sueltos a través de anudaciones genera muchas llegadas a un mismo punto, por esto se buscó generar tramas de cuerda con la máxima continuidad vertical minimizando los cabos sueltos, entramando la cuerda consigo misma a través de los distintos estratos del elemento impreso. La secuencia combina la rutina de impresión con el entramado, imprime y ubica las cuerdas a lo largo de ejes transversales, dejando una extensión de cuerda fuera del muro, necesaria para luego de ser impresas las capas superiores subir este exceso y entramarlo con la misma cuerda (Fig.4). Este sistema posee varias posibilidades de entramado desde una misma grilla regular, presentando una capacidad de adaptación a patrones de entramado orientados por líneas de fuerza intensificando el refuerzo según su solicitud mecánica en función de su desempeño.

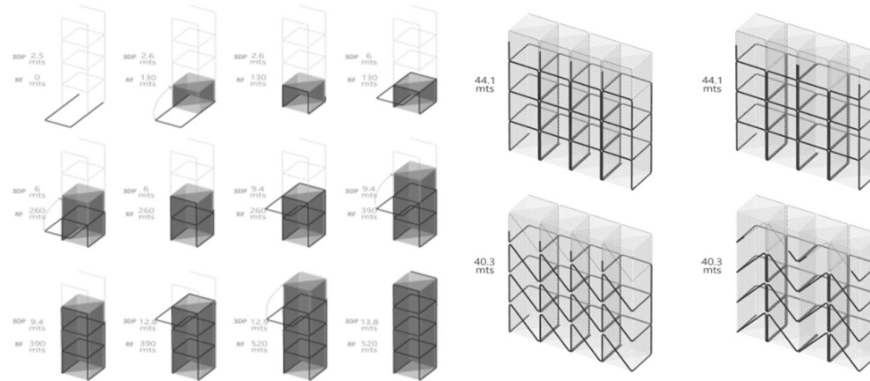


Figura 4. Secuencias, imprimibilidad/entramado. Maximiliano Pazols, 2022.

3.3 Experimentos de impresión de prototipos.

El flujo de trabajo se orientó sobre los parámetros predefinidos y los problemas observados en los experimentos iniciales realizados con los distintos sistemas de extrusión (Fig. 5).

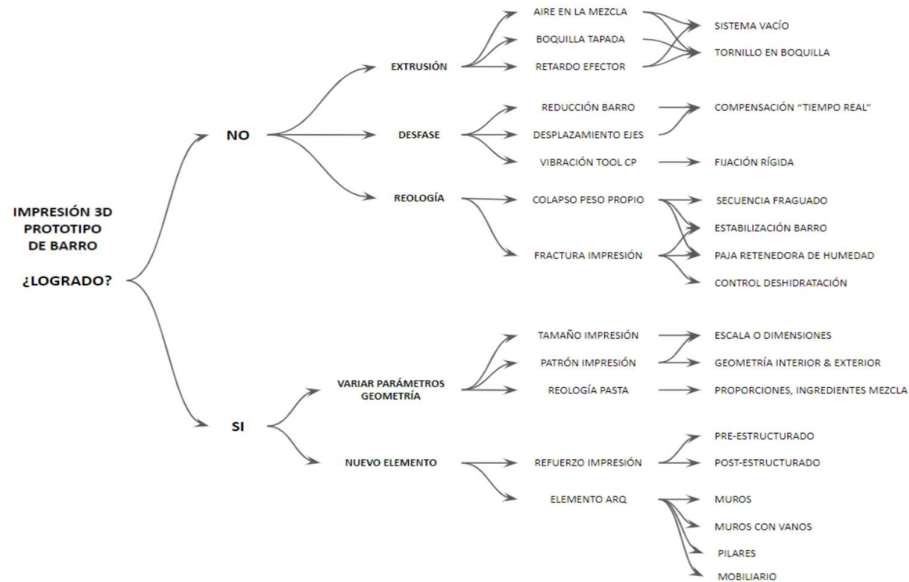


Figura 5. Diagrama de flujo experimentos impresión 3D. Maximiliano Pazols, 2022.

Estos agrupados principalmente en problemas de extrusión como aire en la mezcla, boquilla tapada que aumenta la presión interna y al destaparse expulsa un golpe de material, desfases de la impresión por reducción de la impresión al deshidratarse y problemas con la reología como colapso por peso propio en mezclas muy líquidas.

La incorporación de fibra vegetal es clave para evitar las fracturas, incluso en ambientes con deshidratación controlada, ya que esto solo funciona para elementos de dimensiones menores a aproximadamente medio metro. La fibra evita la fractura distribuyendo la pérdida de volumen por deshidratación, y además la desacelera por ser retenedora de agua. En esta investigación fueron fabricados 32 prototipos, de los cuales 26 son impresos en 3D con pasta de barro arcilloso, algunas de estas pastas incluyendo fibra vegetal, en diferentes extrusoras montadas en el manipulador robótico KUKA KR-180 R2500 (Fig. 6), 18 de estos prototipos fueron fabricados con la calafatear eléctrica que demostró ser el sistema más eficaz para las necesidades de esta investigación.

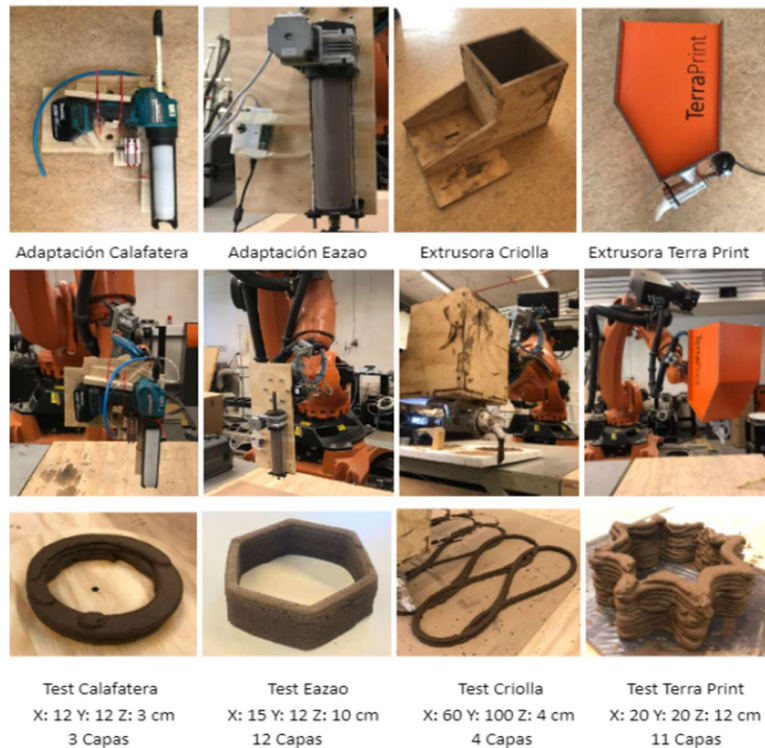


Figura 6. Prototipos de barro, y patrones de relleno. Maximiliano Pazols, 2022.

Se realizaron prototipos de muro escala 1:5, impresos en tierra con relleno de impresión que coestructuró las caras y permita lograr mayor altura en la impresión 3D, se usaron 3 patrones de línea continua donde no se detiene la extrusión (Fig. 7) Para continuar con la incorporación del refuerzo se seleccionó el patrón de relleno que posee líneas perpendiculares a la superficie exterior para asentar las cuerdas en dichos ejes transversales, y confeccionar el exo-refuerzo (Fig.8). Se completó el prototipo con 72 capas de impresión, 122 metros lineales de cordón impreso, 20 Kg o 10 litros de barro impreso (2 x 0,4 x 2 metros) en escala 1:5 (0,4 x 0,08 x 0,4 metros).

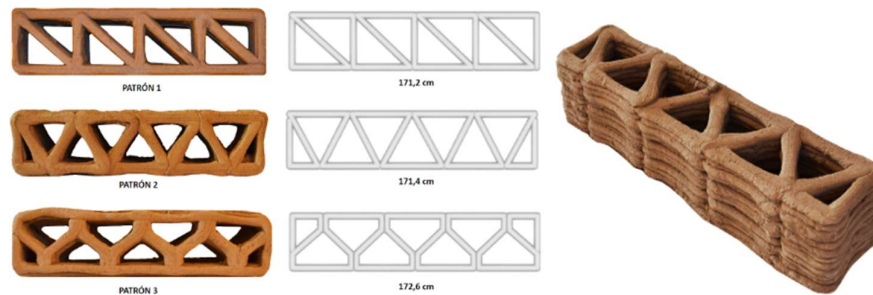


Figura 7. Prototipos de barro, y patrones de relleno. Maximiliano Pazols, 2022.



Figura 8. Manufactura aditiva robotizada en tierra, cuerda inserta entre capas impresas, muro completo escala 1:5. Maximiliano Pazols, 2022.

Todos los ejercicios de impresión fueron registrados y tabulados sistemáticamente. Describiendo patrones, composición de la mezcla al 70% \pm 5% de sólido seco, escala del modelo, cantidad de capas impresas, metros

lineales de impresión, litros de barro impreso, densidad de la mezcla, dimensiones húmedo y seco, peso húmedo y seco, peso perdido por deshidratación, centímetros, porcentaje de reducción longitudinal, su condición de refuerzo y estado de fractura o integridad. Además de parámetros de impresión como altura de capa, ancho de extrusión, velocidad de desplazamiento y velocidad de extrusión.

Estas mediciones muestran en la mayoría de los casos una pérdida de peso por deshidratación de alrededor de un 30%, lo que es coherente con el porcentaje de adición de agua de la mezcla. La reducción longitudinal está alrededor de 5% en mezclas sin fibra vegetal corta. La disminución de la reducción es notoria al incorporar fibra vegetal corta.

Se realizaron ensayos mecánicos (Fig. 9), las probetas ensayadas sin refuerzo de cuerda resistieron 2.9 kilo newton en flexión, y al incorporar refuerzo de cuerda la resistencia a flexión fue de 3.9 kilo newton, aumentando en un 34% la resistencia a flexión.

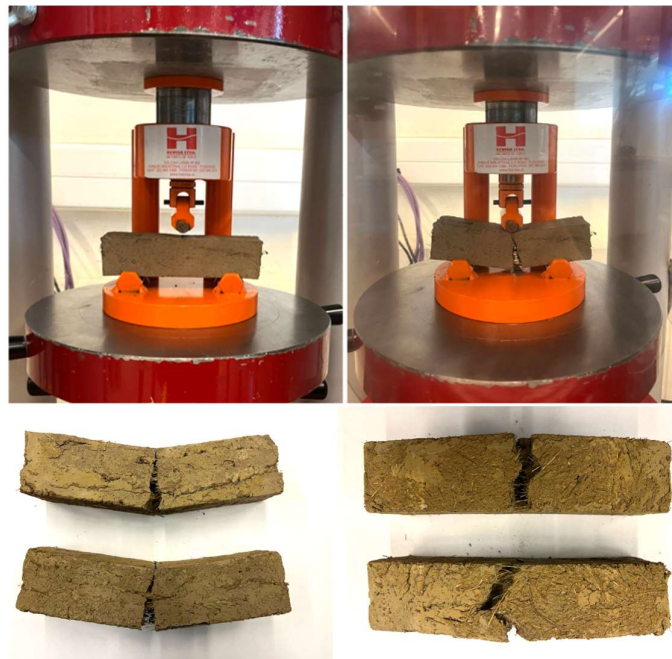


Figura 9. Ensayo a flexión probetas de barro y fibra, Maximiliano Pazols, 2022.

4 Discusión.

La importancia de desarrollar sistemas de construcción modernos más flexibles que puedan conservar las cualidades de la arquitectura vernácula, ha quedado de manifiesto. Se pueden obtener grandes beneficios en términos de sostenibilidad a través de la integración de técnicas de fabricación digital en materiales de construcción basados en la tierra.

Por ende, es relevante aumentar el campo de estudio e investigación sobre las posibilidades de la tierra en aplicaciones arquitectónicas a través de recursos modernos. La automatización para la incorporación de los refuerzos de fibras continuas es parte de los futuros desarrollos a abordar.

La introducción de nuevas tecnologías genera brechas debido a la capacidad de incorporación del conocimiento y la capacidad de acceder a los recursos de desarrollo necesarios para su implementación. Desde ahí el resultado es relevante en aspectos de contribución relativos a la accesibilidad a nuevas tecnologías con gran potencial de aporte, que permiten a comunidades y familias optar por soluciones que posibilitan mejorar la calidad habitacional respecto a la actualmente obtenida, para usuarios que optan por estos materiales para la construcción.

El futuro de la investigación apunta en dos áreas, una relativa a la profundización técnica de sistemas para la manufactura aditiva en tierra reforzada, estudiando otros sistemas de extrusión con mayor presión para mayor viscosidad como bomba de inyección y el potencial de herramientas de proyección de pastas como técnica aditiva. Por otra parte, el potencial de estudio de la optimización del refuerzo ordenado en el sistema material compuesto.

Junto al aumento en los volúmenes y la alimentación continua del sistema de impresión lo que permite mejorar su eficiencia en el proceso de impresión, debido a la reducción del tiempo necesario para rellenar de material. Se plantean claras oportunidades de desarrollo respecto al aumento del TRL de las herramientas fabricadas y en la integración en el sistema.

Es necesaria la profundización técnica de sistemas para la manufactura aditiva en tierra reforzada, estudiando otros sistemas de extrusión con mayor presión para mayor viscosidad como bomba de inyección y el potencial de herramientas de proyección de pastas como técnica aditiva. Por otra parte, el potencial de estudio de la optimización del refuerzo ordenado en el sistema material compuesto, y en el control de las mezclas depositadas según su desempeño resulta considerable.

5 Referencias

García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., & Banda-Pérez, P. (2021). Architectural evaluation of 3d-printed buildings. *Buildings*, 11(6).

Giribas, C. (2017). "Sistema de Drizas: Reforzamiento estructural para construcciones en adobe". www.plataformaarquitectura.cl/cl/803675/sistema-de-drizas-reforzamiento-estructural-para-construcciones-en-adobe

Gomaa, M., Jabi, W., Soebarto, V., & Min Xie, Y. (2022). Digital manufacturing for earth construction: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 338.

Guamán-Rivera, R., Martínez-Rocamora, A., García-Alvarado, R., Muñoz-Sanguinetti, C., Felipe González-Böhme, L., & Auat-Cheein, F. (2022). Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. *Buildings*, 12(2).

Marchment, T., & Sanjayan, J. (2020). Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing. *Automation in Construction*, 109.

Nations Environment Programme, U. (2021). 2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.

Niroumand, H., M.F.M. Zain, & Jamil, M. (2013). Various Types of Earth Buildings. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 89, 226–230.