

Impresión 3D en arcilla de columnas biorreceptivas texturizadas: Hacia una tecnología de construcción democrática, sostenible y emergente

Yomna K. Abdallah⁽¹⁾

Resumen: La impresión 3D de arcilla ha ido ganando cada vez más interés como material de construcción sostenible y ecológico con cualidades climáticas y económicas favorables: además de aprovechar el avance de la cuarta revolución industrial en aplicaciones de fabricación digital y robótica en la industria de la construcción, especialmente con la impresión 3D de aplicaciones en la arquitectura a escala real. Sin embargo, los elevados costes de esta maquinaria utilizada para la impresión 3D de edificios a escala real *in situ*, y la dificultad de transportarlos y operarlos *in situ*, han restado viabilidad democrática a la adopción de la impresión 3D como tecnología constructiva, y han limitado su uso a sólo una élite que posee las capacidades financieras para proporcionar tales máquinas y sistemas operativos. Por otro lado, el voluminoso monovolumen resultante (normalmente en forma de cabaña o iglú), resulta insuficiente desde el punto de vista de la programación arquitectónica funcional para aplicaciones de la vida real, que son más que un simple refugio, y carecen de toda posibilidad de complejidad formal o fractal, debido al factor de adhesión tiempo-material de los ajustes de impresión. Además de su falta de integración con la biodiversidad, debido a sus superficies simples, lisas y unificadas, que son las compatibles con las máquinas de impresión a escala real, por sus boquillas de tamaño de pared gruesa, regidas por ajustes de impresión de coherencia del material, la adhesión de capas y la velocidad de impresión. A pesar de algunas afirmaciones de que la impresión 3D a escala real *in situ* puede ser una solución que salva vidas en situaciones emergentes como catástrofes naturales (por ejemplo, terremotos), hasta el momento no existe en el estado de la cuestión una comparación suficiente de la velocidad de construcción entre conjuntos prefabricados *in situ* y la impresión 3D a escala real *in situ*. Sin mencionar la falta de informes sobre los márgenes oportunos de fijación de estos materiales impresos en 3D y su resistencia a las condiciones climáticas (como la exposición al sol y la lluvia). Así como la falta de informes sobre el rendimiento mecánico y estructural de estos volúmenes impresos en 3D a escala real, y la dificultad para realizar las pruebas pertinentes. Así, debido a estas desventajas de la impresión 3D a escala real *in situ*, el autor aboga una vez más por la segmentación de las estructuras arquitectónicas monocasco mediante una impresión 3D factible y disponible, como bloques de construcción prefabricados que puedan producirse a escala masiva y ensamblarse *in situ*. En el presente trabajo, el autor se centrará en la complejidad y la fractalidad de la forma y superficie de dos diseños diferentes de columnas biorreceptivas que bajo su dirección se desarrollaron el año 2023 en el BioLab del iBAG-UIC Barcelona, dentro del Máster de Arquitectura Biodigital. El objetivo principal era diseñar y fabricar bloques de construcción de arcilla impresos en 3D para producir una columna biorreceptiva. El proceso de diseño incluyó dos cuestiones: el volumen principal de 20 x 20 x 20 cm³, que

se ensamblará con los otros bloques para componer la columna en varias orientaciones, y la textura de la superficie para proporcionar una dimensión fractal y complejidad a la forma. Además de proporcionar un nicho para albergar un cultivo mixto de algas. Se exhibirá aquí a su vez el proceso de optimización para la fabricación de cada diseño, a partir del análisis del diseño formal, de la textura de la superficie, y de las sesiones de impresión.

Palabras clave: Estructuras biorreceptivas - Arquitectura de arcilla - Columnas de arcilla - Impresión 3D de arcilla - Algas

[Resúmenes en castellano y en portugués en las páginas 75-77]

⁽¹⁾ **Yomna K. Abdallah**, Profesora Lectora de la ESARQ-UIC Barcelona School of Architecture (Universitat Internacional de Catalunya), Subdirectora del iBAG-UIC Barcelona (Institute Biodigital Architecture & Genetics), así como Subdirectora del Programa de Maestría en Arquitectura Biodigital desde 2019. Se graduó en la Facultad de Artes Aplicadas de la Helwan University (2012), y obtuvo su Maestría en la misma universidad con una calificación de Excelente (2016), y su Tesis de Maestría ganó el Premio a la mejor Tesis de Maestría de la Universidad de Helwan (2016-2017). Es Doctora en Arquitectura (2020) por la Universitat Internacional de Catalunya, y presentará el año 2024 su segunda tesis doctoral, esta vez en el campo de la Bioingeniería en la misma universidad. Cofundó el BioLab del iBAG (2019), desde el que también se imparte el mencionado programa de arquitectura biodigital. Ha sido investigadora visitante y científica invitada en varias universidades e instituciones de investigación de alto rango, como la Facultad de Ciencias de la Universidad de El Cairo, la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada y el Instituto Max Planck de Coloides e Interfaces en Potsdam. Sus intereses de investigación incluyen la integración de cultivos microbianos y celulares en biosistemas y biomateriales para lograr aplicaciones arquitectónicas renovables, regenerativas, bioactivas y sostenibles en el entorno construido. Así se ha manifestado en sus numerosas publicaciones en revistas indexadas del primer y segundo cuartil, y en diversas editoriales de prestigio, así como en su docencia desde el BioLab, que en sus tres últimas ediciones, han tratado de lo siguiente: el año 2021, bioelectricidad: pilas de combustible microbianas para electricidad renovable (se ganó con ello el concurso de jóvenes creativos de Swarovski para la sostenibilidad), el año 2022, desarrollo de biocompuestos a base de conchas marinas y cáscaras de huevos para aplicaciones arquitectónicas (paneles biorreceptivos), y el año 2023, columnas de arcilla biorreceptivas (desarrollo de columnas de arcilla biorreceptivas impresas en 3D con microtexturas para la inmovilización de mezclas cultivos de algas).

Introducción

Nuestros cuerpos y toda materia viva están compuestos por múltiples “bloques de construcción”, células, que se unen en una gran variedad de morfologías, escalas, formas y materialidad, para formar tejidos diferenciados y variados, cada uno de los cuales corresponde a una función específica, en una magistral interdependencia recíproca de la “forma sigue a la función”, como afirmó Louis H. Sullivan (Sullivan, 1896), y “la función sigue a la forma” como replicó Alberto T. Estévez (Estévez, 2023). Y el autor está de acuerdo con ambas citas, en que forma y función se justifican entre sí, sin que una siga a la otra, sino en íntima sincronización, y ambas siguen la materialidad (autor, 11 de noviembre de 2023). Esto se justifica por una gramática natural de formar y construir cosas. Dado que el código genético, el ADN, se transcribe en combinación y permutación de diferentes proteínas para construir el “bloque de construcción” de las células diferenciadas con sus variadas formas y funciones. Y tal vez esto sea más exactamente lo que quiso decir Estévez cuando usó la expresión “la función sigue a la forma”, dado que la forma la resuelve la materialidad. Sin embargo, hoy, cuando estamos avanzando hacia lo bioinclusivo, biointegrado, bioinformado, bio..., etc., hay que volver al punto de vista de la biología del desarrollo, y enfatizar el papel emergente de la materialidad, siendo el concepto de material el protagonista: el “maestro” de la forma y la función juntas. Observando las fases de desarrollo de un embrión y sus componentes básicos, las células STEM, cómo proliferan y se diferencian para formar diversos tejidos con sus distintas funciones (Zakrzewski *et al.*, 2019). En este sentido, sería más exacto decir “La forma sigue a la materialidad, y la función sigue a la forma”, pero no sería lo suficientemente exacto, ya que la forma y la función en la biología del desarrollo se desarrollan recíprocamente y, más bien, cronológicamente.

Siguiendo esta misma lógica, la sostenibilidad en el entorno construido se basa principalmente en la materialidad. La disponibilidad, reproducibilidad, regeneración, seguridad y ecofuncionamiento son aspectos de materialidad que determinan entre el 70 y el 80% de la sostenibilidad de la implementación final. El otro 20-30% está determinado por los procesos de construcción, de explotación controlada de materiales, de consumo de energía minimizado, y de impacto en el rendimiento posterior a la operación. Esto, una vez más, enfatiza la importante relación de interdependencia entre el material y la forma para lograr una función óptima. Algo defendido por el autor en publicaciones anteriores (Abdallah y Estévez, 2021; Estévez y Abdallah, 2022), donde el material controla los límites de la manipulación formal, y la forma controla las propiedades mecánicas del diseño, incluidas las propiedades mecánicas del material. Además, el autor siempre ha enfatizado el papel significativo y rector de la materialidad en trabajos anteriores, destacando el papel de la investigación en biomateriales como herramienta impulsora de la innovación en el diseño, tanto en la forma como en las funciones ecológicas y regenerativas sostenibles (Abdallah y Estévez, 2023), analizando la relación recíproca entre material bioactivo, forma reticular, funcionamiento ecológico, y proceso de impresión 3D de biofabricación (Abdallah y Estévez, 2023), según se ve en la *Figura 1*.

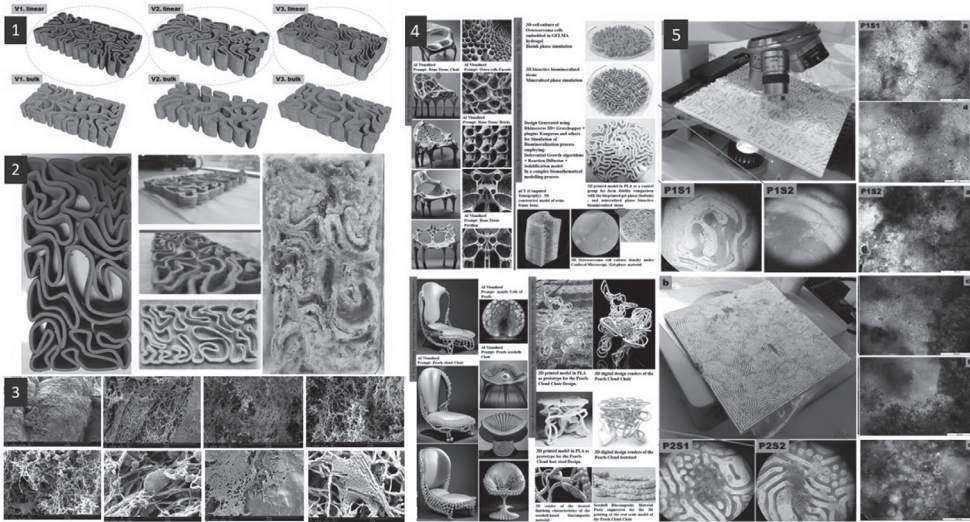


Figura 1. Colección y resumen de investigaciones del autor, publicadas recientemente, sobre la relación entre material, forma y función desde un punto de vista sostenible. 1) Diferentes series de diseño de ladrillos de arcilla impresos en 3D (las Biodigital Barcelona Bricks Series). 2) Desde el modelo lineal V3, con propiedades elásticas, impreso en 3D, hasta el ladrillo biodigital impreso en 3D de un biocompuesto de conchas marinas con biosoldadura de refuerzo a base de micelio. 3) Imágenes de microscopía electrónica de barrido del micelio que suelda y refuerza biológicamente el ladrillo biocompuesto de conchas marinas y micelio. 4) Diseño impulsado por la investigación de biomateriales donde las imágenes de microtomografía computarizada de los motivos estructurales jerárquicos del tejido óseo bovino informan la lógica formal de búsqueda de forma de elementos arquitectónicos: abajo, el modelado biomatemático de formas inspirado en la lógica de ensamblaje del material de las perlas. 5) El papel de la geometría para lograr la eficiencia biorreceptiva de dos piezas diseñadas siguiendo el modelo de reacción-difusión de Gierer-Meinhardt.

Mediante este enfoque de diseño impulsado por el material y principalmente mirando profundamente a la naturaleza, para aprender biológicamente el código de reconstrucción de “emergencia” y de “urgencia” de la naturaleza, se encuentra que la naturaleza nunca adoptó lo voluminoso, soluciones de simple deposición masiva de material, ni en las situaciones más urgentes. Por ejemplo, el proceso de curación de heridas sigue la misma metodología de construcción por disposición de bloques de construcción, regeneración de tejidos, y un sabio equilibrio tiempo-material-velocidad, que ofrece los mejores resultados con pérdidas mínimas de material, de tiempo o de mal funcionamiento (Advances in Wound Care, 2021). Habitualmente, al analizar proyectos recientes de soluciones de arquitectura de emergencia, se encuentra que el 80% de las soluciones eficientes se basan siempre en bloques o unidades de construcción modulares prefabricados de ensamblaje *in situ* (ArchDaily, 2021; ArchDaily, 2020; Smolova y Smolova, 2021; Shahzad, Rajakannu y Kordestani Ghalenoei, 2022), por su ligereza, disponibilidad, facilidad y rapidez de monta-

je, y rentabilidad de tiempo. La eficiencia de estos componentes básicos en la construcción, incluso en situaciones urgentes, garantiza un rendimiento óptimo, por su tecnología de fabricación disponible, junto con la accesibilidad para probar sus propiedades físicas y químicas (como las propiedades mecánicas, aislamiento acústico y térmico, respuesta a las condiciones climáticas, o resistencia al fuego, y para realizar pruebas de fuego, agua, resistencia a parásitos, etc.). Todo ello es muestra de su mejor desempeño en la realidad, y no sólo como simulaciones computacionales, que siempre sufren imprecisiones y márgenes de desviación desde el diseño hasta la producción real (Jiang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023; Segovia y García-Alfaro, 2022). Además, estos componentes básicos, probados con su correspondiente tecnología de fabricación disponible, sientan bases más sólidas para su reproductibilidad y estandarización (Wang *et al.*, 2021; Boafó, Kim y Kim, 2016; Gunawardena y Mendis, 2022). Lo que abre amplios potenciales para establecer una industria de construcción descentralizada e inclusiva, basada en la comunidad, que pueda adoptarse en cualquier parte del mundo, independientemente de sus capacidades financieras, tecnológicas y de infraestructura. Además de transferir y compartir el conocimiento desde el diseño hasta la tecnología de fabricación, dando esperanzas a que las comunidades en desarrollo logren la autosuficiencia y construyan sus propias ciudades con un espíritu de diseño que les pertenece y representa. Estos bloques de construcción producidos en masa también ofrecen la solución de reproductibilidad en caso de daños domésticos en cada pieza por separado o en grupo de bloques, evitando que el efecto del daño aumente y afecte a todo el cuerpo del edificio, como es el caso de los recientes bloques de construcción impresos en 3D a escala real en aplicaciones de construcción (Bazli *et al.*, 2023; Ferretti *et al.*, 2022). Sopesando todas estas ventajas de los bloques de construcción *versus* las desventajas de la voluminosa impresión 3D continua y unitaria a escala real, se debería ser lo suficientemente honestos como para afirmar que funciona mejor, contradiciendo la propaganda ultratecnológica de élite. Pudiéndose así excluir el dinero como única opción para desbloquear los méritos reales y auténticos de estas poderosas herramientas de diseño y fabricación digitales.

La materialidad debe gobernar el proceso de diseño y fabricación para conseguir un entorno construido sostenible y regenerativo, dando forma al futuro de la arquitectura y del diseño. Es imprescindible encontrar canales suficientes para transferir este complejo conocimiento a las generaciones actuales y futuras de diseñadores y constructores. El presente trabajo relata un episodio del estudio BioLab, impartido por el autor como parte intrínseca e inseparable del Máster en Arquitectura Biodigital de la Universidad Internacional de Cataluña, fundado y dirigido por el padre y pionero de lo biodigital, Alberto T. Estévez (Universitat Internacional de Catalunya, s.f.; albertostévez.es, s.f.).

En este episodio del “BioLab 2023”, este concepto de bucle sustentable material-forma-función fue el tema y desafío principal. Trabajar con material sustentable y abundante pero crítico, como arcilla, para diseñar e imprimir en 3D columnas biorreceptivas a modo de bloques de construcción, que se pueden organizar en diferentes orientaciones y teselaciones de cara a ofrecer el máximo volumen-superficie para la biorreceptividad de varias cepas de algas. El desafío consistía en diseñar un bloque de construcción que se imprimiría en 3D a partir de arcilla y se ensamblaría para producir una columna. La forma del bloque de construcción debe ofrecer la máxima superficie y textura fractal para albergar diversas

cepas de algas (Abdallah y Estévez, 2023). Desde el diseño hasta la fabricación, y especialmente el proceso de impresión 3D con arcilla, implicó un ciclo de optimización del diseño mediante retroalimentación, para controlar la configuración de impresión y la compatibilidad formal con las propiedades del material durante la impresión y la postimpresión. Esto se exhibirá a través de los dos proyectos desarrollados por dos grupos de alumnos del Máster de Arquitectura Biodigital. Los diseños se analizarán desde la fase de generación de formularios, que aborda sus requisitos de área de superficie topológica expandida, mientras cumple con los límites de impresionabilidad, de las dimensiones hasta el ciclo de optimización formal del diseño de calibración de impresión 3D, hasta el rendimiento posterior a la impresión del producto final. Los resultados resaltarán las posibilidades y limitaciones de la adopción de bloques de construcción de arcilla prefabricados impresos en 3D en aplicaciones de arquitectura sostenible y de emergencia.

1. Emergencia y Sostenibilidad: Bloques de Construcción de Arcilla Impresos en 3D Como Tecnología de Construcción Democrática y Descentralizada

Como demanda mundial urgente, lograr la sostenibilidad en los sectores de la construcción se ha convertido en una necesidad vital. Pues el sector de la construcción es responsable del consumo de casi la mitad de las materias primas y energía del planeta (Edwards, 2010; Lozano-Miralles *et al.*, 2018), provocando un gran impacto en el agotamiento de las fuentes no renovables del planeta, de los recursos, así como en la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de la combustión de combustibles fósiles (Lozano-Miralles *et al.*, 2018; Dong *et al.*, 2018). En el ámbito de la construcción, como parte importante de la economía mundial, es aconsejable reducir los materiales y procesos que intervienen en la práctica constructiva. Este concepto es fundamental en el diseño de procesos constructivos, técnicas y durabilidad de las estructuras resultantes.

En esencia, minimizar el uso de materiales y el tiempo de construcción ha provocado la aparición de soluciones prefabricadas que se han reintroducido de manera recurrente junto con diferentes tendencias arquitectónicas, con diferentes tecnologías de diseño y fabricación disponibles (Turan, 2009) que se basan en el ensamblaje de unidades prefabricadas. Estas soluciones constructivas prefabricadas surgieron para lograr la sostenibilidad del proceso en el tiempo.

Por otro lado, situaciones urgentes como catástrofes naturales (por ejemplo, terremotos) y catástrofes provocadas por el hombre, como zonas devastadas por la guerra, requieren soluciones de construcción rápidas y eficientes, cuyo criterio principal sea la accesibilidad a los sitios dañados o destruidos, la facilidad de movilidad de maquinaria y equipo, la velocidad de construcción y la solidez de estas viviendas urgentes, y la asequibilidad financiera y tecnológica de estos equipos, que es el principal punto de gran discrepancia entre las comunidades ya desarrolladas y en desarrollo, que en realidad necesitan más soluciones de construcción rápidas y eficientes, debido a su crónica y frágil situación económica y política. Teniendo en cuenta estos criterios realistas y lógicos, es justo decir que

las soluciones de construcción *in situ* a gran escala y en un solo paso de impresión 3D son totalmente incompatibles con aplicaciones en países en desarrollo o zonas afectadas por catástrofes. Mientras que las soluciones de unidades de construcción prefabricadas serían más realistas y asequibles en estos casos.

Sin embargo, el autor no se opone a investigar el desarrollo y uso de esta impresión 3D a escala real *in situ*, en un solo paso, para otras situaciones menos urgentes y más “lujosas”, como las colonias en Marte, o la creación de nuevas zonas urbanas y ciudades en entornos extremos como el desierto. Por lo tanto, estas herramientas no deben ser impulsadas y celebradas como tecnología sostenible, que salva vidas, sino más bien como lo que refleja su descripción original, como lujo y tecnología de élite. Y desde el punto de vista económico, por supuesto, es más rentable y de mayor impacto económico reclutar constructores humanos, que están dando forma a los principales recursos humanos en las comunidades en desarrollo, que importar la ultranueva y costosa tecnología de impresión 3D, cuando no está surgiendo ni encajando en las necesidades de estas comunidades.

Sin embargo, la bibliografía sobre métodos previos de diseño, fabricación, montaje y operación de soluciones constructivas prefabricadas se ha centrado principalmente en el factor tiempo, con la intención de temporalizar estos refugios, y sin aspiraciones futuras de convertirlos en funcionales y “hermosos” a largo plazo como parte del factor urbano (ArchDaily, 2021). Esto ha afectado la vida de muchas personas alrededor del mundo, especialmente en su hemisferio sur, que se encontraron en un abrir y cerrar de ojos viviendo en “campamentos de refugio”, principalmente tiendas de campaña (Paolo Verme *et al.*, 2015; protección-civil-humanitaria- Aid.ec.europa.eu, sin fecha; Sheltercluster.org, sin fecha; Wikipedia, 2023). Estos refugios urgentes, que se suponían temporales, han durado más de lo planeado para ellos, lo que ha resultado en malas condiciones de vida, inhumanas para sus habitantes, con una grave falta de funcionalidad en muchos aspectos, como la falta de protección ante condiciones ambientales, lluvias o terremotos, la falta y grave escasez de instalaciones sanitarias suficientes, la falta de privacidad, y la falta de arquitectura o programación del funcionamiento urbano.

Aunque estas soluciones urgentes prefabricadas pueden considerarse que salvan vidas, pero sólo por unas pocas horas, o unos pocos días. Son incompatibles para crisis de más largo plazo, que duren más de 6 meses, teniendo en cuenta los cambios climáticos estacionales.

Por lo tanto, este concepto y criterio de soluciones prefabricadas emergentes rápido-temporales deben cambiar a soluciones prefabricadas rápido-temporales/permanentes, donde el proceso de construcción mantenga la velocidad y facilidad del montaje *in situ*, mientras se desarrolla lo suficiente como para albergar vida humana digna, para una asignación temporal o permanente más bien.

Pareciera que para lograr este cambio en la arquitectura de emergencia, así como en la arquitectura sustentable, la materialidad de las soluciones prefabricadas debe pasar de materiales efímeros, como telas tensadas y soportes de madera o metal, a un material monocasco rígido y autosustentable que pueda resistir las condiciones naturales a largo plazo. Y aquí aparecen dos obstáculos, su peso y su dificultad de movilidad y montaje. Y aquí la solución la ofrecen las herramientas avanzadas de diseño digital que permiten el diseño y la fabricación de ladrillos formalmente personalizados, con peso ligero y rendimiento

estructural competente, como los ladrillos cerámicos impresos en 3D desarrollados por el autor, los Biodigital Barcelona Bricks (Abdallah y Estévez, 2021), así como otros proyectos recientes (Dezeen, 2012; AZoM.com, 2022).

Desde la década de los ochenta, el mercado de los ladrillos cerámicos ha comenzado a disminuir, debido a sistemas constructivos que se basan en cerramientos exteriores de bloques de hormigón (Lozano-Miralles *et al.*, 2018). Estos sistemas también dependen de ladrillos densos convencionales que carecen de inteligencia en la distribución de su densidad estructural, y que no poseen una adecuación formal para su función estructural (Lozano-Miralles *et al.*, 2018; Bories *et al.*, 2016). Esta forma de ladrillo convencional desafía múltiples leyes espacio-físicas al estar limitada a un rectángulo rígido que no puede generar una superficie mínima óptima, ni por sí sola ni en su conjunto replicativo. Esto se evidencia en las barreras tecnológicas causadas por la imposibilidad de utilizar estos ladrillos convencionales en edificios de baja altura debido a los límites de peso, así como su inadecuación ambiental al no lograr cierto aislamiento térmico, requiriendo procesos y materiales adicionales para lograr el aislamiento (Kornmann, M., 2005). Así como la limitación formal, limitando las formas arquitectónicas a formas ortogonales específicas que se pueden lograr con estos primitivos ladrillos ortogonales convencionales.

Afortunadamente, el rápido avance en las técnicas de diseño y fabricación digitales ha podido romper con estas formas rígidas y limitadas mediante la adopción de diversas estrategias de fabricación digital, especialmente la fabricación aditiva, y el desarrollo de cohesión entre el inicio del diseño, la simulación y la ejecución con precisión. Sin embargo, el creciente interés actual en la impresión 3D dentro de la investigación y la práctica de la industria de la construcción, está celebrando principalmente la escala magnificada de la herramienta de impresión 3D, en lugar de personalizar y optimizar su correspondencia con un uso sostenible. Esto se evidencia en la propaganda para la aplicación de construcción simplificada con brazos robóticos de impresión 3D en el procedimiento de impresión de un solo paso, en casas iglú a gran escala real, con capas de impresión de paredes gruesas (Dezeen, 2021; Chang, s.f.; Herder, 2022).

Aunque la defensa actual de la impresión 3D como el futuro de la industria de la construcción ha abierto un gran potencial para sintetizar y personalizar nuevos materiales de construcción, así como para permitir la deposición controlada de materiales, sin embargo, la atención debe centrarse en la sostenibilidad del rendimiento y la posibilidad de reproducibilidad y adaptación democrática de esta tecnología de impresión 3D para edificios funcionales, rápidos, estructural y ambientalmente optimizados.

Básicamente, la impresión 3D es una tecnología de fabricación aditiva que puede producir geometrías de formas complejas a partir de un modelo 3D capa por capa. Tiene el potencial de reducir el desperdicio de material, disminuir el costo laboral y facilita una producción rápida (Camacho *et al.*, 2018; Hossain *et al.*, 2020). Es innegable que estos edificios impresos en 3D a gran escala son pasos importantes para integrar la impresión 3D como una herramienta de construcción aplicable en el entorno construido: por ejemplo, las microcasas de bioplástico (Países Bajos, DUS Architects), Tecla (Italia, Mario Cucinella Architects y WASP), el Project Milestone (Países Bajos, Universidad Tecnológica de Eindhoven), etc. (McFadden, 2021; Dezeen, 2021). Sin embargo, la viabilidad de su producción en masa, junto con la rentabilidad y los programas arquitectónicos funcionales

reales, sigue siendo un desafío importante debido al alto costo de las impresoras 3D de gran escala y los brazos robóticos, en comparación con las impresoras 3D de disco o de escala limitada. El costo promedio de una impresora 3D de arcilla está entre 3.000 y 10.000 €, es fácil de comprar en línea, y se puede usar varias veces sin costo alguno, excepto por el material de construcción (Aniwa, s.f.). Mientras que la construcción más barata mediante impresión 3D para sólo una vez, los costos de construcción oscilan entre 4.000 y 9.000 €, lo que sólo toma en cuenta el costo del material de construcción, sin tomar en cuenta el alto costo de la maquinaria, que se proporciona únicamente en cotizaciones de precios especiales a grandes empresas constructoras para un solo edificio impreso en 3D. Como las casas en Austin, Texas, y Tabasco, México, 2018-2020, por Icon, y Gaia, o las del norte de Italia, 2018, por Wasp (Gregurić, 2021). Un número considerable de estos ejemplos se encuentran estancados en la fase de maquetas, y están pendientes de más investigaciones sobre su interacción con el usuario, el entorno, y las fuerzas y condiciones físicas (Khalili Tari *et al.*, 2023; euronews, 2023; Salandín *et al.*, 2022; Abdalla *et al.*, 2021). La mayoría de estos ejemplos siguen el modelo de casa iglú que carece de programación arquitectónica operativa real, o de la capacidad de expandirse para abarcar más que la simple función singular de cada uno de estos proyectos. Además, el uso de la impresión 3D de hormigón para casas y villas tiene mejores perspectivas que la construcción de grandes estructuras (Wu *et al.*, 2016), debido a diversas deficiencias, como la capacidad limitada de la impresora 3D para edificios de gran altura, la insuficiencia de materiales de impresión (especialmente para componentes que soportan carga), bajo nivel de personalización y complejidad involucrada en el procesamiento de la información desde el diseño hasta los objetos tangibles (Wu *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019). Sin embargo, la impresión 3D se ha explorado con éxito en la impresión de construcciones rápidas de refugios de socorro en casos de desastre, elementos estructurales y no estructurales con geometrías complejas, y moldes de impresión para componentes que soportan carga (Wu *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019; Delgado *et al.*, 2019).

Por tanto, se está intentando explotar los máximos avances en la impresión 3D como herramienta de construcción sostenible en términos de número de procesos y uso de materiales. Entre las numerosas perspectivas de la impresión 3D en la construcción, que se informaron en estudios recientes, se encuentran una construcción más barata, un uso reducido de materiales, una mayor seguridad, una mejor marca y participación de mercado, y una construcción duradera y sostenible (Camacho *et al.*, 2018; Hossain *et al.*, 2020; Rayna y Striukova, 2016; Agustí-Juan, y Habert, 2017). En este trabajo se propone la pixelación o teselación del proceso de construcción arquitectónica mediante impresión 3D de unidades constructivas que sigue nuestra línea de investigación anterior sobre el desarrollo de ladrillos biodigitales de cerámica impresos en 3D para lograr la sostenibilidad a través de dos aspectos principales: mínimo uso de material y suficiencia formal, a través de dimensiones fractales. A esto se suma la biorreceptividad de la microtextura de estas unidades constructivas, que se disponen para producir columnas de cerámica. Una metodología ascendente justifica esta propuesta del aspecto de dimensión fractal de la arquitectura impresa en 3D, ya que explota las ventajas tanto del sistema de construcción colaborativa modular como de las técnicas de arquitectura impresa en 3D. Además de abrir amplios potenciales para la investigación y la práctica para desarrollar bloques de construcción de

arcilla prefabricados, emergentes y sostenibles, que puedan servir como refugios temporales/permanentes para situaciones de vivienda urgentes.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue emplear la inteligencia formal en el diseño de bloques de construcción, que puedan ensamblarse como una estructura monocasco, sin necesidad de aditivos para lograr la sostenibilidad (menos material, varias iteraciones formales, peso ligero, facilidad de movilidad, asequibilidad, reproductibilidad, intercambio y transferencia de tecnología, y biorreceptividad), en una sola columna, manteniendo al mismo tiempo la menor cantidad posible de consumo de material y de procesos de fabricación. Esto se logró a través de una experimentación práctica interactiva de diseño biotecnológico-biodigital dentro del BioLab 2023 como parte del programa de Máster de Arquitectura Biodigital. Dos grupos de dicho Máster pudieron desarrollar bloques de construcción personalizados y optimizados, para una columna biorreceptiva impresa en 3D con arcilla, de cara a albergar 5 cepas de algas diferentes, con diferentes longitudes de escala y morfologías, basándose en una investigación publicada recientemente por el autor sobre el diseño de patrones fractales para piezas biorreceptoras, para inmovilizar cepas de algas de longitudes múltiples (Abdallah y Estévez, 2023). Lo que añadió más complejidad al proceso de diseño, al diseñar una microtextura sobre los diseños topológicos de los bloques de construcción de columnas de arcilla.

1.1. Ladrillos de Arcilla Impresos en 3D Para una Arquitectura Sostenible y Emergente

La arcilla es uno de los materiales de construcción más abundantes y tradicionales del mundo. Construir con arcilla siempre ha sido un enfoque rentable, fácil y sostenible. Prueba de ello es que la arcilla es una sustancia muy común y la más adoptada en las técnicas de construcción tradicionales, ya que entre la mitad y dos tercios de la población mundial todavía vive o trabaja en edificios hechos con arcilla, a menudo cocida a modo de ladrillos cerámicos, como parte esencial de sus estructuras portantes (Foley, 2008; Keighley, 2013). Las propiedades mecánicas definitorias de la arcilla son su plasticidad cuando está húmeda, y su capacidad para endurecerse cuando se seca o se cuece. Las arcillas muestran un amplio rango de contenidos de agua, dentro de los cuales son altamente plásticas (Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate, 2018). La arcilla de alta calidad también es resistente, medida por la cantidad de trabajo mecánico necesario para aplanar una muestra de arcilla. Su dureza refleja un alto grado de cohesión interna (Moreno-Maroto y Alonso-Azcárate, 2018). La arcilla tiene un alto contenido de minerales arcillosos que le confieren su plasticidad. Los minerales arcillosos son minerales de filosilicato de aluminio hidratados compuestos de iones de aluminio y silicio unidos en placas pequeñas y delgadas mediante la interconexión de iones de oxígeno e hidroxilo. Estas placas son resistentes pero flexibles y, en arcilla húmeda, se adhieren entre sí. Los agregados resultantes confieren a la arcilla la cohesión que la hace plástica (Bergaya y Lagaly, 2006). Cuando se seca la arcilla, se eliminan la mayoría de las moléculas de agua y el hidrógeno de las placas se une directamente entre sí para que la arcilla seca sea rígida pero aún frágil. Cuando la arcilla se cuece hasta la etapa de loza, una reacción de deshidratación elimina agua adicional de la arcilla, lo que hace

que las placas de arcilla se adhieran irreversiblemente entre sí mediante enlaces covalentes más fuertes, lo que fortalece el material.

El tamaño diminuto y la forma de placa de las partículas de arcilla dan a los minerales arcillosos una gran superficie. En algunos minerales arcillosos, las placas llevan una carga eléctrica negativa que está equilibrada por una capa circundante de iones positivos (cationes), como sodio, potasio o calcio (Bergaya y Lagaly, 2006). La química de los minerales arcillosos, incluida su capacidad para retener cationes de nutrientes como el potasio y el amonio, es importante para la fertilidad del suelo.

Con base en las propiedades mencionadas de la arcilla, es el candidato más destacado para servir como material base debido a su alta superficie, además de ser el mineral más disponible que posee estructuras cristalinas únicas, capacidades de intercambio catiónico, comportamiento plástico cuando está húmedo y capacidades catalíticas. Además, la arcilla es un material biorreceptivo, que estimula el crecimiento de organismos vivos como plantas y algas. Esta capacidad biorreceptiva de los ladrillos de arcilla incluso ha sido discutida en asociación con sistemas constructivos convencionales que utilizan ladrillos y mortero (Influence of brick and mortar properties on bioreceptivity of masonry – Results from experimental research, 2021), donde el alto contenido de humedad de ambos ladrillos y el mortero se ha descrito como un criterio fundamental para aumentar la biorreceptividad de estos materiales. Un ejemplo de unidades de construcción de arcilla biorreceptivas es el precedente de “Bio-received Tile Bricks” de Richard Beckett. Otro ejemplo se comunicó en el trabajo de Hayes (Hayes *et al.*, 2020), que propone el diseño biomimético basado en el lugar (BPD) como un enfoque para integrar estrategias biológicas desarrolladas por “adaptadores campeones”, dentro de los ecosistemas, mediante la traducción de su lógica en principios de diseño para entornos construidos, diseño e ingeniería. Este enfoque respalda un diseño que está en sintonía local, adaptable y resiliente a las condiciones y desafíos operativos locales (Hayes *et al.*, 2020; Biomimicry 3.8, s.f.). Estas propiedades permiten una mayor aplicación en muchas industrias y materiales a base de arcilla. Por lo tanto, construir con arcilla siempre ha sido un método sostenible y rentable debido a su muy bajo impacto ambiental, su fácil excavación y sus sencillos métodos de procesamiento y producción. Sin embargo, construir con arcilla según métodos comunes no es fácil ni está estandarizado para aplicaciones a gran y rápida escala. Por ejemplo, la técnica de construcción Mousgoum en África (architectureindevelopment.org, s.f.) es un ejemplo de edificios de arcilla sostenibles que tienen una construcción muy sólida, ya que tienen paredes más gruesas en la base y paredes más delgadas en la parte superior, lo que mejora la resistencia de la estructura al tiempo que siendo altamente texturizado para permitir la individualización de la superficie, ofreciendo una función de drenaje, aislamiento térmico natural y enfriamiento pasivo debido a la naturaleza hidrofílica de la arcilla. Sin embargo, estas estructuras de Mousgoum requieren un mantenimiento frecuente del revestimiento y no son adecuadas para su uso en climas lluviosos. Otro ejemplo de arquitectura sustentable en arcilla se exhibe en la arquitectura de tierra de Hassan Fathy en Egipto. Las cúpulas de arcilla nubia de Fathy, y la programación arquitectónica única, alimentada e influenciada por los elementos de enfriamiento pasivos de la arquitectura islámica, han permitido el diseño y la construcción de una arquitectura de arcilla vernácula que es respetuosa con el medio ambiente y suficientemente sostenible (Miles, 2006).

Sin embargo, tanto los ejemplos de arquitectura vernácula de arcilla como la reciente arquitectura de arcilla impresa en 3D, no están diseñados para ser empleados en situaciones de emergencia, sin equilibrar la resistencia del bloque de construcción en relación a su peso, la facilidad de movilidad y la velocidad de montaje en el sitio sin necesidad de adhesivos, o sin máquinas o procesos auxiliares. Estos ejemplos anteriores, hasta ahora no eran suficientes, centrándose en el control del consumo de materiales, y en los requisitos tiempo-coste por edificio. Aún y así, el trabajo anterior del autor sobre los ladrillos biodigitales de cerámica impresos en 3D se centró principalmente en la deposición controlada del material y en las formas estructuralmente optimizadas, para ofrecer las mejores propiedades mecánicas con el menor peso y tiempo de producción. En el diseño y fabricación de los Biodigital Barcelona Bricks se emplearon diseño asistido por algoritmos e impresión 3D. Estos ladrillos se diseñaron utilizando un algoritmo de reacción-difusión que simula la reacción de difusión de agua en un ladrillo de arcilla en función de su naturaleza hidrófila, y conecta los últimos puntos de la absorción de agua en este ladrillo de arcilla a través del algoritmo del camino más corto, para lograr la optimización de la densidad del material informada por modelos naturales (Abdallah y Estévez, 2021). Se presentaron tales ladrillos impresos en 3D como unidades de construcción, “píxeles”, y sistemas de construcción colaborativos: estos conceptos consideran un sentido similar al de la definición de ladrillos, aunque dependen de diferentes criterios. El término unidades de construcción se utilizó como definición constructiva de ladrillos. El término sistemas colaborativos se usó en el sentido de referencias biológicas de sistemas similares que se componen de muchas partes o agentes más pequeños ensamblados. Y el término “píxeles” se usó en el sentido de interpretación digital de una superficie o un volumen (Abdallah y Estévez, 2021). Esta pixelación de arquitectura impresa en 3D ofrece un método de vanguardia para popularizar, democratizar y facilitar el uso de la impresión 3D como una herramienta eficiente y asequible en el ámbito de la construcción arquitectónica, evitando el alto costo de la arquitectura impresa en 3D a gran escala de una sola fase, o deposición incontrolada de material, logrando así la arquitectura impresa en 3D una forma flexible y sostenible, además de sus infinitas iteraciones formales. Gracias a nuestra actual era biodigital, donde se están produciendo rápidos avances por igual y en paralelo tanto en biotecnología como en digitalización, la síntesis de materiales arcillosos y formas de diseño fisiológico adecuadas se basan en datos digitales. Estas herramientas digitales han permitido la inserción y realización directa de formas biológicas fisiológicas bioaprendidas de la naturaleza (Mustafa *et al.*, 2021). Resolviendo así la relevancia de la forma fisiológica de una estructura material desde el nivel micro al macro a través de la topología, la simulación mecánica y la optimización formal. Pocos proyectos de diseño recientes han abordado esta relación entre el diseño formal del ladrillo impreso en 3D y la sostenibilidad. Por ejemplo, la Twisted Tower desarrollada por Plasma Studio, que utilizó brazos de impresión robóticos para imprimir en 3D 2000 ladrillos de terracota impresos en 3D. Otra experimentación sobre la optimización del diseño formal para lograr eficiencia estructural es evidente en los “Building Bytes 3D Printed Bricks” de Brian Peters, que ha adaptado una impresora 3D de escritorio para producir ladrillos cerámicos para la construcción de estructuras arquitectónicas. Con ello, podría predecirse que las impresoras 3D se convertirán en fábricas de ladrillos portátiles y económicas para la construcción a gran escala, con la implementación de va-

rias impresoras 3D que podrían funcionar simultáneamente *in situ*, utilizando material prefabricado o fabricado localmente, como los presentados en la Dutch Design Week, los mencionados Building Bytes 3D Printed Bricks de Brian Peters. A pesar de estos ensayos previos para optimizar el diseño formal de un ladrillo, para lograr eficiencia estructural, carecían de la referencia de bioaprendizaje de la fisiología formal. Como la mayoría de las formas de los ladrillos alcanzadas como resultado de estos estudios, no siguieron lógicas biológicas relacionadas con el caso de diseño típico. Además, la impresión 3D con arcilla todavía necesita más experimentación, ya que sufre modificaciones significativas antes, durante y después de la impresión 3D. Las propiedades materiales de la arcilla como viscosidad, color y textura, así como las posiciones y herramientas de impresión (es decir, impresora 3D, boquilla de extrusión, trayectorias de herramientas, etc.) se encuentran entre las variables que tienen efectos importantes en la resolución de la forma del resultado. De esta manera, la impresión 3D con arcilla todavía requiere una personalización formal para lograr la máxima resolución con una mínima deposición de material (Gürsoy, B.: “From Control to Uncertainty in 3D Printing with Clay”).

Además, estos estudios se centraron principalmente en los ladrillos como la primera y más pequeña escala de una unidad de construcción, pero cuando se trata de ampliar la escala a un bloque de construcción que forma parte de una columna, o a un elemento arquitectónico más grande, la impresión 3D con arcilla es más desafiante, debido al estrés acumulativo causado por el peso de las capas de arcilla húmeda durante la impresión, lo que provoca el colapso de las impresiones. Igualmente, la incomparable solidez de las capas de arcilla, tras su impresión, provocan grietas en las impresiones semisecas o secas antes de la cocción. Estos problemas en la impresión 3D de arcilla a gran escala han limitado el uso de arcilla a objetos más pequeños como ladrillos. Esto se evidencia por la escasez de bibliografía suficiente, o de proyectos anteriores que intentaron utilizar arcilla en columnas de impresión 3D (Real Academia Danesa, 2019; Arquitectura, Diseño y Conservación - Portal Danés de Investigación Artística y Científica, 2022). Aunque depende más de compuestos con hormigón, o con micelio, que tiene un peso más liviano y características adhesivas más fuertes (Abdallah y Estévez, 2023; Hahn, 2022; Mohseni *et al.*, 2023; Tyrer-Jones, 2023; aditivo.dk, n.d.; Shen *et al.*, 2023). Este evitar la arcilla por parte de profesionales e investigadores, cuando se trata de ampliar la aplicación arquitectónica, y el uso de materiales fáciles como el hormigón (ArchDaily, 2019; Anton *et al.*, 2021), afectan al núcleo de la sostenibilidad de estas tecnologías avanzadas de impresión 3D. Ya que sólo se trata de sustituir una técnica constructiva concreta por otra sin golpear el núcleo, la materialidad. Por lo tanto, es obligatorio exponer estos problemas e intentar abordar los verdaderos objetivos de sostenibilidad, ampliando los componentes básicos de la impresión 3D de arcilla. Por un lado, el autor insiste en la segmentación y pixelación del material de construcción, como método bioaprendido de agregación controlada, para el óptimo rendimiento físico y ambiental, y, por otro lado, el autor intenta también estudiar los aspectos técnicos y la viabilidad del escalado de los bloques de construcción impresos en arcilla en 3D. Ambos patrocinados por la inteligencia formal bioaprendida, y nutridos por la experimentación práctica de la fabricación digital avanzada, y el ciclo de retroalimentación de optimización. Por lo tanto, en el presente trabajo, el autor intenta resolver el desafío de la ampliación de escala en la impresión 3D de arcilla, para producir bloques de construcción que puedan

organizarse y agregarse espacialmente para producir una columna. Esto se logra a través de un taller de experimentación práctica interactiva, el BioLab, celebrado dentro del Bio-digital Architecture Master 2023. Este capítulo exhibirá dos diseños desarrollados por dos grupos diferentes de alumnos del mencionado Master. Los dos diseños reflejan diferentes morfologías formales y organizaciones espaciales, mediante teselación y apilamiento, así como diferentes microtexturas para que la funcionalidad biorreceptiva albergue diferentes cepas de algas (Abdallah y Estévez, 2023).

1.2. Bloques de Construcción Prefabricados de Arcilla Para una Arquitectura Emergente y Sostenible

La impresión 3D de aplicaciones arquitectónicas a gran escala con arcilla es un desafío, por lo que existe una evidente escasez en el estado de la técnica sobre este tema. Especialmente cuando el objetivo principal es la sostenibilidad y la emergencia, no el alarde de alta tecnología, la propaganda, y la celebración de herramientas avanzadas de vanguardia y alto costo, que obviamente están fuera del alcance del 70% de los habitantes de este planeta y sus comunidades.

Además, la idea de pixelar la arquitectura impresa en 3D en bloques de construcción no se había defendido suficientemente en la bibliografía anterior. Por la misma razón que no se había criticado el “glamour” de los brazos robóticos para impresión en 3D a gran escala, que son lo suficientemente caros como para no preocuparse por cualquier otra cosa que no sea la propaganda de quién es el más avanzado, pero no de quién es el más sincero al apuntar a la sostenibilidad en todos sus aspectos: economía material, disponibilidad, factibilidad, reproductibilidad, transferencia democrática de tecnología, eficiencia física y climática, etc., etc., etc.

Por otro lado, la adopción de dicho concepto de sostenibilidad va acompañada del desafío de la agregación espacial formal, así como de la estandarización de los bloques de construcción que permitan su empleo en soluciones arquitectónicas emergentes. Por lo tanto, desafortunadamente la mayoría de las aplicaciones arquitectónicas impresas en 3D eligen la solución de vaciado fácil: “traigamos un brazo robótico gigantesco para imprimir un iglú que no refleje nada más que el costoso robot y las enormes cantidades de hormigón...” Sin embargo, en la última década se ha informado de pocos intentos de imprimir bloques de construcción arquitectónicos en 3D. Centrándose principalmente en los avances técnicos del proceso de impresión 3D, o en el desarrollo de un material de base biológica (Molitch-Hou, 2014; Dezeen, 2012; Abdallah y Estévez, 2021). Al analizar la cantidad y las fechas de estos estudios, es obvio que los primeros intentos de bloques de construcción impresos en 3D se centraron principalmente en ladrillos de arcilla impresos en 3D, debido a su pequeña escala, y tal vez como una fase experimental. Mientras, cuando los brazos robóticos de impresión empezaron a popularizarse, parece que los criterios de innovación ignoraron la sostenibilidad que surge de la lógica de los sistemas colaborativos compuestos por “píxeles” o bloques de construcción. Este punto pone de relieve los objetivos distintos entre innovación técnica en construcción y fabricación, y entre construcción y fabricación con sostenibilidad democrática, o la “co-creación” y “co-construcción”, que se centra en

criterios reales de velocidad-sostenibilidad estructural y económica para el mejoramiento del proceso constructivo y la industria. Es decir, se trata de pasar de categorizar los bloques de construcción de arcilla en la industria de la construcción como una fase experimental, a adoptarlos como el proceso de construcción más sostenible y transferible a diferentes clases y categorías de comunidades, sin discriminación por motivos de dinero.

Por supuesto, no vivimos en la utopía: en algunas comunidades desarrolladas o tal vez en las más desarrolladas, las máquinas son más valiosas que los humanos hasta el punto de que reemplazar a los humanos por máquinas en la construcción es el principal objetivo de las partes interesadas, independientemente de sus sectores. Sin embargo, dado que el autor se ha criado en una comunidad “en desarrollo”, irónicamente con más de 7.000 años de antigüedad como la civilización más avanzada sobre la faz del planeta tierra, el Antiguo Egipto, así, se trata de adoptar la misma metodología de pensamiento crítico que mis antepasados, basando los criterios y la metodología de diseño en lo factible, en las herramientas y en los recursos para la resolución de problemas.

Así, los antiguos egipcios construyeron las gigantescas pirámides a partir de bloques de construcción, tomando todos los criterios de sostenibilidad como el único enfoque correcto desde el punto de vista tecnológico, económico y social: la planificación arquitectónica precisa, que hasta el momento no estaba completamente desbloqueada, además de respaldar el estatus social y económico de la comunidad, al brindar oportunidades laborales ilimitadas para los ya interesantes recursos humanos calificados existentes, equilibrando los márgenes de tiempo y costo de una empresa tan gigantesca. Las más grandes de toda la historia hasta el momento actual, tras muchos intentos por todo el mundo de copiarlas, e innumerables afirmaciones falsas y divertidas de que tan gigantesca y excelente arquitectura de las pirámides de Egipto sólo fue posible que la realizaran extraterrestres...

Por lo tanto, los bloques de construcción son la solución definitiva para construir sistemas expandibles regenerativos ilimitados y coherentes: desde las células epiteliales, que trabajan juntas para curar una herida en la piel, hasta las tremendas pirámides egipcias. Sólo que hoy tenemos el parámetro agudo del tiempo. Y dado que el objetivo del presente estudio era desarrollar elementos estructurales, columnas, a partir de bloques de construcción para soluciones tanto sostenibles como de emergencia, por lo tanto, la velocidad de construcción debe considerarse tanto como la eficiencia del desempeño estructural, como también el aspecto económico. Centrándose en la lógica formal de estos bloques de construcción, devenida por las propiedades de su material, la arcilla. Mientras, se analiza la posibilidad de estandarización de estos bloques de construcción, iteraciones y arreglos espaciales de teselación.

El ejemplo más cercano de columnas de arcilla impresas en 3D se informó en Anton y Abdelmahgou (2018), de componentes cerámicos entrelazados impresos en 3D, que se ensamban en columnas segmentadas de 2,5 metros de altura. Sin embargo, ese estudio empleó la extrusión de pasta cerámica, colocada robóticamente en moldes semicilíndricos, lo que afecta la velocidad, el costo y la complejidad del proceso de fabricación. Además, la principal preocupación del estudio fue la extrusión de arcilla en la generación de trayectorias de herramientas a medida, lo que se identifica más como un enfoque en el avance técnico de la extrusión de pasta que en la aplicación factible de las columnas generadas. Aunque el estudio informado explora métodos alternativos de deposición de arcilla,

diferentes del corte horizontal convencional de modelos 3D basados en la trayectoria de herramientas y la distribución volumétrica del material. Sin embargo, el diseño y el flujo de trabajo generados son inadecuados para una reproductibilidad y estandarización económica sostenible por múltiples razones. Primero, la metodología de fabricación mediada, que depende del uso de una superficie de soporte que aumenta el costo y los procesos del proceso de fabricación. Luego, el comportamiento material desigual e impredecible de la contracción de la arcilla, debido a la impresión de los elementos de arcilla sobre estos soportes curvos. Así como la complejidad del proceso de fabricación, al tener que secar todas las piezas impresas mientras aún están en el molde, para evitar deformaciones formales que conduzcan a la desviación del núcleo cilíndrico. Este estudio y otros similares sobre la impresión sobre superficies curvas (Mostafavi *et al.*, 2015; Zaha-hadid.com, 2023; Marjan Colletti, s.f.) se han dirigido principalmente a la expresión formal más que a la justificación formal de motores funcionales y sostenibles. Aunque estos estudios demostraron la capacidad de retención de forma de la arcilla sobre una superficie de soporte, durante la impresión 3D, hasta más de 60 grados de inclinación con respecto a la dirección de la gravedad. Sin embargo, la dependencia de estos sistemas de fabricación de la impresión sobre soportes curvos personalizados utilizando plástico y hormigón dificulta su valor de sostenibilidad y reproductibilidad. Mientras se centra principalmente en la creación de formas complejas, que son imposibles o demasiado costosas de fabricar con cualquier otra técnica digital, como inconveniente de la complejidad del problema computacional de resolver cada geometría en una solución computacional única.

Si bien el objetivo del estudio actual es mostrar cómo la impresión 3D podría permitir la fabricación asequible de componentes de construcción con características personalizadas, libertad geométrica, velocidad de fabricación y economía de materiales. Con énfasis en el ensamblaje de componentes, ya que revela la reproductibilidad y precisión en aras de la estandarización cuando se trata de usar arcilla, que es propensa a deformarse y encogerse cuando se seca.

Además, el contexto educativo de experimentación práctica de este flujo de trabajo de diseño a producción permitió el ciclo de retroalimentación de optimización, que no sólo se basa en la simulación digital, sino también en la calibración física del material, que se ocupa de la relación proporcional entre la plasticidad y la viscosidad de la arcilla y las configuraciones de impresión, como tamaño de la boquilla, altura de la capa, velocidad de impresión, flujo de material y temperatura, así como los parámetros de diseño ajustables, como la composición jerárquica del diseño, número de capas, altura de la capa, etc.

Los problemas posteriores a la impresión, como el secado desigual debido a la contracción desigual del material, causada por la pérdida de agua que forma grietas a lo largo y entre las capas extruidas, y la pérdida de capacidad estructural debido a fallas del material alrededor de las grietas, se monitorearon, analizaron y calibraron, personalizando el diseño geométrico y ajustes de impresión, así como reducir el agua de la pasta de arcilla y controlar la temperatura/humedad en la sala de secado.

Por lo tanto, el estudio presente informa sobre un sistema de construcción colaborativo, que incorpora la creación de formas generales hechas de bloques de construcción estandarizados, y que se imprimen en 3D utilizando una técnica de deposición controlada de material. A la vez que amplía la superposición entre diseño y fabricación para una produc-

ción más rápida de elementos impresos en 3D a gran escala, donde el diseño, el cálculo, los experimentos de materiales y fabricación se producen de forma sincrónica. Y trata de permitir la calibración de redes entre forma, material y rendimiento. Al mismo tiempo que ofrece una solución de construcción sostenible operable, alternativa a la automatización de procesos rígidos para la fabricación aditiva de técnicas de construcción impresas en 3D *in situ*, voluminosas y a gran escala.

1.3. Montaje de Bloques de Construcción de Arcilla Prefabricados Impresos en 3D vs. Impresión 3D *in Situ* a Escala Real (Velocidad, Coste, Eficiencia Ambiental y Estructural, Biorreceptividad)

Aunque hay una gran escasez de estudios que comparen el montaje en obra con la impresión 3D en obra, y a pesar de la enorme propaganda para vender robots de impresión 3D como la solución de construcción más rápida en obra, el autor quiere resaltar que la estimación de la velocidad del proceso de construcción debe incluir la duración de la solidez de las impresiones, así como un análisis de las propiedades mecánicas, estructurales y ambientales de estos edificios impresos en 3D a gran escala en comparación con los edificios ensamblados, que también sufre una escasez de estudios. Aparentemente, los edificios impresos en 3D *in situ* son más rápidos que la construcción convencional con ladrillos, ya que se informa que la construcción convencional de una casa de dos pisos normalmente tomaría entre 12 y 16 semanas para construir la estructura a prueba de viento y agua. Y una espera de 24 semanas para el equipamiento y el acabado (www.granddesignsmagazine.com, s.f.). Mientras que el montaje robotizado de ladrillos en obra es más rápido ya que un robot colocador de ladrillos puede colocar 1.000 ladrillos en una hora y completar una casa entera en dos días (fastcompany.com). Y, en cambio, la impresión 3D completa de una casa *in situ* requiere menos de 24 horas (Reynolds, 2022; Carpenter, 2019; 3Ddeal.com, 2023). A pesar de que esta comparación de velocidad de construcción parece favorecer a la impresión 3D *in situ*, la base de la comparación reportada no es sencilla, ya que muy pocos estudios previos informaron sobre la duración de solidez requerida después de la impresión en el sitio, con márgenes que se extienden desde de tres semanas a 45 días (Carpenter, 2019; [The World's Largest 3D-Printed Neighborhood Is Here](http://TheWorldsLargest3D-PrintedNeighborhoodIsHere.com), s.f.). Además, la complejidad de la programación arquitectónica, así como el volumen total del edificio, son parámetros vitales para una comparación honesta y realista, que hasta el momento no se ha realizado en un estudio científico comparativo entre las diferentes estrategias constructivas de un mismo diseño arquitectónico de edificio, pues la mayoría de los estudios comparativos se centran principalmente en los aspectos de composición, propiedades y costos del material (Schuldt *et al.*, 2021; Allouzi, Al-Azhari y Allouzi, 2020). Por lo tanto, comparando la colocación robotizada *in situ* de ladrillos o bloques de construcción, que requiere de 24 a 48 horas, es más rápida que la impresión 3D de un edificio a gran escala en el sitio. Dado que la duración del montaje robotizado es la duración total de la construcción, la solidez y la disponibilidad para el uso del edificio, a diferencia del caso de la impresión 3D de gran escala *in situ*, que requiere entre 24 y 48 horas para imprimir pero al menos tres semanas para secar. Esta comparación es tanto más realista cuanto que neutraliza la discrepancia

entre el trabajo manual y la construcción robotizada, así como el efecto económico relacionado. Así, incluso si el objetivo es reducir la necesidad de mano de obra humana y sustituirla por robots, la lógica del ensamblaje de bloques de construcción prefabricados sigue ganando.

En lo que respecta al costo del material, hubo varios estudios que informaron la rentabilidad del uso de materiales de tierra y adobe para la impresión 3D en el sitio, informando que el costo más bajo está entre 4.000 y 1.000 dólares (Gregurić, 2018). Sin embargo, estos estudios carecen de base científica para generalizar sus resultados. A pesar de que la tierra, el adobe o la arcilla son materiales abundantes y baratos, casi ninguno de los informes anteriores sobre la impresión 3D a gran escala *in situ* ha estimado los costes de procesamiento del material. Algunas literaturas han analizado científicamente que el uso de tierra como material de impresión 3D para proyectos *in situ* a escala real requiere procesos de excavación y conversión del material en pasta imprimible (Perrot, Rangeard y Courteille, 2018; Gomaa *et al.*, 2021; Munir y Kärki, 2021). Además, la mayor parte de los estudios publicados sólo tienen en cuenta el coste del material, pero ¿qué pasa con el coste de las máquinas? Los robots más baratos y de menor tamaño pueden costar 100.000 dólares (Aniwaa, s.f.) y ¿qué pasa con el costo de imprimir más que un simple cilindro hueco, imprimiendo una casa completamente funcional y estéticamente agradable (Garfield, s.f.)? ¿Qué pasa con la estimación de los costos de energía? Ignorar todos estos aspectos al informar sobre cómo la impresión 3D *in situ* a gran escala es rentable es engañoso y deshonesto. Además, la estimación de costes debe incluir el ciclo de vida o la caducidad, así como los costes de mantenimiento de las casas impresas en 3D a largo plazo (Re, Biccari y Corallo, 2022). Y por otro lado, la mayoría de la bibliografía sobre impresión 3D *in situ* no tiene suficientes mediciones de las duraciones operativas de los edificios impresos en 3D, para evaluar su respuesta a las tensiones ambientales y estructurales (Dixit, 2019). Este es un aspecto importante a la hora de estimar el desgaste de estos edificios monoestructura, donde el coste de mantenimiento podría volver a ser el coste total del edificio, ya que no existe la posibilidad de sustituir una pieza por otra como en el caso de sistemas colaborativos, como ladrillos o bloques de construcción. Todo ello pone esta cuestión en una zona gris de incertidumbre, y aparece más como propaganda que como una necesidad real de sostenibilidad.

Al comparar las aplicaciones arquitectónicas *in situ* a gran escala impresas en 3D con el ensamblaje de bloques de construcción prefabricados impresos en 3D *in situ*, en términos de rentabilidad, una vez más el ensamblaje de bloques de construcción es una opción más inteligente y más rentable a largo plazo.

Finalmente, cuando se trata de comparar las propiedades mecánicas y ambientales entre los bloques de construcción prefabricados y los voluminosos edificios impresos en 3D a gran escala, por lógica, es más asequible y disponible probar las propiedades de estas piezas uniformes de escala limitada, que no probar una estructura impresa en 3D de una casa completa que el autor ni vio hasta el momento. Esto está respaldado por Universiteit Gent (s.f.), que sostiene que la prueba mecánica máxima que podría aplicarse para las estructuras impresas en 3D completas es una prueba entre dos capas impresas, al tiempo que predice que este tipo de estructura puede sufrir múltiples problemas estructurales y ambientales como grietas de post-secado. Por contra, existen numerosas publicaciones

que tratan de las propiedades mecánicas y ambientales de los bloques de construcción, incluidos los diversos materiales de construcción posibles (Estévez y Abdallah, 2022; Xiao *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2023; Joh *et al.*, 2020; Ferretti *et al.*, 2022; Van Den Bergh *et al.*, s.f.). Esto implica que, una vez más, los bloques de construcción prefabricados son más aptos para aplicaciones arquitectónicas científicas, mensurables y realistas de forma sostenible y en casos de arquitectura de emergencia. Mientras que la impresión 3D *in situ* a gran escala no se puede evaluar ni probar de forma estructural holística.

Además, la capacidad de textura de los edificios impresos en 3D a gran escala se ve obstaculizada por los grandes espesores de las paredes resultantes, merced a las amplias boquillas de impresión utilizadas. Cuando hasta el momento no existe nada como una casa biorreceptiva, impresa en 3D, que sea capaz de albergar en sus paredes el crecimiento de formas de vida naturales biodiversas. Como es el caso de los bloques de construcción prefabricados, donde numerosos estudios han propuesto y analizado sus texturas superficiales y su biorreceptividad (Abdallah y Estévez, 2023; UCL, 2022).

Dada toda esta evidencia sobre la eficiencia sostenible de los bloques de construcción prefabricados en todos los aspectos, el autor pretendía implementar este pensamiento y proceso de diseño crítico a través de una experimentación educativa interactiva. Establecer la verdadera conciencia de los criterios de sostenibilidad en las nuevas generaciones de arquitectos y diseñadores como se muestra en el siguiente apartado.

2. BioLab 2023: Bloques de Construcción de Columnas de Arcilla Impresos en 3D (Materiales, Métodos y Resultados)

El taller BioLab 2023 –como parte del Máster de Arquitectura Biodigital– se centró en el desarrollo de bloques de construcción de arcilla biorreceptiva impresos en 3D que se unen para crear una columna. A cada grupo compuesto por dos estudiantes se le dio el desafío de diseñar un bloque de construcción uniforme, que tuviera una forma topológica extendida, para aumentar su superficie, así como que tuviera una microtextura que se pudiera imprimir con arcilla, con una boquilla de impresión de 0,3 a 0,7. Y se trataba de lograr biorreceptividad mediante la inmovilización de cinco cepas de algas diferentes: *Mougeotia sp.*, *Oedogonium foveolatum*, *Zygnema sp.*, *Microspora sp.*, *Spirogyra sp.* y *Pyrocystis fusiformis*, cultivadas en un cultivo mixto siguiendo los métodos descritos por Abdallah y Estévez (2023). La microtextura está diseñada para lograr una relación entre sus nichos y el tamaño de las células de las cepas de algas hospedadas de 0,05% a 0,75% del nicho con respecto a la escala celular según los hallazgos de Abdallah y Estévez (2023). Lograr esta escala de resolución tan fina fue el principal desafío, cuando la impresión 3D es con arcilla. Además, cada diseño de los bloques de construcción uniformes debe aceptar múltiples orientaciones de ensamblaje para diversas agregaciones espaciales de la columna.

Así, dos grupos de dicho Máster desarrollaron dos topologías diferentes basadas en el empleo de paraboloides y conoides hiperbólicos. Estos grupos están etiquetados en las siguientes líneas como DA (grupo Danielle Amani) y JL (grupo Jonathan Lim). Y cada diseño correspondiente a cada grupo será analizado según los siguientes criterios: forma

general, lógica ensambladora, patrón biorreceptivo, impresionabilidad, optimización de la geometría y la textura, y estabilidad post-impresión.

El diseño de bloques de construcción del grupo DA empleó una metodología de búsqueda de forma basada en expandir el área de superficie del volumen de diseño mediante el uso de paraboloides hiperbólicos (Weisstein, s.f.), inspirados en el diseño del techo de las escuelas de la Sagrada Familia de Antoni Gaudí en Barcelona (Estévez y Abdallah, 2023; Abdallah, s.f.) y en bibliografía previa sobre formas biorreceptivas (Mustafa, Prieto y Ottele, 2021). Mientras que la microtextura empleó una trayectoria en zigzag para entregar la superficie periódica del paraboloides hiperbólico con tamaños de nichos que oscilan entre 0,3 y 0,5 cm, como se muestra en la *Figura 2*.

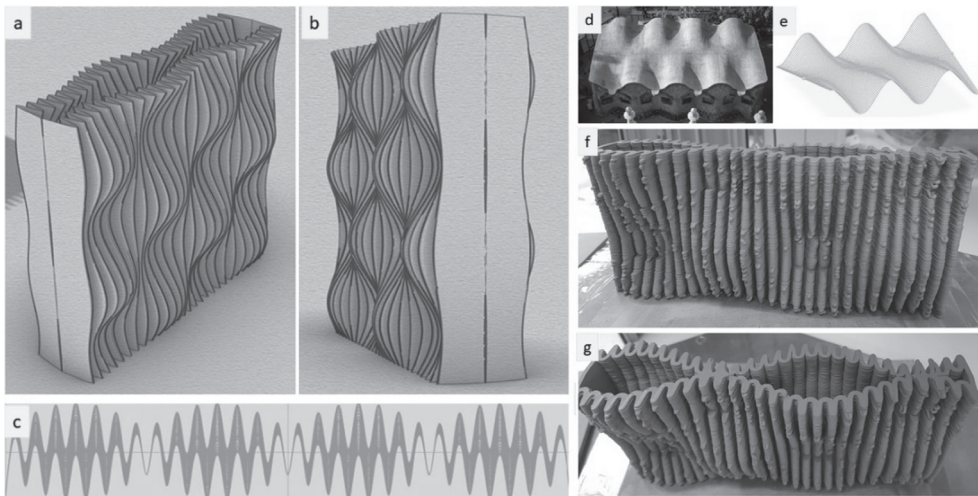


Figura 2. Diseño de bloques de construcción del grupo DA: proceso de búsqueda de forma de diseño del bloque para la columna de arcilla. a) y b) Diferentes perspectivas laterales del bloque. c) Vista en planta del bloque. d) y e) Fuentes de inspiración para el proceso de búsqueda de forma: d) cubierta de las escuelas de la Sagrada Familia de Gaudí, y e) superficie de paraboloides hiperbólico. f) y g) Imágenes en perspectiva de los bloques de arcilla, impresos en 3D, del grupo DA, que muestran la coherencia de la geometría impresa en arcilla sin grietas ni colapso después de la impresión y del secado.

La lógica de montaje del bloque DA siguió una estrategia de apilamiento vertical con posibilidad de desplazamiento recíproco entre los picos (protuberancias) y los pozos (hendiduras). Además, el ciclo de calibración del material, impresión 3D, diseño y optimización de la textura en el caso del diseño del bloque DA también fue sencillo, con una masa de

arcilla húmeda al 15% y después de tres ciclos de calibración-retroalimentación, ajustando principalmente la altura de la capa impresa. Teniendo en cuenta la altura de la sonda Z y el caudal, se logró producir una superficie reglada texturizada desde ambos lados, interno y externo, eliminando el relleno interior que se suponía que actuaría como soporte para las paredes doblemente curvadas. Sin embargo, el proceso de calibración reveló que los soportes de relleno agregaron carga en las paredes adyacentes, lo que provocó el colapso de las capas y también de los soportes. Mientras que las superficies doblemente curvadas de las paredes de bloques actuaron como sus propios soportes equilibrando la carga y el peso en ambos lados de la pared, como se muestra en la *Figura 3*.

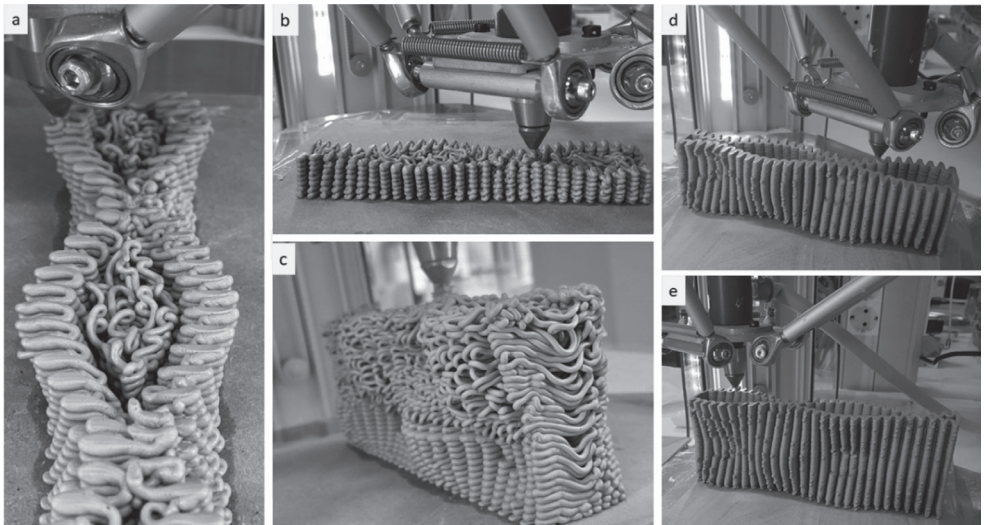


Figura 3. Proceso de calibración de impresión 3D del bloque del grupo DA que revela el circuito de retroalimentación de la reología del material durante la impresión y la adhesión de capas, retención de forma y resistencia después de la impresión, con la optimización del diseño formal. a) y b) Muestra de la primera calibración de impresión 3D, utilizando soportes de relleno de las paredes doblemente curvadas del bloque, que exhiben las deformaciones acumulativas de las capas impresas causadas por la altura de la boquilla, deteriorada con el alto caudal del 120% de esta iteración de impresión. c) Muestra el colapso de la impresión después de la decimotercera capa incluso después de ajustar la altura de la boquilla de impresión (la sonda Z), así como el flujo de impresión al 100%, lo que implicó una calibración adicional de la sonda Z y de la altura de la capa en el código G original del archivo de impresión, así como la eliminación de los soportes interiores. d) y e) Bloque impreso en 3D con éxito, después de 3 ciclos de retroalimentación y calibración para diseñar e imprimir bucles de optimización de configuraciones.

Los bloques DA impresos exhibieron una excelente retención de forma y alta resolución de los detalles de la microtextura. Además, los bloques impresos en 3D tuvieron un proceso de secado saludable, sin grietas ni deformaciones desiguales por contracción merced a las fuerzas igualadas en los lados de cada pared. Esto se debió al diseño general del bloque, informado por la superficie del paraboloides hiperbólico y por las líneas de capas en zigzag de microtextura que aumentaron el equilibrio en ambos lados de cada línea de capa. Además, el bloque mostró coherencia e integración de dimensiones fractales, ya que se realizó la misma lógica de línea en zigzag en ambas escalas, el diseño de forma general y el diseño de líneas de capa. Esta coherencia ha mantenido intactas las impresiones 3D después de la impresión y durante el secado, revelando su eficiencia estructural y mecánica incluso antes de la cocción.

Mientras que el diseño de bloques del grupo JL empleó una síntesis de geometría compleja basada en una matriz polar alrededor de un centro, combinando conoides (Rovenski, 2000) y paraboloides hiperbólicos como superficies de transición desde las partes bajas a las altas (Weisstein, s.f.), inspirado en Gaudí y sus modelos de cadenas colgadas (Estévez y Abdallah, 2023; Abdallah, s.f.), maximizando el área de superficie del bloque, como se muestra en la Figura 4. Mientras que la lógica de ensamblaje del bloque JL permitió dos orientaciones espaciales diferentes de los bloques entre sí, dado que la columna se puede ensamblar apilando verticalmente un bloque sobre otro, entrelazando las protuberancias del bloque inferior en los huecos inferiores del bloque superior, o volteando el bloque superior verticalmente, entrelazando protuberancias y paraboloides hiperbólicos, como entrecruzando los dedos de las dos manos.

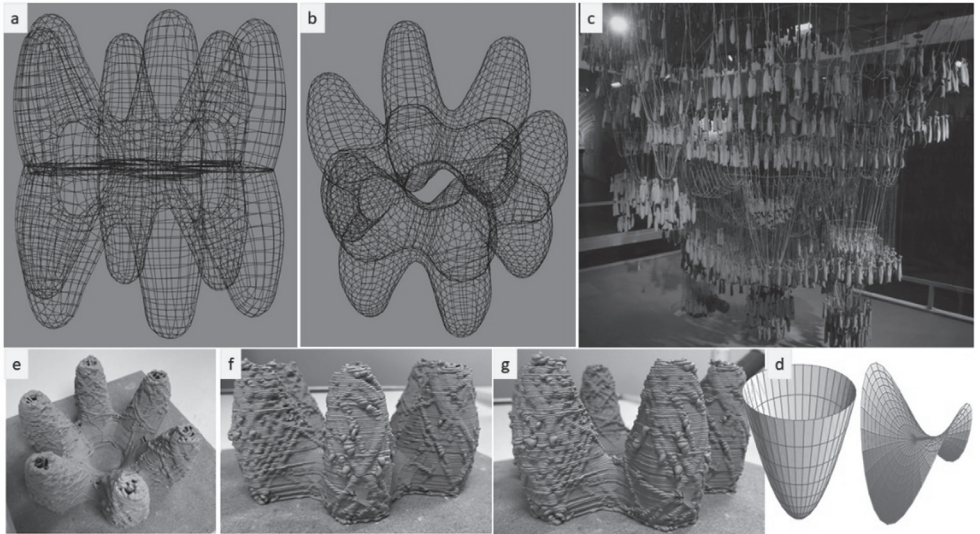


Figura 4. Proceso de búsqueda de forma del diseño de bloques del grupo JL basado en una síntesis de geometría compleja que combina paraboloides y conoides hiperbólicos para maximizar el área de superficie. a) y b) Dos perspectivas diferentes de la estructura alámbrica del diseño 3D. c) Fuente de inspiración: el modelo de cadenas colgadas de Gaudí. d) Paraboloides y conoide hiperbólicos, que son las principales geometrías que componen la geometría compleja del bloque. e), f) y g) Imágenes de los bloques de arcilla impresos en 3D y su post-secado, que exhiben una retención moderada de la forma, donde se detectó un colapso menor en las capas superiores.

Como se muestra en la *Figura 4*, la microtextura del bloque JL adoptó un diseño aleatorio de encaje cruzado desigual. Esta distribución desigual de la microtextura, así como la tensión en la parte del área central del bloque que soporta la carga trasladada de los conoides inclinados ha provocado el agrietamiento del bloque seco, comenzando desde abajo y aumentando hacia arriba. Además, la impresión 3D del material y la calibración de la microtextura requirieron de cuatro a cinco iteraciones para ajustar el caudal al 100% y la altura y el espesor de la capa a 0,5, como se muestra en la *Figura 5*.

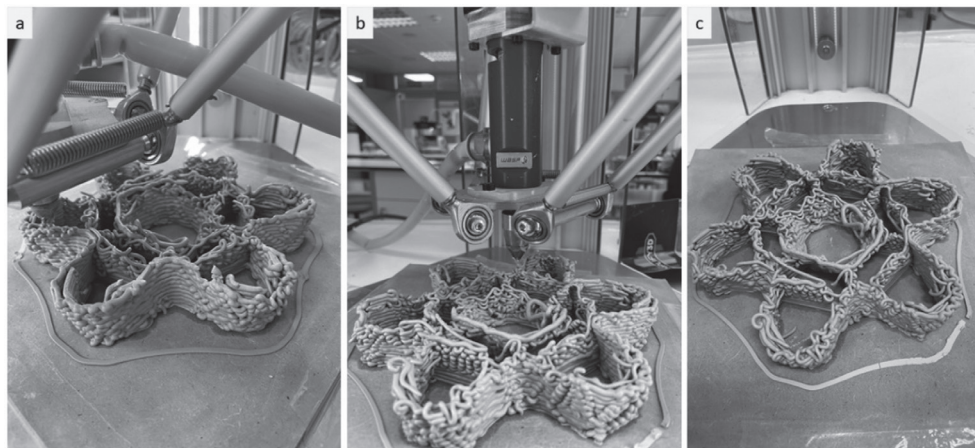


Figura 5. Proceso de calibración de la impresión 3D del bloque del grupo JL que revela el circuito de retroalimentación de la reología del material durante la impresión y la adhesión de capas, retención de forma y resistencia después de la impresión, con la optimización del diseño formal. Imágenes de la primera calibración: iteraciones en las que el caudal oscilaba entre el 150% y el 100%, y el contenido de agua en la masa de arcilla entre el 18 y el 20%, lo que provocó el colapso de las capas superiores, así como la baja resolución de los detalles. Estos problemas se solucionaron para entregar las impresiones finales como se muestra en la Figura 4.

Comparando los dos diseños de bloques, el diseño JL tiene más potencial en términos de complejidad formal, estética y agregación espacial que el diseño DA. Sin embargo, el diseño JL proporciona una menor superficie y microtextura para la coherencia estructural y la inmovilización pasiva de las cepas de algas, debido al efecto de superficie tensada y a los conoides estrechos, que crearon una tensión desigual en el interior de la pared del bloque provocando su agrietamiento. Mientras, el diseño DA fue más coherente, al adoptar una lógica formal de línea en zigzag en la dimensión fractal de la superficie de paraboloides hiperbólicos de la pared, que jugó un papel clave en la distribución uniforme de la carga en los dos lados de la pared, y al mismo tiempo proporcionó un área de superficie biorreceptiva extendida tanto interna como externamente.

Referencias Bibliográficas

3Ddeal.com (2023). *3D Printing a House: Time Duration*. Medium. <https://medium.com/@3Ddeal/3d-printing-a-house-time-duration-9d7f8374c414>.

- Abdalla, H., Fattah, K.P., Abdallah, M. & Tamimi, A.K. (2021). Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House. *Sustainability*, 13(21), p. 11978. <https://doi.org/10.3390/su132111978>.
- Abdallah, Y.K. (s.f.). *Gaudi Morphogenesis*. https://www.academia.edu/31718614/Gaudi_Morphogenesis_pdf.
- Abdallah, Y.K. & Estévez, A.T. (2021). 3D-Printed Biodigital Clay Bricks. *Biomimetics*, 6(4), p. 59. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6040059>.
- Abdallah, Y.K. & Estévez, A.T. (2023). 3D-Printed Bioreceptive Tiles of Reaction–Diffusion (Gierer–Meinhardt Model) for Multi-Scale Algal Strains' Passive Immobilization. *Buildings*, 13(8), p. 1972. <https://doi.org/10.3390/buildings13081972>.
- Abdallah, Y.K. & Estévez, A.T. (2023). Biomaterials Research-Driven Design Visualized by AI Text-Prompt-Generated Images. *Designs*, 7(2), p. 48. <https://doi.org/10.3390/designs7020048>.
- Abdallah, Y.K. & Estévez, A.T. (2023). Biowelding 3D-Printed Biodigital Brick of Seashell-Based Biocomposite by *Pleurotus ostreatus* Mycelium. *Biomimetics*, 8(6), p. 504. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8060504>.
- additive.dk. (s.f.). *Adrian Rygh Brun - International 1st. prize: 3D printed concrete/Mycelium*. <https://additive.dk/integrated-3d-printed-wall>.
- Advances in Wound Care. (2021). *Epithelialization in Wound Healing: A Comprehensive Review | Advances in Wound Care*. <https://doi.org/10.1089%2Fwound.2013.0473>.
- Agustí-Juan, I. & Habert, G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2780-2791.
- albertoestévez.es. (s.f.). *Alberto T. Estévez architect*. <http://albertoestévez.es/>.
- 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, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/1424682>.
- Aniwa. (s.f.). *Clay 3D printer: selection and guide to ceramic clay 3D printing*. Recuperado de <https://www.aniwa.com/buyers-guide/3d-printers/clay-3d-printer-selection-and-guide/>.
- Aniwa. (s.f.). *Guide to Robotic Arm 3D Printing*. <https://www.aniwa.com/guide/3d-printers/robotic-arm-3d-printing-guide/>.
- Anónimo. (2023). *This 3D-printed house could resist a 9.0 magnitude earthquake*. <https://www.euronews.com/next/2023/10/25/this-company-has-3d-printed-a-house-that-can-withstand-a-90-magnitude-earthquake>.
- Anton, A. & Abdelmahgou, A. (2018). Ceramic Components - Computational Design for Bespoke Robotic 3D Printing on Curved Support. *eCAADe Proceedings*. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2018.2.071>.
- Anton, A., Reiter, L., Wangler, T., Frangez, V., Flatt, R.J., & Dillenburger, B. (2021). A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. *Automation in Construction*, 122, p. 103467.
- ArchDaily. (2019). *ETH Zurich Develops 3D-Printed Concrete Columns*. <https://www.archdaily.com/921635/eth-zurich-develops-3d-printed-concrete-columns>.
- ArchDaily. (2020). *5 Alternative Materials for Building Emergency Shelters*. https://www.archdaily.com/939873/5-alternative-materials-for-building-emergency-shelters?ad_campaign=special-tag.

- ArchDaily. (2020). *Alternative Healthcare Facilities: Architects Mobilize their Creativity in Fight against COVID-19*. https://www.archdaily.com/937840/alternative-healthcare-facilities-architects-mobilize-their-creativity-in-fight-against-covid-19?ad_campaign=special-tag.
- ArchDaily. (2020). *Community Centers for Displaced Populations*. https://www.archdaily.com/939820/community-centers-for-displaced-populations?ad_campaign=special-tag.
- ArchDaily. (2020). *Public Spaces with Scaffolding: an Alternative in Emergency Situations*. https://www.archdaily.com/940513/public-spaces-with-scaffolding-an-alternative-in-emergency-situations?ad_campaign=special-tag.
- ArchDaily. (2020). *The Use of Prefabrication in 6 Emergency Projects Around the World*. https://www.archdaily.com/939754/the-use-of-prefabrication-in-6-emergency-projects-around-the-world?ad_campaign=special-tag.
- ArchDaily. (2021). *Refugee Camps: From Temporary Settlements to Permanent Dwellings*. https://www.archdaily.com/940384/refugee-camps-from-temporary-settlements-to-permanent-dwellings?ad_campaign=special-tag.
- Architecture, Design and Conservation - Danish Portal for Artistic and Scientific Research. (2022). *Textile Columns: Drawing and weaving with 3D printed clay: BE-AM 2022 Symposium and Exhibition*. <https://adk.elsevierpure.com/en/publications/textile-columns-drawing-and-weaving-with-3d-printed-clay>.
- architectureindevelopment.org. (s.f.). *A--D -- Mousgoum dwellings*. <https://architectureindevelopment.org/project/68>.
- AZoM.com. (2022). *3D Printing Clay Bricks for Construction*. <https://www.azom.com/news.aspx?newsID=57853>.
- Bazli, M., Ashrafi, H., Rajabipour, A. & Kutay, C. (2023). 3D printing for remote housing: Benefits and challenges. *Automation in Construction*, 148, p. 104772. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104772>.
- Bergaya, F. & Lagaly, G. (2006). General introduction: clays, clay minerals, and clay science. *Developments in Clay Science*, 1, pp. 1-18.
- Biomimicry 3.8. (s.f.). *Biomimicry Resource Handbook*. <https://biomimicry.net/the-buzz/resources/biomimicry-resource-handbook/>.
- Boafo, F., Kim, J.-H. & Kim, J.-T. (2016). Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways. *Sustainability*, 8(6), p. 558. <https://doi.org/10.3390/su8060558>.
- Bories, C., Vedrenne, E., Paulhe-Massol, A., Vilarem, G. & Sablayrolles, C. (2016). Development of porous fired clay bricks with bio-based additives: Study of the environmental impacts by Life Cycle Assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 125, pp. 1142-1151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.042>.
- Building Bytes 3D Printed Bricks by Brian Peters at Dutch Design Week. <https://www.dezeen.com/2012/10/31/building-bytes-3d-printed-bricks-brian-peters/>.
- Camacho, D.D., Clayton, P., O'Brien, W.J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R. & Salomone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, pp. 110-119.
- Carpenter, S. (2019). *3D Printing in Construction – How Long Does it Take to Print a House?* <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-construction-how-long-does-it-take-to-print-a-house/>.

- Chang, B. (s.f.). *The use of 3D printing in homebuilding is set to drastically expand in 2023*. <https://www.businessinsider.com/2023-new-year-of-3d-printed-homes-us-photos-2022-12#but-proponents-of-the-construction-tech-like-zack-mannheimer-ceo-of-3d-printing-construction-startup-quist-believe-printing-may-alleviate-some-of-the-sore-spots-in-the-traditional-home-building-process-12>.
- Civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu. (s.f.). Jordan. https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/where/middle-east-and-northern-africa/jordan_en.
- Delgado, J.M.D., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M. and Owolabi, H. (2019). Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26, p. 100868.
- Dezeen. (2012). *Building Bytes 3D printed bricks by Brian Peters at Dutch Design Week*. <https://www.dezeen.com/2012/10/31/building-bytes-3d-printed-bricks-brian-peters/>.
- Dezeen. (2021). *First tenants move into 3D-printed home in Eindhoven*. <https://www.dezeen.com/2021/05/06/3d-printed-home-project-milestone-eindhoven/>.
- Dezeen. (2021). *Seven 3D-printed houses that have been built around the world* <https://www.dezeen.com/2021/05/14/seven-3d-printed-houses-around-world/>.
- 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, p. 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012012>.
- Dong, L., Wang, Y., Li, H.X., Jiang, B. & Al-Hussein, M. (2018). Carbon reduction measures based LCA of prefabricated temporary housing with renewable energy systems. *Sustainability*, 10(3), p. 718.
- Edwards, B. (2010). *Rough guide to sustainability*. Riba Publishing.
- Estévez, A.T. & Abdallah, Y.K. (2022). The New Standard is Biodigital: Durable and Elastic 3D-Printed Biodigital Clay Bricks. *Biomimetics*, 7(4), p. 159. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7040159>.
- Estévez, A.T. & Abdallah, Y.K. (2023). Biodigital design and symbolism in the Sagrada Família Biodigital Bridge. *World Review of Science, Technology and Sustainable Development*, 19(4), pp. 365-382. <https://doi.org/10.1504/wrstd.2023.133889.euronews>.
- Estévez, A.T. (2023). "Biodigital Architecture and Genetics", en Alberto T. Estévez (ed.), *5th International Conference for Biodigital Architecture & Genetics*, iBAG-UIC Barcelona, Barcelona, p. 15.
- Feng, P., Meng, X., Chen, J.-F. & Ye, L. (2015). Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction and Building Materials*, 93, pp. 486-497. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>.
- Ferretti, E., Moretti, M., Chiusoli, A., Naldoni, L., De Fabritiis, F. & Visonà, M. (2022). Mechanical Properties of a 3D-Printed Wall Segment Made with an Earthen Mixture. *Materials*, 15(2), p. 438. <https://doi.org/10.3390/ma15020438>.
- Foley, N.K. (1999, Septiembre). *Environmental Characteristics of Clays and Clay Mineral Deposits*. <https://doi.org/10.3133/70220359>
- Garfield, L. (s.f.). *In under six months, a robot can produce this home for as little as \$300,000*. <https://www.businessinsider.com/home-3d-printer-robot-construction-branch-technology-2018-4> [Acceso 22 Nov. 2023].

- Gomaa, M., Jabi, W., Veliz Reyes, A. & Soebarto, V. (2021). 3D printing system for earth-based construction: Case study of cob. *Automation in Construction*, 124, p. 103577. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577>.
- Gregurić, L. (s.f.) *How Much Does a 3D Printed House Cost in 2021?* <https://all3dp.com/2/3d-printed-house-cost/>.
- Gunawardena, T. & Mendis, P. (2022). Prefabricated Building Systems—Design and Construction. *Encyclopedia*, 2(1), pp. 70-95. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010006>.
- Gürsoy, B. (s.f.) *From Control to Uncertainty in 3D Printing with Clay*. http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2018_104.pdf.
- Hahn, J. (2022). *Blast Studio 3D prints column from mycelium to make 'architecture that could feed people'*. <https://www.dezeen.com/2022/01/18/blast-studio-tree-column-mycelium-design/>.
- Hayes, S., Toner, J., Desha, C. & Gibbs, M. (2020). Enabling biomimetic place-based design at scale. *Biomimetics*, 5(2), p. 21.
- Herder, G. (2022). *First 3D Printed House Made From Local Raw Earth*. <https://www.electictrends.com/first-3d-printed-house-made-from-local-raw-earth/>.
- Hossain, M.A., Zhumabekova, A., Paul, S.C. & Kim, J.R. (2020). A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market. *Sustainability*, 12(20), p. 8492. <https://www.fastcompany.com/3062703/this-bricklaying-robot-can-build-low-cost-houses-in-two-days>.
- Jiang, H., Qin, S., Fu, J., Zhang, J. & Ding, G. (2021). How to model and implement connections between physical and virtual models for digital twin application. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, pp. 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.012>.
- Joh, C., Lee, J., Bui, T.Q., Park, J. & Yang, I.-H. (2020). Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Materials*, 13(21), p. 4919. <https://doi.org/10.3390/ma13214919>.
- Keighley, D.G. (2013). *Sedimentology and sedimentary basins: from turbulence to tectonics by Mike Leeder*. Chichester: Wiley Blackwell.
- Khalili Tari, M., Reza Faraji, A., Aslani, A. & Zahedi, R. (2023). Energy simulation and life cycle assessment of a 3D printable building. *Cleaner Materials*, p. 100168. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100168>.
- Kornmann, M. (2005). *Clay Building Materials: Manufacturing and Properties*. New South Wales Technical and Further Education Commission: New South Wales.
- Lozano-Miralles, J.A., Hermoso-Orzáez, M.J., Martínez-García, C. & Rojas-Sola, J.I. (2018). Comparative study on the environmental impact of traditional clay bricks mixed with organic waste using life cycle analysis. *Sustainability*, 10(8), p. 2917.
- Lubelli, B., et al. (2021). Influence of brick and mortar properties on bioreceptivity of masonry – Results from experimental research. *Construction and Building Materials*, 266, p.121036. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121036>.
- Marjan Colletti. (s.f.). *Coralloid Cocoons*. <https://www.marjancolletti.com/coralloid-cocoons>.
- McFadden, C. (2021). *7 of the most beautiful 3D-printed houses and cabins*. <https://interestingengineering.com/lists/7-of-the-most-beautiful-3d-printed-houses-and-cabins>.
- Miles, M. (2006). Utopias of mud? Hassan Fathy and alternative modernisms. *Space and Culture*, 9(2), pp. 115-139.

- Mohseni, A., Vieira, F.R., Pecchia, J.A. & Gürsoy, B. (2023). Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination. *Biomimetics*, 8(2), p. 257. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020257>.
- Molitch-Hou, M. (2014). *PolyBricks: 3D Printed Clay for 3D Printed Buildings*. <https://3dprintingindustry.com/news/polybricks-3d-printed-clay-3d-printed-buildings-28627/>.
- Moreno-Maroto, J.M. & Alonso-Azcárate, J. (2018). What is clay? A new definition of “clay” based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. *Applied Clay Science*, 161, pp. 57-63.
- Mostafavi, S., Bier, H., Bodea, S. & Anton, A. (2015). Informed Design to Robotic Production Systems, Developing Robotic 3D Printing System for Informed Material Deposition, *eCAADe 2015 Proceedings*, Viena, pp. 287-296.
- Munir, Q. & Kärki, T. (2021). Cost Analysis of Various Factors for Geopolymer 3D Printing of Construction Products in Factories and on Construction Sites. *Recycling*, 6(3), p. 60. <https://doi.org/10.3390/recycling6030060>.
- Mustafa, K.F., Prieto, A. & Ottele, M. (2021). The role of geometry on a self-sustaining bio-receptive concrete panel for facade application. *Sustainability*, 13(13), p. 7453.
- Paolo Verme, Chiara Gigliarano, Wieser, C., Hedlund, K., Petzoldt, M. & Santacroce, M. (2015). *The Welfare of Syrian Refugees*. World Bank Publications.
- Perrot, A., Rängeard, D. & Courteille, E. (2018). 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 172, pp. 670-676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>.
- Rayna, T. & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, pp. 214-224.
- Re, D., Biccari, C.D. & Corallo, A. (2022). A Cost Model for Additive Manufacturing in Construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1101(9), p.092014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/9/092014>.
- Reynolds, J. (2022). *How Long Does It Take to 3D Print a House?* <https://www.nikkoindustries.com/blogs/news/how-long-does-it-take-to-3d-print-a-house>.
- Rovenski, V.Y. (2000). *Geometry of Curves and Surfaces with MAPLE*. Google Books. Springer Science & Business Media. https://books.google.es/books?id=K31Nzi_xhoQC&pg=PA277&dq=conoid+maple&lr=&ei=B9hvSs_qKYzSkASR8c3XDg&redir_esc=y#v=onepage&q=conoid%20maple&f=.
- Royal Danish Academy (2019). *3D printing ceramics: A modular column system*. <https://royaldanishacademy.com/project/3d-printing-ceramics-modular-column-system>.
- Salandin, A., Quintana-Gallardo, A., Gómez-Lozano, V. & Guillén-Guillamón, I. (2022). The First 3D-Printed Building in Spain: A Study on Its Acoustic, Thermal and Environmental Performance. *Sustainability*, 14(20), p. 13204, <https://doi.org/10.3390/su142013204>.
- Schuld, S.J., Jagoda, J.A., Hoisington, A.J. & Delorit, J.D. (2021). A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments. *Automation in Construction*, 125, p. 103642. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103642>.

- Segovia, M. & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*, 22(14), p. 5396, <https://doi.org/10.3390/s22145396>.
- Shahzad, W.M., Rajakannu, G. & Kordestani Ghalenoei, N. (2022). Potential of Modular Offsite Construction for Emergency Situations: A New Zealand Study. *Buildings*, 12(11), p. 1970. <https://doi.org/10.3390/buildings12111970.sheltercluster.org>. (s.f.).
- Shen, S., Lee, N.A., Lockett, W.J., Acuil, A.D., Gazdus, H.B., Spitzer, B.N. & Buehler, M.J. (2023). *Robust Myco-Composites as a Platform for Versatile Hybrid-Living Structural Materials*. arXiv (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2305.12151>.
- Smolova, M. & Smolova, D. (2021). Emergency architecture. Modular construction of healthcare facilities as a response to pandemic outbreak. *E3S Web of Conferences*, 274, p. 01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127401013>.
- Sullivan, Louis H. (1896, Marzo). The tall office building artistically considered, *Lippincott's Magazine*, Filadelfia, pp. 403-409.
- SYRIA: Shelter Sector (2016) Year-End Report | Shelter Cluster. <https://sheltercluster.org/syria-hub/documents/syria-shelter-sector-2016-year-end-report>.
- The World's Largest 3D-Printed Neighborhood Is Here* (s.f.). <https://www.bloomberg.com/features/2023-3d-printed-houses-austin-texas/#:~:text=A%20layer%20of%20Lava-crete%20will.This%20Twisting%20Tower%20is%20Made%20Out%20of%202000%203D-Printed%20Terracotta%20Bricks>. Available online: <https://inhabitat.com/this-twisting-tower-is-made-out-of-2000-3d-printed-terracotta-bricks/>.
- Turan, M. (2009). *Reconstructing the balloon frame: a study in the history of architectonics*.
- Tyrer-Jones, A. (2023). *Researchers develop new fungi-based 3D printing material*. <https://3dprintingindustry.com/news/researchers-develop-new-fungi-based-3d-printing-material-225036/>.
- UCL (2022). *Computational Seeding of Bio-Receptive Materials*. <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/architecture/research/computation-and-craft-technologies/computational-seeding-bio-receptive-materials>.
- Universitat Internacional de Catalunya (s.f.). *Master's Degree in Biodigital Architecture*. <https://www.uic.es/en/estudis-uic/architecture/masters-degree-biodigital-architecture>.
- Universiteit Gent. (s.f.). *Mechanical properties and durability of 3D printed cementitious materials*. <https://www.ugent.be/ea/structural-engineering/en/research/projects/allprojects/mechanical-properties-and-durability-of-3d-printed-cementitious-materials>.
- Van Den Bergh, J., Nieuw, C., Slob, W., Escalante Suarez, M. and Velema, P. (s.f.). *Modular 3D printing construction: towards affordable, adjustable and climate-resilient housing*. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2022-05/2.4.4-14-van%20den%20Bergh%20-Modular%203D%20printing%20construction.pdf>.
- Wang, D., Zhang, Y., Zhu, Y., Wu, C., Zhou, Y. & Han, Q. (2021). Mechanical performance of sustainable modular prefabricated composite shear panels under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 179, p. 106423. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106423>.
- Weisstein, E.W. (s.f.). *Hyperbolic Paraboloid*. <http://mathworld.wolfram.com/HyperbolicParaboloid.html>.
- Wikipedia. (2023). *Syrian refugee camps*. https://en.wikipedia.org/wiki/Syrian_refugee_camps#/media/File:Kurdish_Refuge_Camp_in_Suruc_Turkey.jpg.

- Wu, P., Wang, J. & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, pp. 21-31.
- www.granddesignsmagazine.com. (s.f.). *Construction duration estimation*. <https://www.granddesignsmagazine.com/self-build/construction/construction-duration-estimation/>.
- Xiao, J., Lv, Z., Duan, Z. & Hou, S. (2022). *Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations*. *Journal of Building Engineering*, [online] 51, p. 104282. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104282>.
- Yu, Q., Zhu, B., Li, X., Meng, L., Cai, J., Zhang, Y. & Pan, J. (2023). Investigation of the rheological and mechanical properties of 3D printed eco-friendly concrete with steel slag. *Journal of Building Engineering*, 72, p. 106621. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106621>.
- Zaha-hadid.com. (2023). *Thallus for White in the City – Zaha Hadid Architects*. <https://www.zaha-hadid.com/2017/04/05/thallus-for-white-in-the-city/>.
- Zakrzewski, W., Dobrzyński, M., Szymonowicz, M. & Rybak, Z. (2019). Stem cells: Past, Present, and Future. *Stem Cell Research & Therapy*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s13287-019-1165-5>.
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X. & Han, B., (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, p. 105533.
- Zhang, N., Wu, Y., Yang, R. & Xie, G. (2023). Digital Simulation and Analysis of Assembly-Deviation Prediction Based on Measurement Data. *Applied Sciences*, 13(22), pp. 12193-12193. <https://doi.org/10.3390/app132212193>.

Abstract: Clay 3D printing has been gaining increasing interest as a sustainable and environmentally friendly building material with favourable climatic and economic qualities: as well as taking advantage of the advancement of the fourth industrial revolution in digital fabrication and robotics applications in the construction industry, especially with the 3D printing of full-scale architectural applications. However, the high costs of such machinery used for 3D printing of full-scale buildings on-site, and the difficulty of transporting and operating them on-site, have made the adoption of 3D printing as a construction technology democratically unfeasible, and limited its use to only an elite who possess the financial capabilities to provide such machines and operating systems. On the other hand, the resulting bulky monovolume (usually in the form of a hut or igloo) is insufficient from the point of view of functional architectural programming for real-life applications, which are more than just a shelter, and lack any possibility of formal or fractal complexity, due to the time-material adhesion factor of the print settings. In addition to their lack of integration with biodiversity, due to their simple, smooth and unified surfaces, which are those compatible with full-scale printing machines, by their thick-walled nozzle sizes, governed by print settings of material coherence, layer adhesion and print speed. Despite some claims that in-situ full-scale 3D printing can be a life-saving solution in emergent situations such as natural disasters (e.g. earthquakes), so far there is no sufficient comparison of the speed of construction between in-situ prefabricated assemblies and in-situ full-scale 3D printing

in the state of the art. Not to mention the lack of reports on the appropriate fixing margins of these 3D printed materials and their resistance to climatic conditions (such as exposure to sun and rain). As well as the lack of reports on the mechanical and structural performance of these 3D printed volumes at full scale, and the difficulty in carrying out the relevant tests. Thus, due to these disadvantages of full-scale 3D printing *in situ*, the author once again advocates for the segmentation of monocoque architectural structures by feasible and available 3D printing as prefabricated building blocks that can be produced on a mass scale and assembled *in situ*. In this paper, the author will focus on the complexity and fractality of the shape and surface of two different bioresponsive column designs that were developed under his direction in 2023 at the BioLab of the iBAG-UIC Barcelona, within the Master in Biodigital Architecture. The main objective was to design and manufacture 3D printed clay building blocks to produce a bioresponsive column. The design process included two issues: the main volume of 20 x 20 x 20 cm³, which will be assembled with the other blocks to compose the column in various orientations, and the surface texture to provide a fractal dimension and complexity to the form. In addition to providing a niche to house a mixed culture of algae. The optimisation process for the fabrication of each design, based on the analysis of the formal design, the surface texture, and the printing sessions, will be exhibited here.

Keywords: Bioreceptive structures - Clay architecture - Clay columns - Clay 3D printing - Algae - Clay 3D printing

Resumo: A impressão 3D de argila vem ganhando cada vez mais interesse como um material de construção sustentável e ecológico com qualidades climáticas e econômicas favoráveis, além de aproveitar o avanço da quarta revolução industrial em aplicações de fabricação digital e robótica no setor de construção, especialmente com a impressão 3D de aplicações arquitetônicas em escala real. No entanto, os altos custos desse maquinário usado para a impressão 3D de edifícios em escala real no local e a dificuldade de transportá-lo e operá-lo no local tornaram a adoção da impressão 3D como uma tecnologia de construção democraticamente inviável e limitaram seu uso apenas a uma elite que possui os recursos financeiros para fornecer essas máquinas e sistemas operacionais. Por outro lado, o monovolume volumoso resultante (geralmente na forma de uma cabana ou iglu) é insuficiente do ponto de vista da programação arquitetônica funcional para aplicações na vida real, que são mais do que um simples abrigo, e não têm qualquer possibilidade de complexidade formal ou fractal, devido ao fator de adesão tempo-material das configurações de impressão. Além de sua falta de integração com a biodiversidade, devido a suas superfícies simples, lisas e unificadas, que são compatíveis com máquinas de impressão em escala real, por seus tamanhos de bocal de paredes grossas, regidos por configurações de impressão de coerência de material, adesão de camada e velocidade de impressão. Apesar de algumas alegações de que a impressão 3D em escala real in-situ pode ser uma solução para salvar vidas em situações emergenciais, como desastres naturais (por exemplo, terremotos), até o momento não há comparação suficiente da velocidade de construção entre montagens pré-fabricadas in-situ e impressão 3D em escala real in-situ no estado da arte. Isso sem mencionar a falta de relatórios sobre as margens de fixação apropriadas desses materiais

impresos em 3D e sua resistência às condições climáticas (como exposição ao sol e à chuva). Assim como a falta de relatórios sobre o desempenho mecânico e estrutural desses volumes impressos em 3D em escala real e a dificuldade de realizar os testes pertinentes. Portanto, devido a essas desvantagens da impressão 3D em escala real *in situ*, o autor mais uma vez defende a segmentação de estruturas arquitetônicas monocoque por meio da impressão 3D viável e disponível como blocos de construção pré-fabricados que podem ser produzidos em grande escala e montados *in situ*. Neste artigo, o autor se concentrará na complexidade e na fractalidade da forma e da superfície de dois projetos diferentes de colunas bio-responsivas que foram desenvolvidos sob sua direção em 2023 no BioLab do iBAG-UIC Barcelona, dentro do Mestrado em Arquitetura Biodigital. O objetivo principal era projetar e fabricar blocos de construção de argila impressos em 3D para produzir uma coluna bio-responsiva. O processo de design incluiu duas questões: o volume principal de 20 x 20 x 20 cm³, que será montado com os outros blocos para compor a coluna em várias orientações, e a textura da superfície para proporcionar uma dimensão fractal e complexidade à forma. Além de fornecer um nicho para abrigar uma cultura mista de algas. O processo de otimização para a fabricação de cada design, com base na análise do design formal, da textura da superfície e das sessões de impressão, será exibido aqui.

Palavras-chave: Estruturas biorreceptivas - Arquitetura de argila - Colunas de argila - Impressão 3D de argila - Algas - Impressão 3D de argila
