

HORMIGÓN CIRCULAR  
Y REGENERATIVO.  
UNA APUESTA POR  
LA IMPRESIÓN 3D  
DE MATERIALES  
CONGLOMERADOS

*Miriam Campillo Mejías, David Sanz Arauz*

*REGENERATIVE  
CONCRETE  
AND CIRCULAR  
CONSTRUCTION*

*miricampillo@gmail.com*

*david.sanz.arauz@upm.es*  
*<https://orcid.org/0000-0001-5289-3267>*

*Arquitecta*  
*Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.*  
*Doctor Geólogo. Profesor Contratado Doctor*  
*Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.*  
*Universidad Politécnica de Madrid.*

La transición hacia una economía circular exige cambios sustanciales en la arquitectura y sus materiales de construcción. La impresión digital de elementos de hormigón es uno de esos procesos de regeneración. La fabricación aditiva desarrollada desde la década de los 70 constituye uno de los mayores avances en la industria moderna. Su aplicación en el campo de la arquitectura, como construcción aditiva, se presenta como una de las revoluciones de la arquitectura contemporánea. En este trabajo se discute la idoneidad de esta técnica para su implantación sistemática en la arquitectura. Se estudia la fabricación aditiva en la industria como predecesora y su aplicación en otros campos para poder entender el cambio necesario hasta llegar a la escala arquitectónica. Se recoge el estado actual de la técnica de la impresión en hormigón y sus principales aplicaciones y metodologías constructivas. Se proponen distintos casos actuales, con el análisis de las características de la técnica desarrollada hasta hoy. Al final del artículo se discute la viabilidad de la implantación de la construcción aditiva y su futuro.

Palabras clave: Economía circular, Diseño regenerativo, Impresión 3D, Construcción aditiva, Hormigón.

#### ABSTRACT

*The transition to a circular economy requires substantial changes in architecture and its building materials. The digital printing of concrete elements is one such regeneration process. Additive manufacturing is, since its origin in the 1970's, one of the greatest steps forwards in modern industry. Its application, as additive construction, has the potential to bring about a revolution in contemporary architecture. This thesis, therefore, seeks to understand the scope that this new revolution could achieve, and the feasibility of its systematic implementation in the construction industry. In order to achieve this, an understanding of additive manufacturing, as an effective predecessor, and its applications in other fields of research is first obtained. This allows a discussion of the main additive manufacturing techniques and how they apply to additive construction in order to understand the necessary changes that would allow effective implementation on an architectural scale. The current state of the technique, its main applications and constructive methodologies, are studied afterwards. Several case studies are subsequently proposed, that allow a deeper analysis of the technique's characteristics developed so far. Once the results are obtained, the viability of additive construction's implementation and its future are discussed.*

Keywords: Circular Economy, Regenerative Design, 3d Printing, Additive Construction, Concrete.

A nadie se le escapa lo insostenible de la situación actual en cuanto a consumo de recursos –agua, energía, materias primas–, emisiones de gases de efecto invernadero, y generación de residuos.

La transición de una economía (y de toda una forma de pensar) lineal a una economía circular se presenta como el nuevo paradigma de nuestra sociedad. Este cambio filosófico y político transversal afecta a todas las áreas de producción y de consumo, incluida la arquitectura. En este sentido, el sector de la construcción ya está cambiando hacia formas de producción y consumo responsables. Y es importante que lo haga, ya que según la Estrategia Española de Economía Circular (España Circular 2030) la construcción supone el 6,5% del PIB, emplea el 40%

de los recursos, genera el 40% de los residuos y emite el 35% de los gases de efecto invernadero. Por todo ello se identifica como uno de los campos prioritarios de actuación de esta estrategia.

Por otra parte, conviene recordar que el hormigón es el material artificial más fabricado en el planeta. De hecho, la construcción emplea más del doble de morteros y hormigones que el resto de materiales juntos, incluyendo madera, acero, aluminio, plástico o vidrio. Parece obvio que la contribución del hormigón a la emisión de gases, al uso de materias primas, agua y energía, y a la generación de residuos es más que notable.

Por lo tanto, todas las acciones que se emprendan en el campo del hormigón van a afectar de forma significativa al medio ambiente. En este escenario resulta adecuado y diríamos que urgente, repensar el hormigón.

El hormigón se puede entender como un sistema complejo y dinámico en el que múltiples factores a distintos niveles influyen en su materialización. Sus componentes fundamentales pueden ser revisados de cara a una mejora ambiental, de cara a la transición a una economía circular: el conglomerante puede ser diferente del cemento Portland común, pueden emplearse cementantes que precisen menor energía de fabricación, como la cal, los cementos beléticos, o los geopolímeros; los áridos son ya una vía de entrada para el reciclado de residuos; hay fibras de armado distintas que las de acero; los sistemas de puesta en obra, las geometrías, las estructuras formales... Todo podría ser repensado para su adecuación al cambio ambiental.

La impresión 3d es una de las principales oportunidades para convertir al hormigón en un material circular y regenerativo, en un material capaz de restaurar, renovar o revitalizar sus propias fuentes de energía y materias primas.

Y desde luego, la fabricación aditiva influirá de forma significativa en el diseño arquitectónico. En este sentido, aumenta cada día la cantidad de publicaciones científico-técnicas que aparecen sobre la impresión de morteros y hormigones y su relación con la arquitectura, con el reciclado o en general con la construcción responsable. Desde artículos sobre incorporación de residuos en las argamasas hasta los que tratan del empleo de los fondos marinos o el material lunar o marciano, el volumen y la diversidad de la información sobre este tema crece exponencialmente.

La implantación de la impresión 3d en la arquitectura tiene sus orígenes en la fabricación aditiva, que comienza en los años 70 con la aparición de la impresora de inyección de tinta, aunque no es hasta 1984, cuando Charles Hull patenta el sistema de este-reoligrafía y funda la empresa 3DSystems, cuando se

comienza a pensar en una impresión de objetos tridimensionales<sup>1</sup>. Aparece entonces el método conocido como *Contour Crafting*<sup>2</sup>. Es un método de fabricación por capas para construir objetos de gran escala con un acabado regular conseguido mediante la utilización de paletas orientables tanto en el eje vertical como el horizontal.

Otra técnica similar al *Contour Crafting* es la técnica desarrollada por el Departamento de Obra Civil e ingeniería de la Universidad de Loughborough en Reino Unido: *Concrete Printing*<sup>3</sup>. Esta técnica tiene una menor resolución, por lo que tiene menos calidad en los acabados, aunque mayor versatilidad en sus formas y dimensiones, pues permite mayor control de las geometrías internas y externas. Una tercera técnica, muy distinta a las anteriores, es el *D-Shape*. Se trata de un proceso de impresión 3d desarrollado por Enrico Dini, que utiliza la deposición selectiva y endurecida mediante la aplicación de un aglutinante. Un cabezal de impresión compuesto por 300 boquillas, montado en un puente grúa de aluminio, se mueve por el área de impresión depositando el aglutinante donde la arena debe ser solidificada mientras el material que no ha sido endurecido actúa como soporte, permitiendo la creación de formas que no serían posibles con un método de extrusión de un único material<sup>4</sup>.

Para aplicar estas técnicas, la industria de la construcción ha desarrollado distintos métodos: *gantry solutions*, una gran impresora 3d que transforma directamente la fabricación aditiva en construcción aditiva; soluciones con suspensión de cables, como evolución de las *gantry solution*, con un movimiento de los cabezales de impresión mucho más libre<sup>5</sup>; brazos robóticos, con aun mayor libertad de movimiento, pero un rango de alcance considerablemente inferior pues depende directamente del tamaño del mismo<sup>6</sup>; minirobots, una técnica totalmente distinta que rechaza el uso de un único elemento gigante que imprime en favor de pequeños robots que construyen individualmente grano a grano<sup>7</sup>.



Fig. 1  
Mini home. Apis Cor. 2016.

Como ejemplo de aplicación, *ApisCor*<sup>8</sup> (Fig. 1), una empresa de origen ruso, que ha sido capaz de imprimir una vivienda de 38m<sup>2</sup> en 24 horas, con un coste total de 265\$/m<sup>2</sup>. Para ello, utiliza una impresora que es una mezcla entre brazo robótico y las soluciones *gantry* con tecnología *Concrete Printing*, utilizando un material que mezcla una dosificación de hormigón tradicional con aditivos que aceleran el proceso de curación. Realiza la construcción de los muros portantes de la vivienda, a los que posteriormente se les inyecta un aislante en forma de espuma y se le añade una cubierta formada por una subestructura de madera y un plástico especialmente resistente. Con el mismo método, se estudian los otros seis casos, determinando un mayor número de ejemplos de piezas ensambladas en obra que de elementos monolíticos, así como un predominio de edificios residenciales sobre los públicos. (Fig. 2)

Lo realmente importante o identificativo de los resultados de la construcción aditiva no es la técnica que se haya utilizado. Aquello que se vuelve relevante es el objeto de impresión: si la construcción se realiza impresa de una pieza como elemento monolítico o, por el contrario, se realiza como piezas de diferente tamaño que son ensambladas en obra.

Para encontrar el método más viable entre estos dos se presenta un análisis DAFO de cada uno de ellos.

1  
S. Lim, R. Buswell, et al. «Development of a Viable 3D Printing Process.» 28th International Association for Automation and Robotics in Construction (2011): 665-670

2  
B. Khoshnevis. «Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies.» *Automatisation in Construction* 13 (2004), p5-19

3  
S. Lim, R. Buswell, T. Le, R. Wacrow, R. Austin, A. Gibb, et T. Thorpe, «Development of a Viable 3D Printing Process.», p665-670

4  
J.B. Gardiner, *Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing*. RMIT University (2011) p5-7

5  
Nathalie Labonnote, Anders Ronnquist, Bendik Manum, et Petra R  ther. «Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities.» *Automation in Construction* 72 , (2016) p347-366

6  
Bos Freek, Ahmed Zeeshan, et Theo Salet, «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing.» *Virtual and Physical Prototyping* (2016) p209-225

7  
J. Pegna, «Exploratory Investigation of Freeform Construction.» *Automatisation of Construction* 5 (1997) p427-437

8  
Apis Cor. Apis Cor. *We Print Buildings*. (2016) <http://apis-cor.com/en/>.

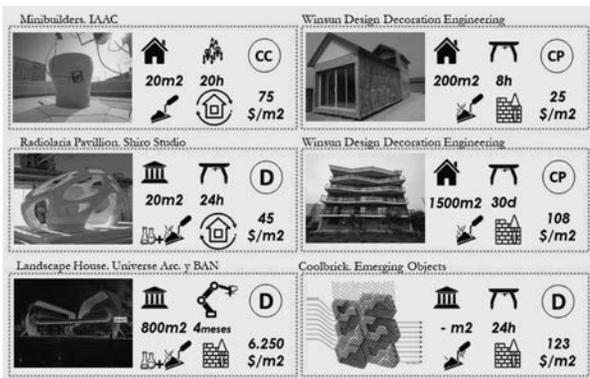


Fig. 2  
Cases study. Miriam Campillo.

En este caso, vemos el análisis de construcción monolítica: ciertos factores como el transporte, acabados y capacidades estructurales son elementos significativos para cualquier sistema constructivo, sobre todo en comparación con la construcción tradicional, y que en este caso no se pueden considerar como factores positivos de la técnica. (Fig. 3)

Diferente sería la construcción de elementos que se ensamblan en obra, aunque se sigue teniendo una limitación de tamaño que viene dada por la impresora, esta influirá menos en el resultado final, al poder ensamblarse piezas realizadas con una impresora pequeña para crear un todo más grande (como es el caso de las obras realizadas por *Emerging Objects*<sup>9</sup>, que utilizan piezas de tamaño manejable por una sola persona), aunque con ello se elimina la ventaja de la disminución de la mano de obra y los materiales, siguen contando con unas carencias técnicas derivadas de las propiedades del propio hormigón. (Fig. 4)

Se puede observar que los dos métodos de construcción aditiva estudiados tienen una serie de ventajas comunes: la reducción de tiempos de obra, de materiales de desperdicio, de costes por automatización y la personalización de la arquitectura. La implementación de la construcción aditiva de forma sistemática en la arquitectura lleva a una automatización de la construcción y a una implicación humana menor en los procesos.

Se puede afirmar que la construcción aditiva aún está en una fase muy temprana de su desarrollo como para considerarse una técnica implantable de manera sistemática en la construcción. Esto lleva a que la calidad de las construcciones realizadas actualmente

9, 11

Ronald Rael, Virginia San Fratello, «Material Design and Analysis for 3D-printed Fiber-reinforced Cement Polymer Building Components.» *Ambience' 11*. Boras. (2011) p2-5

10

Freek, Zeeshan, et Salet, «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing.» p220

mediante esta técnica quede muy lejos de la que proporciona la arquitectura tradicional. La impresión únicamente en hormigón no es aquella que produce los resultados más satisfactorios por su falta de cualidades técnicas: un material estructural no puede depender únicamente de esfuerzos a compresión, sería dar un paso atrás, negar la existencia del hormigón armado<sup>10</sup>. Presumiblemente, el mayor desarrollo de la construcción aditiva se produzca con materiales de tipo resinas o polímeros, o con la impresión de diferentes materiales de forma conjunta.

En nuestra opinión, el proceso de evolución debe seguir hacia la escala de la microimpresión, que permite la creación de materiales impresos con estructuras similares a las que encontramos en la naturaleza. La línea comenzada por Ronald Rael y Virginia San Fratello en *Emerging Objects*<sup>11</sup> podría ser el futuro de la construcción: la fabricación de distintas piezas “inteligentes”, unidas mediante cosido y entrelazado de piezas de menor tamaño.

#### Bibliografía

- Apis Cor. 2016. Apis Cor. We Print Buildings. <http://apis-cor.com>.
- Bos, Freek, Zeeshan Ahmed, et Theo Salet. «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing», *Virtual and Physical Prototyping* (2016): 209-225.
- Gardiner, J.B. «Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing». RMIT University (2011).
- Khoshnevis, B. «Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies.» *Automatisation in Construction 13* (2004): 5-19.
- Labonnote, Nathalie, Anders Ronnquist, Bendik Manum, et Petra R  ther. «Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities.» *Automation in Construction 72* (2016): 347-366.
- Lim, S., R. Buswell, T. Le, R. Wacrow, R. Austin, A. Gibb, et T. Thorpe. «Development of a Viable 3D Printing Process.» *28th International Association for Automation and Robotics in Construction. Seoul* (2011): 665-670.
- L  pez Conde, Jos   Enrique. «Impresoras 3D.» *Nota de Futuro 2* (2016).
- Pegna, J. «Exploratory Investigation of Freeform Construction.» *Automatisation of Construction 5* (1997): 427-437.
- Rael, Ronald, et Virginia San Fratello. «Material Design and Analysis for 3D-printed Fiber-reinforced Cement Polymer Building Components.» *Ambience' 11 Boras* (2011).

ANÁLISIS INTERNO	Fortalezas	Debilidades
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Personalización de la arquitectura</li> <li>Elementos constructivos con cualidades adicionales</li> <li>Reducción de desperdicios</li> <li>Reducción de tiempos de obra</li> <li>Reducción de costes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limitación de tamaño por tamaño de la impresora</li> <li>Falta técnica de los materiales</li> <li>Mano de obra</li> </ul>
ANÁLISIS EXTERNO	Oportunidades	Amenazas
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sector de la construcción en desarrollo y alza.</li> <li>Personalización de la arquitectura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sector tradicional y estandarizado. Reacio a cambios.</li> <li>Complejidad de cambio de proveedor</li> <li>Conocimiento técnico</li> </ul>

Fig. 3

DAFO Construcción monolítica. Miriam Campillo. 2017.

ANÁLISIS INTERNO	Fortalezas	Debilidades
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de tiempos de obra</li> <li>Reducción de costes de construcción.</li> <li>No necesita mano de obra</li> <li>Reducción de desperdicios</li> <li>Seguridad en el trabajo. Menor cantidad de accidentes.</li> <li>Complejidad de formas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dificultad en el transporte y montaje del sistema de impresión.</li> <li>Limitación de tamaño por tamaño de impresora</li> <li>Menor definición en acabados que en la construcción tradicional</li> <li>Falta técnica de los materiales</li> <li>Sólo materiales autoportantes.</li> </ul>
ANÁLISIS EXTERNO	Oportunidades	Amenazas
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sector de la construcción en desarrollo y alza.</li> <li>Personalización de la arquitectura</li> <li>Inversión inicial menor que la construcción tradicional</li> <li>No necesita de alto conocimiento técnico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sector tradicional y estandarizado. Reacio a cambios.</li> <li>Complejidad de cambio de proveedor</li> <li>Hackeo</li> </ul>

Fig. 4

DAFO Construcción por elementos ensamblados. Miriam Campillo. 2017.