

02-032

COMPARATIVE ANALYSIS OF PRODUCTIOIN PROCESSES BASED ON 3D PRINTING VERSUS CONVENTIONAL MANUFACTURING IN THE CONSTRUCTION SECTOR

Piquero Camblor, Juan Carlos⁽¹⁾; Mesa Fernández, José Manuel⁽²⁾; Morán Palacios, Hénar⁽²⁾;
Luiña Fernández, Rocío⁽²⁾

⁽¹⁾Fundación PRODINTEC, ⁽²⁾Universidad de Oviedo. Área de Proyectos de Ingeniería

Although the production methodologies and technologies used in the construction sector have evolved over time, much of the work is still done using techniques that can be considered less evolved than those used in other industrial sectors where robotics and other advanced manufacturing technologies are much more implemented.

In this framework it is presented an analysis regarding the integration of production processes based on 3D printing (additive manufacturing) versus conventional manufacturing methodologies in the construction sector. With this aim in mind, a set of experiments on manufacturing construction elements have been conducted, both by conventional methodologies as well as by additive manufacturing. In this way, it is possible to compare variables such as process time, material consumption and quality of each technique, which have an influence on atomization and other aspects such as safety, productivity or environmental impact

Keywords: *construction sector; additive manufacturing; 3D printing; conventional manufacturing*

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROCESOS PRODUCTIVOS BASADOS EN IMPRESIÓN 3D FRENTE A FABRICACIÓN CONVENCIONAL EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Aunque las metodologías y tecnologías de producción utilizadas en el sector de la construcción han ido evolucionando a lo largo de los tiempos, gran parte de los trabajos se siguen realizando mediante técnicas que se pueden considerar menos evolucionadas respecto a las utilizadas en otros sectores industriales donde la robótica y otras las tecnologías de fabricación avanzadas están mucho más implementadas.

En este marco se plantea un análisis de la integración de procesos productivos basados en impresión 3D (fabricación aditiva) frente a metodologías convencionales de fabricación en el sector de la construcción. Con ese objetivo se llevó a cabo un conjunto de experimentos de fabricación de elementos constructivos tanto por medio de metodologías convencionales como mediante fabricación aditiva. De esta forma es posible la comparación de variables tales como: tiempo de proceso, consumo de materiales y la calidad de cada una de las técnicas y que tienen gran influencia en la automatización y en otros en aspectos como la seguridad, la productividad o el impacto ambiental.

Palabras clave: *sector de la construcción; fabricación aditiva; impresión 3D; fabricación convencional*

Correspondencia: mesa@api.uniovi.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1 Introducción

En el sector de la construcción, a pesar de los avances en distintas áreas (nuevos materiales, diseño, etc.), se mantienen un elevado número de procesos cuyos métodos de trabajo distan bastante de lo que se puede entender por automatización o industrialización, en especial si se comparan con otros sectores en los que la robótica y las tecnologías de fabricación avanzada se encuentran mucho más implementadas.

Asimismo, algunos estudios (Snyman y Smallwood 2017) realizados en los últimos años revelan que la productividad en el ámbito de la industria de la construcción está por debajo de lo esperado, e incluso que ha descendido (Bock 2015) en el tiempo de forma contraria a como sucede en otros sectores en los cuales ha ido aumentando de manera considerable.

Por otro lado, la industria constructiva incluye actividades y trabajos a gran escala lo que conlleva un importante impacto ambiental (Häfliger et al. 2017) en la mayoría de las actuaciones, ligados principalmente al consumo de recursos (Bamgbade, Kamaruddeen, y Nawi 2017) tanto materiales como energéticos. A día de hoy, se están adoptando diversas iniciativas (Zutshi y Creed 2015) para reducir el impacto que la construcción tiene sobre el medio ambiente. No obstante, no existe una línea de trabajo global que defina una estrategia común.

A la vista de lo anterior, parece clara la necesidad del sector de mejorar sus procesos tanto para incrementar la productividad como para reducir su impacto sobre el medioambiente y el consumo de recursos. Para ello se requiere la utilización de sistemas de producción automatizada (Agustí-Juan et al. 2017), versátiles en su uso y que optimicen el uso de materiales y accesorios.

En este marco se plantea un análisis comparativo de los procesos productivos basados en impresión 3D (fabricación aditiva) frente a metodologías convencionales de fabricación en el sector de la construcción. Con ese objetivo se llevó a cabo un conjunto de experimentos de fabricación de elementos constructivos tanto por medio de metodologías convencionales como mediante fabricación aditiva.

1.1 Fabricación aditiva

La fabricación aditiva se define como un proceso de fabricación en el cual se hace uso de una serie de tecnologías que, en un proceso automático, permiten generar objetos tridimensionales directamente desde un modelo digital sin necesidad del uso de moldes ni utillajes. Este novedoso método de fabricación lleva asociadas una serie de ventajas (Weller, Kleer, y Piller 2015):

- Reducción del tiempo necesario de puesta en el mercado para productos personalizados (Time-to-market reduction). Esto es consecuencia de que se tratan de procesos de fabricación directos desde el fichero CAD 3D, sin la necesidad de fabricar utillajes específicos previamente al producto personalizado, tal como sucede en los procesos convencionales de fabricación.
- Completa libertad y flexibilidad en el diseño de producto. A diferencia de otros procesos de fabricación, la fabricación aditiva puede producir piezas con casi cualquier forma y complejidad, ya que no tiene ninguna de las limitaciones geométricas de los procesos de fabricación convencionales.

- Máximo ahorro de material. El material es añadido selectivamente y no sustraído desde un bloque. Para algunas aplicaciones, especialmente en el sector del metal, existen casos de estudio donde se demuestra que los residuos producidos a partir de material en bruto se reducen hasta un 40% cuando se utilizan tecnologías de fabricación aditiva en vez de tecnologías sustractivas (mecanizado). Además, entre el 95% y el 98% del material no utilizado puede ser reciclado.
- Sin necesidad de inversión en moldes o utillaje. La pieza se produce directamente a partir del fichero CAD 3D. Para obtener las primeras unidades, se reducen tanto el coste de inversión como el tiempo necesario para la producción del utillaje, que repercuten finalmente en las piezas fabricadas, como ocurre en procesos convencionales. Todo esto permite que las tecnologías de AM sean competitivas en la producción de series cortas y medias, donde el tamaño de la producción dependerá generalmente de la tecnología de AM, tipo de material, complejidad de la geometría de la pieza y de la competitividad de los procesos convencionales para este caso.

Todas las ventajas indicadas sobre estas líneas han hecho que, desde ya algunos años, estas tecnologías irrumpieran en los procesos productivos, primero como sistemas accesorios centrados en el desarrollo de prototipos, no funcionales, hasta los últimos avances a día de hoy donde se fabrican piezas totalmente operativas para sectores tan exigentes como el aeronáutico (Liu et al. 2017), la medicina (Malik et al. 2015) o la automoción (Yoo et al. 2016).

1.2 Estado actual de los procesos de impresión 3D en construcción

Las técnicas constructivas convencionales para estructuras de mortero y hormigón se basan en la utilización de encofrados ejecutados de manera manual a la medida y con la geometría de la estructura a fabricar. Así mismo, existe también un importante desarrollo de la industria de los elementos prefabricados, los cuales se ejecutan mediante moldes que son reutilizados una y otra vez para la producción de múltiples piezas iguales.

La fabricación de una pieza de mortero/hormigón requiere de una estructura auxiliar o encofrado que actúe como molde la cual se debe de hacer a medida para cada elemento siendo no reutilizable, esto es, si se van a hacer dos elementos iguales, han de montarse y desmontarse dos encofrados. A este respecto, cabe destacar que la instalación de un sistema de encofrado no es un proceso trivial debiendo ser realizado de forma manual por personal cualificado. Esta forma de trabajo implica una alta implicación de mano de obra, largos tiempos de proceso, así como un alto impacto ambiental vinculado al consumo de materiales junto con el transporte de moldes.

Frente a estos sistemas tradicionales de puesta en obra, han surgido en los últimos años nuevas metodologías productivas (Bos et al. 2016) basadas en el uso de la tecnología de impresión 3D para el desarrollo de elementos constructivos en mortero y hormigón.

La tecnología de impresión 3D deriva en un cambio disruptivo en los procesos de fabricación puesto que supone un cambio radical en el modelo productivo tanto desde el punto de vista del diseño y fabricación como del impacto ambiental y la sostenibilidad (Gebler, Schoot Uiterkamp, y Visser 2014).

A finales del siglo XX surgieron las primeras investigaciones relacionadas con la integración de los procesos de fabricación aditiva en el ámbito de la industria constructiva, así pues, autores tales Joseph Pegna (Pegna 1997) empezaron a finales de los años noventa a investigar sobre nuevos sistemas constructivos basados en impresión 3D. En el año 2005, autores como Khoshnevis empezaron a trabajar sobre metodologías basadas en lo que se denomina Contour Crafting (Hwang et al. 2005), también basado en la aplicación de la impresión 3D.

En los últimos años se han llevado a cabo diversos trabajos relativos al estudio de la impresión 3D con materiales de construcción (Lim et al. 2012) en los cuales se han abordado análisis de los materiales en estado fresco (Kazemian et al. 2017), el desarrollo de morteros específicos (Khalil et al. 2017) para procesos de fabricación aditiva, así como estudios teóricos (Duballet, Baverel, y Dirrenberger 2017) sobre metodologías de fabricación teniendo en cuenta la complejidad de componentes, necesidad de soportes, etc.

2 Metodología y caso de estudio

Como se ha indicado anteriormente, el objetivo del presente trabajo es la realización de un análisis de la productividad del proceso de impresión 3D con materiales en base cemento y su análisis comparativo con los métodos convencionales de fabricación, en el sector de la construcción, mediante encofrado más hormigonado.

2.1 Selección de elementos

Como punto de partida para de las investigaciones planteadas se procedió a la selección de los elementos objeto de estudio, los cuales deberían de cumplir con dos funciones: permitir evaluar las tecnologías de fabricación planteadas siendo a su vez altamente representativos del sector de la construcción. En este marco, se optó por el análisis de dos de los elementos constructivos/estructuras más utilizados, de cara a la realización del análisis comparativo, como es el caso de pilares y vigas.

En este marco se definieron dos estructuras patrón con unas dimensiones tipo, representativas y comprables con los componentes utilizados habitualmente en los procesos constructivos: con las siguientes dimensiones:

- Pilar de base cuadrada con 400 x 400 mm de lado y una altura de 900 mm.
- Viga de base rectangular de base 200 x 900 mm con un espesor de 400 mm.

2.2 Fabricación convencional

Se procedió a la fabricación de los dos elementos (viga y pilar) descritas en el apartado anterior mediante métodos de fabricación convencional. Para ello se llevaron a cabo las siguientes actuaciones:

- Fabricación del molde o elemento de encofrado con perfiles metálicos.
- Vertido de hormigón en el interior del encofrado obtenido.
- Vibrado del material previamente vertido, a fin de darle homogeneidad y eliminar así las posibles acumulaciones de aire en forma de burbujas.
- Desencofrado del molde, transcurridas 24 horas.

Este procedimiento se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1: Proceso constructivo de una viga por métodos convencionales



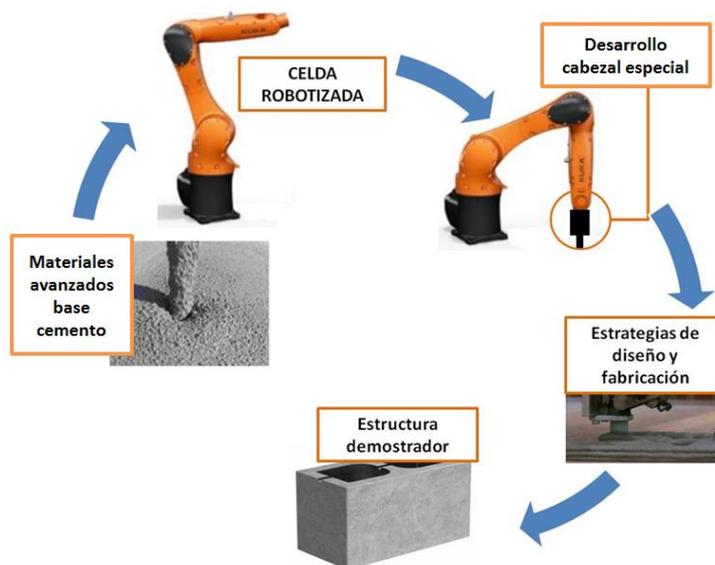
2.3 Impresión 3D a gran escala

El sistema de fabricación aditiva implementado está basado en una celda robotizada Kuka sobre la cual, se instalarán diferentes sistemas auxiliares destinados a realizar la alimentación de material, además de un cabezal para la impresión de hormigón. Este último, se diseñará y fabricará ad hoc.

Así pues, el brazo del robot con la ayuda del cabezal fabricado, conformarán el equipo que posteriormente realice la deposición de las capas de material en el proceso de fabricación por impresión 3D.

Combinando el desarrollo de materiales avanzados en base cemento con la celda robotizada y los sistemas auxiliares añadidos a la misma (cabezales depositores de material y de alimentación) se llevarán a cabo los desarrollos oportunos referentes en primer lugar a las estrategias de diseño, posteriormente a las de fabricación, para así fabricar mediante impresión 3D las estructuras definidas con anterioridad.

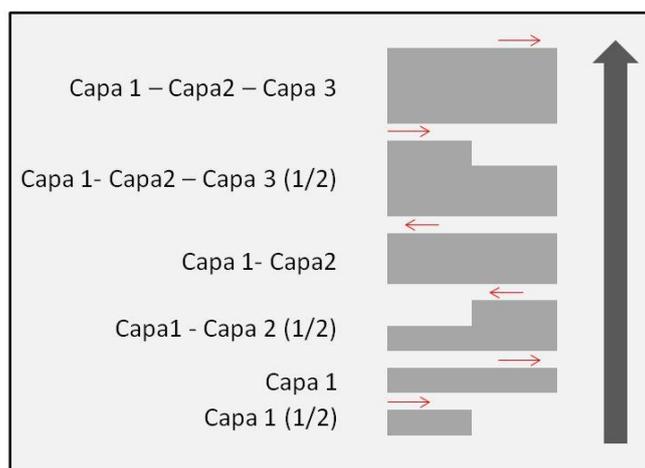
Figura 2: Proceso de fabricación con celda robotizada Kuka



2.3.1 Desarrollo y definición de trayectorias de fabricación

Para llevar a cabo el proceso de fabricación mediante tecnologías de fabricación aditiva o impresión 3D, es necesario realizar una definición previa referente a las trayectorias de impresión a seguir por el sistema robotizado, así como de las características que tendrán las capas que serán depositadas en el mismo, gracias a las cuales, será posible posteriormente fabricar/imprimir los demostradores propuestos.

Figura 3: Estrategia de fabricación por impresión 3D



A tal fin, se utilizará un software informático con el que se desarrollará el siguiente proceso:

1. Se diseñarán tales demostradores teniendo en cuenta las capacidades de fabricación y los sistemas que se emplearán.
2. Se ejecuta el proceso de definición de capas (slices) teniendo en cuenta como parámetros fundamentales el número y el espesor de las capas a imprimir.
3. Finalmente se definirán las trayectorias de fabricación a seguir por el equipo de fabricación (paths definition) para ser programadas y así, proceder a la impresión de los demostradores objeto.

Dicho proceso puede observarse en las siguientes figuras (**Figura 4** y **Figura 5**).

Figura 4: Definición de capas y trayectorias para fabricación 3D del pilar

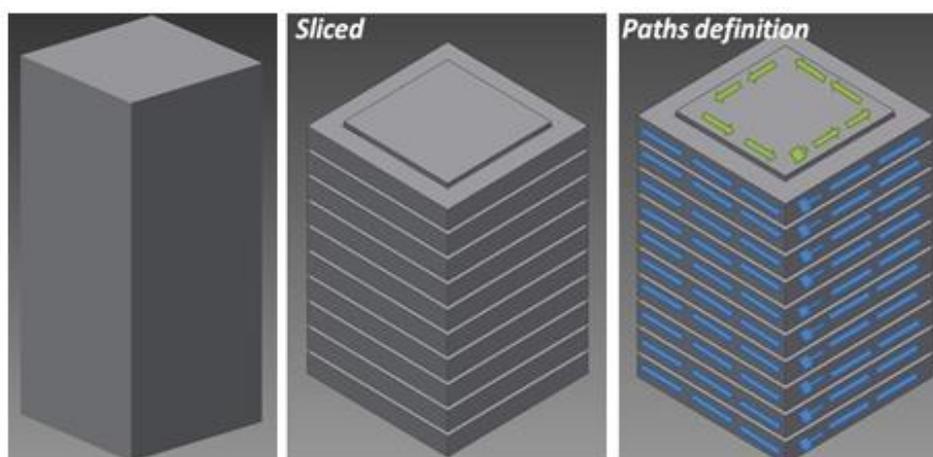
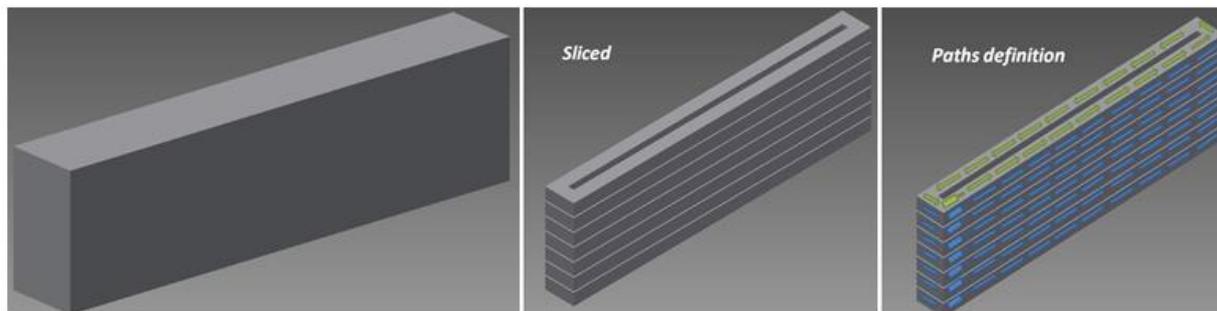


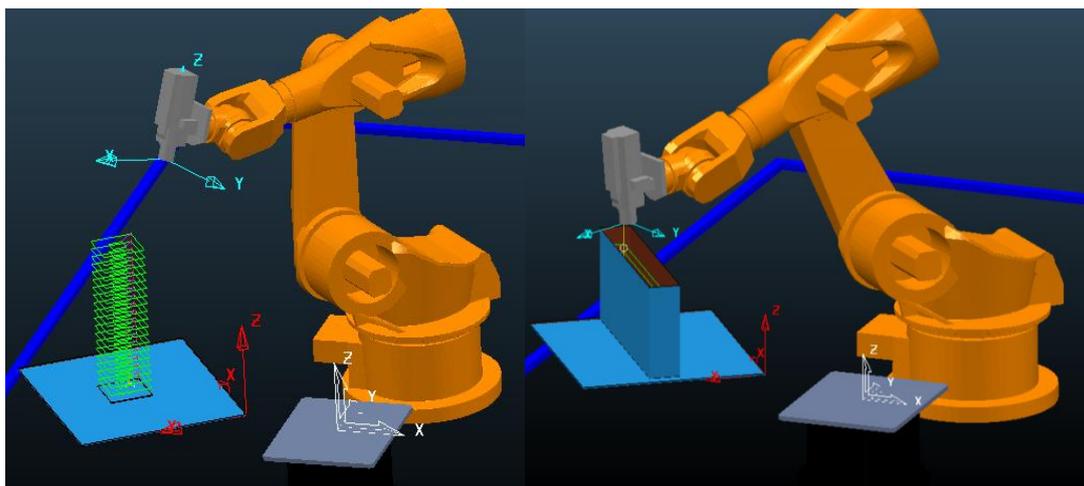
Figura 5: Definición de capas y trayectorias para fabricación 3D de la viga



2.3.2 Implementación en proceso mediante robot

Definidas y desarrolladas tanto las capas como las trayectorias de fabricación a seguir en el proceso, se procederá a su implementación en la celda robotizada Kuka, gobernada por un software específico, sobre el que previamente y de forma física, habrán sido instalados los sistemas auxiliares de alimentación de material, así como el cabezal con el que se realizará el proceso de impresión 3D, obteniendo así los elementos demostradores planteados.

Figura 6: Simulación del proceso de fabricación con celda robotizada Kuka



En este marco, se introducirán los archivos generados en el proceso previo de “sliced” y “paths definition” en el software específico integrado en la celda robotizada Kuka para realizar así una simulación virtual del procedimiento de fabricación (**Figura 6**) que con ésta se llevará a cabo. Dicha simulación será de gran utilidad, pues permitirá comprobar si existen desviaciones o errores a corregir tanto en las trayectorias definidas como en los movimientos que el sistema robótico realizará para su consecución, antes de llevar a cabo el proceso de impresión 3D real, así como para obtener una primera aproximación a los demostradores a imprimir físicamente.

2.3.3 Estudio de velocidades óptimas de fabricación y caudales de material

Previamente a la ejecución del proceso de fabricación mediante tecnologías de impresión 3D, se realizó un análisis de las posibles velocidades de fabricación que el sistema robótico es capaz de adoptar. Se trata de determinar cuáles son las óptimas para el proceso y las características de éste, así como el caudal óptimo y posible, dentro de las limitaciones propias del equipo, de material a bombear para la consecución del proceso de fabricación mediante impresión 3D.

Así, tanto la elección de las velocidades óptimas como de los caudales de bombeo, se realizó considerando factores limitantes:

- Del material, destacando entre ellos la retracción de este, la consistencia e integridad de capa, y la continuidad y falta de imperfecciones en la misma.
- Del equipo de impresión, destacando la capacidad de la bomba y el rango de caudales (máximo y mínimo) que es capaz de proporcionar.

Mediante la experimentación con pruebas de campo y posterior comprobación del comportamiento del material frente a diferentes valores de velocidad y caudal, se extrajeron como valores de trabajo óptimos los que a continuación se presentan:

Tabla 1: Velocidad y caudal

	Mínimo asumible	Máximo asumible	Óptimo
Velocidad (m/min)	3.50	4.50	4.00
	Mínimo asumible	Máximo asumible	Valores de intervalo
Caudal (L/min)	10	16	1

2.3.4 Selección de la sección tipo de fabricación

Relacionado con la selección de velocidades y caudales de fabricación, se llevó a cabo la selección de las secciones óptimas de capa con las que se llevará el cabo el proceso de fabricación. Para ello, y mediante experimentación, se analizaron las diferentes secciones que es posible fabricar con el sistema robótico y la calidad que adquiere la capa impresa en cada caso, en términos de continuidad de material, integridad y consistencia, de la misma.

En este sentido, se consideraron inicialmente secciones con “ancho de capa” variando entre 40 y 80 milímetros y “alto de capa” entre 40 y 70 milímetros. En este sentido indicar que un criterio fundamental debe ser que la dimensión referente al “ancho de capa”, debe ser en todo caso igual o mayor al “alto” de la misma. Este criterio fue establecido tras la observación de que la esbeltez de capa no era compatible con la integridad y sostenimiento de esta. En la Tabla 2 se muestra como ejemplo los valores de velocidad obtenidos para un “alto de capa” de 40 milímetro para los diferentes valores posibles de “ancho de capa”.

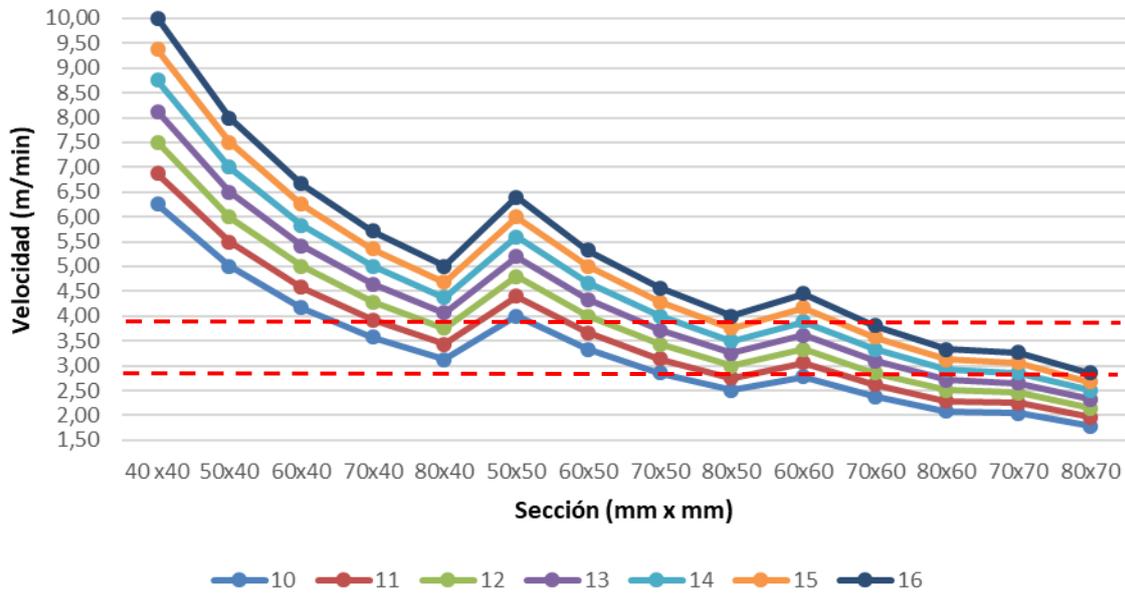
Tabla 2: Valores de velocidad obtenidos para diferentes secciones de alto 40 mm

Q (L/min)	Ancho (mm)				
	40	50	60	70	80
10	6,25	5,00	4,17	3,57	3,13
11	6,88	5,50	4,58	3,93	3,44
12	7,50	6,00	5,00	4,29	3,75
13	8,13	6,50	5,42	4,64	4,06
14	8,75	7,00	5,83	5,00	4,38
15	9,38	7,50	6,25	5,36	4,69
16	10,00	8,00	6,67	5,71	5,00

Teniendo en cuenta los valores predeterminados y limitantes referentes a velocidades y caudales óptimos para el proceso, anteriormente indicados, ha sido posible obtener los siguientes tipos de sección con los que será posible llevar a cabo el proceso de impresión 3D.

donde han sido descartados los valores superiores e inferiores a los establecidos como máximo y mínimo respectivamente para velocidad de fabricación

Figura 7: Comparación de las diferentes secciones limitadas por la velocidad de fabricación



Como consecuencia en la Tabla 3 se muestran los valores de velocidad óptimos para cada sección y caudal de impresión.

Tabla 3: Valores de velocidad para cada sección y caudal

Caudal	Sección								
	60x40	70x40	80x40	50x50	60x50	70x50	80x50	60x60	70x60
Q 10	4,17	3,57		4,00					
Q 11		3,93		4,40	3,67				
Q 12		4,29	3,75		4,00				
Q 13			4,06		4,33	3,71		3,61	
Q 14			4,38			4,00	3,50	3,89	
Q 15						4,29	3,75	4,17	3,57
Q 16							4,00	4,44	3,81

2.3.5 Proceso de fabricación por impresión 3D

Una vez obtenidos los valores de trabajo del proceso de impresión se procedió a la fabricación real de los elementos demostrativos anteriormente definidos, y de los cuales, se extraerán datos para su posterior estudio y comparación.

Se ha fabricado una estructura con forma de pilar de base cuadrada de 400mm de lado, y una altura de 900mm. El proceso de fabricación se ha llevado a cabo mediante la impresión de 16 capas de material de un espesor aproximado de 55mm.

Figura 8: Impresión 3D del pilar en hormigón



Cabe destacar que el método de impresión comenzó realizando la parte interna o núcleo del pilar, para luego realizar la impresión de su periferia hasta completar las dimensiones de este.

Se ha fabricado una estructura con forma de viga de base rectangular, con unas dimensiones aproximadas de 400mm de alto, 200mm de ancho y 1300mm de longitud. El proceso de fabricación se ha llevado a cabo mediante la impresión de 7 capas de 55mm de espesor aproximado.

Figura 9: Impresión 3D de la viga en hormigón



Durante el proceso de impresión de las estructuras, se tuvieron que realizar paradas en la deposición del material para el fraguado del previamente ya impreso que garantizara la correcta sustentación de las siguientes capas una vez impresas.

3 Resultados

Los tiempos de fabricación del proceso de impresión 3D están muy distantes a los obtenidos por métodos de fabricación convencionales. Concretamente, se han obtenido tiempos finales de fabricación de 13 y 14 minutos (pilar y viga respectivamente) mediante impresión 3D, en comparación con los tiempos de 120 y 129 minutos (2 y 2,15 horas) en el caso de realizar fabricación tradicional mediante el uso de encofrado.

La siguiente tabla recoge un análisis comparativo entre las tecnologías convencionales y la fabricación aditiva en el sector de la construcción. Se analizan las necesidades de cada uno de los métodos en cuanto a personal, tiempo, materiales y equipos, así como otras características adicionales a los mismos:

Tabla 4: Comparativa de distintos aspectos de los dos sistemas de fabricación

	CONVENCIONAL	ADITIVA
Personal	Diseño estructura y encofrado Transporte de los elementos del encofrado Altamente cualificado para el montaje y desmontaje Aplicación manual mortero/hormigón	Diseño estructura Manejo equipo de fabricación aditiva
Tiempo	Diseño pieza Diseño del encofrado Aplicación manual mortero/hormigón Montaje y desmontaje (encofrado)	Diseño de pieza Aplicación automática de mortero/hormigón
Materiales construcción	Mortero/hormigón	Mortero/hormigón
Equipos y herramientas	Madera (encofrado) Metal (encofrado) Tornillería (encofrado) Herramienta (encofrado)	Equipo de fabricación aditiva
Otros	Un encofrado a medida por pieza Para dos piezas iguales es necesario montar dos encofrados	No requiere de encofrado No todos los elementos se pueden fabricar con esta tecnología

4 Conclusiones

El nuevo sistema planteado supone un salto tecnológico considerable y necesario con respecto a las metodologías constructivas actuales. La implementación de las tecnologías de fabricación aditiva en la construcción de piezas de mortero y hormigón lleva asociadas una serie de ventajas a destacar:

- Fabricación de una pieza directamente desde un plano en formato digital, es decir, los datos geométricos de la pieza se transmiten desde un archivo digital al robot de impresión.
- La fabricación aditiva permite construir piezas sin necesidad de encofrados (moldes). Esto reduce los tiempos de fabricación al eliminar los intervalos de montaje y desmontaje, así como los riesgos asociados a estas actividades.
- Se trata de un sistema de fabricación versátil ya que es posible fabricar diversos tipos de estructuras sin necesidad de realizar cambios físicos en estructuras auxiliares o encofrados.
- Una parte importante del proceso productivo pasará a estar automatizado lo que, de cara al futuro, se transmitirá en importantes mejoras productivas y de calidad.

Así pues, a modo de resumen, cabe destacar que la implementación de un sistema de fabricación aditiva como el planteado en el sector de la construcción rompería con todo lo establecido hasta la fecha en este campo, suponiendo un salto innovador en los procesos productivos del sector al eliminar los sistemas de encofrado tradicionales en la fabricación de determinadas estructuras.

5 Referencias

- Agustí-Juan, Isolda, Florian Müller, Norman Hack, Timothy Wangler, y Guillaume Habert. 2017. «Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall». *Journal of Cleaner Production* 154 (junio): 330-40. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.002>.
- Bamgbade, J. A., A. M. Kamaruddeen, y M. N. M. Nawi. 2017. «Towards environmental sustainability adoption in construction firms: An empirical analysis of market orientation and organizational innovativeness impacts». *Sustainable Cities and Society* 32 (julio): 486-95. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.015>.
- Bock, Thomas. 2015. «The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics». *Automation in Construction* 59 (noviembre): 113-21. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.022>.
- Bos, Freek, Rob Wolfs, Zeeshan Ahmed, y Theo Salet. 2016. «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing». *Virtual and Physical Prototyping* 11 (3): 209-25. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
- Duballet, R., O. Baverel, y J. Dirrenberger. 2017. «Classification of building systems for concrete 3D printing». *Automation in Construction* 83 (noviembre): 247-58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.018>.
- Gebler, Malte, Anton J. M. Schoot Uiterkamp, y Cindy Visser. 2014. «A global sustainability perspective on 3D printing technologies». *Energy Policy* 74 (noviembre): 158-67. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>.
- Häfliger, Ian-Frederic, Viola John, Alexander Passer, Sebastien Lasvaux, Endrit Hoxha, Marcella Ruschi Mendes Saade, y Guillaume Habert. 2017. «Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials». *Journal of Cleaner Production* 156 (julio): 805-16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.052>.
- Hwang, Dooil, Behrokh Khoshnevis, Dooil Hwang, y Behrokh Khoshnevis. 2005. «An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)». *ISARC Proceedings 2005 Proceedings of the 22nd ISARC, Ferrara, Italy*: 0-0.
- Kazemian, Ali, Xiao Yuan, Evan Cochran, y Behrokh Khoshnevis. 2017. «Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture». *Construction and Building Materials* 145 (agosto): 639-47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>.
- Khalil, Noura, Georges Aouad, Khadija El Cheikh, y Sébastien Rémond. 2017. «Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars». *Construction and Building Materials* 157 (diciembre): 382-91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>.
- Lim, S., R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, y T. Thorpe. 2012. «Developments in construction-scale additive manufacturing processes». *Automation in Construction* 21 (enero): 262-68. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- Liu, R., Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, y J. Newkirk. 2017. «13 - Aerospace applications of laser additive manufacturing». En *Laser Additive Manufacturing*, editado por Milan Brandt, 351-71. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.

- Malik, Hammad H., Alastair R. J. Darwood, Shalin Shaunak, Priyantha Kulatilake, Abdulrahman A. El-Hilly, Omar Mulki, y Aroon Baskaradas. 2015. «Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications». *Journal of Surgical Research* 199 (2): 512-22. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.06.051>.
- Pegna, Joseph. 1997. «Exploratory investigation of solid freeform construction». *Automation in Construction* 5 (5): 427-37. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5).
- Snyman, Tamlyn, y John Smallwood. 2017. «Improving Productivity in the Business of Construction». *Procedia Engineering*, 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management, 182 (enero): 651-57. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.175>.
- Weller, Christian, Robin Kleer, y Frank T. Piller. 2015. «Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited». *International Journal of Production Economics* 164 (junio): 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>.
- Yoo, In Seong, Thomas Braun, Christopher Kaestle, Michael Spahr, Joerg Franke, Philipp Kestel, Sandro Wartzack, Joerg Bromberger, y Erhard Feige. 2016. «Model Factory for Additive Manufacturing of Mechatronic Products: Interconnecting World-class Technology Partnerships with Leading AM Players». *Procedia CIRP*, 6th CIRP Conference on Learning Factories, 54 (enero): 210-14. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.113>.
- Zutshi, Ambika, y Andrew Creed. 2015. «An international review of environmental initiatives in the construction sector». *Journal of Cleaner Production*, Special Volume: Support your future today! Turn environmental challenges into opportunities., 98 (julio): 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.077>.