

# Arquitectura circular

*Manufactura aditiva con materiales sostenibles:  
suelo, cemento y micelio*



## Ficha del proyecto

<b><u>Título</u></b>	Arquitectura circular <i>Manufactura aditiva con materiales sostenibles: suelo, cemento y micelio</i>
<b><u>Autora</u></b>	Sophie Le Bienvenu
<b><u>Fecha</u></b>	2023
<b><u>Palabras clave</u></b>	Economía circular; manufactura aditiva; impresión 3D; diseño arquitectónico sostenible; residuos de construcción
<b><u>Contacto</u></b>	slebiennu@pucp.edu.pe

## Resumen

### Descripción general

La investigación propone una arquitectura circular a través de la manufactura aditiva o impresión 3D con materiales locales y sostenibles, como el suelo natural, el cemento y el micelio<sup>1</sup>.

### Preguntas de investigación

1. ¿Cómo aporta la arquitectura circular al medio ambiente?
2. ¿Cómo generamos estructuras más sostenibles?
3. ¿Cuáles son los procesos y el rendimiento?
4. ¿Cuáles son los indicadores cuantitativos y cualitativos de los materiales?
5. ¿Cómo aporta el proyecto a la vivienda en necesidad del país?

### Metodología

La investigación en curso recoge las experiencias de dos procesos que estamos desarrollando un equipo multidisciplinario de la Pontificia Universidad Católica del Perú: el primero,

la impresión de una casa en base a barro, y el segundo, la impresión de mobiliario con concreto reciclado, para luego plantear cómo hipotetizar las posibles ejecuciones de impresión en micelio. Para ello, se plantea comparar los procesos de selección, composición, manufactura, y secado, a través de indicadores de rendimiento y sostenibilidad, de forma cuantitativa y cualitativa. Esta información será procesada mediante herramientas digitales y manuales que permitirán producir diagramas y cuadros comparativos con cifras específicas que nos permitirán entender y mejorar procesos para seguir desarrollando proyectos.

- a. Comparar los materiales: suelo, cemento y micelio.
- b. Entendimiento de la economía circular.
- c. Resultados de la manufactura aditiva.
- d. Plantear hipótesis de la evolución del proceso de manufactura aditiva.

### Objetivos

1. Entender y dar a conocer las ventajas de la manufactura aditiva.

<sup>1</sup> El micelio es una estructura de los hongos de apariencia similar a una raíz, consistente en una masa de hifas ramificadas y de textura como de hilo, que forman la parte vegetativa de los hongos pluricelulares

como las setas y los mohos (<https://es.m.wikipedia.org/wiki/Micelio>).

2. Conocer las características de los materiales e imprimir geometrías variadas.
3. Presentar un proyecto de construcción tecnológica con materiales sostenibles para el mercado local.

---

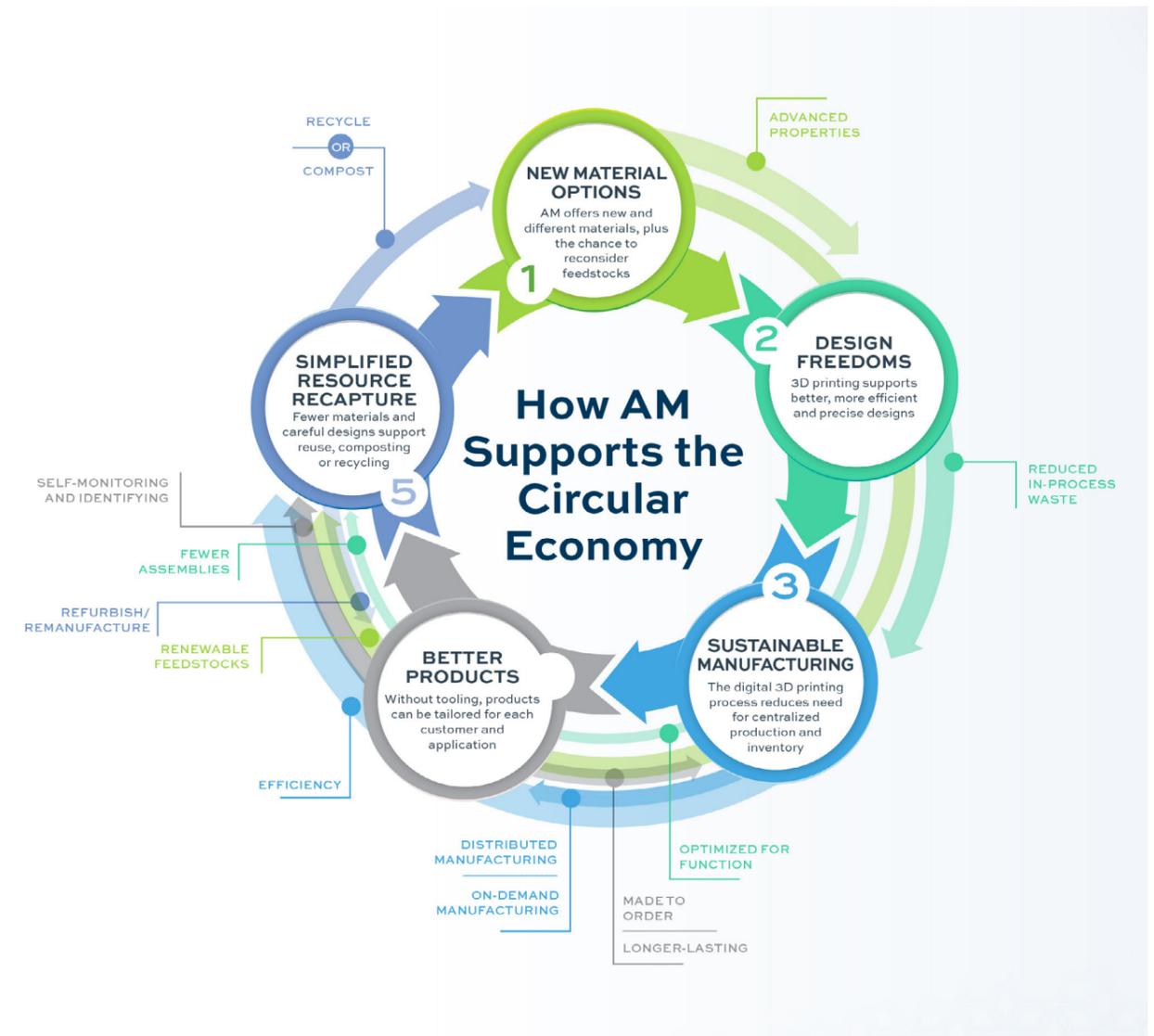
## Introducción

Esta investigación comprende una revisión y evolución de exploraciones basadas en estudios y talleres sobre la manufactura aditiva en base al concepto de economía circular, comparando tres materiales: suelo, concreto y micelio. En los últimos años se ha desarrollado la tecnología y ha evolucionado el proceso. Esta una solución específica que no va a reemplazar los sistemas convencionales constructivos, dado que es una herramienta adicional para resolver una construcción rápida sostenible con materiales locales. El conocimiento aprendido aquí se aplicará en estrategias relevantes para la arquitectura y la construcción.

## Economía circular

En la economía actual, tomamos materiales de la tierra, fabricamos productos a partir de ellos y, finalmente, los tiramos como desechos; esto es denominado como proceso lineal. En una economía circular, por el contrario, detenemos la producción de residuos y la contaminación, hacemos circular productos y materiales en su valor más alto y regeneramos la naturaleza. Es un sistema económico que ofrece mejores resultados para las personas y el medio ambiente; una característica esencial para un futuro sostenible. En gran medida, es la arquitectura definitoria de una sociedad sostenible y positiva para el clima (Ellen Macarthur Foundation, s.f.).

En esencia, la economía circular tiene el objetivo de transformar la forma en que se usan y producen los materiales para eliminar el desperdicio. La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) señala su objetivo de «cerrar el círculo entre materias primas, productos y residuos para que los materiales permanezcan en uso y se reduzca el consumo de recursos finitos» (Robertson, 2022).



## Manufactura aditiva

Impresión 3D o manufactura aditiva es una filosofía y una metodología que surge como una de las mayores promesas en el diseño para lograr una arquitectura y construcción sostenibles. Se trata de una técnica que produce objetos 3D a través del procesamiento capa por capa de materiales, como metales, compuestos de fibra polimérica, cerámicas, cemento y concreto, polímeros, comida, barros, materiales-meta y tejido orgánico. La manufactura aditiva está cambiando la manufactura a nivel mundial en distintas formas, ya que hace que el diseño y la producción sean reemplazables y accesibles para todos (Colorado *et al.*, 2020). Asimismo, facilita el flujo de la construcción, reduce los costos hasta un 50 % (Arpitha, 2023), acorta tiempos, reduce los residuos, ayuda al empleado a reducir esfuerzo físico y, en general, es más eficiente.

De acuerdo con Arpitha (2023), los beneficios de la impresión 3D son cuatro:

1. Reducción de mano de obra requerida en la construcción.
2. Reducción de residuos y huella de carbono.
3. Reducción del tiempo requerido en la construcción de estructuras.

4. Crecimiento en el desarrollo de la tecnología global (puede transformar el sector constructivo).

Finalmente, tendencias presentes en impresión 3D están siendo examinadas con relación a las prácticas utilizadas en este momento, para asegurarnos de que la manufactura aditiva se consolida como una solución sostenible y conveniente en las esferas económicas, sociales y medio ambientales (Colorado *et al.*, 2020).

## Referentes

En todo el mundo, la impresión 3D en la construcción va en exponencial aumento. Estados Unidos y varios países de Europa llevan la iniciativa («Additive manufacturing around the world...», 2019). Algunas propuestas son más exploratorias, y otras más comerciales para solución de viviendas. TECLA, un nuevo eco-hábitat, creado con materiales reutilizables y reciclables, es un proyecto interesante por los materiales y la exploración realizados. La empresa italiana WASP lo construyó utilizando la impresora 3D Crane WASP, y se consideró un gran avance en el área de la construcción sostenible. La exploración de la geometría permitió una solución de doble cúpula que cubrió, al mismo tiempo, las funciones de estructura, techo y revestimiento exterior. Los materiales son extraídos del terreno local; se ensayó la composición química y física de la tierra y las fracciones de arcilla, limo y arena; asimismo, se realizaron los procesos de muestreo, filtrado, mezclado y secado para lograr una óptima consistencia (Marchante, 2021).

Además, existen dos proyectos enfocados en la comercialización de la vivienda, como un producto rápido y económico. El proyecto C3PO, en Westerlo, Bélgica, es una casa construida en una única pieza,

con el objetivo de acelerar la introducción de la tecnología de impresión 3D de concreto en el sector de la construcción (Aerts, s.f.). Por otro lado, en Eindhoven, Países Bajos, se están construyendo cinco casas de concreto impresas en 3D. La primera se entregó en el 2021. Este es el primer proyecto de vivienda comercial del mundo basado en la impresión 3D de concreto, con tecnología de impresión y diseño de viviendas cada vez más complejas, ya que se construye una tras otra (Project Milestone, s.f.).



2

2 Project Milestone, casas impresas en 3D. Fuente: Universidad de Tecnología de

Eindhoven en conjunto con varios contratistas especializados, 2021.

## Estudios previos

En la constante búsqueda del territorio tecnológico en la arquitectura, Federico Dunkelberg y yo nos unimos al Centro de Tecnologías Avanzadas de Manufactura de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CETAM PUCP) para desarrollar el programa de manufactura robótica en arquitectura. En los dos *workshops* realizados durante los talleres «Architectural Association Visiting School Lima» en 2017 y 2019, y a través de ejercicios por tecnología de software y procesos de fabricación robótica, nos permitimos participar de manera colaborativa multidisciplinaria, empezando un recorrido para obtener una visión de construcciones vanguardistas.

En el segundo taller AAVSLIM 2019, nos enfocamos en la producción en arcilla y manejo del brazo robótico KUKA, donde pudimos desarrollar varias piezas de arcilla —como experimentos en producción aditiva— encontrando las características adecuadas para la impresión: la consistencia del material, la inclinación de la forma, el grosor de la estructura, la altura de la pieza y el tiempo de la impresión. Se realizaron varias pruebas y, finalmente, se lograron imprimir las piezas enteras. Asimismo, tuvimos que manejar adecuadamente el software con el brazo

robótico; la interfaz de la plataforma digital paramétrica Rhino-Grasshopper nos permitió obtener las múltiples opciones para la fabricación.



3

3 Manejo del brazo robótico KUKA. Estudiantes del workshop, con los tutores Karl Single

y Álvaro López. Fuente: Archivo AAVSLIM, 2019.

4 Experimentos de producción aditiva en arcilla. Estudiantes del workshop, con los tutores

Karl Single y Álvaro López. Fuente: Archivo AAVSLIM, 2019.



4

## Proyectos en curso

Docentes de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo PUCP, en conjunto con la Facultad de Ingeniería de la misma universidad, la Universidad de Piura y Drexel University, estamos desarrollando dos investigaciones de manufactura aditiva:

1. Proyecto Wasitek, impresión 3D de una vivienda en suelo. Utiliza la tecnología de impresión 3D en un sistema de construcción robótico para viviendas en caso de desastre. Esta es la primera impresora 3D de material de construcción a gran escala que se va a implementar en el país y la más grande desarrollada por una universidad en Latinoamérica. Las viviendas constan de 125 m<sup>3</sup> de volumen, y el equipo está trabajando actualmente en las pruebas de impresión de materiales, consistencia, resistencia y espesores.
2. Economía circular en la industria de la construcción con impresión 3D. Reúso de desechos de conchas de abanico, concreto de demolición y PET como agregados para construcción aditiva con concreto e impresión de mobiliario con materiales reciclados. El proyecto propone el desarrollo de un concreto eco-amigable para impresión 3D utilizando combinaciones de tres residuos: a) valvas de conchas de

abanico, b) desecho de demolición (concreto y ladrillo), y c) tereftalato de polietileno (PET) reciclado proveniente de botellas desechadas. Los dos primeros ingredientes molidos y el PET triturado en hojuelas son planteados como un reemplazo parcial del agregado natural, un recurso natural cada vez más escaso por la sobreexplotación; además, el PET en forma de tiras actuará como fibras de refuerzo. Este proyecto se presenta dentro de un marco de economía circular buscando beneficios para el medio ambiente basado en la reutilización de residuos.



## Materiales

La investigación propone la comparación de tres materiales en la manufactura aditiva. Los dos primeros, suelo y concreto, son materiales ya explorados en territorio local, aún incipientes en la impresión 3D localmente, y tienen características similares; y el tercero, micelio, un material en exploración en el mundo de la manufactura aditiva, que servirá para seguir investigando el uso de materia orgánica en este ámbito.

### *Suelo*

Las construcciones de abobe en el país son representativas, por lo que utilizar un material local, de bajo costo, con propiedades de confort interno, suman al resultado de la edificación. La arcilla o barro se puede extraer del suelo y utilizarse para la impresión 3D a través de extrusores que se manufacturan artesanalmente buscando las dimensiones idóneas.

### *Concreto*

La impresión 3D de concreto se logra mediante extrusión capa por capa. Esta es un área única que reúne múltiples especialistas, como químicos, desarrolladores de software, diseñadores, ingenieros estructurales, expertos en automatización y, lo que es más

importante, visionarios creativos, para formular las innovaciones del mañana (Das, 2022).

### *Micelio*

Estamos interesados en el potencial que tiene el micelio para resolver una serie de problemas que enfrentamos actualmente. El plástico y el concreto son dos de los materiales más utilizados en la tierra (Barvir, 2022). Para imprimir en 3D se combina el micelio con una base vegetal compuesta de paja, madera y residuos de alimentos. Una vez impreso, el micelio se extiende por todo el material vegetal, dando como resultado una estructura sólida. El objeto fabricado se seca en un horno, matando al hongo y dando como resultado paredes celulares abiertas que absorben el sonido. Esta estructura porosa, formada por células abiertas y puede ser ideal para la insonorización (Molitch-Hou, 2021).





7

7 Fabricación de prototipo a través de impresión 3D de suelo natural 85 % y cemento

15%. Fuente: Departamento Académico de Ingeniería de la PUCP, 2023.

8 Impresión 3D de muestra basada en micelio. Fuente: Instituto Fraunhofer IBP, 2021.



8

## Reflexiones finales

Al llevar la tecnología a sus límites, podemos construir obras arquitectónicas complejas que no serían posibles de realizar con mecanismos actuales.

Investigar constantemente y experimentar posibilidades nos permite llevar la arquitectura a un nuevo nivel. Asimismo, la colaboración con otros sectores y el trabajo en equipo permiten diversas posibilidades, y se configuran como un libro abierto para seguir escribiendo sobre la manufactura y las grandes estructuras factibles de manera industrializada, lo que podría reducir costos y mejorar la falta de infraestructura en el país.

## Bibliografía y recursos

- Additive manufacturing around the world: What is the State of 3D printing adoption in North America and Europe? (7 de noviembre de 2019). *AMFG* [entrada de blog]. <https://amfg.ai/2019/11/07/additive-manufacturing-around-the-world-what-is-the-state-of-3d-printing-adoption-in-north-america-and-europe/>
- Aerts, Marijke (s.f.). 3D printing in the construction world. The project: KIEM. *Kamp C*. [https://www.kampc.be/c3po\\_eng](https://www.kampc.be/c3po_eng)
- Arpitha, S. (23 de febrero de 2023). Dubai's 3D Printing Strategy: Transforming the construction sector. *Parametric Architecture*. <https://parametric-architecture.com/dubais-3d-printing-strategy-transforming-the-construction-sector/>
- Barvir, Jill (27 de febrero de 2022). 3D Printing with Mycelium. *Fungi Akafo*. <https://www.fungiakuafo.com/3d-printing-with-mycelium/>
- Brennecke, Tom (1 de marzo de 2023). Exploring 3D Printed Housing as a solution for post-disaster temporary shelters. *Parametric Architecture*. <https://parametric-architecture.com/exploring-3d-printed-housing-as-a-solution-for-post-disaster-temporary-shelters/>
- Colorado, Henry A., Gutiérrez Velásquez, Elkin I., y Neves Monteiro, Sergio (2020). Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8221-8234. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.062>
- Das, Gaurav (24 de agosto de 2022). Are these the building blocks for a better future? *Innovators*. <https://www.innovatorsmag.com/are-these-the-building-blocks-for-a-better-future/>
- Ellen Macarthur Foundation. <https://ellenmacarthurfoundation.org/>
- Marchante, Alicia (2021). WASP habla sobre las viviendas sostenibles y la impresión 3D con tierra. *3Dnatives*. <https://www.3dnatives.com/es/wasp-viviendas-impresion-3d-tierra-110320212/>
- Molitch-Hou, Michael (2021). *Fungus in your ears: Fraunhofer 3D prints Mycelium as sound absorber*. 3DPrint.com. <https://3dprint.com/277602/fungus-in-your-ears-fraunhofer-3d-prints-mycelium-as-sound-absorber/>

Project Milestone (s.f.). <https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone/>

Robertson, Susan (6 de julio de 2022). What is circular economy. *Innovators*. <https://www.innovatorsmag.com/what-is-the-circular-economy/>

## Dosieres CIAC

© De los autores, 2023

### Editores

Luis Rodríguez Rivero  
Gary Leggett Cahuas  
Ingrid García Westphalen

### Diseño gráfico

Gary Leggett Cahuas

### Diagramación

Ingrid García Westphalen  
Natalia Talledo Fonken

### Revisión de estilo

Lucía Patsías Valle

